



Увакин Максим Александрович

**Математическое моделирование реакторов ВВЭР
с машинным обучением для обоснования
маневренных режимов**

1.2.2 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Работа выполнена в Акционерном обществе «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССР опытном конструкторском бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»)

Официальные оппоненты:

Давиденко Владимир Дмитриевич, доктор технических наук
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», руководитель отделения физики и моделирования энергетики в Курчатовском комплексе перспективной атомной энергетики

Коробейников Валерий Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор. Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), главный научный сотрудник

Полетыкин Алексей Григорьевич, доктор технических наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН), лаборатория 31, главный научный сотрудник

Ташлыков Олег Леонидович, доктор технических наук
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Кафедра атомные станции и возобновляемые источники энергии, профессор

Защита диссертации состоится 18 февраля 2026 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.1.02 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru/> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан « ___ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МИФИ.1.02,
доктор физико-математических наук



Гани Вахид Абдулович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Появление новых требований по маневренности энергетических ядерных реакторов предопределяет новые требования к расчетному обоснованию безопасности. Повышение необходимой скорости изменения нейтронной мощности, постоянная готовность к гибкому графику несения нагрузки и многовариантные способы регулирования должны быть учтены при выполнении анализов безопасности. Это вызывает необходимость разработки и практического применения моделей, адаптированных под специфику маневрирования, и новых эффективных численных методов при обосновании безопасности.

Актуальной проблемой современного этапа развития атомной энергетики является реализация алгоритмов численного моделирования динамики ядерных реакторов с применением современных информационных технологий, включая искусственный интеллект, использование машинного обучения и работу с большими данными. Практическое внедрение таких подходов позволяет задействовать накопленный опыт анализов безопасности для эффективного снижения вычислительных затрат в задачах с прогрессирующим количеством сценариев аварийных процессов, обусловленным многообразием различных состояний реакторной установки в нестационарных режимах, связанных с маневрированием.

Тема диссертационной работы в части государственных задач Российской Федерации соответствует актуальным направлениям «Энергетической стратегии развития Российской Федерации до 2035 года» и «Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 года».

Предмет исследования.

Применение современных математических моделей расчета нестационарных процессов в ядерных реакторах типа ВВЭР и технологий машинного обучения для повышения эффективности вычислений.

Область исследования.

Задачи математического моделирования нестационарных процессов на реакторных установках с ВВЭР при маневрировании мощностью до и после возникновения постулируемых исходных событий в части изменения энерговыделения и эффектов реактивности, а также их воздействия на параметры, которые используются для проверки приемочных критериев в анализах безопасности.

Цель работы.

Решение научной проблемы, имеющей принципиальное значение для эксплуатации и обоснования безопасности реакторных установок ВВЭР – создание, программная реализация и внедрение эффективного вычислительного метода, адаптированного к физическим явлениям и управлению реактором при маневрировании мощностью.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Предложен метод обоснования безопасности ядерного энергетического реактора с учетом маневренных режимов.
2. Разработана методика математического моделирования нестационарных процессов на реакторной установке ВВЭР в режимах маневрирования мощностью до и после возникновения постулируемого исходного события при помощи связанных кодов КОРСАР/ГП и ТРАП-КС.
3. На основе многовариантного расчетного анализа исследовано влияние динамики концентрации ксенона, плотности теплоносителя и перемещения органов регулирования на результаты анализов безопасности с учетом маневрирования.
4. Разработаны математические модели и предложены способы их численной реализации для определения изменения коэффициентов реактивности в динамическом расчете.
5. В практических задачах обоснования безопасности с учетом маневрирования реализованы эффективные методы машинного обучения для снижения трудоемкости и повышения релевантности проводимых расчетных анализов, а также для расширения объема данных под валидацию программных средств.
6. Созданы объектно-ориентированные комплексы программ для решения следующих прикладных задач в области сопровождения и поддержки связанных динамических расчетов реактора:
 - VELETTA/GP для формирования архитектуры, обучения и практического применения предиктивных нейросетевых моделей динамических процессов;
 - UGRA/GP для анализа неопределенностей коэффициентов реактивности;
 - SHEGRA/GP для корректировки мало групповых библиотек макроскопических констант с минимизацией возмущения реактивности и распределения энерговыделения;
 - DVINA/GP для валидации программных кодов связанного расчета по результатам экспериментов с маневрированием;
 - GORYN/GP для автоматизации и управления расчетными вариантами.
7. Для валидации программных кодов по результатам натуральных экспериментов с маневрированием разработана группа специализированных

алгоритмов для определения функции потерь и метрики точности расчетных моделей.

8. Выполнена верификация разработанных программных комплексов и их внедрение в практику сопровождения расчетных анализов в обоснование безопасности, выполняемых по аттестованным программным средствам.

Методы исследования.

Для решения поставленных задач использовалась физическая теория ядерных реакторов, основы нейтронной кинетики и динамики ядерных энергетических установок, численные методы оптимизации, алгоритмы машинного обучения и основы теории нейронных сетей.

Научная новизна.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Впервые теоретически обоснован и реализован в виде вычислительных задач подход к обоснованию безопасности ядерного энергетического реактора с учетом маневренных режимов.
2. Расчетными исследованиями впервые показано, что в задачах обоснования безопасности с учетом маневренных режимов исходное состояние должно приниматься динамическим, и не может рассматриваться как совокупность стационарных состояний на моменты времени, где постулируется возникновение исходных событий.
3. Впервые в практике реакторов ВВЭР предложен и обоснован алгоритм динамического run-time метода для проведения анализов безопасности, включающий моделирование маневренной динамики до исходного события и ее учет после его возникновения.
4. Разработан новый метод моделирования динамики реактора ВВЭР с использованием предиктивных нейронных сетей для эффективного выбора консервативных сценариев в процедурах анализа постулируемых исходных событий в условиях маневрирования мощностью.
5. Для прогнозирования динамики реактора впервые предложена двухкомпонентная архитектура нейронной сети, включающая редуцированный вариант сверточной сети и вариант мультирекуррентной сети, модифицированный за счет специальной синаптической связи для углубленной памяти, которая нацелена на уточненное моделирование ксеноновых процессов.
6. Разработан программный комплекс, ориентированный на создание и обучение нейросетевых моделей различной архитектуры для проведения предсказательных вычислений важных для безопасности параметров по

- результатам детерминистического моделирования процессов до возникновения исходного события.
7. Впервые получены результаты связанного моделирования нестационарных процессов для реакторов ВВЭР в условиях совместного протекания рассматриваемых исходных событий и нескольких типов маневренных режимов с учетом ошибки оператора, принимаемой в качестве единичного отказа.
 8. Разработан и апробирован алгоритм вычисления коэффициентов реактивности ВВЭР в динамических режимах с изменением мощности, основанный на малых отклонениях опорных узлов сетки параметрической библиотеки мало групповых констант.
 9. Предложен и верифицирован способ ускорения машинного времени по отношению к реальному времени модели, реализуемый за счет изменения постоянных времени ксеноновых процессов в связанных расчетах маневренных режимов.
 10. На основе алгоритмов, реализованных с применением методов математической статистики и машинного обучения, выполнена валидация моделей расчета параметров распределения энерговыделения и температуры теплоносителя для кодов КОРСАР/ГП и ТРАП-КС по результатам натурных экспериментов режимов с маневрированием.
 11. Предложен новый математический метод интерпретации натурального эксперимента по маневрированию реактором на основе модели с машинным обучением, включающим линейную регрессию по диапазонам действия основных регуляторов с принципом разделения пространственной и временной переменных.
 12. Разработан и внедрен принцип непрерывного обновления времени изменения для параметров, задаваемых таблично, под текущее время в задачах с подключением внешнего модуля основных регуляторов к программам связанного расчета.

Практическая значимость.

Практическая значимость результатов работы определяется их внедрением и непосредственным использованием в практике численного моделирования реакторных установок с ВВЭР в маневренных режимах для решения следующих задач, предусмотренных требованиями Федеральных норм и правил:

- обоснование эксплуатационных пределов по локальным параметрам энерговыделения;
- выполнение анализов безопасности на основе консервативного подхода;
- выполнение анализов погрешностей и неопределенностей;
- верификация и валидация программ для ЭВМ;

- обоснование применяемых технических решений в соответствии с современным уровнем развития науки и техники в части использования технологий искусственного интеллекта.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Метод математического моделирования реактора ВВЭР с использованием машинного обучения для комплексного обоснования безопасности эксплуатации в маневренных режимах.
2. Методика выполнения расчетов важных для безопасности параметров при помощи связанных кодов с трехмерной моделью нейтронной кинетики, учитывающая маневрирование мощностью до и после возникновения исходного события.
3. Алгоритмы:
 - построения, обучения и применения предиктивных нейросетевых моделей для прогнозирования динамических процессов после исходного события на основе результатов моделирования до него;
 - валидации расчетных моделей параметров поля энерговыделения реактора по результатам натурных испытаний маневрирования с применением методов машинного обучения;
 - расчета динамического изменения коэффициентов реактивности;
 - ускорения машинного времени по отношению к реальному времени модели путем изменения постоянных времени ксеноновых процессов;
 - моделирования динамики с внешним модулем регуляторов на основе непрерывно меняющегося времени изменения для параметров, задаваемых таблично.
4. Комплексы программ:
 - VELETMA/GP для формирования архитектуры, обучения и практического применения предиктивных нейросетевых моделей динамических процессов;
 - UGRA/GP для анализа неопределенностей коэффициентов реактивности;
 - SHEGRA/GP для корректировки малогрупповых библиотек макроскопических констант с минимизацией возмущения реактивности и распределения энерговыделения;
 - DVINA/GP для валидации программных кодов связанного расчета по результатам экспериментов с маневрированием;
 - GORYN/GP для автоматизации и управления расчетными вариантами.
5. Численные результаты решения задач по моделированию динамических процессов в обоснование безопасности для 5 серий испытаний на двух действующих Российских АЭС и трех проектируемых АЭС, включая сценарии аварийных последовательностей, выбранные с использованием технологии искусственного интеллекта.

Обоснованность и достоверность.

Обоснованность и достоверность результатов численного моделирования нестационарных процессов с пространственной нейтронной кинетикой на реакторной установке с ВВЭР обеспечивается за счет использования программных комплексов КОРСАР/ГП и ТРАП-КС, которые аттестованы в установленном порядке в соответствии с Федеральными нормами и правилами для расчетов данного класса. Обоснованность и достоверность результатов, полученных при помощи моделей машинного обучения, обусловлена применением проверенных и математически согласованных подходов, а также соответствием критериям, предлагаемым в ГОСТ, по стабильности, чувствительности, релевантности и достижимости. Методы моделирования реактора ВВЭР в режимах с изменением реактивности и распределения энерговыделения разрабатывались автором с учетом результатов натуральных экспериментов на энергоблоке №1 Ленинградской АЭС-2, энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2, энергоблоке №4 Ростовской АЭС и личного участия в их проведении и расчетном сопровождении.

Публикации.

Результаты диссертации представлены в 47 научных работах, включая 25 в российских изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования¹, 8 в иностранных изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, и 14 в рекомендованных ВАК российских изданиях².

Результаты работы опубликованы в журналах «Атомная энергия», «Вопросы атомной науки и техники» (Серии Физика ядерных реакторов, Ядерно-реакторные константы, Математическое моделирование физических процессов), «Physics of Atomic Nuclei», «Kerntechnik», «Nuclear Engineering and Design», «Annals of Nuclear Energy», «Journal of Physics: Conference Series». Список наиболее значимых публикаций и докладов автора приведен в конце автореферата.

Апробация работы.

Результаты диссертации представлены более, чем в 120 научно-технических, инженерных и учебно-методических источниках, включая:

- 78 докладов в материалах и трудах российских и международных научно-технических конференций и семинаров;

¹ Справочная информация об отечественных изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования и в соответствии с пунктом 5 правил формирования перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень), утвержденных приказом Минобрнауки России от 31 мая 2023 г. № 534 (зарегистрирован Минюстом России 11 июля 2023 г., регистрационный № 74207), считаются включенными в Перечень (по состоянию на 31 декабря 2023 г.)

² Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (по состоянию на 02.06.2025 года)

- 5 свидетельств о регистрации Программ для ЭВМ;
- 1 акт о внедрении расчетной модели.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и Российских отраслевых мероприятиях:

- Симпозиум AER (International Scientific Cooperation Atomic Energy Research), Словакия – 2013, Россия – 2014, Венгрия – 2015, Финляндия – 2016, Германия – 2017, Чехия – 2018, Словакия – 2019;
- Международная конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, Россия, 2013, 2015, 2017, 2019;
- Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование», Саров, Россия – 2022, 2024;
- Рабочая группа AER D “VVER Safety Analysis”, Германия – 2012, Франция – 2013, Швейцария – 2016, Германия – 2017, 2018, 2019, 2021;
- Межотраслевая научно-техническая конференция «Моделирование динамики ЯЭУ (Динамика)», Сосновый Бор, Россия – 2015, 2018, 2024.
- Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника), Обнинск, Россия – 2012, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2022, 2024;
- Рабочие группы МАГАТЭ, Румыния – 2016, Россия – 2016, Австрия – 2018, 2023, Китай – 2019;
- Семинар «Математическое моделирование на супер-ЭВМ», Национальный Центр Физики и Математики (НЦФМ), Саров, Россия – 2023, 2024;
- Международная математическая конференция НИЯУ МИФИ «Современные математические модели в энергетике», Обнинск, Россия – 2024.
- Научно техническая конференция «Ядерное топливо нового поколения для АЭС. Результаты разработки, опыт эксплуатации и направления развития», АО «ТВЭЛ» Сочи, Россия – 2024.
- Семинары EDF-Rosatom (Virtual NPP and Code Validation, Подходы к обоснованию ядерного топлива в маневренных режимах работы энергоблоков АЭС типа PWR/ВВЭР), Париж, Франция – 2019, Москва, Россия – 2021;
- Международная рабочая встреча WANO “Reactivity Management During VVER Reactor Start-Ups”, Москва, Россия – 2020;
- Международные семинары по проблемам физики реакторов (ВОЛГА), Москва, Россия – 2012, 2014, 2022, 2024;
- Международная конференция «VVER-2016», Прага, Чехия – 2016.

Личный вклад автора.

