

Бикеев Артем Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ВОДО-ВОДЯНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
РЕАКТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ С ПРЕЦИЗИОННЫМ МОДУЛЕМ
НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОГО РАСЧЕТА**

По специальностям:

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ,

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении
«Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Научный кандидат физико-математических наук
руководитель: **Шкаровский Денис Александрович**

Научный доктор физико-математических наук, доцент
консультант: **Рыжков Сергей Витальевич**

Официальные **Мосунова Настасья Александровна**, доктор технических
оппоненты: наук, федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт проблем безопасного развития атомной
энергетики Российской академии наук, заведующая
отделением разработки программного обеспечения для
анализа безопасности АЭС

Тихомиров Георгий Валентинович, доктор физико-
математических наук, профессор, федеральное
государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», заместитель директора
Института ядерной физики и технологий

Ведущая Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени
организация: и ордена Труда ЧССР опытное конструкторское бюро
«ГИДРОПРЕСС»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2020 г. в __ ч. __ мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.141.15 при Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте
www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Аттетков
Александр
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР) является наиболее распространенным типом энергетических реакторов в России. В настоящее время в эксплуатации находятся ВВЭР следующих конструкций: ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, где числовой показатель характеризует электрическую мощность реакторной установки. В диссертационной работе рассматривались ВВЭР большой мощности – ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Для повышения технико-экономических показателей эксплуатируемых и проектируемых ВВЭР активно разрабатываются новые топливные циклы с увеличенными значениями тепловой мощности и длительности работы реактора между перегрузками, с расширением сырьевой базы за счет использования урана и плутония, извлеченных из отработавшего ядерного топлива, а также с использованием новых конструкционных материалов в тепловыделяющих сборках (ТВС).

Новые топливные циклы ВВЭР разрабатываются с использованием проектных кодов, реализующих в рамках детерминистического подхода различные приближения при решении уравнения переноса нейтронов. Проектные коды имеют жесткие ограничения на область применения и допустимые значения параметров расчета. Для разработки перспективных топливных циклов, для которых наблюдается превышение указанных в аттестационном паспорте проектного кода допустимых значений параметров расчета, таких как обогащение топлива, содержание Gd_2O_3 , Er_2O_3 , ^{236}U в топливе, глубина выгорания топлива и другие, необходимо предварительно проводить верификацию проектного кода. Ввиду отсутствия опыта эксплуатации перспективных топливных циклов и сокращения программ проведения измерений нейтронно-физических характеристик (НФХ) на стендовых установках, сопоставление с результатами расчетов по реализующим метод

Монте-Карло программам в настоящее время является основным способом верификации проектных кодов.

Для проведения верификации проектных кодов для ВВЭР используется аттестованная программа MCU-PD – универсальная модульная программа для численного решения уравнения переноса различного вида излучений в трехмерных системах с легкопроводным замедлителем методами Монте-Карло.

Одним из основных ограничений применения программы MCU-PD для верификации проектных кодов является невозможность проведения расчета НФХ ВВЭР с учетом обратных связей, то есть с учетом зависимости нейтронных сечений от самого решения через температуру топлива, температуру и плотность теплоносителя, концентрацию ^{135}Xe .

Развитие программы MCU-PD с реализацией практической возможности расчета НФХ ВВЭР с учетом обратных связей на доступных в НИЦ «Курчатовский институт» многопроцессорных вычислительных кластерах позволит расширить область применения программы для уточнения, тонкой настройки и верификации проектных кодов, а также создаст основу для использования программы при проектном обосновании безопасности эксплуатации энергоблоков, работающих с использованием перспективных топливных циклов. Достигаемая благодаря использованию метода Монте-Карло высокая точность в оценках НФХ ВВЭР может быть использована для уменьшения излишнего консерватизма расчетов.

Цель работы – разработка математических моделей и программного обеспечения для решения стационарного уравнения переноса нейтронов в активной зоне ВВЭР большой мощности методом Монте-Карло с учетом обратных связей.

Для достижения поставленной цели решены **следующие основные задачи**:

1. С использованием модулей программы MCU-PD разработан программный комплекс для решения методом Монте-Карло стационарного

уравнения переноса нейтронов в активной зоне ВВЭР с итерационным учетом обратных связей.

2. Проведены исследования влияния на НФХ ВВЭР различных параметров расчета. Выбраны оптимальные с точки зрения длительности расчета и вносимой методической погрешности параметры расчета.

3. С учетом проведенных исследований разработана математическая модель активной зоны ВВЭР и ее ближайшего окружения.

