

На правах рукописи



Кузнецов Алексей Николаевич

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА ПОТВЭЛЬНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ДЛЯ
ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР

Специальность 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл,
радиационная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сосновый Бор, 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова».

Научный руководитель:

Артемов Владимир Георгиевич

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
отделения нейтронной физики Научно-исследовательского
технологического института имени А.П. Александрова,
г. Сосновый Бор.

Официальные оппоненты:

Гольцев Александр Олегович

доктор технических наук, профессор Национального
исследовательского университета «МЭИ», главный
научный сотрудник отделения канальных реакторов НИЦ
«Курчатовский институт», г. Москва;

Попыкин Александр Иванович

кандидат физико-математических наук, старший научный
сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела экспертизы
программ для ЭВМ ФБУ «Научно-технический центр по
ядерной и радиационной безопасности», г. Москва.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Всероссийский научно-
исследовательский институт по эксплуатации атомных
электростанций», г. Москва.

Защита диссертации состоится 29 сентября 2026 г., начало в 14:00, на заседании
диссертационного совета 02.1.003.08 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 «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 02.1.003.08,
кандидат физико-математических наук

Д.А. Шкаровский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Снижение излишнего консерватизма в расчетном обосновании проектов реакторных установок (РУ) ВВЭР необходимо для увеличения их номинальной мощности и улучшения других технико-экономических показателей. В настоящее время обосновать снижение консерватизма можно только с помощью расчетов, проводимых в программах, реализующих реалистичное приближение, поэтому создание методологии расчета потвального энерговыделения для таких программ, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы

В настоящее время при расчетном обосновании температурного состояния твэлов в переходных и аварийных режимах используется модель так называемого «горячего канала» которая дает консервативный результат, однако прослеживается тенденция, в том числе у Главного конструктора ВВЭР АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», к переходу к более детальному потвальному расчету. Причиной этого, в частности, является ужесточение требований к формированию кампаний РУ, что может приводить к реализации условий, при которых оценка критериальных параметров безопасности с помощью модели «горячего канала» не будет удовлетворять современным нормам безопасности из-за высокого консерватизма.

Приведенный в диссертации обзор показывает, что в ведущих организациях, занимающихся проектированием ВВЭР, ставится задача создания программ нейтронно физического расчета с трехмерным потвальным описанием энерговыделения в активной зоне, однако включение их в практику обоснования безопасности ограничивают значительные затраты ресурсов ЭВМ при проведении потвальных расчетов, а также человеческих ресурсов при подготовке расчетных моделей и анализе получаемых результатов.

Цель и задачи исследования

Цель работы – разработка методологии расчета потвального энерговыделения и ее программная реализация в рамках комплекса программ (КП) САПФИР_95&RC_ВВЭР¹ и расчетного кода КОРСАР/ГП (далее КП КОРСАР/САПФИР) для обоснования безопасности РУ ВВЭР в стационарных, переходных и аварийных режимах.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методологию выполнения потвальных трехмерных расчетов активной зоны с возможностью проведения как оперативных инженерных, так и поверочных расчетов в стационарных, переходных и аварийных режимах.

¹ В комплекс программ входят программы для ЭВМ: САПФИР_95.1, CRC15, САПФИР_95&RC_ВВЭР.2, САПФИР_95&RC_micro, RCKin

2. Создать технологию автоматизации потвальных расчетов и осуществить ее программную реализацию в виде пакета сервисных программ для подготовки расчетных моделей, а также анализу получаемых результатов для расчетов потвального энерговыделения в стационарных и динамических режимах.

Диссертационное исследование представляет результаты работы по модернизации РК КОРСАР (КОРСАР/3D), выполненных по заказу Главного конструктора ВВЭР – АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Одним из требований к модернизации являлось обеспечение снижения консерватизма при обосновании температурного состояния ТВЭлов в переходных и аварийных режимах за счет дополнения, а в перспективе замены, модели «горячей струи» моделями ТВС, основанным на расчетах потвального энерговыделения в ТВС активной зоны.

Научная новизна

1. Разработана, программно реализована и аттестована для стационарных расчетов комбинированная методика расчета потвального энерговыделения, которая включает в себя расчет выгорания, теплофизических параметров обратной связи в ТВЭлах и ТВЭгах на основе метода суперпозиции (суперпозиция решений уравнений переноса нейтронов в кассете и в трехмерном пространстве активной зоны реактора) и прямое потвальное (pin-by-pin) моделирование активной зоны.
2. Автором предложена и обоснована по результатам верификации методика подготовки сопряженной нейтронно-физической и теплогидравлической модели для динамических расчетов с потвальным расчетом энерговыделения методом суперпозиции и комбинированным методом.
3. Реализована возможность в рамках одного комплекса программ проводить сопряженный нейтронно-физический и теплогидравлический расчет с расчетом потвального энерговыделения помощью двух методов с существенно разной природой погрешности, что позволяет вести оценку снизу методической погрешности в динамических расчетах.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в совершенствовании научно-методического аппарата для расчета потвального энерговыделения в реакторах ВВЭР в обеспечение снижения консерватизма и повышении точности расчетов.

Практическая значимость работы

Работа является развитием методологии определения нейтронно-физических характеристик и расчетного обоснования безопасности реакторов ВВЭР с использованием программ для ЭВМ.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана, аттестована и внедрена для проектных стационарных расчетов программа САПФИР_95&RC_micro, реализующая комбинированный метод расчета потвэльного энерговыделения для уточнения полученных ранее методом суперпозиции результатов расчетов потвэльного энерговыделения.
2. Разработана и реализована в КП КОРСАР/САПФИР методика расчета температурных характеристик твэлов в сопряженных динамических нейтронно-физических и теплогидравлических расчетах для моделирования переходных и аварийных режимов РУ ВВЭР.
3. Разработана и реализована в КП КОРСАР/САПФИР методология выполнения потвэльных трехмерных расчетов активной зоны с возможностью проведения как оперативных инженерных, так и поверочных расчетов в стационарных, переходных и аварийных режимах.
4. Разработана и реализована в виде пакета сервисных программ технология автоматизации потвэльных расчетов.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная, программно реализованная и аттестованная для стационарных расчетов комбинированная методика расчета потвэльного энерговыделения, которая включает в себя расчет выгорания твэлов и твэглов на основе метода суперпозиции (суперпозиция решений уравнений переноса нейтронов в кассете и в трехмерном пространстве активной зоны реактора) и прямое потвэльное (pin-by-pin) моделирование активной зоны.
2. Предложенная и обоснованная автором по результатам верификации методика подготовки нейтронно-физической модели для связанных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов переходных режимов ВВЭР с потвэльным моделированием энерговыделения методом суперпозиции и комбинированным методом.
3. Созданная автором технология автоматизации связанных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов переходных режимов ВВЭР с потвэльным моделированием энерговыделения реализованная в виде пакета сервисных программ для подготовки расчетных моделей и анализа получаемых результатов.

Достоверность представленных в работе результатов подтверждается теоретическим анализом и сравнением полученных результатов расчетов комбинированным методом с прецизионными расчетами методом Монте-Карло, расчетами методом суперпозиции и экспериментальными данными, полученными на критических сборках и на действующих энергоблоках ВВЭР.

Апробация результатов

Результаты работы опубликованы в 18 статьях в рецензируемых журналах, из них 5 статей опубликованы в научных журналах, входящих в действующий перечень научных изданий ВАК. Также результатом работы стало получение 6 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, в создании которых автор принимал участие.