Все представленные в диссертации разработки созданы лично автором, либо при его непосредственном участии в качестве ответственного исполнителя, научного или технического руководителя исследовательских и инженерных работ. Автором выполнены:

- постановка задач, решение которых отражено в диссертации;
- разработка и реализация методологии математического моделирования маневренных режимов в задачах обоснования безопасности;
- разработка и реализация методов машинного обучения;
- проведение наиболее значимых расчетных исследований;
- написание, отладка и рефакторинг исходных кодов для программных комплексов VELETMA/GP, SHEGRA/GP, DVINA/GP;
- разработка алгоритмов для программных комплексов UGRA/GP и GORYN/GP;
- разработка ряда расчетных процедур для трехмерной модели нейтронной кинетики и валидации под маневренные режимы кодов ТРАП-КС и КОРСАР/ГП.

В разработке новых методов и алгоритмов, а также обосновании и внедрении полученных результатов принимали непосредственное участие специалисты отдела вероятностных анализов безопасности и программных средств АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» А.Л. Николаев, М.В. Антипов, И.В. Махин, Г.В. Алехин, М.О. Закутаев, Н.А. Дарьин, Г.А. Рябов, Е.В. Сотсков, М.А.Быков. Разработка модулей регуляторов выполнялась специалистами отдела АСУ ТП. В ряде расчетных исследований, касающихся применения модели трехмерной нейтронной кинетики в задачах обоснования безопасности реактора ВВЭР автор принимал участие в качестве научного руководителя и научного консультанта кандидатских диссертаций Петкевича И.Г., Конюховой А.И., Томилина А.А., Козлачкова А.Н.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка публикаций автора. Полный объем диссертации составляет 380 страниц, включая 212 рисунков, 16 таблиц, список использованных источников из 263 наименований (без учета публикаций автора) и 2 приложения. Каждая глава завершается подразделом с кратким описанием содержания главы и общей роли представленного в ней материала для всего диссертационного исследования в целом. В конце диссертации приведен перечень публикаций автора по теме диссертации и список докладов на научных конференциях.

Обоснование соответствия специальности.

Основные положения диссертационного исследования отвечают следующим направлениям исследований паспорта научной специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»³:

П. 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.

³ <https://vak.minobrnauki.gov.ru/uploader/loader?type=17&name=92259542002&f=14595>

П. 2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

П. 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

П. 4. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели.

П. 5. Разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента или на основе анализа математических моделей.

П. 8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Диссертационное исследование удовлетворяет требованию паспорта научной специальности в части наличия трех составляющих: математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведен обзор результатов научно-исследовательских и инженерно-технических работ в области алгоритмов маневрирования мощностью и методов численного анализа безопасности за период 30-40 лет. Также рассмотрен имеющийся опыт применения технологий искусственного интеллекта для задач атомной отрасли, в первую очередь для повышения эффективности моделирования процессов в ядерных реакторах. На основании обзора автором сделаны следующие обобщенные выводы:

1. На текущий момент для обоснования безопасности реакторов ВВЭР с учетом маневренных режимов не создавалось специализированных полноценных расчетных методик. В Российской практике подобные задачи не ставились. В мировой практике опыт их создания и применения для реакторов PWR существует, но маневренные режимы и аварийные процессы в совокупности не учитываются, ни в части математической модели, ни в части начальных условий в нестационарной задаче (исходное состояние, типы аварий, действия оператора).

2. Современное состояние средств и методов численного моделирования процессов на реакторных установках (РУ) с ВВЭР позволяет применять ресурсоемкие технологии машинного обучения, включая нейронные сети с глубоким обучением, для построения эффективных методов обоснования безопасности РУ ВВЭР.

С учетом сделанных выводов были сформулированы основные цели и задачи работы. Также во введении представлены основные положения, сформировавшиеся в процессе выполнения диссертации.

В первой главе содержится результаты научно-технических и инженерных исследований по группе вопросов, касающихся разработки и использования модели трехмерной нейтронной кинетики для проведения расчетного обоснования безопасности РУ с ВВЭР большой мощности. Представлен опыт участия автора в разработке и валидации математических моделей с трехмерной нейтронной кинетикой, приведено описание используемых программных комплексов, аттестованных для выполнения расчетов в обоснование безопасности. Поскольку программные комплексы КОРСАР/ГП и ТРАП-КС, математические модели и нодализационная схема реакторной установки являются исходным инструментом при выполнении работы, в главе приводится их краткое описание (применительно к коду КОРСАР/ГП, как основному).

Моделирование проводится на основе связанного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета. Теплогидравлический блок кода КОРСАР/ГП представлен одномерной схемой на основе полностью неравновесной (термически и механически) двухжидкостной модели с равными давлениями фаз. Используются по три уравнения сохранения для жидкой и паровой фазы: массы, энергии и импульса.

Нейтронно-физический расчет производится в трехмерном двухгрупповом диффузионном приближении с 6-ю группами запаздывающих нейтронов. Имеется возможность использования классической диффузионной модели и метода коррекции коэффициентов диффузии (метод Аскью-Такеда). Метод коррекции коэффициентов диффузии заключается в уточнении описания потоков вблизи границ областей с различными нейтронно-физическими свойствами. Уравнения для потока нейтронов в диффузионном приближении имеют вид (1)-(3).

Для решения уравнений (1)-(3) по пространству используется конечноразностный метод с 1, 6 или 24 расчетными узлами на тепловыделяющую сборку (ТВС) в плане (треугольная или квадратная сетка). Число расчетных узлов по длине ТВС может достигать до 30.

КОРСАР/ГП использует заранее подготовленные в результате расчетов библиотеки макроконстант. Эти библиотеки содержат значения макроконстант для каждого элемента активной зоны и отражателя для узловых значений параметров обратной связи (ПОС) по заданной шкале выгорания. Параметрическое пространство включает температуру топлива, концентрацию бора и плотность замедлителя. Библиотеки содержат значения макроконстант для точек пространства, координатами которых являются узловые значения ПОС. Значения макроконстант в каждой ноде в процессе счета определяются на основе многомерной линейной интерполяции.

$$\frac{1}{v_1} \cdot \frac{\partial \Phi_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1 \cdot \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_1 \cdot \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_1 \cdot \frac{\partial \Phi_1}{\partial z} \right) - (\Sigma_1 + \Sigma_R) \cdot \Phi_1 + (1 - \beta) \cdot (v_1 \Sigma_{f_1} \Phi_1 + v_2 \Sigma_{f_2} \Phi_2) + \sum_{\kappa=1}^6 \lambda_{\kappa} \cdot c_{\kappa} \quad (1)$$

$$\frac{1}{v_2} \cdot \frac{\partial \Phi_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_2 \cdot \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_2 \cdot \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_2 \cdot \frac{\partial \Phi_2}{\partial z} \right) - \Sigma_2 \Phi_2 + \Sigma_R \Phi_1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_{\kappa}}{\partial \tau} = \beta_{\kappa} \cdot (v_1 \Sigma_{f_1} \Phi_1 + v_2 \Sigma_{f_2} \Phi_2) - \lambda_{\kappa} \cdot c_{\kappa}, \quad \kappa = 1, \dots, 6 \quad (3)$$

- где τ – текущее время процесса, с;
 D – групповой коэффициент диффузии нейтронов в среде, см;
 Σ – полное групповое макроскопическое сечение поглощения нейтронов, 1/см;
 Σ_R – макроскопическое сечение рассеивания нейтронов из быстрой группы в тепловую, 1/см;
 $v \Sigma_f$ – макроскопическое групповое сечение деления нейтронов, умноженное на среднее число вторичных нейтронов, 1/см;
 Φ – групповая плотность нейтронного потока, 1/(см²·с);
 v – средняя групповая скорость нейтронов, см/с;
 c_{κ} – концентрация предшественников запаздывающих нейтронов к-ой группы, 1/см³;
 λ_{κ} – постоянная распада предшественников к-ой группы запаздывающих нейтронов, 1/с;
 β_{κ} – доля предшественников к-ой группы запаздывающих нейтронов в данном цикле деления;
 β – суммарная доля запаздывающих нейтронов.

Моделируется реакторная установка и два контура циркуляции теплоносителя. Нодализионная схема реактора и оборудования первого контура показана на рисунке 1. Более полное описание модели, включая обоснование нодализации и примеры использования, содержится в материалах диссертационной работы И.Г Петкевича, выполненной под руководством автора.

Далее в Главе 1 приводятся описание комплекса ТРАП-КС и результаты валидации и кросс-верификации этого кода для расчетов аварий класса RIA⁴ с применением модели трехмерной нейтронной кинетики. На примере решения задач валидации автором демонстрируются возможности модели трехмерной кинетики и обосновываются значения погрешности моделирования.

⁴ Исходные события с изменением реактивности и поля энерговыделения, являются определяющими для обоснования маневренных режимов.

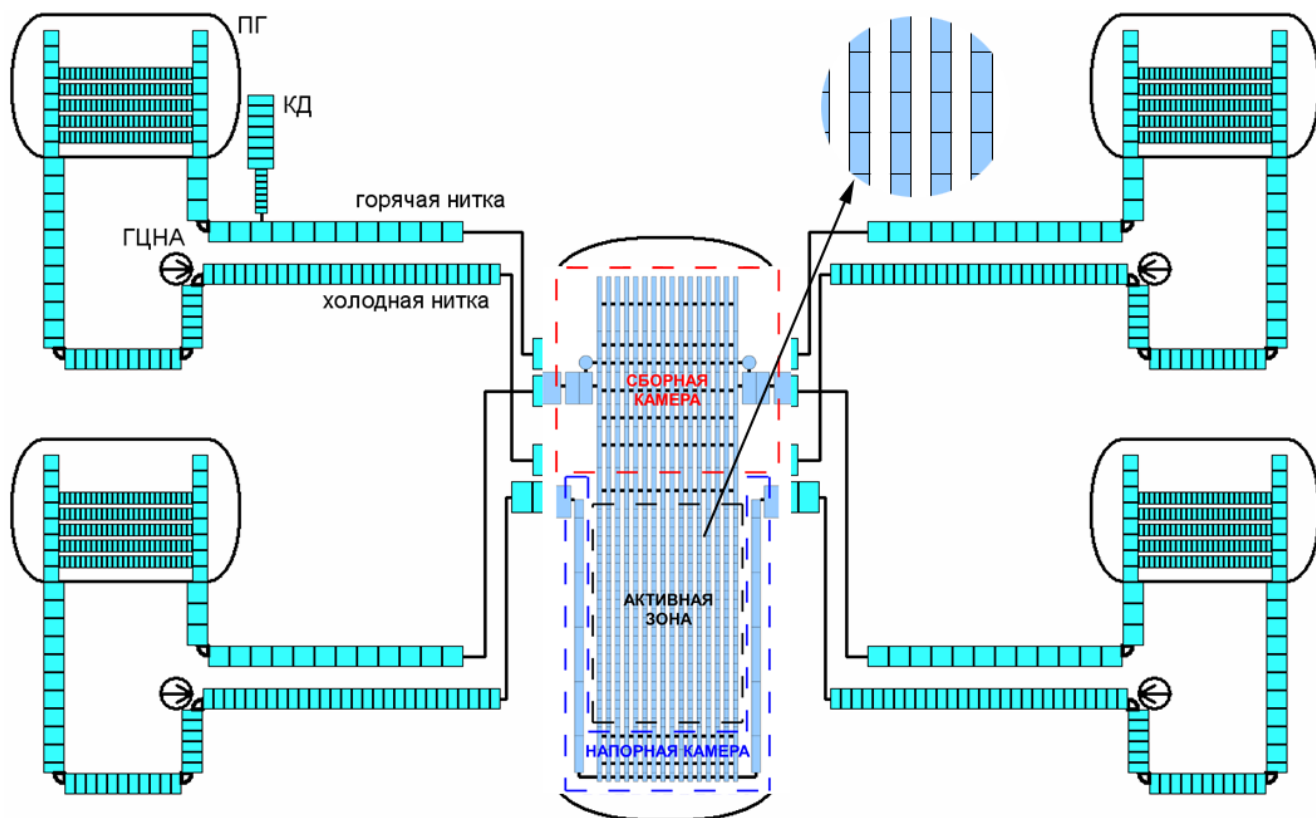


Рис. 1 – Расчетная схема главного циркуляционного контура. Компенсатор давления (КД) показан уменьшенным, входные и выходные патрубки разнесены по высоте

Далее в Главе 1 описывается распределенная математическая модель для нейтронно-физической части связанного расчета (детализация до уровня тепловыделяющего элемента). Показаны важные особенности применения данной модели для анализов безопасности с учетом режимов маневрирования мощностью. Более полное описание модели, включая ее обоснование, содержится в материалах диссертационной работы А.И. Конюховой, выполненной под руководством автора. Данная модель представляет собой обособленное направление, одним из задач которого является практическое применение на основе результатов настоящей работы.

В завершающей части Главы 1 приводится краткое описание алгоритмов и области применения программ GORYN/GP и UGRA/GP, разработка которых была выполнена по инициативе и при непосредственном участии автора (использовался язык программирования Python 3). Предназначение данных программ указано в разделе «основные положения, выносимые на защиту».

Результаты Главы 1 представляют собой общую базу для дальнейших исследований, рассматриваемых в настоящей работе (Главы 2-5) по математическому моделированию маневренных режимов в части нодализационных схем, численных моделей, средств анализа расчетных данных.

Во второй главе приводится описание новых элементов математической модели реакторной установки, специально разработанных для учета специфики маневренных режимов: модель расчета коэффициентов реактивности в динамическом процессе и алгоритм подключения внешнего модуля основных регуляторов.

В начале Главы 2 даются общие определения, перечисляются основные типы режимов маневрирования (суточное, первичное регулирование частоты, следование за нагрузкой и т.д.) и приводятся основные причины, по которым требуется изменение математической модели и алгоритмов численного моделирования. Показано, что должны рассматриваться новые статические программы регулирования и повышенные скорости изменения нагрузки, реализуемые за счет всех доступных средств воздействия на реактивность: органы регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), операции водообмена, температурное регулирование.

Коэффициенты реактивности являются важнейшими динамическими характеристиками активной зоны, определяющими темп изменения реактивности в зависимости от физических параметров. В модели трехмерной нейтронной кинетики требуемые значения коэффициентов реактивности достигаются путем корректировки библиотеки макроскопических констант. Обеспечение требуемых значений коэффициентов реактивности принципиально важно для соблюдения консервативного подхода при анализе аварий и обоснования возможных отклонений реальных топливных загрузок от рассмотренных в проекте.