4. Проведена верификация разработанного программного комплекса и математической модели ВВЭР.

Методы исследования. При решении задач, возникших в ходе выполнения диссертационной работы, использовались различные классы математических методов: методы Монте-Карло для прямого моделирования переноса нейтронов, численные методы решения уравнений переноса тепла, сохранения массы и динамики сплошной среды, нуклидной кинетики, а также теории ошибок, вычислительной математики и параллельных вычислений.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана математическая модель ВВЭР, позволяющая проводить за приемлемое время расчеты методом Монте-Карло нейтронно-физических характеристик ВВЭР с учетом обратных связей с допустимой для решения практических задач точностью.

2. Предложена и реализована модификация численного метода Хоогенбума итерационного решения системы уравнений, описывающих стационарное состояние активной зоны реактора с учетом обратных связей.

3. Разработан программный комплекс для решения методом Монте-Карло однородного стационарного уравнения переноса нейтронов в активной зоне ВВЭР с итерационным учетом обратных связей.

Практическая значимость. Разработанные в диссертационной работе программный комплекс совместно с математической моделью ВВЭР

использовались для верификации программ комплекса КАСКАД для расчета топливных загрузок с уран-эрбиевым топливом и с топливом из регенерированного урана. Комплекс программ КАСКАД используется для решения основных задач ядерного проектирования активной зоны ВВЭР. Кроме того, программный комплекс и математическая модель ВВЭР использовались для независимой проверки проектных расчетов первых топливных загрузок 3-го энергоблока Ростовской АЭС, 6-го энергоблока Нововоронежской АЭС, 5-го энергоблока АЭС «Пакш» (Венгрия) и 3-го энергоблока АЭС «Тяньвань» (Китай).

Благодаря детальному описанию в математической модели ВВЭР материального состава и геометрии активной зоны и ее ближайшего окружения, разработанные модели используются для высокоточного решения смежных задач: анализ активации концевых элементов ТВС, расчет флюенса нейтронов, накопленного на внутренней поверхности и в толще корпуса реактора, расчет активации сборок образцов свидетелей и закорпусных детекторов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель, предназначенная для нейтронно-физического расчета активной зоны ВВЭР с использованием разработанного программного комплекса.

2. Модификация численного метода итерационного решения системы уравнений, описывающих стационарное состояние активной зоны ВВЭР с учетом обратных связей. Модификация включает введение дополнительного условия для контроля сходимости итерационного процесса относительно оценки характеристик энерговыделения, введение зависимости параметров релаксации и числа моделируемых историй нейтронов от номера итерации, определение их оптимальных значений, а также использование в качестве начального приближения распределений, полученных из расчета рассматриваемого состояния реактора в комплексе КАСКАД.

3. Программный комплекс для решения методом Монте-Карло однородного стационарного уравнения переноса нейтронов в активной зоне ВВЭР с итерационным учетом обратных связей.

Достоверность и обоснованность научных положений, результатов и выводов основана на применении корректных математических моделей, сравнении результатов моделирования с экспериментальными данными, а также с результатами, полученными по аттестованным программным комплексам.

Апробация работы. Основные положения, сформулированные в диссертационной работе, были доложены на: XXII, XXIII, XXIV и XXIX межведомственных семинарах «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (Обнинск, 2011, 2012, 2013, 2018), 21-м, 22-м, 24-м, 26-м и 27-м симпозиумах международной ассоциации АЕР по физике и безопасности реакторов ВВЭР (Дрезден, Германия, 2011; Пругонице, Чехия, 2012; Сочи, 2014; Хельсинки, Финляндия, 2016; Мюнхен, Германия, 2017), I, III, IV и V международных конференциях клуба пользователей комплекса программ КАСКАД (Москва, 2014, 2016, 2017, 2018), международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики» (Новосибирск, 2014), международной конференции «М&С» по математическому моделированию и расчету ядерных реакторов (Чеджудо, Корея, 2017).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 18 научных работах, в 3 статьях в журналах, входящих в Перечень российских рецензируемых научных изданий, и 7 научных публикациях в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science.

Личный вклад соискателя. Все исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю, заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих результатов и выводов, списка литературы и приложения. Работа представлена на 161 странице, содержит 54 иллюстрации и 20 таблиц. Список литературы включает 83 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проведен обзор литературы по теме исследования, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

В первой главе приведено описание разработанного программного комплекса, предназначенного для решения методом Монте-Карло однородного стационарного уравнения переноса нейтронов в активной зоне ВВЭР с итерационным учетом обратных связей по плотности и температуре теплоносителя, температуре топлива и концентрации ^{135}Xe . Программный комплекс получил название MCU-TPA (Monte Carlo Universal – Thermo-Physical Analysis).