Материалы докладывались и обсуждались на 5 международных, 6 отраслевых конференциях, 2 семинарах и 1 симпозиуме, а именно:

Межведомственным XXIV семинаре «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» – «НЕЙТРОНИКА 2013».

Всероссийской научно-технической конференции «НЕЙТРОНИКА 2016», «НЕЙТРОНИКА 2017», «НЕЙТРОНИКА 2018», «НЕЙТРОНИКА 2019» и «НЕЙТРОНИКА 2022». ФГУП «ГНЦ РФ ФЭИ им. А.И. Лейпунского», г. Обнинск.

Межотраслевой научно-технический семинар «Расчетные и экспериментальные исследования динамики ядерных энергетических установок на этапах жизненного цикла». 2015 год. ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор

Межотраслевой научно-технической конференции «Моделирование динамики ЯЭУ». 2024 год. ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор

16 школе-семинаре по проблемам физики реакторов (Волга-2010). 2010 год, НИЯУ «МИФИ», г. Москва.

Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» 2011, 2015, 2017 и 2019 года. АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск.

24th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety Sochi, Russia, 2014 год.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертационной работы соответствует направлению исследований по п. 1 паспорта научной специальности 2.4.9. – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

Личный вклад автора

1. Создал методику расчета потвэльного энерговыделения комбинированным методом для реакторов ВВЭР в программе RC_micro и RCkin.
2. Подготовил модели и провел верификационные и валидационные стационарные и динамические расчеты комбинированным методом и методом суперпозиции.
3. Разработал и внедрил пред- и пост-процессинговые программы, облегчающие подготовку и анализ результатов расчетов по КП САПФИР_95&RC_ВВЭР.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы из 46 наименований, содержит 113 страниц, 8 таблиц и 58 рисунков.

Краткое содержание работы

Во введении представлено обоснование актуальности работы, сформулированы цель и основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и личный вклад автора. Также введение включает в себя исторический обзор развития основных программ расчета потвэльного энерговыделения ВВЭР.

В первой главе описаны реализованные в комплексе программ САПФИР_95&RC_ВВЭР методики расчета потвэльного энерговыделения.

В КП САПФИР_95&RC_ВВЭР реализованы и отработаны два метода расчета потвэльного энерговыделения в реакторном расчете: метод восстановления потвэльного энерговыделения за счет заранее рассчитанных на этапе ячейкового расчета скоростей реакции деления в кассетах (суперпозиции микро- и макропотока) и комбинированный «мелкосеточный» метод (pin-by-pin), в котором узлы радиальной расчетной сетки в активной зоне совпадают с центрами твэлов ТВС. Мелкосеточный расчет проводится с известными распределениями теплофизических параметров обратной связи (температуры топлива и плотности теплоносителя) и выгорания в твэлах. Эти распределения получаются на основе результатов расчетов, полученных методом суперпозиции при проведении расчетов загрузки. Поэтому такой подход получил название «комбинированный метод».

Расчет с использованием метода суперпозиции проводится с помощью программы САПФИР_95&RC_ВВЭР.2 (далее RC_ВВЭР), комбинированный мелкосеточный расчет проводится с помощью программы САПФИР_95&RC_micro (далее RC_micro). На основе этих методов разработана технология нестационарного сопряженного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета в потвэльном приближении, реализованная в программе RCkin входящей в КП КОРСАР/САПФИР.

Метод суперпозиции

В данном методе потвэльное энерговыделение рассчитывается как суперпозиция микрораспределения потока нейтронов в кассете и макрораспределения по реактору в целом в два этапа.

На первом этапе с использованием программы САПФИР_95.1 на основе решения уравнения переноса в бесконечной решетке ТВС методом вероятности первого столкновения (ВПС) моделируются процессы изменения изотопного состава при выгорании топлива и

подготавливается архив малогрупповых диффузионных характеристик ячеек. Для расчета потвального энерговыделения готовятся скорости реакции деления в твэлах, которые зависят от тех же параметров, что и другие малогрупповые характеристики ячеек (температуры топлива, температуры теплоносителя, отравления ксеноном, концентрации борной кислоты в теплоносителе, наличии или отсутствии органов регулирования в кассете).

На втором этапе проводится трехмерный расчет реактора в целом в малогрупповом диффузионном приближении по программе RC_BBЭР. Расчет производится на конечно-разностной сетке с 96-ю расчетными узлами на ячейку ТВС в плане. Высотная разбивка, как правило, составляет 30 высотных слоев. После получения групповых потоков проводится процедура восстановления потвального энерговыделения.

Алгоритм основан на предположении о разделении переменных при решении уравнения диффузии нейтронов, т.е. о том, что распределение потока нейтронов в твэле в каждый момент времени можно представить в виде суперпозиции распределений потока нейтронов в реакторе (макро) и в ТВС (микро).

Использование в расчете методом суперпозиции крупносеточного реакторного расчета в связке с методикой восстановления позволяет вести быстрый расчет потвального энерговыделения с приемлемой точностью.

Комбинированный мелкосеточный метод

За счет большей детализации прямой мелкосеточный потвальный расчет позволяет детально просчитать поле энерговыделения в реакторе, однако, при расчете выгорания твэгов появляются погрешности в следствии использования диффузионного приближения. Расчет выгорания твэгов на основе метода суперпозиции имеет меньшую методическую погрешность вследствие использования при его вычислении диффузионного приближения только при расчете макрораспределения потока по реактору, а микрораспределения потока в кассетах основаны на скоростях реакций деления в ТВС полученные при решении уравнения переноса методом ВПС в программе САПФИР_95.1. Скорость расчета прямым мелкосеточным методом с детальным потвальным моделированием активной зоны в разы медленнее восстановления потвального энерговыделения с помощью метода суперпозиции поэтому для практического использования диссертантом был предложен и реализован комбинированный мелкосеточный метод расчета потвального энерговыделения в котором выгорание ячеек и параметры обратной связи вычисляются на основе метода суперпозиции и используются в качестве входных данных. Такой подход также позволяет вести расчет сразу нескольких состояний по кампании одновременно, что существенно ускоряет время получения результатов в сравнении с прямым мелкосеточным расчетом.

Текущая реализация комбинированного метода проводится в три этапа.

На первом этапе производится расчет методом суперпозиции с подготовкой архивов с распределениями температуры топлива, плотности теплоносителя и выгорания в ТВЭлах которые будут использованы в реакторном расчете как входные данные.

На втором этапе производится подготовка архива малогрупповых диффузионных характеристик микроячеек с использованием программы САПФИР_95.1 на основе решения уравнения переноса в бесконечной решетке ТВС методом ВПС. При этом для различных конструктивных элементов (ТВЭлов, ТВЭгов, ПЭЛов и т.д.) ТВС или отражателя готовятся свои наборы диффузионных характеристик.

На третьем этапе проводится трехмерный малогрупповой диффузионный мелкосеточный расчет (pin-by-pin) реактора на конечно-разностной сетке, узлы которой в плане совпадают с центрами ТВЭлов ТВС в активной зоне. Высотная разбивка, как правило, составляет 30 высотных слоев. В реакторном расчете в качестве входных параметров используются распределения температуры топлива, плотности теплоносителя и выгорания в ТВЭлах полученных на первом этапе, что позволяет оперативно (каждое состояние можно считать отдельно) проводить прямой трехмерный потвэльный расчет всей активной зоны.