В основу математической модели для оценки коэффициентов реактивности заложено конечно-разностное представление производной при малом изменении параметра. По определению коэффициент реактивности α_X по некоторому параметру X есть частная производная реактивности. Конечно-разностное

представление
$$\alpha_X = \frac{\partial \rho}{\partial X} = \frac{\rho(X_i + \Delta X) - \rho(X_i)}{\Delta X}; \quad \frac{dP_j(t)}{dt} = 0 \quad \forall j \in [1, N_{par}]$$
 дает

модель оценки ее величину при малом приращении этого аргумента ΔX . Реализация данного подхода состоит из двух этапов. На первом из них производится вычисление макроконстант на изначально заданной сетке ПОС. Затем начинается связанный расчет динамики. На втором этапе узловые значения сетки ПОС получают малое приращение для выбранного параметра обратной связи, вычисление макроконстант повторяется для новой сетки. Связанный расчет запускается на продолжение на несколько расчетных шагов с обновленной библиотекой. Значения $P_j(t)$ для N_{par} теплогидравлических параметров на эти несколько шагов фиксируются, чтобы не допустить возмущения реактивности за счет их изменения. Вычисляется приращение реактивности и коэффициент реактивности, после чего связанный расчет динамики продолжается.

Для разработанной модели были исследованы вопросы зависимости погрешности от величины приращения аргумента (рисунок 2) и выбора оптимального шага изменения аргумента (рисунок 3). Верификация модели выполнялась с применением прецизионных расчетов коэффициентов реактивности с помощью аттестованных кодов нейтронно-физического расчета.

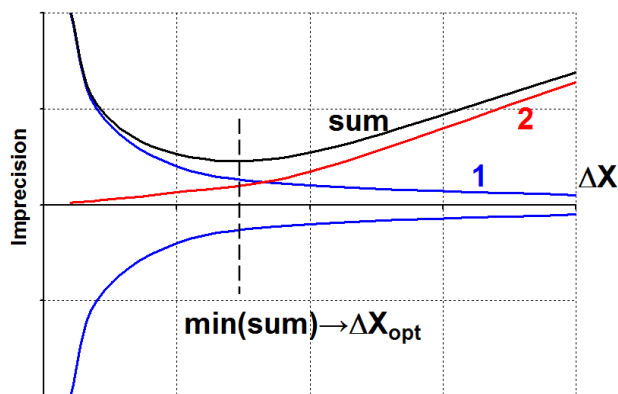


Рис. 2. — Модель выбора приращения аргумента. 1 — огибающая вычислительной погрешности, 2 — погрешность конечно-разностной схемы, sum — суммарная погрешность.

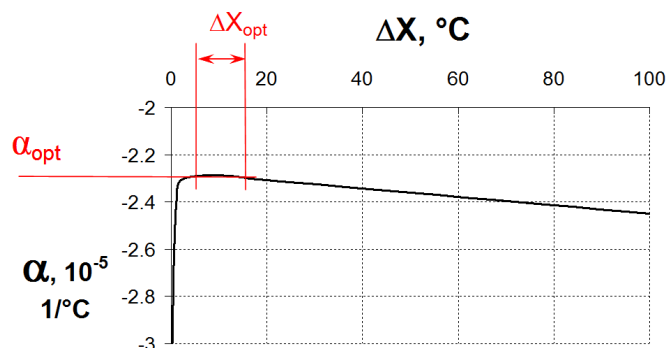


Рис. 3 — Выбор оптимального шага изменения параметра и оценка соответствующего значения коэффициента реактивности на примере температурного эффекта по топливу

Принципиальной новизной модели является оценка коэффициентов реактивности непосредственно в динамическом расчете. Это позволяет реализовывать состояние с требуемым значением коэффициента в момент возникновения аварии при моделировании маневренного режима. Для предложенного метода были проведены исследования области применения и сформулированы необходимые ограничения. Разработанная модель вычисления коэффициентов реактивности была заложена в основу алгоритмов программ UGRA/GP и SHEGRA/GP.

Алгоритм подключения внешнего модуля основных регуляторов разрабатывался с целью моделирования маневренных режимов в соответствии с фактически действующими алгоритмами энергоблоков АЭС. Путем валидации (Глава 4) было показано, что таким образом можно значительно повысить точность расчета параметров, важных для обоснования безопасности.

При подключении модуля регуляторов реализована технология, позволяющая обходиться без перекомпиляции используемых кодов. С точки зрения внешнего подключения, модуль регуляторов представляет собой программный блок, имеющий определенный набор входных параметров (давление, температура, нейтронная мощность и т.д.) и вычисляющий в процессе однократного выполнения своего алгоритма определенный набор выходных параметров (положение регулирующих групп, клапанов и т.д.). В исполняемые файлы кодов ТРАП-КС и КОРСАР/ГП была введена подпрограмма обмена данными с модулем

регуляторов посредством динамической библиотеки FMAIN.DLL (разрабатывается специалистами АСУ ТП). Частота обращения к модулю регуляторов совпадает с расчетным шагом по времени. При каждом обращении алгоритм модуля регулирования производит однократное выполнение. Для каждого из используемых кодов были разработаны протоколы обмена данными по входным и выходным параметрам.

Для комплекса ТРАП-КС исходные данные по моделированию динамики задаются таблично по времени. Поскольку внесение изменений в расчетные блоки аттестованного кода не допустимо, был разработан принцип подключения, затрагивающий только процедуры ввода-вывода (принцип «бегущей таблицы»). Суть подхода состоит в том, что параметр в исходных данных задается в виде таблицы из двух точек. Первое значение параметра (соответствующее моменту 0.0 сек.) остается неизменным, а второе значение на каждом шаге по времени обновляется в соответствии с полученным значением из модуля регуляторов. Точка по времени при этом также на каждой операции обмена принимает значение на один шаг интегрирования больше текущего значения времени. Такой подход позволяет присваивать значения, полученные от модуля регуляторов, таблично задаваемым параметрам кода ТРАП-КС без нарушения алгоритма их вычисления в коде. Для кода КОРСАР/ТП подключение модуля регуляторов осуществлено с помощью имеющейся функции внешнего обмена. Протоколы обмена данными реализованы за счет встроенного языка DLC и специально созданного служебного массива в базовом наборе исходных данных.

Апробация разработанных алгоритмов для подключения внешних модулей основных регуляторов и обоснование достоверности результатов были выполнены за счет кросс-верификации и валидации по результатам натуральных экспериментов.

Третья глава посвящена разработке методов и алгоритмов обоснования безопасности с учетом маневренных режимов. Вначале приводятся результаты анализа влияния на маневренные режимы со стороны ксеноновых процессов, которые рассматриваются с позиции наложения дополнительного источника колебаний на график внешней нагрузки реактора. Численно исследуется задача суперпозиции колебаний и возможности возникновения биений.

Далее в Главе 3 приводятся результаты поисковых исследований в части метода для выбора времени возникновения исходного события. Показывается возможность применения модели полиномиальной регрессии для прогнозирования значения искомого момента времени. Модель строится на основе разложения важных для безопасности параметров по характеристикам маневренных режимов, численные коэффициенты полинома определяются на основе итерационного алгоритма, построенного на методе парабол.

Следующим вопросом, рассматриваемым в Главе 3, является разработка динамического run-time метода для определения искомого момента времени t_0 , в который постулируется возникновение исходного события. Метод основан на модели ненулевой динамики реакторной установки $\frac{df_i(t_0)}{dt} \neq 0 \quad \forall t_0$ для всей совокупности моделируемых параметров. Выбор t_0 выполняется путем анализа значений определяющих параметров, и значения скорости их изменения под специфику рассматриваемого исходного события. Пояснение сути метода run-time показано на рисунке 4. На основе всех полученных результатов исследований был разработан комплексный метод обоснования безопасности реакторов ВВЭР в маневренных режимах, который будет основным инструментом в дальнейшем. Метод включает следующие модели и алгоритмы.

1. Модифицированная модель «горячих струй». Модель активной зоны использует детализацию активной зоны до уровня ТВС. Для учета неравномерности энерговыделения внутри ТВС (по твэлам) в расчетную схему добавляются так называемые «горячие струи» - фиктивные каналы с граничными условиями по давлению и температуре, соответствующими выбранным наиболее теплонапряженным ТВС. Поле энерговыделения в «горячих струях» интегрально увеличивается с сохранением формы таким образом, чтобы соответствовать наиболее теплонапряженному твэлу выбранной ТВС. Увеличение достигается за счет повышающего коэффициента K_{HC} , определяемого с учетом коэффициентов неравномерности K_r . Модифицированная модель представляется в виде $K_{HC} = f(W, H_i) \quad \forall i \in [N_{CR} - N_{reg}, N_{CR}]$ как функция мощности и положения N_{reg} групп ОР СУЗ по данным нейтронно-физического стационарного расчета с потвэльной детализацией (рисунок 5).

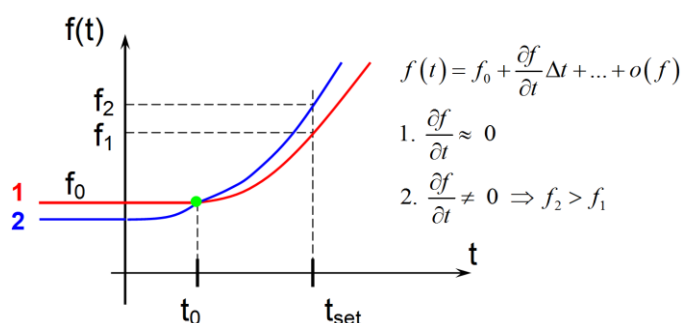


Рис. 4. – Пояснение метода run-time для изменения параметра f . 1 – стационарное исходное состояние, 2 – динамическое исходное состояние, t_{set} – время срабатывания защиты.

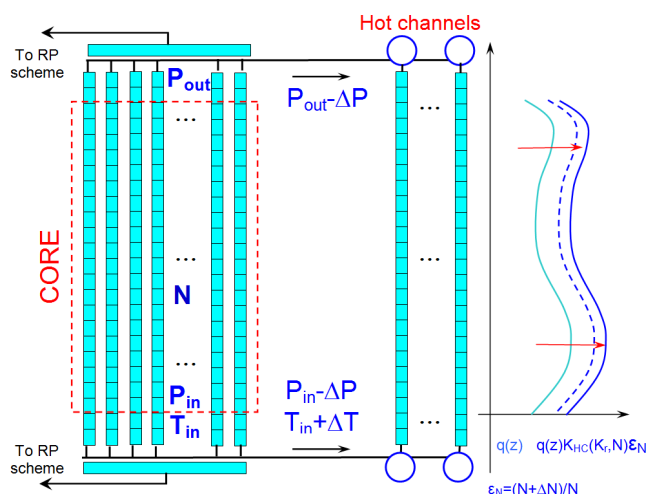


Рис. 5 – Модификация модели «горячих струй»

2. Алгоритм корректировки сетки ПОС с исключением скачка реактивности. Главная проблема в случае маневренных режимов заключается в том, что изменение сетки параметров обратной связи под заданное значение коэффициентов реактивности в момент возникновения исходного события (аварии) приведет к скачкообразному изменению реактивности (в момент исходного события произойдет переопределение макроконстант под измененную сетку параметров). Для исключения этого эффекта был предложен следующий алгоритм. Для корректировки значений ПОС используется уравнение (4).

$$U_{i,1}^{FB} = U_{i,0}^{FB} \cdot (1 - \varepsilon_{FB}) + U_{fix}^{FB} \cdot \varepsilon_{FB} \quad (4)$$

В формуле (4) $U_{i,0}^{FB}$ и $U_{i,1}^{FB}$ обозначают, соответственно, старое и новое значения параметров обратной связи в i -м узле параметрической оси, U_{fix}^{FB} – рабочая точка, значение параметра обратной связи, относительно которого производится изменение сетки, ε_{FB} – относительная величина изменения сетки, определяющая изменение коэффициента реактивности. Положительное значение ε_{FB} означает ужесточение обратной связи, отрицательное значение ε_{FB} – ослабление.

Цель алгоритма – определение рабочей точки, при которой общий эффект изменения реактивности окажется близким к нулю до заданного порядка малости. Используется факт единственности искомой рабочей точки, что позволяет применить метод дихотомии, дополняя его на каждой итерации вычислением значения ε_{FB} , соответствующего заданному коэффициенту реактивности, методом касательных. Выбираются два значения U_{fix1}^{FB} и U_{fix2}^{FB} так, что изменение реактивности относительно значения ρ_0 в выбранный момент времени $\rho(U_{fix1}^{FB}) - \rho_0 > 0$ и $\rho(U_{fix2}^{FB}) - \rho_0 < 0$. Затем вычисляется $U_{fix0}^{FB} = \frac{U_{fix1}^{FB} + U_{fix2}^{FB}}{2}$ и анализируется $(\rho(U_{fix0}^{FB}) - \rho_0)$. Если выполняется условие $\rho(U_{fix0}^{FB}) - \rho_0 > 0$, то производится присвоение $U_{fix1}^{FB} \equiv U_{fix0}^{FB}$ и цикл повторяется. Если выполняется условие $\rho(U_{fix0}^{FB}) - \rho_0 < 0$, то производится присвоение $U_{fix2}^{FB} \equiv U_{fix0}^{FB}$ и цикл также повторяется. Практическая реализация метода показала высокую (не более 10 итераций) сходимость к искомой рабочей точке (рисунок 6).

Алгоритм был реализован в виде объектно-ориентированного программного комплекса SHEGRA/GP на языке C++. Входными данными являются исходная (некорректированная) библиотека макроконстант, отклоненные значения коэффициентов реактивности, результаты расчета невозмущенного состояния по коду связанного расчета. На выходе программа для ЭВМ «SHEGRA/GP» вычисляет массив откорректированных узловых значений сетки ПОС.