Программный комплекс имеет модульную структуру и состоит из следующих модулей: управляющего, транспортного, составного физического, геометрического, источников, регистрационного, оборудования, выгорания и теплофизического. Все модули, за исключением теплофизического модуля, входят в состав программы MCU-PD и использовались без внесения изменений. Теплофизический модуль разработан соискателем.

В программном комплексе реализована следующая схема расчета. На первом этапе в рассматриваемой системе методом Монте-Карло оцениваются значения математического ожидания и дисперсии плотности потока нейтронов и скорости реакции деления в топливных материалах. Полученные значения передаются в теплофизический модуль в качестве исходных данных для расчета температуры и плотности теплоносителя, температуры топлива и равновесной концентрации ^{135}Xe . Если полученные на этапе теплофизического расчета значения не удовлетворяют заданным критериям завершения итераций, то проводится новый нейтронно-физический расчет с полученными на этапе теплофизического расчета значениями температур и концентраций материалов. Если полученные на этапе теплофизического расчета значения удовлетворяют критериям завершения итераций, то проводится расчет изменения нуклидного состава материалов (расчет выгорания). Затем проводится новый нейтронно-физический расчет

с полученными на этапе расчета выгорания составами материалов. Расчет продолжается до достижения заданного значения времени работы системы.

Итерации для учета обратных связей по параметрам теплоносителя, температуре топлива и равновесной концентрации ^{135}Xe проводятся одновременно. Используются следующие критерии завершения итераций:

$$\max_{1 \leq i \leq N} \left| \frac{\xi_i^j(k)}{\xi_i^j(k-1)} - 1 \right| \cdot 100\% < \delta \xi^j, \quad j = \overline{1,3}, \quad (1)$$

где i – номер материала, N – количество материалов в системе, ξ^1 – температура теплоносителя, ξ^2 – температура топлива, ξ^3 – концентрация ^{135}Xe , k – номер итерации, $\delta \xi^j$ – задаваемые пользователем значения.

Для ускорения итерационного процесса используется модифицированная схема релаксации параметров Хоогенбума:

$$\xi_i^{j(k+1)} = \alpha_j(k) \xi_i^{j(k)} + (1 - \alpha_j(k)) \xi_i^{j(k-1)}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, 3},$$

где $\alpha_j \in [0, 1]$ – задаваемый пользователем параметр.

Предложенная модификация схемы Хоогенбума заключается во введении зависимости параметров релаксации α_j и числа моделируемых историй нейтронов от номера итерации.

Выбор пользователем параметров итерационной сходимости $\delta \xi^j$ и релаксации α_j является отдельной задачей. Из-за использования стохастического метода решения уравнения переноса нейтронов оптимальные значения $\delta \xi^j$ и α_j невозможно вычислить заранее, они определяются эмпирическим путем. Приведены рекомендуемые значения параметров $\delta \xi^j$ и α_j , а также число моделируемых историй нейтронов в зависимости от номера итерации.

По выбору пользователя может быть использовано дополнительное условие для контроля сходимости итерационного процесса относительно оценки характеристик энерговыделения:

$$\left| \frac{q_i^{(k)}}{q_i^{(k-1)}} - 1 \right| \cdot 100\% \leq \sqrt{\sigma^2(q_i^{(k)}) + \sigma^2(q_i^{(k-1)})}, \quad (2)$$

где k – номер итерации; q_i – скорость реакции деления в i -ом материале; σ – статистическая погрешность расчета (одно стандартное отклонение), %.

Для завершения итерационного процесса необходимо одновременное выполнение всех неравенств типа (1), а также не менее $0,68 \cdot M$ неравенств типа (2), где M – количество топливных материалов в системе. Результаты расчетов показывают, что предложенная итерационная схема является устойчивой, а для получения решения требуется весьма небольшое число итераций.

Для расчета температуры теплоносителя в активной зоне ВВЭР в программном комплексе реализованы две возможности: использование внешней аттестованной программы SC-1 (автор Д.А. Олексюк), либо использование модели изолированного канала.

Для расчета температуры топлива в программном комплексе также реализованы две возможности: использование интегрированной в модуль аттестованной программы TOPRA-s (автор А.С. Щеглов), либо использование модели полиномиальной аппроксимации температуры топлива от плотности мощности и глубины выгорания:

$$T_{\text{топл}}(W, B) = \left(T_{\text{тепл}} + \sum_{i=1}^5 \alpha_i W^i \right) \cdot \sum_{i=0}^3 \beta_i B^i,$$

где $T_{\text{топл}}$ – температура топлива в расчетной ячейке, W – мощность расчетной ячейки, B – глубина выгорания топлива, $T_{\text{тепл}}$ – температура теплоносителя в расчетной ячейке, α_i и β_i – коэффициенты аппроксимации.