Реализованные в КП САПФИР_95&RC_BBЭР методы расчета потвэльного энерговыделения имеют существенно разную природу методической погрешности. У каждого из методов есть сильные и слабые стороны на основе которых определяется их роль в общей методологии расчета потвэльного энерговыделения в рамках КП САПФИР_95&RC_BBЭР. Метод суперпозиции играет роль оперативного инженерного метода для большинства классов задач, роль комбинированного мелкосеточного метода – уточняющий расчет в случаях где необходимо максимально детально рассмотреть изменение поля энерговыделения, например, на границе бокового отражателя.

Во второй главе приводится обоснование комбинированного метода расчета потвэльного энерговыделения на основе верификации и валидации программы RC_micro.

В комплексе программ САПФИР_95&RC_BBЭР комбинированный расчет потвэльного энерговыделения использует данные по распределению выгорания, температуры топлива, плотности теплоносителя в ТВЭлах, полученных на основе расчетов с использованием аттестованной программы RC_BBЭР.

При верификации комбинированного мелкосеточного метода расчета потвэльного энерговыделения оценена погрешность самого мелкосеточного метода и погрешность, вносимая использованием потвэльных распределений выгорания, рассчитываемых методом суперпозиции.

Погрешность мелкосеточного метода оценивалась сравнением² полученных с его помощью результатов расчетов стационарных состояний активной зоны без выгорания с результатами расчетов, полученных с помощью программы САПФИР_95.1, программ реализующих метод Монте-Карло, а также с экспериментальными данными, полученными на сборках ZR-6.

Погрешность, вносимая использованием выгорания из результата расчета методом суперпозиции, оценивалась отличием потвэльного энерговыделения при расчете выгорания напрямую на мелкосеточной модели, от энерговыделения при мелкосеточном расчете с заданным из метода суперпозиции выгоранием. Результат в таком случае сравнивается с результатами расчетов методом Монте-Карло или расчетами бесконечных решеток ТВС в программе САПФИР_95.1, точность которых обеспечивается использованием метода ВПС.

Определение точности мелкосеточного метода представлено на примере двумерной тестовой задачи, прототипом которой является один из проектных вариантов первой загрузки АЭС-2006. В ней было проведено шесть расчетов, в которых варьировалась плотность теплоносителя в пределах от 0,3 до 0,8 г/см³ с шагом 0,1 г/см³. Тестовые расчеты выполнены специалистами АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» по программе MCNP.

Ожидается, что диффузионное приближение будет давать наихудшие результаты в области с резким изменением плотности потока нейтронов, например, на границе с отражателем. Как правило, в этих ТВС достигаются максимальные значения относительного потвэльного энерговыделения (в противоположной к боковому отражателю части ТВС) именно поэтому в качестве реперных выбраны ТВС на границе активной зоны и отражателя, где энергетический спектр нейтронов изменяется наиболее сильно.

Для оценки влияния числа используемых энергетических групп на результаты расчета потвэльного энерговыделения мелкосеточным методом были проведены расчеты с двумя, шестью и двенадцатью энергетическими группами.

На рисунке 1 представлена картограмма 1/12 части активной зоны, на которой показана нумерация кассет, применяемая в данном тесте, тип ТВС, серым цветом при этом помечены тестовые ТВС.

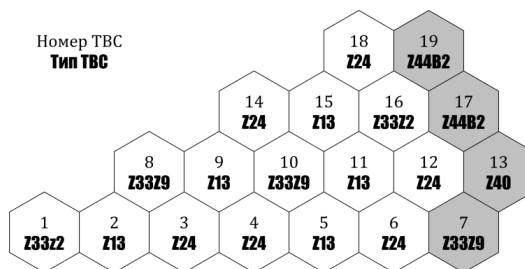


Рисунок 1 – Картограмма 1/12 части активной зоны. Серым цветом показаны тестовые ТВС

² Везде в работе используется относительное отклонение результата тестового расчета от реперного

В таблице 1 представлены отклонения результатов расчетов (RC_micro и MCNP) потвального энерговыделения.

Таблица 1 – Отклонения результатов расчетов (RC_micro и MCNP) потвального энерговыделения (в ТВС № 7, 13, 17 и 19)

Плотность теплоносителя, г/см ³	Относительное отклонение коэффициента неравномерности потвального энерговыделения Кк, %			Среднеквадратичное отклонение относительного потвального энерговыделения		
	2 гр.	6 гр.	12 гр.	2 гр.	6 гр.	12 гр.
0,3	-4,90	-1,53	-1,65	1,79	0,86	0,88
	-3,96	-1,57	-2,23	1,82	1,47	1,90
	-5,03	-1,28	-1,76	1,55	1,04	1,32
	-5,38	-1,60	-2,03	1,56	0,94	1,00
0,4	-4,72	-1,49	-1,62	1,77	0,95	0,97
	-4,58	-1,96	-2,55	1,64	1,19	1,53
	-4,80	-0,83	-1,23	1,61	1,18	1,45
	-5,10	-1,15	-1,50	1,59	1,04	1,15
0,5	-4,42	-1,38	-1,53	1,68	1,04	1,05
	-4,33	-1,65	-2,18	1,57	1,11	1,42
	-5,04	-1,10	-1,43	1,65	1,29	1,51
	-5,30	-1,43	-1,73	1,59	1,18	1,29
0,6	-3,37	-0,56	-0,71	1,57	1,15	1,12
	-3,35	-0,61	-1,15	1,34	0,91	1,15
	-4,18	-0,34	-0,66	1,67	1,38	1,57
	-4,42	-0,68	-0,97	1,57	1,21	1,35
0,7	-2,76	-0,78	-0,95	1,67	1,37	1,38
	-3,57	-1,13	-1,65	1,41	0,95	1,22
	-3,56	0,38	-0,68	1,81	1,65	1,84
	-3,78	-0,86	-1,14	1,71	1,48	1,66
0,8	-2,60	-0,30	-0,45	1,55	1,45	1,42
	-3,02	-0,44	-0,94	1,19	0,81	0,97
	-3,41	-0,06	-0,33	1,67	1,65	1,78
	-3,69	-0,49	-0,75	1,57	1,39	1,52
Среднее значение	-4,14	-0,95	-1,33	1,61	1,20	1,35

Полученные результаты показали оптимальность использования 6 группового приближения. Переход к 12 группам не привел к увеличению точности получаемых результатов при этом гораздо более вычислительно затратен. Результаты расчета крупносеточным методом в 2 группах с помощью программы RC_BBЭР показали среднее значение по максимальному отклонению в Кк – -3,00%, по среднеквадратичному отклонению относительного потвального энерговыделения – 2,46%.

Анализ влияния использования потвэльного выгорания из метода суперпозиции на точность расчета энерговыделения комбинированным методом, проведен в тесте, моделирующем выгорание твэгов в кассете РУ ВВЭР-1000 в бесконечной решетке. Рассматриваемая ТВС включает 292 твэла с обогащением 4,4% и 18 твэгов с обогащением 3,6% и массовой долей Gd_2O_3 8%. Энерговыделение в твэгах рассчитывалось до выгорания вплоть до 45 МВт*сут/кгU.

На рисунке 2 представлена модель ТВС, а также графики с отклонением результата расчета энерговыделения в твэге, в котором достигнуто максимальное отклонение, полученное прямым и комбинированным методом в 2, 6 и 12 групповом приближении в сравнении с результатами расчета методом Монте-Карло в программе MCU-FR.