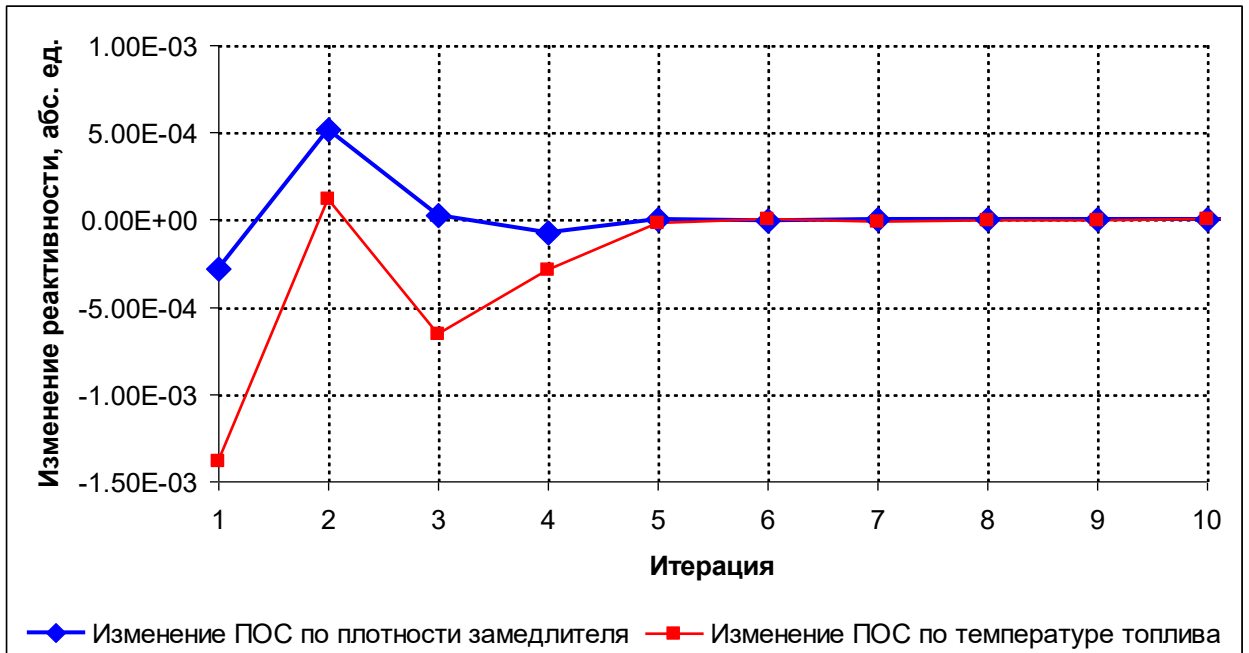


Рис. 6 – Сходимость метода корректировки для сетки параметров обратной связи

3. Выбор определяющих исходных событий и времени их возникновения на основе метода run-time.

4. Моделирование маневренных режимов до и после возникновения исходного события с учетом единичного отказа или ошибки оператора.

В заключение в Главе 3 приводятся результаты апробации комплексного метода для обоснования безопасности испытаний действующего реактора ВВЭР большой мощности. Показано соответствие следующим критериям:

- полное сохранение принципов консервативного подхода, применяемого в анализах безопасности РУ ВВЭР;
- учет важных для безопасности особенностей физики и динамики реактора при реализации режима маневрирования мощностью.

Блок-схема комплексного метода показана на рисунке 7.

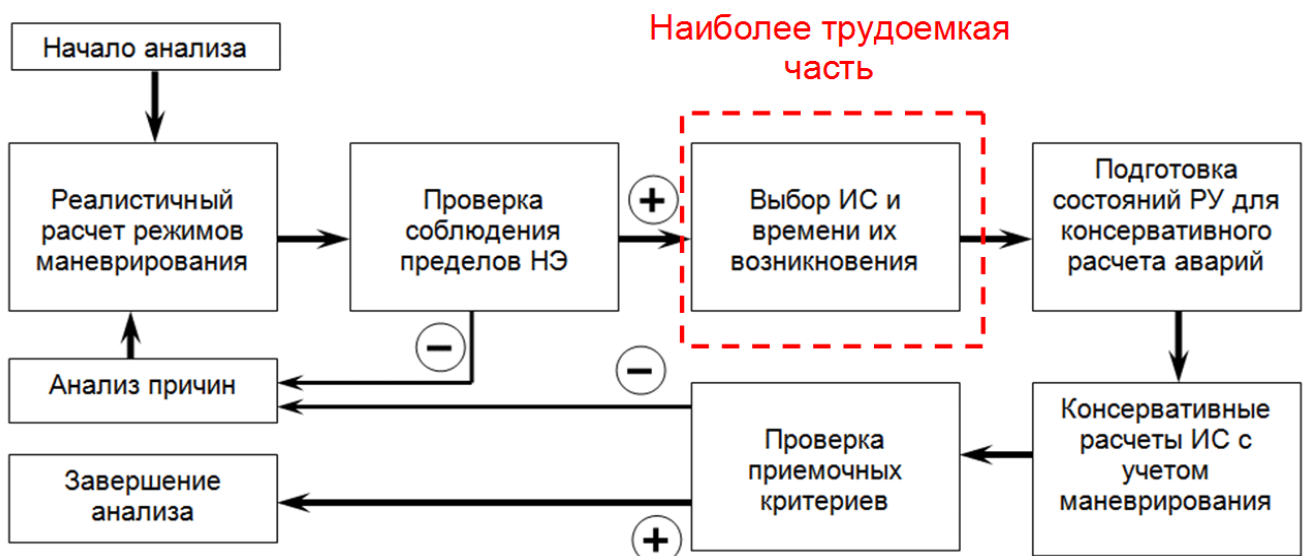


Рис. 7 – Блок-схема комплексного динамического метода

В четвертой главе приведены разработанные методы и алгоритмы валидации моделей и интерпретации экспериментов с работой реактора в маневренных режимах. В начале Главы 4 описываются алгоритмы расчета и предтестовые результаты моделирования испытаний реактора ВВЭР в суточном графике несения нагрузки (10 суток с разгрузкой сначала до 71%, затем до 46 % от номинальной нейтронной мощности). В процессе расчетного моделирования была подтверждена возможность проведения испытаний без нарушения эксплуатационных пределов по локальным параметрам энерговыделения. Также был сформирован весь объем исходных состояний РУ для использования при выполнении обоснования безопасности испытаний (анализ аварий). Пример моделирования показан на рисунке 8, где приведено давление в главном паровом коллекторе и границы зоны нечувствительности автоматического регулятора мощности, которые изменяются в зависимости от этапа маневрирования.

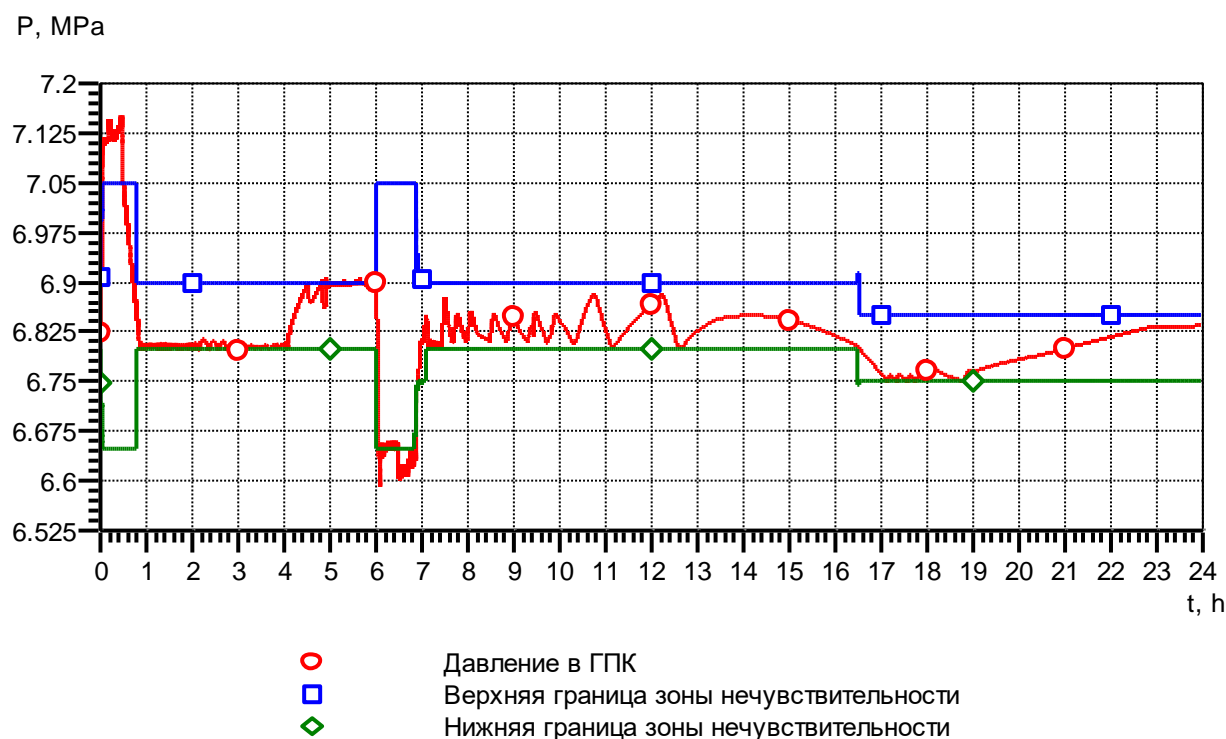


Рис. 8 – Изменение давления в главном паровом коллекторе в процессе суточного графика несения нагрузки по результатам связанного расчетного моделирования

Дополнительным результатом предтестового моделирования являются несколько методов ускорения счета, предложенных для повышения производительности вычислений. Одним из методов являлся принцип распараллеливания маневренных циклов с учетом динамики ксеноновых процессов. Первоначально рассчитывается первый суточный цикл, затем из исходного состояния РУ на момент завершения первого цикла выполняются расчеты последующих суточных циклов с тем же уровнем разгрузки. При использовании данного подхода необходимое для расчетов машинное время было

сокращено примерно на 60%, но при сопутствующем увеличении погрешности. Поэтому был предложен и верифицирован метод ускорения на основе теории подобия нестационарных процессов.

В его основе лежит принцип, суть которого состоит в изменении постоянных времени медленных процессов в несколько раз (коэффициент ускорения), оставляя величину шага по времени расчетного кода неизменной. Особенности суточного маневрирования таковы, что на значительных отрезках времени переходные процессы протекают сравнительно медленно. Изменив постоянные времени йода и ксенона, а также скорости управляющих воздействий регуляторов, можно получить на сокращенном интервале расчетного времени моделирование состояния РУ на длительном интервале. Трансформация результатов, полученных на сокращенном интервале времени, к фактической шкале времени происходит путем перезаписи выходного файла с умножением шага интегрирования по времени на величину ускоряющего коэффициента (реализовано программно в комплексе GORYN/GP).

Путем многовариантных расчетов были определены интервалы маневренных режимов, где использование данного метода дает ускорение счета до 10 раз без практически значимого увеличения погрешности. Обоснование критериев выбора для коэффициента ускорения выполнялись на основе валидации (сравнение с экспериментами) и кросс-верификации (сравнение с расчетами по тем же программным комплексам без ускорения).

В следующей части Главы 4 описываются результаты валидации и специализированные методы расчета погрешности и оценки точности численного моделирования. Вначале выполняется качественное сопоставление результатов расчета и эксперимента. Это необходимо для валидации предтестовых расчетов. Был предложен и апробирован критерий, позволяющий дать оценку точности моделирования. Математическая модель, заложенная в основу критерия, основана на вычислении времени реакции регулируемого параметра после управляющего воздействия регулятора по данным эксперимента и проверки аналогичного расчетного времени на предмет попадания в заданную окрестность экспериментального значения.

Далее проводится основная практически значимая часть валидации, основанная на посттестовых расчетах. Посттестовое моделирование учитывает ряд факторов, которые имели место в натурном эксперименте: точное определение моментов начала этапов испытаний, управляющих действий оператора, фактическое значение технологических параметров и т.д. В общем случае задача вычисления погрешности сводится к определению отклонения экспериментальных и расчетных величин, определенных как массив значений в заданных точках по шкале времени, причем указанные абсциссы по времени для

расчета и эксперимента различны. Задача решается путем введения понятия метрики точности для двух анализируемых массивов данных.

Предлагается три основных метода определения такой метрики:

1. Метод доминирования экспериментальной точки. Отклонение между расчетом и экспериментом вычисляется для каждого экспериментального значения из условий линейной интерполяции ближайших расчетных данных.

2. Метод скользящего среднего. Отклонение вычисляется на основе сравнения с заданным конечным числом экспериментальных значений.

3. Метод определения доверительного интервала. Для статистически значимого числа значений эксперимента и расчета (целевые массивы) определяется отклонение по методу доминирования экспериментальной точки, и определяются параметрические характеристики распределения для всей совокупности. При движении по шкале времени происходит поочередное замещение элементов целевых массивов.

Все три метода расчета были реализованы в специальном программном комплексе DVINA/GP на языке C++. Внешний вид программного комплекса DVINA/GP и его практическое применение для валидации проиллюстрирован на рисунке 9. Основными компонентами программного комплекса, (отмечены на рисунке цифрами 1-7), являются: блок выбора исходных данных (1); блок выбора диапазона времени для валидации (2); блок выбора одного из 3-х методов валидации (3); метка вывода погрешности (4); блок ввода переменных для метода валидации (5); опция включения режима отображения (6); блок отображения графиков валидируемых данных и погрешности (7).

