ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

ТИХОМИРОВ Георгий Валентинович

**КОМПЛЕКСНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ**

**СИСТЕМНОГО ПОДХОДА**

***Специальность 05.13.18***

***«Математическое моделирование, численные методы и***

***комплексы программ»***

Диссертация на соискание ученой степени доктора  
физико-математических наук

Научный консультант: Зав.кафедрой Прикладной математики №31, д.ф.-м.н., профессор, НИЯУ МИФИ Кудряшов Николай Алексеевич

Москва - 2013

ВВЕДЕНИЕ 5

Глава 1. Нейтронно-физические расчеты с позиции системного подхода 17

1. От общей теории систем к целостному методу 17
2. Проблема сохранения ядерных знаний 22
3. Т енденции в области НФР 29
4. Термины и определения 29
5. Подходы к моделированию нейтронно-физических 30 процессов
6. Этапы развития нейтронно-физических расчетов 55
7. Виды деятельности в области НФР 74
8. Задачи нейтронно-физического расчета 86
9. Система объекта с нейтронным источником 86
10. Классификация задач НФР 86
11. Тестовые задачи НФР 88
12. Особенности комплексных задач НФР 96

Глава 2. Вероятностный метод дискретных ординат и его программная 101 реализация

1. Вероятностный метод дискретных ординат (ВМДО) 103
2. ВМДО для задач с локализованными источниками нейтронов 108
3. Особенности задач с локализованными источниками 108 нейтронов
4. Источник первых столкновений 109
5. Алгоритм учета анизотропии рассеяния 112
6. Алгоритм анализа влияния области системы на 117 формирование нейтронного поля в ней
7. Комплекс программ GERA 119
8. Описание комплекса программ GERA 119
9. Результаты верификации и использования комплекса 122 программ GERA

Глава 3. Комплексы программ НФР 149

1. Примеры комплексных задач моделирования нейтронно- 149 физических процессов
2. Общие подходы к проектированию комплексов программ 153
3. [Комплекс программ MCCOOR 156](#bookmark37)
4. Общая схема комплекса программ MCCOOR 160
5. Алгоритм выбора областей выгорания в комбинированной 169

ТВС

1. Результаты верификации комплекса программ MCCOOR 172
   1. Комплекс программ SC-MC 180
      1. Общая схема комплекса программ SC-MC 180
      2. Результаты верификации комплекса программ SC-MC 184

Глава 4. Результаты моделирования систем с нейтронными 191 источниками

1. Экспериментальные установки НИЯУ МИФИ 194
2. Подкритические стенды кафедры «Теоретической и 196 экспериментальной физики ядерных реакторов» НИЯУ МИФИ
3. [Колодезный счетчик нейтронных совпадений 203](#bookmark40)

4.1.3 Нейтронные фильтры в ГЭК-10 ИРТ МИФИ для 209

коллаборации РЭД

1. Счетчик нейтронов в детекторе ПАМЕЛА 214
   1. Датчик прямой зарядки в ВВЭР 218

4.3 Результаты анализа различных топливных циклов 239

1. [Примеры топливных циклов с глубоким выгоранием 242](#bookmark51)
2. Методика сравнительного анализа топливных циклов с 245 точки зрения возможности топливного цикла с самовоспроизводством делящихся ядер
3. Обоснование возможности осуществления ториевого 248

топливного цикла с самовоспроизводством делящихся ядер в тяжеловодном реакторе

1. Анализ условий трансмутации минорных актиноидов 254
2. Радиальное распределение выгорания в топливной таблетке 264

Глава 5. Нейтронно-физические расчеты и учебный процесс 273

* 1. Информационно-справочная система «Онтологии НФР» 274
  2. Система поддержки лабораторных работ на уникальном 280 экспериментальном оборудовании в области ЯЭУ
  3. Магистерская программа «Математическое моделирование 300 нейтронно-физических процессов»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 305

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 310

ПРИЛОЖЕНИЕ 331

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые заключаются в том, что автором предложены, реализованы и внедрены для практического использования методы, методики, алгоритмы и программные комплексы:

1. Вероятностный метод дискретных ординат (метод объемных и поверхностных балансов) метод решения уравнения переноса нейтронов с учетом анизотропии рассеяния и возможности расчета потоков нейтронов в пустых областях. В рамках этого метода были разработаны и реализованы алгоритмы, которые могут использоваться в других детерминистических методах:

алгоритм расчета групповых дважды-дифференциальных сечений анизотропного рассеяния на основе моментов сечений межгрупповых переводов;

алгоритм анализа влияния различных областей системы на формирования распределений нейтронов в задачах с локализованными источниками;

алгоритмы для прецизионного расчета источника первых столкновений, согласованные с алгоритмами ВМДО.

Предложены различные численные схемы ВМДО, которые изучены на тестовых задачах в одномерной плоскопараллельной геометрии. Проведена оценка порядков пространственной аппроксимации численных схем.

1. Разработана на основе алгоритмов ВМДО и верифицирована программа GERA, предназначенная для поддержки экспериментов на моделях защиты и бланкетов ТЯР, облучаемых локализованным источником «термоядерных» нейтронов.