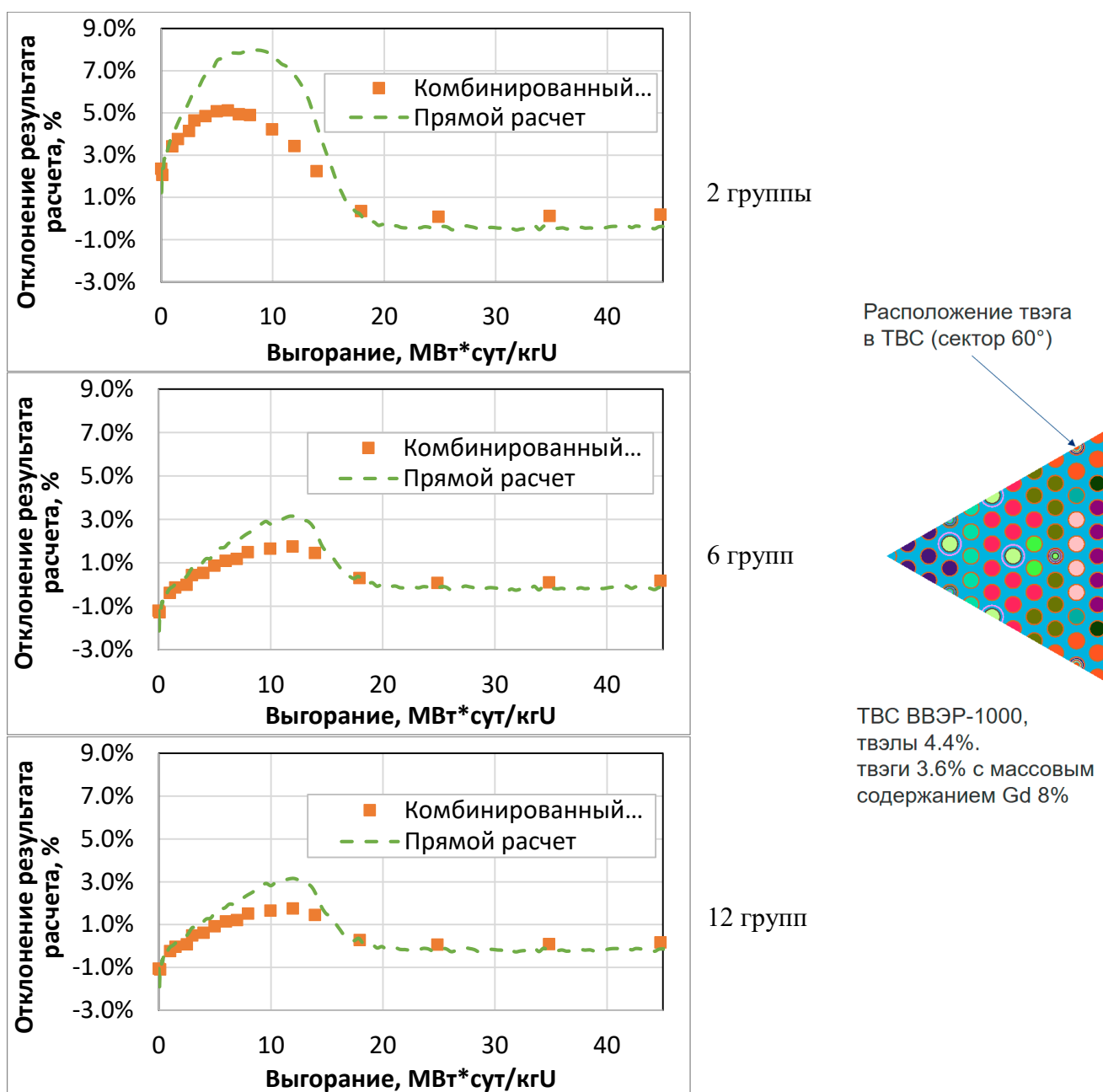


Рисунок 2 – Отклонение результатов расчетов энерговыделения в твэгах полученных с помощью программы RC_micro прямым и комбинированным мелкосеточным методом от результата расчета в программе MCU

Погрешность расчета энерговыделения в твэгах зависит от точности расчета потока нейтронов и скоростей реакций в топливе, а также от точности расчета скорости выгорания гадолиния. При больших выгораниях, когда гадолиний выгорел, моделирование энерговыделения в твэгах не имеет особенностей по сравнению с остальными твэлами. Наиболее сложный случай для моделирования – промежуточный ($\sim 10 \text{ МВт} \cdot \text{сут} / \text{кгU}$), когда гадолиний не полностью прогорел. В это время размножающие свойства наиболее быстро изменяются, и дополнительная погрешность в расчете скорости выгорания гадолиния, связанная с диффузионным приближением в прямом методе расчета приводит к увеличению (в сравнении с комбинированным методом) погрешности в расчетах энерговыделения.

Из полученных результатов видно, что наибольший вклад в снижении погрешности мелкосеточного расчета имеет переход от 2 к 6 групповому расчету. Переход от 6 к 12 групповому расчету не дает существенного увеличения точности. Вторым по значимости фактором, влияющим на точность, является использование комбинированного метода, который дает лучшее согласие с репером, чем прямой метод.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными полученными на критических сборках ZR-6 подтвердили расчетные оценки. Были проведены сравнения однородных и не однородных конфигураций K91 (K101, K102, K103) которые показали уменьшение максимальной погрешности при переходе от 2 к 6 групповому расчету от 17% до 9%, а уменьшение максимального (по рассмотренным конфигурациям) среднеквадратичного отклонения с 7% до 3,5%.

Проведенная верификация подтвердила обоснованность комбинированного метода расчета потвэльного энерговыделения. Мелкосеточный метод показал хорошее согласие с результатами расчета методом Монте-Карло в задачах без выгорания. В задачах с выгоранием в которых результаты прямым и комбинированным методом сравнивались с результатами расчетов методом Монте-Карло использование комбинированного метода улучшило согласие в сравнении с прямым мелкосеточным расчетом. Верификация позволила определить, что наиболее оптимально использовать комбинированный мелкосеточный метод с 6 групповой разбивкой по энергии. По результатам экспертизы в ФБУ «НТЦ ЯРБ» программа RC_micro, в которой реализован комбинированный метод расчета, была аттестована для расчета потвэльных трехмерных стационарных распределений мощности в активных зонах ВВЭР и водо-водяных критических сборках в 6 групповом диффузионном приближении. После аттестации программа была передана Главному конструктору РУ ВВЭР – АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» для практических расчетов.

В третьей главе приведено описание технологии сопряженных нейтронно-физических и теплогидравлических динамических расчетов с поячейковым моделированием проточной части

выделенных, наиболее напряженных ТВС на основе моделирования потвэльного энерговыделения методом суперпозиции и комбинированным методом, а также приведен пример ее практического использования.

Совместный нейтронно-физический и теплогидравлический расчет проводится с помощью комплекса программ КП КОРСАР/САПФИР, состоящего из двух программ. Программа теплогидравлического расчета подготовлена на основе РК КОРСАР/ГП. Нейтронно-физический расчет выполняется программой RCkin. Обе программы имеют собственные файлы входных данных и запускаются параллельно на отдельных процессах. В процессе решения задачи обмен данными между процессами осуществляется с помощью стандарта MPI (Message Passing Interface). Ведущей является теплогидравлическая программа, формирующая команды для нейтронно-физической программы, которая, в свою очередь, передает ведущей программе информацию о своем состоянии в виде кода ошибки.