Пространственное распределение равновесной концентрации ^{135}Xe определяется по аналитической формуле с учетом зависимости значений выходов ^{135}I и ^{135}Xe от типа делящегося нуклида. Пространственное распределение ^{149}Sm определяется на этапе расчета выгорания.

Во второй главе представлены основные этапы разработки математической модели ВВЭР. Необходимым условием для проведения расчетов по программному комплексу MCU-ТРА является наличие математической модели – файла исходных данных, в котором содержится информация о материальном составе и геометрии рассматриваемой системы, а также указаны параметры расчета.

Разработка математической модели ВВЭР включает три этапа.

На первом этапе проведены следующие исследования:

1. Исследовано влияние степени детализации в описании геометрии отдельных наиболее сложных для моделирования конструктивных элементов ТВС на НФХ ВВЭР. Показано, что использование разработанных моделей с приближенным описанием геометрии головки, хвостовика и дистанционирующей решетки ТВС не оказывает влияния на значения эффективного коэффициента размножения нейтронов и распределение энерговыделения в активной зоне.

2. Оценены методические погрешности расчета НФХ при использовании модели изолированного канала и приближения постоянства температуры топлива и концентрации ^{135}Xe в высотном слое ТВС.

3. Проведены параметрические исследования для поиска оптимальных с точки зрения времени расчета и вносимой методической погрешности параметров: списка малозначащих нуклидов в топливе для модели приближенного расчета сечений, шага расчета и числа радиальных зон в разбиении тепловыделяющих элементов с интегрированным в топливо выгорающим поглотителем.

На втором этапе разработан интерфейс КАСКАД-МСU. В состав интерфейса входят программы КДМК-ВВЭР и СМР-М2К. Программа КДМК-ВВЭР предназначена для автоматизированного создания математической модели ВВЭР на основе информации из библиотеки шаблонов и некоторых параметров, полученных из комплекса КАСКАД. Программа СМР-М2К предназначена для автоматизации проведения сравнительного анализа результатов расчетов, полученных в МСУ-ТРА и входящим в комплекс КАСКАД программам БИПР-7А и ПЕРМАК-А. Общая схема взаимодействия программ представлена на Рис. 1.

В библиотеке шаблонов содержится информация о материальном составе и геометрии активной зоны и ее ближайшего окружения в виде шаблонов ТВС и реакторной установки. Шаблон ТВС – это описание материального состава и геометрии ТВС на входном языке МСУ-ТРА. Шаблон реакторной установки содержит описание на входном языке МСУ-ТРА материального состава и

геометрии ближайшего окружения ТВС: выгородки, опорной плиты, шахты, корпуса реактора, а также некоторых элементов закорпусного пространства.

Полученные при расчете по комплексу КАСКАД распределения параметров теплоносителя, температуры топлива и концентрации ^{135}Xe используются в качестве начального приближения в итерационном процессе учета обратных связей в MCU-TPA.