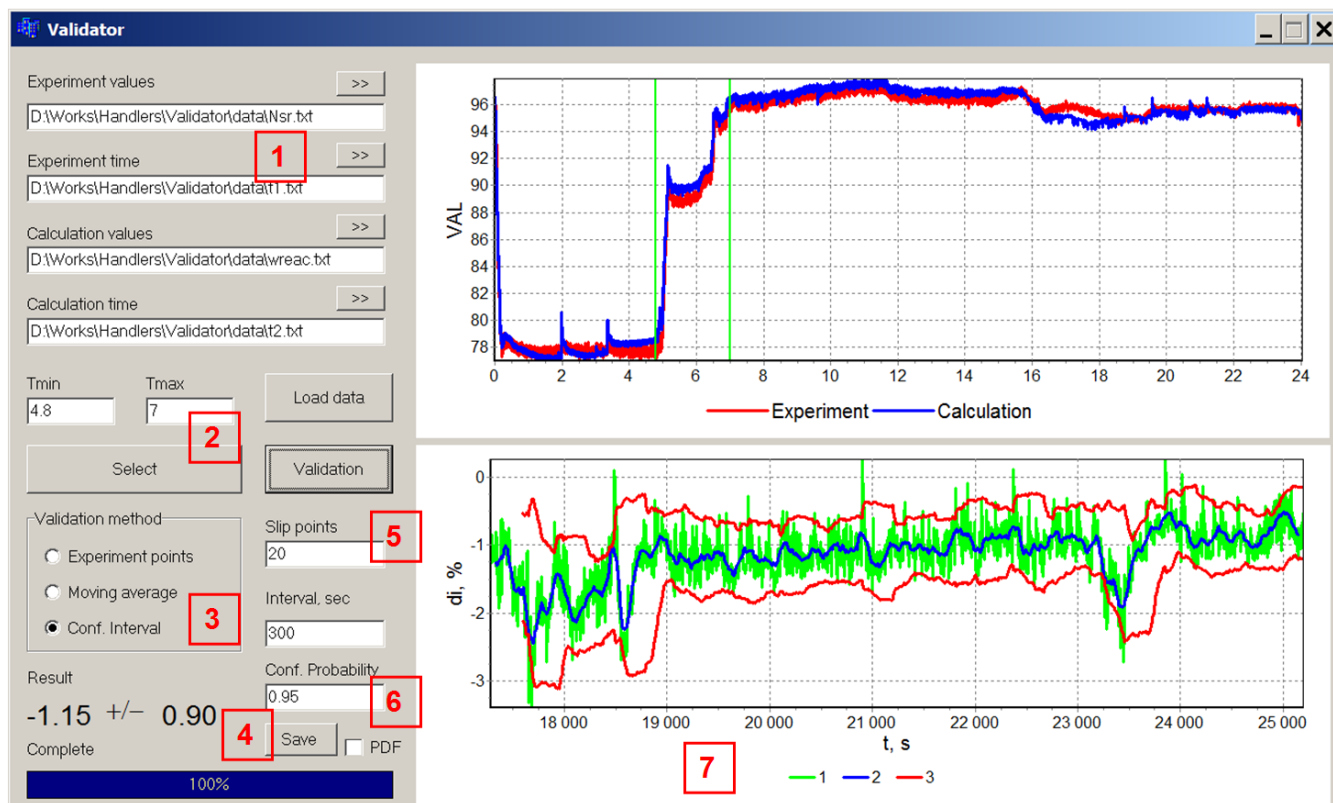


Рис. 9 – Общий вид программного комплекса DVINA/GP

На основе накопленного опыта валидации предложен новый математический метод интерпретации натурального эксперимента по маневрированию реактором на основе модели с машинным обучением. Далее в Главе 4 приводится описание этого метода и его реализации для программы DVINA/GP. Примененный метод машинного обучения дает возможность определения погрешности в условиях малого количества имеющихся экспериментальных данных за счет использования физических особенностей протекающих процессов. Основой метода служит выделение пространственной и временной составляющих ксеноновых процессов и основных средств воздействия на реактивность.

Вводятся $H_{CR}(z,t)$ - относительное положение регулирующей группы органов СУЗ в зависимости от времени и аксиальной координаты, $C_B(t)$ - концентрация борной кислоты в зависимости от времени, $\rho_{Xe}(\vec{r},t)$ - пространственно-временное распределение концентрации ксенона в активной зоне. Используется классификация экспериментов, представленная в Таблице 1. Для примера, взяты 3 широко известных эксперимента на реакторах ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Для каждого эксперимента строится модель действия обратных связей.

Таблица 1 – Классификация экспериментов по средствам воздействия на реактивность (знак «+» означает, что изменение параметра в эксперименте происходило, «-» – не происходило)

№	Параметр			Краткое описание	Модель действия обратных связей
	$C_B(t)$	$H_{CR}(z,t)$	$W(t)$		
1	+	+	-	Энергоблок ВВЭР-1000, момент кампании 30 эффективных суток, время процесса – 30 часов.	
2	+	-	+	Энергоблок ВВЭР-1000, момент кампании 80 эффективных суток, время процесса – 50 часов.	
3	-	+	+	Энергоблок ВВЭР-1200, момент кампании 280 эффективных суток, время процесса – 5 часов.	

Рассматриваются интервалы Δt_i , каждый из которых соответствует выбранному периоду эксперимента, либо полностью, либо по частям, один интервал за другим. На каждом интервале определяются относительные изменения трех параметров - концентрации бора, положения ОР СУЗ и нейтронной мощности (ΔC_i , ΔH_i , ΔW_i соответственно). Вычисление происходит как отношение абсолютной разницы между максимальным и минимальным

значением на интервале к некоторому базовому значению. Задаются коэффициенты обратной связи δ_{i1} , δ_{i2} , δ_{i3} по трем рассматриваемым параметрам, отражающие действие или отсутствие действия обратной связи по соответствующему параметру.

В комплексе КОРСАР/ГП численное решение дифференциальных уравнений на некотором шаге проводится по значению нейтронного потока, полученного по результатам расчета предыдущего шага. Используется линейная зависимость сечения поглощения $\Sigma_a = \Sigma_a^0 + \alpha \Sigma_a^{Xe}$ в зависимости от макроскопического сечения поглощения ксенона Σ_a^{Xe} в каждом расчетном объеме активной зоны, базового макроскопического сечения Σ_a^0 (определяется по параметрической библиотеке констант), и некоторого коэффициента пропорциональности α .

Алгоритм машинного обучения реализуется на основе двух матриц исходных данных (аргументов) \mathbf{X} и \mathbf{FB} , характеризующих проходящие процессы (5).

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \Delta C_1 & \Delta H_1 & \Delta W_1 \\ \Delta C_2 & \Delta H_2 & \Delta W_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta C_N & \Delta H_N & \Delta W_N \end{pmatrix}; \quad \mathbf{FB} = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{21} & \dots & \delta_{N1} \\ \delta_{12} & \delta_{22} & \dots & \delta_{N2} \\ \delta_{13} & \delta_{23} & \dots & \delta_{N3} \end{pmatrix} \quad (5)$$

В матрицах \mathbf{X} и \mathbf{FB} значение N - объем полученной выборки интервалов времени для экспериментальных данных. Далее определяется вектор действия обратных связей \bar{f} , элементами которого будет главная диагональ произведения матриц. Компоненты вектора \bar{f} фактически являются эффективными показателями действия обратной связи по всем трем параметрам. Далее задается вектор интервалов времени $\bar{\tau}$, компонентами которого будут рассмотренные интервалы времени, отнесенные к периоду полураспада ксенона. Рассматриваемый вектор погрешностей некоторой величины, характеризующей поле энерговыделения, \bar{E} представляется как линейная комбинация векторов \bar{f} и $\bar{\tau}$ в виде (6).

$$\bar{E} = \lambda_0 \bar{e} + \lambda_1 \bar{f} + \lambda_2 \bar{\tau} \quad (6)$$

В выражении (6) первое слагаемое – некоторая постоянная составляющая погрешности кода, не зависящая от модели расчета концентрации ксенона, \bar{e} - единичный вектор. Второе слагаемое отвечает за погрешность, вносимую за счет действия обратной связи с регуляторами, т.е. изменение Σ_a^0 . Третье слагаемое определяется погрешностью численного решения дифференциального уравнения для концентрации ксенона и характеризует погрешность Σ_a^{Xe} в модели кода КОРСАР/ГП. В итоге формулируется следующая задача. На основе исходных

данных, представленных в виде матриц \mathbf{X} и \mathbf{FB} , которые характеризуют работу реактора в реальных процессах (экспериментах), и соответствующих этим процессам погрешностей расчетной модели $\bar{\varepsilon}$ найти наилучшее приближение для коэффициентов разложения λ_0 , λ_1 и λ_2 . Решение поставленной задачи осуществляется путем машинного обучения взятой за основу модели линейной регрессии. Определяется величина невязки $\sigma(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2)$, как сумма квадратов отклонений точного решения от приближенного (7).

$$\sigma(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_{0i} - \lambda_0 - \lambda_1 f_i - \lambda_2 t_i)^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

Точное решение $\bar{\varepsilon}_0$ известно как результат валидации по данным использованных экспериментов. Задача нахождения коэффициентов разложения сводится к поиску минимума невязки. В итоге, получается система линейных алгебраических уравнений (8), которая представляется в матричном виде и решается численно любым известным методом.

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2)}{\partial \lambda_0} = 0 \\ \frac{\partial \sigma(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2)}{\partial \lambda_1} = 0 \\ \frac{\partial \sigma(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2)}{\partial \lambda_2} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^N \varepsilon_{0i} = \lambda_0 + \lambda_1 \sum_{i=1}^N f_i + \lambda_2 \sum_{i=1}^N t_i \\ \sum_{i=1}^N \varepsilon_{0i} f_i = \lambda_0 \sum_{i=1}^N f_i + \lambda_1 \sum_{i=1}^N f_i^2 + \lambda_2 \sum_{i=1}^N f_i t_i \\ \sum_{i=1}^N \varepsilon_{0i} t_i = \lambda_0 \sum_{i=1}^N t_i + \lambda_1 \sum_{i=1}^N f_i t_i + \lambda_2 \sum_{i=1}^N t_i^2 \end{cases} \quad (8)$$

Основные преимущества предложенного метода интерпретации экспериментальных данных заключаются в следующем:

- погрешность расчета для экспериментально непроверенных алгоритмов маневрирования, вычисляется на основе имеющихся экспериментальных данных для других алгоритмов за счет модели, построенной на физических принципах протекающих процессов;

- за счет машинного обучения реализуется использование неограниченного массива экспериментов для оценки точности моделируемого процесса;

- разработанный алгоритм позволяет выполнять сравнительный анализ различных моделей подготовки малогрупповых констант для связанных расчетов.

В пятой главе показан пример практического использования разработанного комплексного метода для обоснования безопасности маневренных режимов. На основе полученных результатов определена задача о повышении эффективности производимых вычислений и предложено ее решение за счет дополнения математическими моделями предиктивного анализа, построенными с использованием технологий искусственного интеллекта.

Результаты обоснования безопасности испытаний для энергоблоков Нововоронежской АЭС-2 и Ленинградской АЭС-2, выполненные на основе разработанного метода, позволили получить разрешение Ростехнадзора и провести их в полном объеме. Поскольку применялись обновленные алгоритмы маневрирования, а в случае Ленинградской АЭС-2 также использовалась модернизированная система подпитки-продувки, выполняемая задача в части расчетного обоснования была выполнена в практике РУ ВВЭР впервые. Разработанный метод и полученные результаты были приняты эксплуатирующей организацией и надзорными органами, а также представлены на международном уровне среди потенциальных потребителей технологии ВВЭР. Пример результатов анализа безопасности с учетом маневренных режимов показан на рисунке 10.

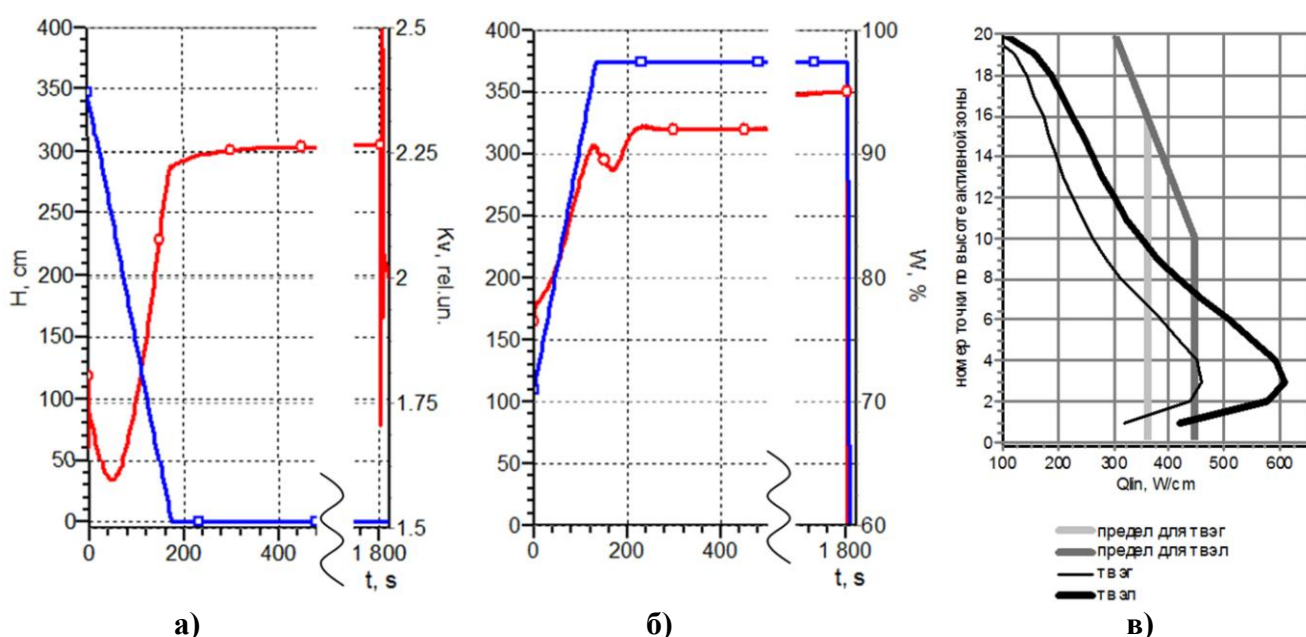


Рис. 10 – Моделирование аварийных процессов. Показан коэффициент неравномерности энерговыделения при нерегулируемом погружении группы ОР СУЗ (а) на этапе нагрузки энергоблока (б) с ошибочным действием оператора по переключению регулятора мощности (в)

По результатам апробации комплексного метода в числе методических компонент математической модели, нацеленных на получение представительных результатов и имеющих влияние на безопасность, выделены следующие:

- моделирование динамического состояния реакторной установки на момент возникновения постулируемых исходных событий и учет маневренной динамики после него;
- учет ошибки оператора в качестве соблюдения принципа единичного отказа;
- специфические сценарии аварийных процессов, связанных с исходными событиями из категории с изменением реактивности и распределения энерговыделения;
- учет защит по локальным параметрам энерговыделения;

- внедрение современных информационных технологий в практику обоснования безопасности в качестве инструментов работы с большими объемами данных и многофакторного анализа.