Для апробации методики подготовки сопряженной нейтронно-физической и теплогидравлической модели для динамического расчета потвэльного энерговыделения был выбран эксперимент по отключению 2-х смежных главных циркуляционных насосов (ГЦН) из 4-х работающих на уровне мощности 100% $N_{ном}$, проведенный на РУ ВВЭР-1200 в первую кампанию при выгорании в 42.7 эфф. суток. Компенсация реактивности при этом осуществлялась двумя группами органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ).

Схема проведения расчета состояла из следующих этапов:

1. Подготовка малогрупповых диффузионных характеристик для расчета методом суперпозиции и мелкосеточным методом в программе САПФИР_95.1.
2. Стационарный расчет по программе RC_ВВЭР первой загрузки с расчетом потвэльного энерговыделения методом суперпозиции.
3. Подготовка на основе расчета из п. 2 файлов с начальным состоянием по выгоранию для нейтронного модуля КП КОРСАР/САПФИР для расчета динамического режима методом суперпозиции.
4. Подготовка на основе расчета из п. 2 файлов с начальным состоянием по выгоранию для нейтронного модуля КП КОРСАР/САПФИР для расчета динамического режима комбинированным методом.
5. Проведение по КП КОРСАР/САПФИР динамического сопряженного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета режима с расчетом потвэльного энерговыделения методом суперпозиции.

6. Проведение по КП КОРСАР/САПФИР динамического сопряженного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета режима с расчетом потвэльного энерговыделения комбинированным мелкосеточным (pin-by-pin) методом.
7. Оценка методической погрешности расчета потвэльного энерговыделения, как отклонения между расчетами, выполненными двумя методами.

Сопоставление результатов расчетов и измерений распределений энерговыделения в активной зоне выполнено в пяти характерных точках режима (см. рисунок 3):

- 1) начало режима ($T = 0$ с);
- 2) группа ускоренной предупредительной защиты упала на нижние жесткие упоры ($T = 7$ с);
- 3) середина периода разгрузки реактора погружением 12 й группы ОР СУЗ ($T = 30$ с);
- 4) начало участка поддержания мощности с помощью автоматического регулятора мощности ($T = 70$ с);
- 5) конец участка стабилизации мощности ($T = 150$ с).

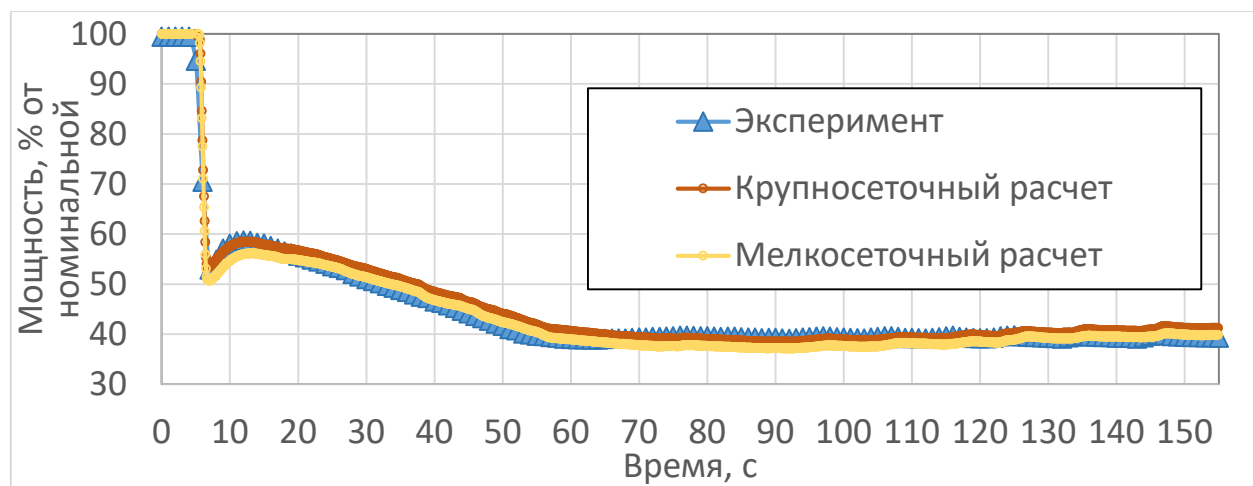


Рисунок 3 – Отключение 2-х ГЦН. Сравнение рассчитанной и измеренной мощности РУ в режиме

В таблице 2 приведено отклонение результатов расчетов относительного покассетного энерговыделения K_q для 2 группового расчета.

Таблица 2 – Отклонение результатов крупносеточного и мелкосеточного расчетов K_q от экспериментальных значений

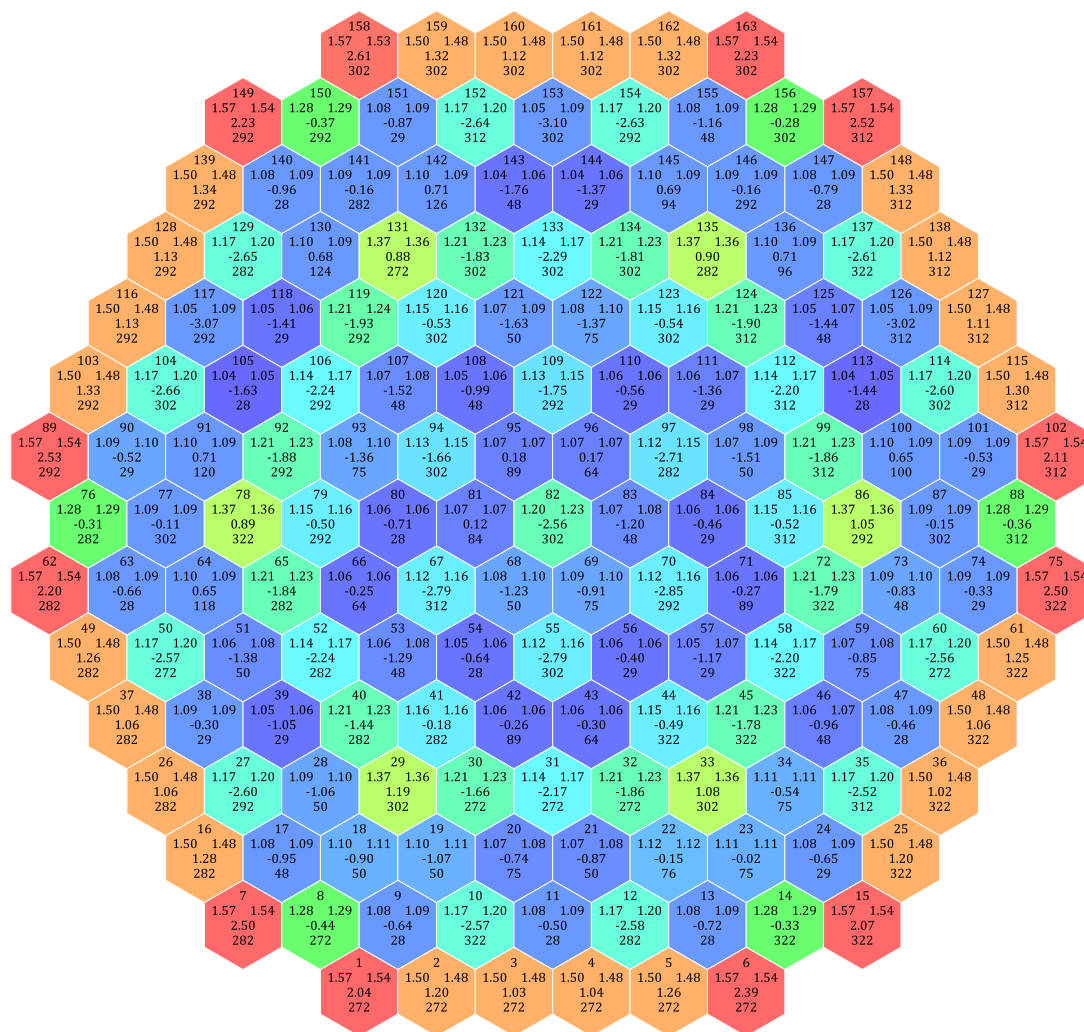
Время, секунды	0	7	30	70	150
Отклонение (крупносеточный расчет), %	-1,9	-2,5	-4,9	-3,7	-2,8
Отклонение (мелкосеточный расчет), %	0,6	0,4	-1,8	-0,5	0,4