Следует отметить, что в процессе разработки программы GERA было проведено тестирование алгоритмов ВМДО и обоснована возможность их использования для решения задач глубокого проникновения излучения с учетом анизотропии рассеяния нейтронов. В процессе решения тестовой задачи на определение асимптотического параметра в однородном параллелепипеде были оценены методическая погрешность результатов расчетов при использовании различных параметров численных схем ВМДО в трехмерной геометрии и методическая погрешность, связанная с алгоритмами описания индикатрисы рассеяния. Показано, что в задачах глубокого проникновения излучения особое внимание необходимо уделять корректному описанию индикатрисы рассеяния.

Также в диссертации приведены результаты валидации программы GERA на основе ее использования при поддержке экспериментов на моделях бланкетов ТЯР, которые проводились на кафедре «Теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов», и результаты использования программы GERA при анализе переноса излучения через системы с щелями. На данном этапе использовался разработанный алгоритм анализа влияния различных областей системы на формирования распределений нейтронов в задачах с локализованными источниками.

1. Разработан комплекс программ MOCOOR для моделирования изменения изотопного состава в ТВС ядерных реакторов. В рамках разработки был предложен и реализован алгоритм выбора областей выгорания в комбинированной ТВС реактора.
2. На основе результатов нейтронно-физических расчетов характеристик инновационных топливных циклов с глубоким выгоранием топлива, которые проводились с помощью комплекса MOCOOR, предложена методика анализа потенциала ядерных реакторов с точки зрения реализации топливных циклов с воспроизводством делящихся ядер.
3. Разработан комплекс программ SC-MC для моделирования радиационной обстановки вокруг контейнера с отработавшими ТВС. На основе анализа результатов расчетов различных моделей транспортных упаковочных комплектов с отработавшими ТВС проведены оценки вклада различных источников в формирование радиационной обстановки.
4. На основе системного подхода предложена классификация задач нейтронно-физического расчета, в рамках которой различные «базовые» задачи можно объединять в комплексные задачи нейтронно-физического расчета. В зависимости от исходной информации о рассматриваемой системе задачи НФР могут быть отнесены либо к классу хорошо структурированных проблем, либо к классу слабо структурированных проблем. Предложены общие подходы к трансформации конкретных слабо структурированных проблем в структурированные проблемы для разработки тестовых задач для верификации методов, алгоритмов и программ НФР.
5. Приведены результаты решения различных задач нейтронно - физического расчета с использованием различных программ и программных комплексов. Для каждой расчетной системы, рассмотренной в диссертации, схематично представлены: тип задачи НФР; используемые ПС; алгоритмы и методики, используемые при анализе результатов; основные результаты. Рассмотренные системы можно объединить в несколько блоков (разделов), каждый из которых имеет общую специфику в постановках задач: модели экспериментальных установок НИЯУ МИФИ; модель датчик прямой зарядки ВВЭР; модели элементов активных зон ядерных реакторов с различными топливными циклами; модели установок для трансмутации минорных актиноидов; модель топливного сердечника ВВЭР. Все результаты расчетов представленные в диссертации иллюстрируют эффективность использования единой методики использования программ и программных комплексов НФР:

* Анализ объекта с нейтронным источником, формулировка системы объекта и постановка задачи на НФР (определение типа задачи);
* Выбор программы или программного комплекса для решения поставленной задачи (возможна постановка задачи на разработку программных средств);
* Верификация программы и выбор параметров расчетной модели на тестовых задачах данного типа;
* Использование программы для решения задачи, поставленной на втором этапе. В процессе решения задачи возможно использование ряда специализированных алгоритмов, которые могут повысить эффективность использования программ.

• Анализ результатов расчетов, включая оценку диапазона неопределенности полученных результатов и анализа вклада различных составляющих (методической, алгоритмической, константной,

комплексной и др.) в общую неопределенность.

1. Разработана и внедрена в учебный процесс Национального исследовательского ядерного университета (МИФИ) информационно­справочная система «Онтология НФР», в которой реализованы механизмы систематизации и сохранения знаний по вопросам нейтронно-физического расчета.
2. Предложена концепция разработки виртуальных лабораторных работ

(ВЛР) на уникальном экспериментальном оборудовании с нейтронными источниками, на основе которой разработан комплекс ВЛР,

иллюстрирующих физические процессы в экспериментальных установках кафедры «Теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов» НИЯУ МИФИ.

Таким образом, в диссертационной работе на основании выполненных автором расчетно-теоретических исследований в области математического моделирования нейтронно-физических процессов в различных системах разработаны эффективные алгоритмы Вероятностного Метода Дискретных Ординат для решения уравнения переноса нейтронов и гамма-квантов, проведена их программная реализация, верификация и применение для решения нейтронно-физических задач в области расчетной поддержки экспериментов с использованием локализованных источников нейтронов. Разработана методология эффективного использования программ нейтронно­физического расчета для решения комплексных задач. Совокупность выполненных работ представляет собой решение крупной научной проблемы по повышению точности, надежности и оперативности предсказания нейтронно-физических характеристик экспериментальных установок с внешними источниками нейтронов. Разработанные методики и программные средства повышают эффективность расчетного сопровождения ядерных технологий России и способствуют росту ее экспортного потенциала.