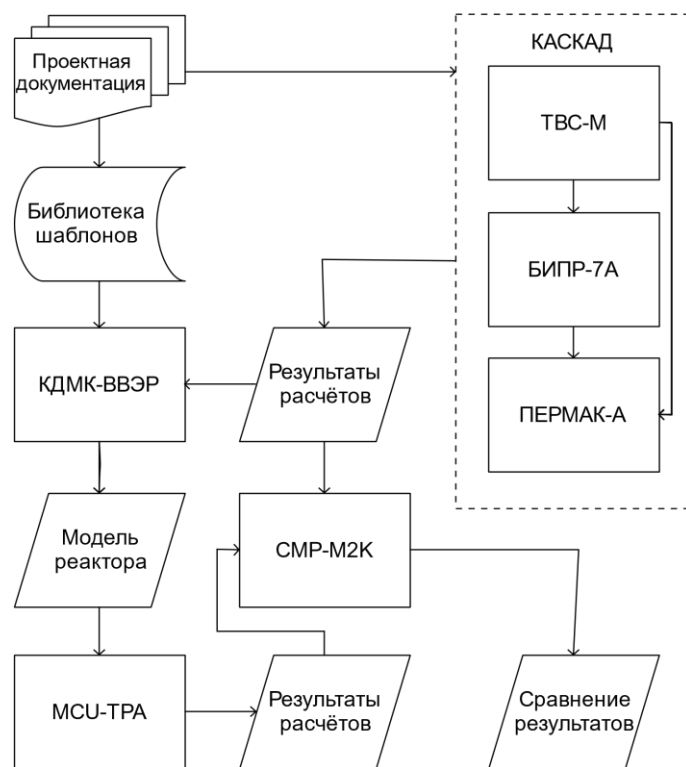


Рис. 1. Общая схема взаимодействия программ

Необходимость использования интерфейса КАСКАД-MCU объясняется невозможностью «вручную» задать математическую модель ВВЭР с разбиением материалов теплоносителя и топлива в активной зоне на заданное количество равновысотных слоев, так как файл исходных данных с описанием такой модели состоит из сотен тысяч текстовых строк. Кроме того, использование интерфейса позволяет значительно упростить процедуру задания исходных данных и постпроцессорную обработку результатов расчетов, что повышает надежность получаемых результатов, поскольку благодаря высокому уровню автоматизации процессов существенно снижается вероятность внесения случайных ошибок. Опыт эксплуатации интерфейса показал, что использование полученных из

КАСКАД распределений характеристик теплоносителя и топлива позволяет примерно в два раза сократить количество итераций и, соответственно, общее время счета в MCU-ТРА. Необходимо отметить, что время расчета одной итерации в MCU-ТРА составляет примерно 4 часа при использовании 1000 вычислительных ядер.

На третьем этапе с учетом проведенных исследований разработаны 42 шаблона ТВС и 3 шаблона реакторной установки.

В среде интерфейса КАСКАД-MCU с использованием данных из комплекса КАСКАД и разработанных шаблонов созданы следующие модели ВВЭР с первой топливной загрузкой: 1-й, 2-й и 3-й энергоблоки Ростовской АЭС, 3-й энергоблок АЭС «Тяньвань», 6-й энергоблок Нововоронежской АЭС, 5-й энергоблок АЭС «Пакш» и 1-й энергоблок АЭС «Ханхикиви». Разработанные модели использовались для верификации MCU-ТРА, а также для решения ряда практических задач. На Рис. 2 представлены изображения модели реактора 3-го энергоблока Ростовской АЭС с первой топливной загрузкой.

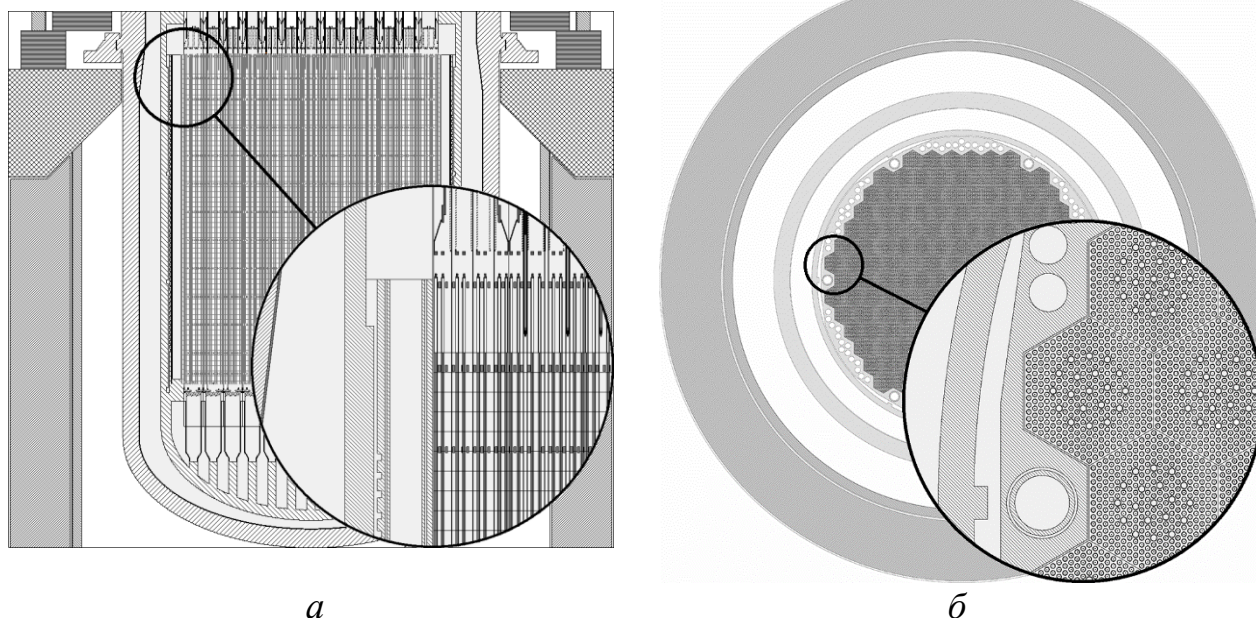


Рис. 2. Изображение математической модели ВВЭР-1000: в вертикальном (а) и горизонтальном (б) сечениях

В третьей главе приведены основные результаты верификации математической модели ВВЭР и программного комплекса MCU-ТРА.