В таблице 3 приведено среднеквадратичное отклонение результатов расчетов относительного покассетного энерговыделения для 2 группового расчета.

Таблица 3 – Среднеквадратичное отклонение результатов расчетов относительного покассетного энерговыделения крупносеточным и мелкосеточным методом от экспериментальных значений.

Время, секунды	0	7	30	70	150
Отклонение (крупносеточный расчет), %	1,4	3,2	3,3	3,2	2,5
Отклонение (мелкосеточный расчет), %	1,2	3,1	2,9	2,9	2,2

На рисунке 4 в качестве примера приведено распределение коэффициентов неравномерности потвального энерговыделения (K_k) в кассетах активной зоны на 7 секунде режима. В каждой ТВС сверху – ее номер, слева – результат крупносеточного расчета, справа – результат мелкосеточного расчета, ниже – относительно отклонение крупносеточного расчета от мелкосеточного в %, внизу номер твэла где достигается K_k в ТВС.



Среднеквадратичное отклонение – 1,54%

Рисунок 4 – Сравнение значений K_k в крупносеточном и мелкосеточном расчете. $T = 7$ с.

В таблице 4 приведены значения среднеквадратичного отклонения результатов расчетов коэффициента неравномерности потвального энерговыделения K_k энерговыделения по всем ТВС активной зоны между расчетами методом суперпозиции и комбинированным методом.

Таблица 4 – Среднеквадратичное отклонение между результатами расчета K_k методом суперпозиции и комбинированным методом.

Время, секунды	0	7	30	70	150
Среднеквадратичное отклонение, %	2,02	1,54	1,49	1,53	1,54

Результат статистической обработки результатов расчетов потвального энерговыделения показывает:

- оценка модельной неопределенности расчета потвального энерговыделения включает небольшую систематическую составляющую и неопределенность, зависящую от конструкции ТВС и места ее расположения в активной зоне;
- обе компоненты слабо изменяются в процессе динамического режима после погружения стержней ОР СУЗ на седьмой секунде внесенного возмущения.

Это указывает на то, что методическая погрешность расчета коэффициента неравномерности потвального энерговыделения определяется, в первую очередь, конструкцией и местом расположения ТВС в активной зоне и ее оценку можно получить путем сопоставления с реперными расчетами, полученными в стационарных состояниях.

Предложенная автором методика подготовки сопряженной нейтронно-физической и теплогидравлической модели для динамических расчетов с потвальным расчетом энерговыделения методом суперпозиции и комбинированным методом по результатам верификации показала свою обоснованность. Полученные результаты расчетов распределения покассетного энерговыделения в сравнении с экспериментальными данными показали хорошее согласие. Комбинированный метод при этом в целом показал лучшее согласие с экспериментом. Отклонение результатов расчетов потвального энерговыделения (в частности K_r) в динамическом режиме между методикой суперпозиции и комбинированным методом не превысило аналогичное отклонение в стационарных расчетах.

В четвертой главе проведен обзор созданного автором пакета сервисных программ, обеспечивающего технологию автоматизации потвальных расчетов.

Потвальный расчет в комплексе программ КП КОРСАР/САПФИР можно разбить на четыре этапа:

1. Этап расчета ячеек. Осуществляется с помощью программы САПФИР_95.1.
2. Этап подготовки библиотеки малогрупповых диффузионных характеристик на базе результатов ячейковых расчетов. Осуществляется с помощью программы CRC15.
3. Этап стационарного реакторного расчета. Осуществляется с помощью программ RC_BBЭР, RC_micro. На данном этапе осуществляется также подготовка данных для начального состояния (по выгоранию) для динамического расчета, осуществляемого на четвертом этапе.

4. Этап динамического сопряженного нейтронно-физического (осуществляется с помощью программы RCkin) и теплогидравлического (осуществляется с помощью программы KORCAP) реакторного расчета.

На каждом из этапов пользователю необходимо работать с большим объемом разнородных данных, при этом осуществляя множество рутинных операций. Такое сочетание, как правило, приводит к ошибкам в подготовке и анализе результатов. Созданная автором технология автоматизации потвэльных расчетов за счет использования пакета сервисных программ сводит к минимуму время подготовки исходных данных, уменьшает число рутинных операций и максимально визуализирует полученные результаты расчетов. Сервисные программы позволяют реализовать довольно громоздкую комбинированную методику расчета потвэльного энерговыделения.

В таблице 5 представлена система сервисных программ, обеспечивающая технологию автоматизации потвэльных расчетов в КП KORCAP/САПФИР.

Таблица 5 – Система сервисных программ в КП KORCAP/САПФИР

Программа	САПФИР_95.1	CRC15	RC	RC-KORCAP
Этап работы	Расчет ячеек	Подготовка библиотеки	Стационарный реакторный расчет	Сопряженный динамический реакторный расчет
Подготовка исходных данных для программ	RUI, SCG5W	-	RC_Model_Creator, Model_Creator_GP, Micro_Model_Creator, Micro_Model_Creator_GP, Sparc	RC_Model_Creator, Model_Creator_GP, Micro_Model_Creator, Micro_Model_Creator_GP
Обработка и анализ результатов расчетов	SCG5W, SapfReader	DAV2	Model_Creator_GP, Micro_Model_Creator_GP, Extractor, AllZoneTvels	Model_Creator_GP, Micro_Model_Creator_GP, Extractor, AllZoneTvels, KORVIS

Схема взаимодействия программ в комплексе представлена на рисунке 5 на нем отмечены программы которые обеспечивают методологию потвэльных расчетов и программы обеспечивающие технологию автоматизации их проведения. Стрелками показана необходимость передачи данных от одной программы к другой.