Опыт использования также обозначил и наиболее трудоемкую часть комплексного метода: экспертная оценка по выбору исходных состояний РУ на момент возникновения аварии (соответствующий блок выделен на рисунке 7) и моделирование сценариев с ошибкой оператора, как эмпирически определяемым элементом. Эти процедуры приводят к зависимости результата от конкретного экспертного мнения и большому количеству возможных вариантов решения.

Решение обозначенной проблемы было предложено реализовать на основе использования нейронной сети, как прогнозирующей математической модели, основанной на использовании уже имеющихся данных. На первом этапе для тестирования был выбран быстропротекающий режим с выбросом ОР СУЗ. В этом случае определяющими характеристиками аварийного процесса являются значения основных параметров и скорости их изменения на момент возникновения исходного события. Была построена простая нейронная сеть прямого распространения (рисунок 11). Входными сигналами служили значения определяющих параметров на момент возникновения исходного события, на выходе определялся момент времени его возникновения. Использовались перевод входного и эталонного массивов в единичный интервал и классическая сигмоидальная функция активации. Обучение выполнялось на основе метода обратного распространения ошибки.

На рисунке 12 показан пример работы нейронной сети по выбору момента возникновения аварии t_0 . Показаны реактивность (1), аксиальный офсет (2) и мощность (3). Дополнительным плюсом разработанного метода является возможность пороговой фильтрации выходного сигнала, что позволяет сужать сделанный выбор исходных состояний до разумного количества наиболее представительных вариантов.

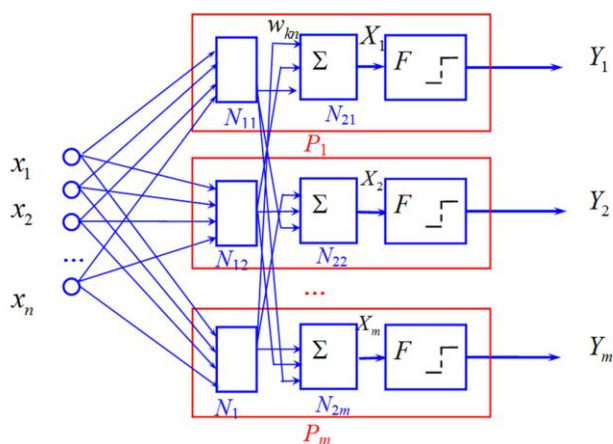


Рис. 11 – Схема нейронной сети прямого распространения

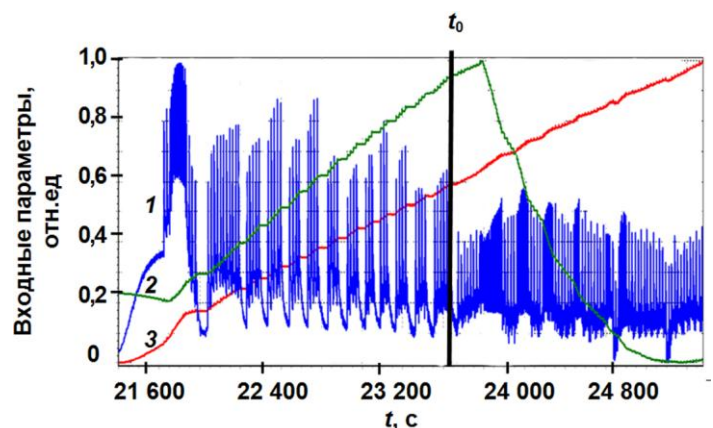


Рис. 12 – Пример выбора момента возникновения исходного события «Выброс ОР СУЗ» нейронной сетью

Примененная модель нейронной сети позволила добиться хорошей эффективности для быстропротекающих процессов. При этом результаты анализов безопасности показывали, что наибольшую значимость имеют все же продолжительные аварийные режимы, такие как непреднамеренное разбавление теплоносителя, извлечение группы ОР СУЗ или срабатывание паросбросных устройств второго контура. В этом случае хода аварийного процесса определяется полной предысторией динамики реактора в процессе маневрирования мощностью. Поэтому было принято решение о построении полноценной предиктивной модели. Постановка задачи была сделана следующая. Необходимо разработать модель нейронной сети, входными данными которой является группа наиболее представительных параметров реакторной установки, реализующихся в процессе маневрирования мощностью в зафиксированном интервале времени. Правая граница интервала является временем начала заданного аварийного процесса (возникновения исходного события). На основе анализа входных данных модель дает прогнозируемое динамическое изменение в аварийном процессе одного или нескольких параметров, определенных в качестве критериев для анализа безопасности.

Поставленная задача, относится к задачам прогнозирования поведения многопараметрических нелинейных динамических систем. Для решения была предложена двухкомпонентная нейронная сеть. Первый блок модели был реализован в виде упрощенной сверточной нейронной сети, реализующей перевод многомерного массива изменения параметров во времени до аварии в многомерный массив изменения этих же параметров после аварии. При этом в отличие от задач распознавания изображений, архитектура является сильно облегченной, поскольку нет необходимости использовать классификаторы и не нужны карты признаков. Также было принято дополнительное упрощение, состоящее в полной связности сверточного и пулингового слоев, то есть каждый нейрон сверточного слоя имеет связи со всеми нейронами пулингового слоя.

Архитектура блока сверточной нейронной сети приведена на рисунке 13. Набор из n входных параметров $x_i(t_j)$, $i = 1, \dots, n$, определенный для моментов времени t_j , $j = 1, \dots, N$ переводится в набор n выходных параметров $x_i(t_k)$, определенный для моментов времени t_k , $k = 1, \dots, M$. Выходное значение ik -го нейрона для фиксированного параметра в выбранном слое определяется по формулам (9) и (10).

$$X_{out}^{ik} = F(X_{in}^{ik}) \quad (9)$$

$$X_{in}^{ik} = \sum_j w_{ij}^k x_{ij} - T_i^k \quad (10)$$

В формулах (9) и (10) F – функция активации, X_{in}^{ik} – взвешенный сигнал нейрона, w_{ij}^k – весовой коэффициент нейрона выходного слоя, T_i^k – пороговое значение. Модель включает перевод входного и эталонного массивов в единичный интервал, вычисление выходных сигналов персептронов с применением классической сигмоидальной функции активации. Для обучения использовался алгоритм обратного распространения ошибки. Модификация весовых коэффициентов в процессе обучения проводилась на основе метода градиентного спуска для минимизации суммарной квадратичной ошибки обучения. Вычисления на итерации с номером l производились по формуле (11).

$$w_{ij}^k(l+1) = w_{ij}^k(l) + \alpha \sum_{i,j} \gamma_{ij}^k \frac{\partial F(X_{in}^{ik})}{\partial X} x_{ij}^k \quad (11)$$

В формуле (11) α – темп обучения, γ_{ij}^k – ошибка ij -го нейрона для k -го нейрона выходного слоя. Количество промежуточных слоев варьировалось и определялось с учетом полученной ошибки по результатам обучения.

Второй блок нейронной сети был реализован на основе модификации рекуррентной сети Элмана. Для контекстного слоя нейронов был применен дополнительный синаптический сигнал от выходного слоя сети. Данный сигнал был добавлен в общий суммарный выход каждого из нейронов контекстного слоя и был направлен на подкрепление «глубокой» памяти. Таким образом, созданная архитектура сети дала возможность более точно учитывать медленно меняющиеся параметры (например, концентрацию ксенона) без повышения вычислительных затрат, как это имело бы место в случае использования мультирекуррентной сети. Архитектура блока рекуррентной нейронной сети приведена на рисунке 14.

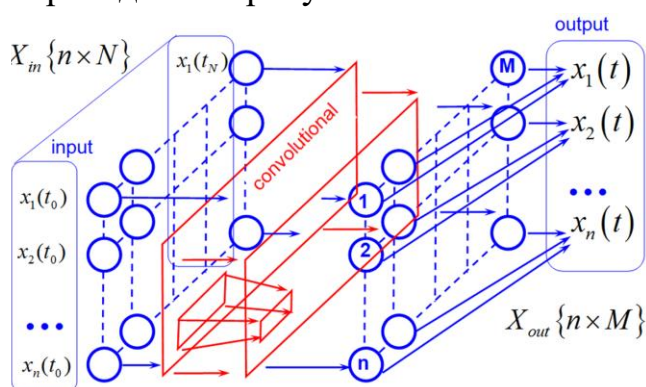


Рис. 13 – Блок сверточной нейронной сети

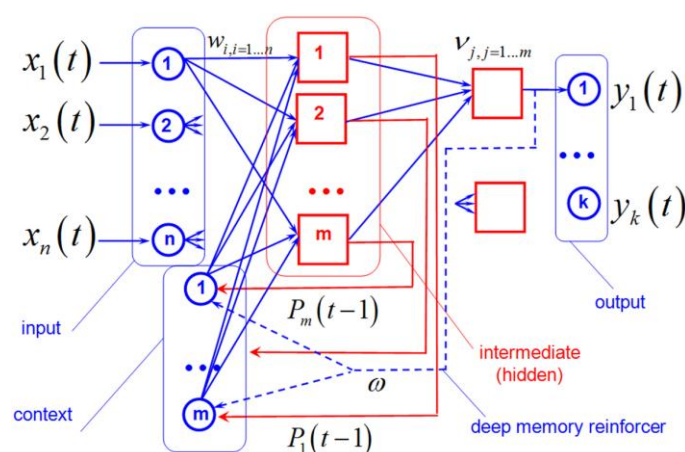


Рис. 14 – Блок рекуррентной нейронной сети

Выходное значение нейронной сети определяется стандартно в соответствии с формулой (12). Выходное значение и взвешенная сумма i -го нейрона скрытого слоя определяются по формулам (13) и (14). Входными сигналами является массив выходных сигналов, полученный в результате работы блока сверточной

нейронной сети. В случае, если дискретизация по времени у эталонного массива отличается от массива, подаваемого на вход (общий случай), производится дополнительная модификация входного сигнала путем простой линейной интерполяции.

$$y(t) = \sum_{i=1,m} v_i p_i(t) - T \quad (12)$$

$$p_i(t) = F(X_{out}^i(t)) \quad (13)$$

$$X_{out}^i(t) = \sum_{k=1}^n w_{ki} x_k(t) + \sum_{l=1}^m w_{li} p_l(t-1) + \omega_i y(t - \delta t) - T_i \quad (14)$$

В формулах (12)-(14) w_{ki} - весовые коэффициенты от входного слоя к скрытому слою, w_{li} - весовые коэффициенты от скрытого слоя к контекстному слою, ω_i - коэффициенты для усиления «глубокой» памяти, подаваемые с задержкой на δt шагов по времени. Для обучения также использовался алгоритм обратного распространения ошибки, построенный на основе производных функции квадратичной ошибки по настраиваемым параметрам сети. Вычисления производились по формулам (15)-(18).

$$v_i(t+1) = v_i(t) - \alpha (y(t) - e) p_i(t) \quad (15)$$

$$w_{ki}(t+1) = w_{ki}(t) - \alpha \gamma_i \frac{\partial F(X_{out}^i(t))}{\partial X} x_k(t) \quad (16)$$

$$w_{li}(t+1) = w_{li}(t) - \alpha \gamma_i \frac{\partial F(X_{out}^i(t))}{\partial X} p_i(t-1) \quad (17)$$

$$\omega_i(t+1) = \omega_i(t) - \alpha \gamma_i \frac{\partial F(X_{out}^i(t))}{\partial X} y(t - \delta t) \quad (18)$$

В формулах (15)-(18) α - темп обучения, $\gamma_i = (y(t) - e) v_i$ - ошибка i -го нейрона скрытого слоя, e - эталонное значение выходного сигнала. Математическая модель, примененная в формулах (9)-(18) представляет собой процесс минимизации функции потерь для использованного метода машинного обучения.

Рассмотренные модели нейронных сетей были реализованы в виде объектно-ориентированного программного комплекса для ЭВМ VELETTMA/GP, позволяющего проводить формирование предложенных вариантов архитектуры нейронных сетей, их обучение и практическое применение. На рисунке 14 показано диалоговое окно программы для предиктивного анализа в режиме работы. Обозначенный на рисунке момент времени t_0 является искомым времени возникновения исходного события. Программа разработана на языке C++, универсальна в плане гибкости архитектуры используемых нейросетевых моделей, возможно применение внешних нейросетевых стандартных библиотек.