Файл исходных данных MCU-ТРА с описанием разработанной математической модели ВВЭР состоит из сотен тысяч текстовых строк и содержит количество информации, исчисляемое десятками мегабайт. Файл такого размера невозможно проверить «вручную». Одним из возможных способов проверки адекватности описания геометрии, материального состава и заданных параметров расчета в математической модели ВВЭР с точки зрения расчета НФХ является моделирование экспериментов, выполненных на этапе физического пуска и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. С использованием математической модели ВВЭР и программного комплекса MCU-ТРА проведено моделирование экспериментов, выполненных на этапах физического пуска 1-го и 3-го энергоблоков Ростовской АЭС. Рассчитывались следующие НФХ: эффективный коэффициент размножения нейтронов, критическая концентрация борной кислоты в теплоносителе, эффективность отдельных органов регулирования, интегральная и дифференциальная эффективность групп органов регулирования, эффективность аварийной защиты и коэффициенты реактивности. Проведено сопоставление расчетных характеристик с экспериментальными значениями. Показано, что различия в значениях незначительны и не превышают суммы квадратично сложенных экспериментальной и расчетной статистической погрешностей.

Верификация программного комплекса MCU-ТРА проводилась путем сравнения с аттестованными программами. Рассматривались состояния реакторов 1-го и 2-го энергоблоков Ростовской АЭС со свежим топливом на минимально контролируемом и номинальном уровнях мощности. НФХ, полученные на этапах физического и энергетического пусков, а также в процессе эксплуатации первых топливных загрузок 1-го и 2-го энергоблоков Ростовской АЭС, хорошо согласуются с проектными расчетами, выполненными с использованием программ БИПР-7А, ПЕРМАК-А и РАДАР. Поэтому результаты расчетов НФХ по программам БИПР-7А, ПЕРМАК-А и РАДАР для

данных энергоблоков являются хорошими данными для верификации MCU-TPA.

Проведен сравнительный анализ объемных распределений в активной зоне ВВЭР: энерговыделения, температуры и плотности теплоносителя, температуры топлива, равновесной концентрации ^{135}Xe , полученных в расчете с использованием MCU-TPA и указанных выше аттестованных программ. Для рассмотренных характеристик энерговыделения отклонения MCU-TPA от аттестованных программ не превышают паспортные погрешности данных программ. Распределения параметров теплоносителя, температуры топлива и концентрации ^{135}Xe в активной зоне хорошо согласуются друг с другом. Отклонения в расчетах коррелируют с отклонениями в расчете энерговыделения. В качестве примера, для 1-го энергоблока Ростовской АЭС на Рис. 3 представлено высотное распределение энерговыделения, а на Рис. 4 приведено отклонение MCU-TPA от БИПР-7А в расчете мощности ТВС для угла поворотной симметрии 60° .