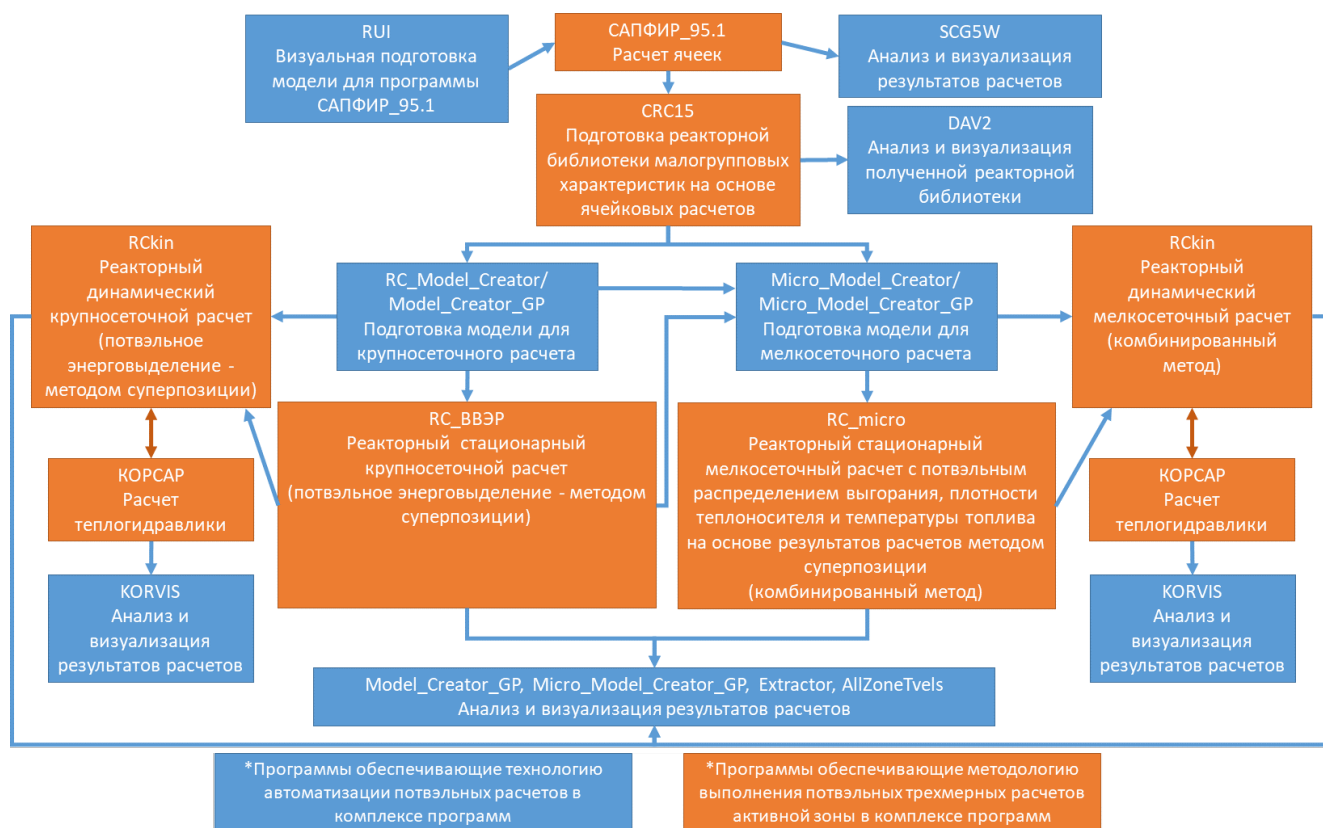


Рисунок 5 – Схема взаимодействия программ в КП КОРСАР/САПФИР

Сервисная программа SCG5W обеспечивает графическое представление заданной во входном файле для программы САПФИР_95.1 геометрии и проверку ее на корректность. Также программа осуществляет визуализацию результатов расчетов на заданной геометрии.

Сервисная программа RUI позволяет графическим образом формировать файлы входных данных для программы САПФИР_95.1 и MCU.

Сервисная программа SapfReader дает возможность анализировать результаты расчетов, записанных в выходных бинарных архивах программы САПФИР_95.1. Программа также позволяет сохранить считанные данные в текстовом виде, удобном для обработки пользователем.

С помощью сервисной программы Diffusion Archive Visualizer2 (DAV2) пользователь может проводить анализ библиотек мало групповых характеристик для реакторных программ RC полученных с помощью программы CRC15. Программа позволяет отображать находящиеся в ней характеристики в виде таблиц и графиков.

Сервисные программы RC_Model_Creator и Model_Creator_GP (аналог RC_Model_Creator созданный с учетом требований специалистов АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС») обеспечивают визуальное создание расчетных моделей для крупносеточного расчета в программе RC_BBЭP и RCkin. Программа Model_Creator_GP кроме этого позволяет визуализировать результаты расчетов в виде таблиц, картограмм и графиков в требуемом пользователю формате.

Сервисные программы Micro_Model_Creator и Micro_Model_Creator_GP (аналог RC_Model_Creator созданный с учетом требований специалистов АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС») обеспечивают визуальное создание расчетных моделей для мелкосеточного расчета в программе RC_micro и RCkin. Программа Micro_Model_Creator_GP позволяет визуализировать результаты расчетов в виде таблиц, картограмм и графиков в требуемом пользователю формате. Программа Micro_Model_Creator_GP по формату входных данных связана с программой Model_Creator_GP, что позволяет брать множество входных данных из ее крупносеточной модели в модель для мелкосеточного расчета.

Если расчет мелкосеточным методом проводится не в рамках оболочек Model_Creator_GP и Micro_Model_Creator_GP, то для него требуется подготовить входные архивы с потвэльным распределением выгорания, температуры топлива и плотностью теплоносителя, которые готовятся с помощью программы Sparc на основе результатов расчетов методом суперпозиции.

Программа Extractor позволяет анализировать данные из выходного текстового файла или создаваемых бинарных архивов программ RC_BBЭР, RC_micro и RCkin и позволяет представлять данные в виде картограмм и графиков, а также сохранять данные в текстовом виде. В программу встроена возможность сравнения картограмм из разных источников.

Программа AllZoneTvels анализирует выходные потвэльные архивы с результатами расчета энерговыделения или выгорания в твэлах. Программа позволяет отображать всю активную зону в потвэльном представлении и, при необходимости, увеличивать интересующий пользователя участок. В программу встроена возможность рассчитывать значения Kr, Kk, Kq и Kz на основе результатов расчетов потвэльного энерговыделения. Программа позволяет вести сравнение результатов двух расчетов, выдавая относительное отклонение. Полученные результаты можно сохранить как в виде изображения, так и в текстовом виде.

При сопряженном динамическом нейтронно-физическом и теплогидравлическом расчете результаты расчета, полученные с помощью РК КОРСАР сохраняются в бинарном формате в файлах korres. Для анализа и визуализации этих данных в виде графиков, картограмм и гистограмм используется программа KORVIS разработанная в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» Михеевым П.А.³.

Созданная автором технология автоматизации потвэльных расчетов позволила свести к минимуму время подготовки исходных данных, уменьшила число рутинных операций, производимых пользователем, дала возможность максимально визуализировать получаемые результаты расчетов и позволила реализовать комбинированную мелкосеточную методику расчета потвэльного энерговыделения не как экспериментальную научную методику для

³ Все остальные сервисные программы, обеспечивающие технологию автоматизации потвэльных расчетов разработаны автором диссертационной работы

решения узкого класса задач, а как введенную в практику инженерных расчетов, осуществляемых при обосновании безопасности РУ с ВВЭР.