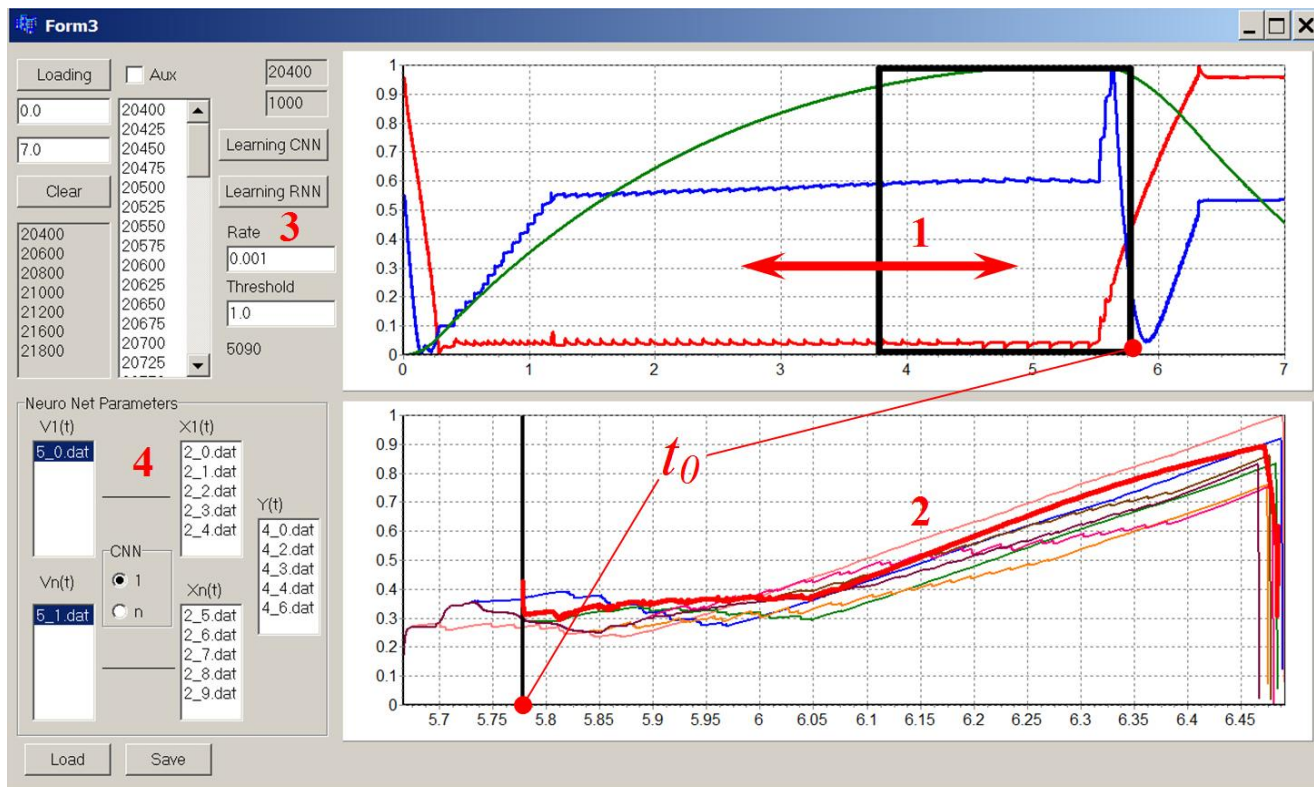


Рис. 14 – Диалоговое окно программы VELETMA/GP для предиктивного анализа (1 – перемещаемое рецептивное окно, 2 – расчет по нейросетевой модели в сравнении с эталонными данными, 3 – блок управления обучением, 4 – блок управления файловой структурой)

Была проведена полноценная апробация разработанной нейросетевой модели, включая проверку устойчивости ее работы в случае изменения массивов эталонных данных, использованных для обучения. Практическими результатами было показано, что производительность вычислений в целях обоснования безопасности повышается примерно в 10 раз. Это имеет особое значение для обоснования безопасности маневренных режимов работы реакторной установки, специфической особенностью которых является многообразие исходных состояний и возможных сценариев развития нестационарных процессов после возникновения постулируемого исходного события.

При этом принципиально важно отметить, что представленная технология имеет строго предиктивное назначение и нацелена на выполнение прогноза нестационарных процессов по заданной предыстории работы реактора. Результаты прогноза предназначены для упрощения и ускорения процедуры выбора наиболее значимых для анализов безопасности сценариев. Заключение о соблюдении приемочных критериев должно приниматься на основе расчетов по аттестованному программному коду.

В завершающей части пятой Главы приводится ряд рассуждений о возможности применения моделей искусственного интеллекта, проблематике интерпретации результатов и их математического обоснования. С точки зрения фундаментальных основ вычислительной математики, задача представления некоторой непрерывной функции нескольких переменных в виде суперпозиции

непрерывных функций одной переменной рассматривалась и решалась А.Н. Колмогоровым и В.И. Арнольдом. Эти исследования дали начало целой области, названной теорией приближений, что, собственно, и определило математические основы нейросетевых моделей. Основным теоретическим обоснованием возможности нейросетевых аппроксимаций принято считать теорему Цыбенко, которая определяет, что любая непрерывная функция может быть с любой точностью аппроксимирована нейронной сетью прямой связи при условии достаточного количества нейронов и точного выбора значений весовых коэффициентов. К настоящему моменту времени, что очень важно для обоснования результатов данной работы, уже есть теоретически обоснованные расширения указанных фундаментальных теорем. Наиболее значимым здесь является обоснование того факта, что возможно добиться высокой точности аппроксимации даже в условиях меньшего по сравнению с классической формулировкой количества членов разложения. Данный факт подтверждает возможность получения результатов при малых объемах обучающей выборки. Это подтверждает существование нейросетевой модели, отвечающей поставленной задаче прогнозирования маневренных режимов.

На основе сделанного анализа предлагаются формулировки критериев для обоснованности и достоверности полученных результатов. Если оперировать официально существующими стандартами для обоснования нейронных сетей, то поставленные вопросы сводятся к оценке робастности⁵ на основе установленной методологии использования формальных методов (существует проект соответствующего ГОСТ, находящегося на этапе введения). На основе имеющейся нормативной базы и были предложены упомянутые критерии. Формулировки и количественные показатели, достигнутые по результатам данной работы, приведены в виде таблицы 2.

В заключении к Главе 5 делается вывод, что задача искусственного интеллекта в любых сферах его применения – не заменять традиционные вычислительные методы, построенные на основе физики моделируемых объектов, а повысить эффективность численного моделирования. Это особенно востребовано для некорректно поставленных задач, попадающих в данный класс по причине отсутствия единственности решения, таких, как обоснование безопасности реакторных установок.

⁵ Под робастностью в данном случае понимается способность системы искусственного интеллекта поддерживать качество работы алгоритмов машинного обучения при любых условиях (согласно ГОСТ Р 70462.1-2022/ISO/IEC TR 24029-1-2021)

Таблица 2 – Критерии для оценки робастности нейросетевых моделей в обоснование рассматриваемого подхода

Свойство модели	Критерий	Достигнутое значение
Стабильность	Сохранение выходных данных в условиях изменения (зашумления) входных данных в пределах некоторой области	Изменение прогнозируемого времени исходного события при случайных возмущениях исходных значений нейтронной мощности активной зоны в пределах погрешности ¹⁾ : - не более 0.3 с при использовании нейросети прямого распространения; - не более 5.0 с при использовании рекуррентной нейросети
Чувствительность	Изменение выходных данных при условии значимого изменения входных данных	Изменение прогнозируемого времени исходного события при изменении исходных значений нейтронной мощности активной зоны более погрешности: - не менее 1 шага по времени в выходных данных ²⁾
Релевантность	Влияние каждого типа входных данных на выходные данные	Изменение прогнозируемого времени исходного события при поочередном исключении параметров каждого типа из входных данных: - не менее 1 шага по времени в выходных данных
Достижимость	Получение требуемого набора выходных состояний при заданном наборе входных данных	Изменение прогнозируемого времени исходного события при повышении размерности массива входных данных: - не более 2 шагов по времени в выходных данных
1) - здесь и далее имеются в виду погрешности, указанные в аттестационных паспортах; 2) – здесь и далее, 1 секунда		

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения диссертационной работы был проведен большой объем исследований для решения актуальной научной проблемы, имеющей принципиальное значение для эксплуатации реакторных установок ВВЭР. Была поставлена задача о создании, программной реализации и практическом внедрении эффективного вычислительного метода обоснования безопасности, адаптированного к физическим явлениям и управлению реактором при маневрировании мощностью.

При выполнении работы были получены следующие результаты:

- предложен метод обоснования безопасности ядерного энергетического реактора с учетом маневренных режимов;

- разработана методика математического моделирования нестационарных процессов на реакторной установке ВВЭР в режимах маневрирования мощностью до и после возникновения постулируемого исходного события при помощи связанных кодов КОРСАР/ГП и ТРАП-КС;

- на основе многовариантного расчетного анализа исследовано влияние динамики концентрации ксенона, плотности теплоносителя и органов регулирования на результаты анализов безопасности с учетом маневрирования;

- разработаны математические модели и предложены способы их численной реализации для определения изменения коэффициентов реактивности в динамическом расчете;

- в практических задачах обоснования безопасности с учетом маневрирования реализованы эффективные методы машинного обучения для снижения трудоемкости и повышения релевантности проводимых расчетных анализов, а также для расширения объема данных под валидацию программных средств;

- созданы объектно-ориентированные комплексы программ VELETMA/GP, UGRA/GP, SHEGRA/GP, DVINA/GP, GORYN/GP для решения прикладных задач в области сопровождения и поддержки связанных динамических расчетов реактора;

- для валидации программных кодов по результатам натурных экспериментов с маневрированием разработана группа специализированных алгоритмов для определения функции потерь и метрики точности расчетных моделей;

- выполнена верификация разработанных программных комплексов и их внедрение в практику сопровождения расчетных анализов в обоснование безопасности, выполняемых по аттестованным программным средствам.

Перечисленные программные комплексы направлены на решение прикладных задач:

- VELETMA/GP для формирования архитектуры, обучения и практического применения предиктивных нейросетевых моделей динамических процессов;

- UGRA/GP для анализа неопределенностей коэффициентов реактивности;

- SHEGRA/GP для корректировки малогрупповых библиотек макроскопических констант с минимизацией возмущения реактивности и распределения энерговыделения;

- DVINA/GP для валидации программных кодов связанного расчета по результатам экспериментов с маневрированием;

- GORYN/GP для автоматизации и управления расчетными вариантами.

Результаты работы были внедрены в практику выполнения расчетного обоснования безопасности РУ ВВЭР в ОКБ «ГИДРОПРЕСС», а также вызвали целый ряд новых исследований в предметной области со стороны других организаций атомной отрасли.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. И.Г. Петкевич, М.А. Увакин Применение программы LINQUAD для анализа неопределенностей расчетов режима с разрывом паропровода на установке АЭС-2006 по коду КОРСАР/ГП // Вопросы Атомной Науки и Техники, серия Физика ядерных реакторов, вып.2, 2013 г., с.51-60.
2. М.А. Увакин, Г.В. Алехин, М.А. Быков, С.И. Зайцев. Верификация трехмерной модели нейтронной кинетики кода ТРАП-КС по результатам расчетов тестовых задач с изменением реактивности // Вопросы Атомной Науки и Техники, серия Физика ядерных реакторов, вып. 3, 2015 г., с. 33-41.
3. А.П. Демехин, М.А. Увакин, В.В. Брюхин, А.Н. Устинов. Консервативная методика определения времени возникновения исходного события при маневренном режиме изменения мощности для расчетов аварийных процессов на РУ ВВЭР по коду КОРСАР/ГП // Вопросы Атомной Науки и Техники, серия Физика ядерных реакторов, вып. 3, 2015 г., с. 42-50.
4. В.В. Брюхин, К.Ю. Куракин, М.А. Увакин. Анализ неопределенностей физических расчетов ВВЭР по параметрам моделей подготовки малогрупповых констант // Вопросы Атомной Науки и Техники, серия Физика ядерных реакторов, вып. 5, 2015 г., с. 26-36.
5. M.A. Uvakin, A.P. Demekhin, G.V. Alekhin, V.V. Bryukhin, A.N. Ustinov Differential reactivity coefficients estimation method for VVER reactor by KORSAR/GP and TRAP-KS codes application // Topical meeting of AER Working Group D "VVER Safety Analysis". Paul Scherrer Institute (PSI), Villigen, Switzerland, 2016.
6. Uvakin M.A., Alekhin G.V., Bykov M.A., Zaitsev S.I. Verification of three-dimensional neutron kinetics model of TRAP-KS code regarding reactivity variations // KERNTECHNIK, 81, 2016 (4), p. 394-400.
7. Bryukhin V.V., Kurakin K.Y., Uvakin M.A. Analysis of the uncertainties in the physical calculations of water-moderated power reactors of the VVER type by the parameters of models of preparing few-group constants // Physics of atomic nuclei, 79, 2016 (8), p. 1305-1314.
8. М.А. Увакин, А.П. Демехин, Г.В. Алехин, В.В. Брюхин, А.Н. Устинов Дифференциальная методика оценки коэффициентов реактивности реактора ВВЭР с применением кодов КОРСАР/ГП И ТРАП-КС // Вопросы Атомной Науки и Техники, серия Физика ядерных реакторов, вып. 2, 2016 г., с. 42-48.
9. Томилин А.А., Увакин М.А., Петкевич И.Г., Синегрибова А.И., Семенов А.А. Результаты применения метода наименьшей ошибки при восстановлении мощности РУ ВВЭР по показаниям блоков детектирования АКНП // Вопросы Атомной Науки и Техники, серия Физика ядерных реакторов, вып. 1, 2017 г., с 135-146.
10. M.A. Uvakin, A.P. Boginsky, G.V. Alekhin, M.A. Bykov TRAP-KS Code Functionality Enhancement by Connection of Basic Regulators External Module //

Topical meeting of AER Working Group D “VVER Safety Analysis” OECD/NEA WPRS Workshop week, Erlangen, Germany, 2017.

11. Увакин М.А., Демехин А.П. Анализ коэффициентов реактивности реактора ВВЭР в режимах нормальной эксплуатации с изменением внешней нагрузки // Атомная Энергия, 2017, том 123 вып. 4, с. 193-196.
12. Синегрибова А.И., Увакин М.А. Апробация распределенной нейтронно-физической и теплогидравлической модели ТВС в ПК КОРСАР/ГП для расчета переходных процессов на РУ ВВЭР // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2017, №4, с. 114-123.
13. M.A.Uvakin, I.V.Makhin, E.V.Sotskov Mathematical model for VVER reactor safety assessment calculations in load regulating regimes // 28th Symposium of AER, Olomouc, Czech Republic, 2018.
14. Rahman S.K. Anisur, M.A. Uvakin Uncertainty analysis in the physical calculations of VVER cells in the daily maneuvering schedule // Journal of Physics: Conference Series, 2018 // 2018 Vol. 1133, No. 1, Q4.
15. A.I. Sinegribova, M.A. Uvakin, M.A. Bykov Assessment of the fuel assembly pin-by-pin model in the KORSAR/GP code // KERNTECHNIK, 84/4, 2019.
16. M.V. Suslov, I.G. Petkevich, M.A Uvakin Leningrad NPP-2 start-up loss of power test and its simulation with use of KORSAR/GP code // KERNTECHNIK, 84/4, 2019.
17. M.A. Uvakin, I.V. Makhin, A.L. Nikolaev, E.V. Sotskov Safety assessment calculation procedure for operating VVER unit in maneuvering regimes experiment // 29th Symposium of AER, Energoland, Mochovce NPP, Slovakia, 2019.
18. Сиряпин В.Н., Закутаев М.О., Увакин М.А., Сиряпин Н.В., Быков М.А. Определение погрешности расчетного кода по результатам экспериментов // Вопросы Атомной Науки и Техники серия Физика ядерных реакторов, вып. 2, 2019 г., с 47-53.
19. A.I. Sinegribova, M.A. Uvakin, M.A. Bykov Development of the fuel assembly pin-by-pin model in the code KORSAR/GP // Nuclear Engineering and Design, 354 (2019), 110203.
20. Николаев А.Л., Увакин М.А. Проведение предтестовых расчетов по ПК КОРСАР/ГП для испытаний режимов работы действующего энергоблока РУ ВВЭР в суточном графике несения маневренной нагрузки // В сборнике трудов 11-й Международной научно-технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", г.Подольск, 2019.
21. М. А. Увакин, И. В. Махин, Е. В. Сотсков Проведение анализов безопасности РУ ВВЭР в реактивностных авариях с учетом регулирования частоты энергосети // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2019, №2.