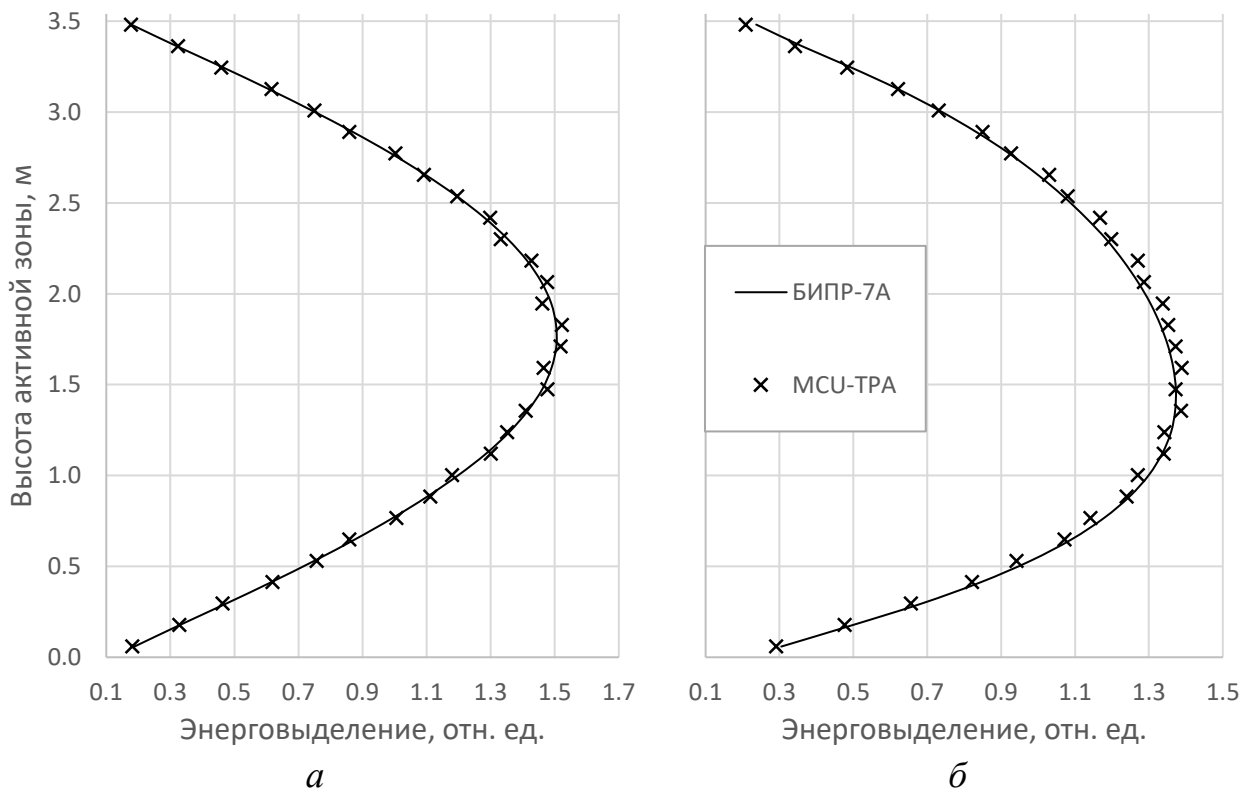


Рис. 3. Высотные распределения энерговыделения для состояния реактора на минимально контролируемом (а) и номинальном (б) уровнях мощности

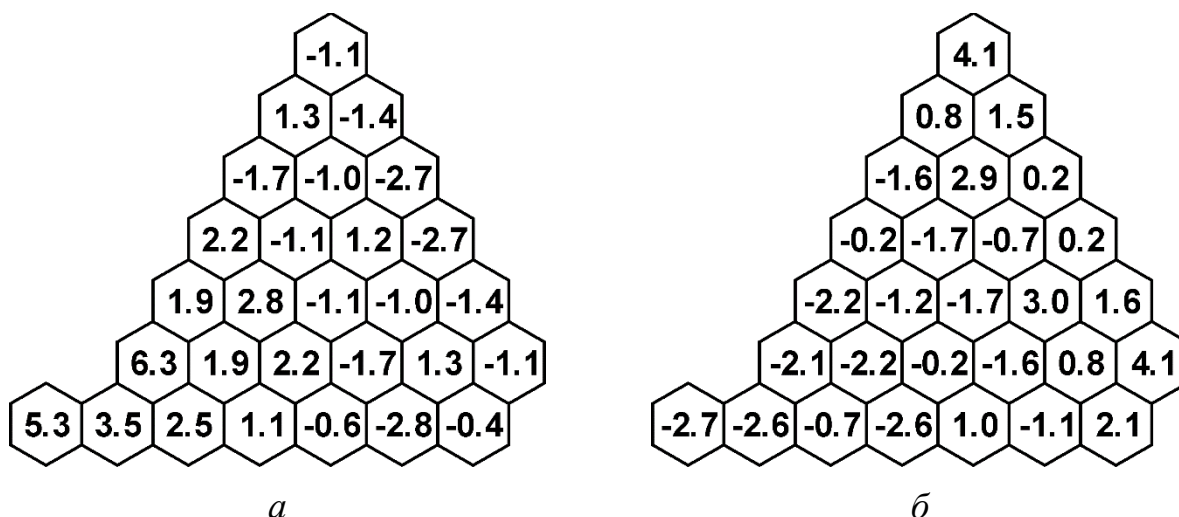


Рис. 4. Картограммы относительных отклонений (в процентах) MCU-TPA от БИПР-7А в расчете мощности ТВС для состояния реактора на минимально контролируемом (а) и номинальном (б) уровнях мощности

В четвертой главе приведено краткое описание применения программного комплекса MCU-TPA и математической модели ВВЭР для решения следующих прикладных задач:

1. Верификация программ комплекса КАСКАД для расчета топливных загрузок с уран-эрбиевым топливом и с топливом из регенерированного урана.
2. Верификация точности расчета эффективности аварийной защиты в программе БИПР-7А.
3. Независимая проверка проектных расчетов НФХ первых топливных загрузок 3-го энергоблока Ростовской АЭС, 3-го энергоблока АЭС «Тяньвань», 6-го энергоблока Нововоронежской АЭС и 5-го энергоблока АЭС «Пакш».
4. Исследование влияния эксцентричного расположения инструментального канала в ТВС на распределение энерговыделения в активной зоне.
5. Исследование влияния содержания нуклидов ^{234}U и ^{236}U в топливе на критическую концентрацию борной кислоты в теплоносителе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработан программный комплекс для численного решения методом Монте-Карло однородного стационарного уравнения переноса нейтронов в

активной зоне ВВЭР большой мощности с учетом зависимости нейтронных сечений от самого решения через температуру топлива, температуру и плотность теплоносителя, концентрацию ^{135}Xe .

2. Проведены исследования влияния на НФХ активной зоны ВВЭР следующих параметров расчета: степени детализации в описании геометрии отдельных наиболее сложных для моделирования конструктивных элементов ТВС и распределения по объему активной зоны параметров теплоносителя, температуры топлива, концентрации ^{135}Xe ; списка малозначащих нуклидов в топливе для модели приближенного расчета сечений; шага расчета; числа радиальных зон в разбиении тепловыделяющих элементов с выгорающим поглотителем. Выбраны оптимальные с точки зрения длительности расчета и вносимой методической погрешности параметры расчета.

3. С учетом проведенных исследований разработана математическая модель, позволяющая проводить нейтронно-физический расчет активной зоны ВВЭР с использованием разработанного программного комплекса за приемлемое время с допустимой для решения практических задач точностью.

4. Проведена верификация разработанного программного комплекса и математической модели ВВЭР.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В РАБОТАХ

1. Бикеев А.С., Калугин М.А., Шкаровский Д.А. Прецизионный расчет по программе MCU энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 на номинальной мощности с учетом обратных связей // Атомная энергия. 2013. Т. 114. № 5. С. 254–255. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.)

2. Bikeev A.S., Marin S.V., Sukhino-Khomenko E.A. A comparison of the FA's models with the detailed and simplified description in the MCU code calculations // Kerntechnik. 2013. V. 78. No. 4. P. 330–338. (1,0 п.л. / 0,7 п.л.)

3. Bikeev A.S., Shkarovsky D.A. Results of precision calculations of three-dimensional power density in VVER-1000 core with feedbacks using MCU code // Kerntechnik. 2013. V. 78. No. 4. P. 343–346. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)

4. Расчет показаний детекторов прямой зарядки по программе MCU в течение кампании по полномасштабной модели реактора типа ВВЭР с учетом обратных связей / А.С. Бикеев [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2014. № 3. С. 82–84. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)

5. Бикеев А.С. Прецизионный расчет по программе MCU некоторых нейтронно-физических характеристик ВВЭР-1000 // Атомная энергия. 2015. Т. 118. № 4. С. 188–191. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.)

6. Calculations of 3D full-scale VVER fuel assembly and core models using MCU and BIPR-7A codes / A.S. Bikeev [et al.] // Kerntechnik. 2015. V. 80. No. 4. P. 326–338. (1,5 п.л. / 0,8 п.л.)

7. Simulation of VVER-1000 startup physics tests using the MCU Monte Carlo code / A.S. Bikeev [et al.] // Annals of Nuclear Energy. 2018. V. 117. P. 60–66. (0,8 п.л. / 0,5 п.л.)

8. Study of neutron-physical characteristics of VVER-1200 considering feedbacks using MCU Monte Carlo code / A.S. Bikeev [et al.] // Kerntechnik. 2018. V. 83. No. 4. P. 299–306. (0,9 п.л. / 0,5 п.л.)

9. Оптимизация параметров расчетной схемы при моделировании выгорания активной зоны ВВЭР-1000 по прецизионной программе MCU / А.С. Бикеев [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер: Ядерно-реакторные константы. 2018. № 4. С. 5–14. (1,1 п.л. / 0,7 п.л.)

10. Использование методики приближенного расчета сечений малозначащих нуклидов при моделировании выгорания активной зоны ВВЭР-1000 по прецизионной программе MCU / А.С. Бикеев [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2018. № 4. С. 23–32. (1,0 п.л. / 0,6 п.л.)