Заключение

1. Разработана, программно реализована и аттестована для стационарных расчетов комбинированная методика расчета потвэльного энерговыделения, которая включает в себя расчет выгорания, теплофизических параметров обратной связи в твэлах и твэгах на основе метода суперпозиции (суперпозиция решений уравнений переноса нейтронов в кассете и в трехмерном пространстве активной зоны реактора) и прямое потвэльное (pin-by-pin) моделирование активной зоны.
2. Предложена и обоснована по результатам верификации методика подготовки сопряженной нейтронно-физической и теплогидравлической модели для динамических расчетов с потвэльным расчетом энерговыделения методом суперпозиции и комбинированным методом.
3. Разработана и реализована в КП КОРСАР/САПФИР методология выполнения потвэльных трехмерных расчетов активной зоны с возможностью проведения как оперативных инженерных, так и поверочных расчетов в стационарных, переходных и аварийных режимах.
4. Разработана и реализована в виде пакета сервисных программ технология автоматизации связанных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов ВВЭР с потвэльным моделированием ТВС в КП КОРСАР/САПФИР.

Публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК

1. Оценка влияния изменения плотности теплоносителя на точность расчета потвэльного энерговыделения ВВЭР / В.Г. Артёмов, А.Н. Кузнецов, К.Ю. Куракин, А.В. Тихомиров // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2019. - Вып. 3. - С. 115-123. - DOI: 10.55176/2414-1038-2019-3-80-88. - EDN: UEQTТК

2. Результаты моделирования тестовой задачи "Benchmark Rostov 2" с использованием комплекса программ САПФИР_95&RC_ВВЭР и КОРСАР / В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, В.Г. Коротаев, А.Н. Кузнецов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы. -2019. - Вып. 4. - С. 118-127. - DOI: 10.55176/2414-1038-2019-4-118-127. - EDN: APEVEO

3. Результаты моделирования потвэльного энерговыделения в эксперименте по отключению двух смежных из четырех работающих главных циркуляционных насосов на РУ ВВЭР-1000 / В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, В.Г. Коротаев, А.Н. Кузнецов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2023. - № 3. - С. 44-58. - EDN: VEGBDR

4. Развитие алгоритмов комплекса программ САПФИР_95&RC для обоснования нейтронно-физических характеристик реакторов различных типов / В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, А.Н. Кузнецов [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2021. - № 2. - С.9-24. - DOI: 10.52069/2414-5726_2021_2_24_9. - EDN: MFDUAJ

5. Моделирование потвэльного энергоснабжения в нестационарных режимах ВВЭР / В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, В.Г. Коротаев, А.Н. Кузнецов // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2022. - №2. -С.38-48. - DOI: 10.52069/2414-5726_2022_2_28_38. - EDN: BLFKAJ

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663185 Российская Федерация. Программа САПФИР_РФ: 14.12.2015 / В.Г. Артемов, А.С. Иванов, А.С. Карпов, А.Н. Кузнецов; правообладатель ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова».

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662958 Российская Федерация. Программа RC_Model_Creator: 21.11.2017 / А.Н. Кузнецов; правообладатель ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова».

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662976 Российская Федерация. Программа SCG5W: 22.11.2017 / А.Н. Кузнецов; правообладатель ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова».

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663629 Российская Федерация. САПФИР_95&RC_ВВЭР.3: 21.10.2019 / В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов [и др.]; правообладатель ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова».

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619253 Российская Федерация. Программа CRC15: 19.05.2022 / А.В. Пискарев, А.Н. Кузнецов; правообладатель ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова».

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022618823 Российская Федерация. САПФИР_95&RC_micro: 18.05.2022 / Артемов, Л.М. Артемова, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов [и др.]; правообладатель ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова».

Публикации

1. Тестирование расчета потвэльного энергоснабжения в комплексе программ САПФИР_95&RC_ВВЭР / В.Г. Артёмов, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов, Ю.П. Шемаев // ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»: годовой отчет 2009 год. - Сосновый Бор: ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», 2010. - С. 75-81.

2. Развитие алгоритма расчета потвэльных характеристик реактора в комплексе программ САПФИР_95&RC_ВВЭР / В.Г. Артёмов, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов, Ю.П. Шемаев // ФГУП

«НИТИ им. А.П. Александрова»: годовой отчет 2009 год. - Сосновый Бор: ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», 2010. - С. 81-94.

3. Развитие алгоритмов расчета потвального энерговыделения реактора в комплексе программ САПФИР_95&RC_BBЭР / В.Г. Артёмов, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов, Ю.П. Шемаев // ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»: годовой отчет 2010 год. - Сосновый Бор: ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», 2011. - С. 83-89.

4. Развитие алгоритмов и методов расчета потвального энерговыделения в комплексе программ САПФИР_95&RC_BBЭР / В.Г. Артёмов, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов, Ю.П. Шемаев // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: 7-я международная научно-техническая конференция; Подольск, Россия 17-20 мая 2011 года. – Подольск: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2011.

5. Иванов А.С. Модернизация комплекса программ САПФИР_95&RC_BBЭР для расчета в параллельном режиме нейтронно-физических характеристик реакторов ВВЭР / А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов, А.В. Пискарев // ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»: годовой отчет 2012 год. - Сосновый Бор: ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», 2013. - С.81-83.

6. 3-D SIMULATION OF VVER CORE POWER DENSITY BASED ON SAPFIR_95&RC_VVER ALGORITHMS / V.G. Artemov, A.S. Ivanov, A.N. Kuznetsov, Yu.P. Shemaev // Proceedings of the twenty-fourth Symposium of AER I; Sochi, Russian Federation, October 14-18, 2014; Kiadja MTA Energiatudományi Kutatóközpont Budapest. - P. - 157-160.

7. Комбинированный метод расчета потвального энерговыделения в комплексе программ САПФИР_95&RC_BBЭР / В.Г. Артёмов, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов, Ю.П. Шемаев // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2014. - Вып. 3. - С. 85-89. -EDN: VOBQRZ

8. Расчет потвального энерговыделения при маневрах мощности в ВВЭР с использованием комбинированного метода в комплексе программ САПФИР_95&RC_BBЭР / В.Г. Артёмов, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов, Ю.П. Шемаев // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: 9-я международная научно-техническая конференция; Подольск, Россия 19-22 мая 2015 года. - Подольск: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2015.

9. Моделирование потвального энерговыделения в маневренном режиме ВВЭР / В.Г. Артёмов, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов, Ю.П. Шемаев // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. -2016. - № 2(4). - С. 36-44. - EDN: WFFIKJ

10. Программные средства для подготовки расчетных моделей и анализа полученных результатов расчетов потвального энерговыделения в комплексе программ САПФИР_95&RC_BBЭР / В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, А.Н. Кузнецов, П.А. Михеев // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: 10-я международная научно-техническая конференция; Подольск, Россия 16-19 мая 2017 года. - Подольск: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2017

11. Расчет потвэльного энерговыделения в бенчмарках 'FULL-CORE' для ВВЭР-440 и MIDICORE для ВВЭР-1000 с использованием комплекса программ САПФИР_95&RC_ВВЭР / В.Г. Артёмов, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: 10-я международная научно-техническая конференция; Подольск, Россия 16-19 мая 2017 года. - Подольск: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2017.

12. Артемов В.Г. Верификация потвэльной модели программы САПФИР_95&RC_ВВЭР при моделировании выгорания загрузок энергоблоков ВВЭР / В.Г. Артёмов, А.Н. Кузнецов / Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2018. - Вып. 1. - С. 35-46. - EDN: XOCEGL

13. Развитие алгоритмов и методов расчета потвэльного энерговыделения в КП САПФИР_95&RC_ВВЭР / В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, А.Н. Кузнецов [и др.] // ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»: годовой отчет 2019 год. - Сосновый Бор: ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», 2020. - С. 73-78.