22. Николаев А.Л., Увакин М.А. Верификация кода КОРСАР/ГП для расчетов с функцией изменения постоянных времени при моделировании ксеноновых переходных процессов на РУ ВВЭР // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2019, №4.
23. M.A. Uvakin, A.L. Nikolaev, I.V. Makhin, E.V. Sotskov, Safety assessment calculation procedure for operating VVER unit in maneuvering regimes experiment // KERNTECHNIK, DOI 10.3139/124.200008 KERNTECHNIK 85 (2020) 4; page 274 – 281 ^a Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG ISSN 0932-3902.
24. А.И. Синегрибова, М.А. Увакин Анализ результатов расчета режима с разрывом паропровода РУ ВВЭР в потвэльном приближении с использованием ПК КОРСАР/ГП // Вопросы Атомной Науки и Техники серия Физика ядерных реакторов, вып. 2, 2020 г., с 19-27.
25. V.N. Siryapin, M.O. Zakutaev, M.A. Uvakin, N.V. Siryapin, and M.A. Bykov Determination of Computer Code Error by Experimental Results // Physics of Atomic Nuclei, 2020, Vol. 83, No. 8, pp. 121–126. © Pleiades Publishing, Ltd., 2020.
26. Rahman S.K. Anisur, M.A. Uvakin Investigation of the power peaking factor K_r in the fuel assembly during the maneuvering mode of the VVER-1000 reactor // Journal of Physics: Conference Series, 2020 // 2020 Vol. 1689, No. 1, Q4.
27. Uvakin M.A., Nikolaev A.L., M. V. Antipov, Makhin I.V., Sotskov E.V. Safety Assessment Innovative Method Development for VVER in Maneuvering Operation. Meeting of AER Working Group D “VVER Safety Analysis” June 22, 2021, Online via ZOOM.
28. Увакин М.А., Николаев А.Л., Махин И.В., Сотсков Е.В. Анализ результатов применения динамического метода для расчетного обоснования безопасности испытаний маневренных режимов на РУ ВВЭР // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2021, №1, с. 55-65.
29. Николаев А.Л., Увакин М.А., Антипов М.В., Махин И.В., Сотсков Е.В. Валидация кода КОРСАР/ГП по результатам испытаний действующего энергоблока РУ ВВЭР в суточном графике несения маневренной нагрузки // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2021, №2.
30. Антипов М.В., Увакин М.А., Николаев А.Л., Махин И.В., Сотсков Е.В. Разработка методик использования технологии машинного обучения при обосновании безопасности РУ ВВЭР // В сб. трудов Научно-технической конференции (НТК) «Супервычисления и математическое моделирование», ВНИИЭФ, г. Саров, 2022.
31. Николаев А.Л., Увакин М.А., Антипов М.В., Махин И.В., Сотсков Е.В. Применение кода КОРСАР/ГП для имитационного моделирования процессов на РУ ВВЭР при выполнении маневренных режимов с расширенным диапазоном регулирования // В сб. трудов Научно-технической конференции

- (НТК) «Супервычисления и математическое моделирование», ВНИИЭФ, г. Саров, 2022.
32. Увакин М.А., Николаев А.Л., Антипов М.В., Махин И.В., Сотсков Е.В. Разработка расчетной технологии обоснования безопасности РУ ВВЭР в маневренных режимах с использованием модели нейронной сети // В сб. трудов Научно-технической конференции (НТК) «Супервычисления и математическое моделирование», ВНИИЭФ, г. Саров, 2022.
 33. Николаев А.Л., Увакин М.А., Антипов М.В., Махин И.В., Сотсков Е.В., Шарый Н.В. Валидация расчетов интегральных параметров кодом КОРСАР/ГП по результатам испытаний маневренных режимов РУ ВВЭР с расширенным диапазоном регулирования // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2022, №2.
 34. Николаева А.В., Увакин М.А., Пантюшин С.И., Сотсков Е.В., Николаев А.Л., Литышев А.В. Антипов М.В., Безруков Ю.А., Кавун О.Ю., Быков М.А. Искусственный интеллект в области использования атомной энергии – существующие возможности и стратегические перспективы // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2023 г., №3, с 4-16.
 35. А.Л. Николаев, М.А. Увакин, М.В. Антипов, И.В. Махин, Г.А. Рябов Метод машинного обучения для валидации расчетной модели нестационарных ксеноновых процессов в реакторе ВВЭР на основе алгоритма разделения переменных // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2023 г., №3, с 17-28.
 36. M.V. Antipov, M.A. Uvakin, A.L. Nikolaev, I.V. Makhin, E.V. Sotskov Neural Network Models Application to the Safety Assessment of Maneuvering Modes at NPPs with VVER // Technical Meeting on Artificial Intelligence and its Recent and Near-term Deployment in Operating Nuclear Power Plants. IAEA, Vienna, 2023.
 37. Увакин М.А., Николаев А.Л., Антипов М.В., Махин И.В., Сотсков Е.В. VELETMA/GP (Verified Engine Learning for Event Time Moment Assessment, GIDROPRESS) // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2023612599, 06.02.2023. Заявка № 2023611457 от 30.01.2023.
 38. Увакин М.А., Николаев А.Л., Антипов М.В., Дарьин Н.А. GORYN/GP (Graphic Oriented Representative Yield for Non-stationary analysis, gidropress) // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2023612624, 06.02.2023. Заявка № 2023611459 от 30.01.2023.
 39. Увакин М.А., Николаев А.Л., Антипов М.В., Махин И.В., Сотсков Е.В. UGRA/GP (Uncertainty estimation by feedback Grid Relocation Analysis, GIDROPRESS)// Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2023613136, 13.02.2023. Заявка № 2023611504 от 30.01.2023.
 40. Увакин М.А., Николаев А.Л., Антипов М.В., Махин И.В., Сотсков Е.В. DVINA/GP (Data Validation and Imprecision Notation Algorithm,

- GIDROPRESS) // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2023612600, 06.02.2023. Заявка № 2023611455 от 30.01.2023.
41. Увакин М.А., Николаев А.Л., Антипов М.В., SHEGRA/GP (Software for reactivity Hopping Exclusion by feedback Grid Relocation Analysis, GIDROPRESS) // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2023613134, 13.02.2023. Заявка № 2023611498 от 30.01.2023.
 42. М.А. Увакин, А.Л. Николаев, М.В. Антипов Опыт разработки и развития математических методов и специализированных алгоритмов для выполнения полномасштабного моделирования маневренных режимов на реакторных установках ВВЭР при помощи программного комплекса КОРСАР/ГП // В материалах II Всероссийской школы-семинара «Математическое моделирование на супер-ЭВМ экс-и зеттафлопсной производительности» 25–29 сентября 2023 г. Национальный Центр Физики и Математики (НЦФМ), г. Саров.
 43. A.L. Nikolaev, M.A. Uvakin, M.V. Antipov, I.V. Makhin, E.V. Sotskov and N.V. Sharyi Validation of the KORSAR/GP Code Based on the Results of Tests of Maneuvering Conditions of a VVER Reactor with an Extended Control Range // Physics of Atomic Nuclei, 2023, Vol. 86, No. 8, pp. 1863–1873. © Pleiades Publishing, Ltd.
 44. М.В. Антипов, Г.А. Рябов, М.А. Увакин, А.Л. Николаев, И.В. Махин Алгоритм расчета коэффициентов неравномерности энерговыделения реактора ВВЭР с адаптацией к специфике маневренных режимов // В сб. трудов Научно-технической конференции (НТК) «Супервычисления и математическое моделирование», ВНИИЭФ, г. Саров, 2024.
 45. А.Л. Николаев, М.А. Увакин, М.В. Антипов, И.В. Махин, Г.А. Рябов Метод машинного обучения для оценки точности имитационного моделирования нестационарных ксеноновых процессов в реакторе ВВЭР // В сб. трудов Научно-технической конференции (НТК) «Супервычисления и математическое моделирование», ВНИИЭФ, г. Саров, 2024.
 46. М.А. Увакин, А.Л. Николаев, М.В. Антипов, И.В. Махин, Е.В. Сотсков Нейросетевой метод прогнозирования процессов на реакторе ВВЭР для задач обоснования безопасности маневренных режимов // В сб. трудов Научно-технической конференции (НТК) «Супервычисления и математическое моделирование», ВНИИЭФ, г. Саров, 2024.
 47. Николаев А.Л., Увакин М.А., Антипов М.В., Махин И.В., Сотсков Е.В. Развитие алгоритмов формирования защитных сигналов по линейной нагрузке для реактора ВВЭР в задачах обоснования маневренных режимов // В сб. трудов Научно-технической конференции (НТК) «Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики» Нейтроника-2024, ФЭИ, г. Обнинск, 2024.
 48. Увакин М.А., Николаев А.Л., Антипов М.В., Махин И.В., Сотсков Е.В. Использование методов искусственного интеллекта в многовариантных

- задачах моделирования динамических процессов на реакторе ВВЭР // В сб. трудов Научно-технической конференции (НТК) «Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики» Нейтроника-2024, ФЭИ, г. Обнинск, 2024.
49. Антипов М.В., Увакин М.А., Николаев А.Л., Махин И.В., Сотсков Е.В. Анализ применения машинного обучения при обосновании безопасности ВВЭР // Атомная Энергия, 2024, том 136, №3-4, с. 107-113.
 50. Увакин М.А., Николаев А.Л., Антипов М.В., Махин И.В., Сотсков Е.В. Развитие методики обоснования безопасности ВВЭР в маневренных режимах посредством использования нейронной сети // Атомная Энергия, 2024, том 136, №3-4, с. 102-106.
 51. А.Л. Николаев, М.А. Увакин, М.В. Антипов, Г.А. Рябов, И.В. Махин Метод машинного обучения для валидации расчетной модели нестационарных ксеноновых процессов в реакторе ВВЭР на основе алгоритма разделения переменных // В сб. трудов Межотраслевой научно-технической конференции «Моделирование Динамики ЯЭУ» Динамика-2024, ФГУП НИТИ им. А.П. Александрова, г. Сосновый Бор, 2024.
 52. М.А. Увакин, А.Л. Николаев, М.В. Антипов, Г.А. Рябов, И.В. Махин, М.А. Быков, Е.В. Сотсков Математическое моделирование динамики реакторов ВВЭР на основе комплекса КОРСАР/ГП: актуальные задачи, новые методы, программные решения // В сб. трудов Межотраслевой научно-технической конференции «Моделирование Динамики ЯЭУ» Динамика-2024, ФГУП НИТИ им. А.П. Александрова, г. Сосновый Бор, 2024.
 53. Г.А. Рябов, А.Л. Николаев, М.А. Увакин, М.В. Антипов, И.В. Махин, Н.А. Дарьин Анализ аварий с выбросом ОР СУЗ на РУ ВВЭР с учетом реальных гидродинамических усилий // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2024, №2, , с 70-75.
 54. М.А. Увакин Обоснование безопасности ядерных реакторов в режимах маневрирования как новый класс вычислительных задач // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2024, №4, с. 5-16.
 55. М.В. Антипов, Г.А. Рябов, М.А. Увакин, А.Л. Николаев, И.В. Махин Метод оценки коэффициентов неравномерности энерговыделения РУ ВВЭР в динамических процессах при маневрировании мощностью // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2024, №4, с. 23-31.
 56. Увакин М.А., Николаев А.Л., Антипов М.В., Дарьин Н.А., Рябов Г.А. Применение методов искусственного интеллекта в задачах предикативного анализа динамики реакторов ВВЭР // в Сб. трудов Международной математической конференции НИЯУ МИФИ «Современные математические модели в энергетике», г. Обнинск, 2024.
 57. М.А. Увакин, А.Л. Николаев, М.В. Антипов, И.В. Махин, Е.В. Сотсков Нейросетевой метод прогнозирования процессов на реакторе ВВЭР для задач обоснования безопасности маневренных режимов // Вопросы Атомной Науки

- и Техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов, 2025, №1, с.39-50.
58. Н.А. Дарьин, М.А. Увакин, М.В. Антипов, А.Л. Николаев, И.В. Махин Разработка численного метода параметризации макроконстант для программы КОРСАР/ГП на основе полиномов // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2025, №1, с.17-30.
 59. A.V. Nikolaeva, M.A. Uvakin, S.I. Pantyushin, E.V. Sotskov, M.V. Antipov, A.L. Nikolaev, A.V. Lityshev, Yu.A. Bezrukov, O.Yu. Kavun, M.A. Bykov Artificial Intelligence in the Field of Atomic Energy Usage — Existing Possibilities and Strategic Perspectives // Physics of Atomic Nuclei, Vol. 87, pp. 1020–1029, 2025. © Pleiades Publishing, Ltd.
 60. A.L. Nikolaev, M.A. Uvakin, M.V. Antipov, I.V. Makhin, G.A. Ryabov Machine Learning Method for Calculation Model Validation of Non-stationary Xenon Processes in the VVER Reactor Based on the Variables Separation Algoritm // Physics of Atomic Nuclei, Vol. 87, pp. 1030–1038, 2025. © Pleiades Publishing, Ltd.
 61. M.A. Uvakin, A.L. Nikolaev, M.V. Antipov, I.V. Makhin Artificial intelligence methods application for reactor dynamics predicting in the tasks of maneuverable modes safety assessment // Annals of Nuclear Energy, 215 (2025) 111248.
 62. М.А. Увакин Методы повышения производительности вычислений в задачах обоснования безопасности современных ядерных энергетических установок с ВВЭР в маневренных режимах // В материалах III Всероссийской школы-семинара «Математическое моделирование на супер-ЭВМ экса-и зеттафлопсной производительности» 02-06 декабря 2024 г. Национальный Центр Физики и Математики (НЦФМ), г. Саров.