

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИБРАЭ РАН)

На правах рукописи



Колташев Дмитрий Александрович

**Связанные расчеты макроячеек реактора на базе трехмерных
нейтронно-физических и теплогидравлических кодов**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Стрижов Валерий Федорович.

Официальные оппоненты: Мелихов Олег Игорьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры атомных электрических станций Национального исследовательского университета «МЭИ».

Марков Павел Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов», г. Дмитровград.

Защита состоится 1 июля 2021 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 002.070.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте <http://ibrae.ac.ru/contents/482/>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н.



В. Е. Калантаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современные требования к обоснованию безопасности реакторных установок как с водяным, так и с жидкометаллическим теплоносителем обуславливают необходимость моделирования широкого класса процессов, протекающих в активных зонах, на базе комплексных моделей с использованием нейтронно-физических и теплогидравлических кодов, выполняющих связанные расчеты.

Особое внимание уделяется применению прецизионных методов расчета, поскольку их использование позволяет определять характеристики в локальных областях, задаваемых в 3D моделях в соответствии с конструктивными особенностями элементов моделируемых систем, а также учитывать локальные эффекты, связанные с различными пространственными и плотностными неоднородностями, вызванными в том числе кипением теплоносителя, деформированием оболочек тепловыделяющих элементов, распуханием топлива, блокировкой проходного сечения ТВС и др.

Актуальность развития технологии прецизионных связанных расчетов обуславливается необходимостью получения численных решений ввиду объективной сложности, высокой стоимости или невозможности получения экспериментальных данных для объектов ядерной энергетики, что особенно актуально для разрабатываемых новых проектов АЭС с жидкометаллическим (свинцовым) теплоносителем.

Для выполнения связанных расчетов требуется построение согласованной расчетной модели, от параметров которой во многом зависит результат и степень доверия к нему. Создание согласованной расчетной модели предполагает формирование расчетных сеток для нейтронно-физического и теплогидравлического кодов на базе единого набора исходных данных, а также определение начальных и граничных условий. Создание согласованной расчетной модели в «ручном режиме» является очень трудоемким, зачастую приводящим потенциально к критическим ошибкам, которые, к тому же, трудно идентифицировать. Актуальной задачей является создание инструмента для автоматизированной подготовки согласованной расчетной модели.

В данной работе разработана и апробирована технология проведения связанных расчетов с использованием прецизионных нейтронно-физических кодов семейства MCU (MCU-FREE, MCU-FR) и двух теплогидравлических кодов – трехмерного кода OpenFOAM, распространяемого по свободной лицензии GNU General Public Licence, и аттестованного инженерного канального теплогидравлического кода семейства HYDRA-IBRAE для установок с водяным (HYDRA-IBRAE/H2O) и свинцовым (HYDRA-IBRAE/LM) теплоносителями.

Цель диссертационной работы

Цель работы заключается в разработке технологии и проведении связанных стационарных нейтронно-физических (на базе методов Монте-Карло) и теплогидравлических (на базе CFD и канальных кодов) расчетов макроячеек реактора с водяным и жидкометаллическим теплоносителем.

Поставленная цель предполагает решение следующих задач:

- разработка программной оболочки, содержащей инструментальные средства для формирования согласованной расчетной модели, включая построение сеточных моделей на базе единых данных о геометрии моделируемого объекта, и обеспечения обмена данными для выполнения связанных расчетов;
- построение с помощью программной оболочки согласованных расчетных моделей для выполнения связанных стационарных расчетов макроячеек реактора с водяным и жидкометаллическим теплоносителем с использованием кодов семейства MCU (MCU-FREE и MCU-FR) и CFD кода OpenFOAM или теплогидравлических канальных кодов семейства HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H₂O и HYDRA-IBRAE/LM);
- проведение связанных стационарных расчетов макроячеек реакторов с водяным теплоносителем с использованием нейтронно-физических кодов семейства MCU и валидированного канального одномерного теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/H₂O или CFD кода OpenFOAM, анализ и сравнение полученных результатов, отработка методических вопросов и верификация программной оболочки;
- проведение расчетов модельной тепловыделяющей сборки со свинцовым теплоносителем и анализ влияния возмущений теплогидравлических параметров, вызванных распуханием оболочек и топлива тепловыделяющих элементов, на нейтронно-физические характеристики;
- проведение прецизионных расчетов по кодам MCU-FR и OpenFOAM, с учетом локальных характеристик энерговыделения и теплообмена в контурных расчетах реакторной установки со свинцовым теплоносителем для определения температуры наиболее энергонапряженного твэла, а также сравнение с результатами, полученными по интегральному коду ЕВКЛИД/V1.

Научная новизна работы

Впервые для нейтронно-физических кодов семейства MCU (MCU-FREE и MCU-FR) и теплогидравлических кодов CFD класса OpenFOAM и канальных кодов семейства HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H₂O и HYDRA-IBRAE/LM) разработана программная оболочка Coupled Calculation Shell (CCS), содержащая инструментальные средства для построения согласованной расчетной модели в связанных стационарных расчетах.

С помощью программной оболочки построены согласованные расчетные модели для проведения связанных стационарных расчетов макроячеек реактора с водяным и жидкометаллическим теплоносителем с использованием кодов семейства MCU (MCU-FREE и MCU-FR) и CFD кода OpenFOAM или теплогидравлических канальных кодов семейства HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H₂O и HYDRA-IBRAE/LM).

Для макроячейки реактора с водяным теплоносителем показано согласие результатов связанных расчетов интегральных характеристик, полученных с помощью разработанной модели, с результатами, полученными международным сообществом и опубликованными в свободном доступе.

С использованием нейтронно-физического кода MCU-FR и пакета OpenFOAM проанализировано влияние возмущения расчетных параметров, обусловленного распуханием оболочек и топлива твэлов, на теплогидравлические и нейтронно-физические характеристики в расчетах макроячеек реактора со свинцовым теплоносителем.

С помощью связанных расчетов по кодам MCU-FR и OpenFOAM для ТВС реакторной установки со свинцовым теплоносителем проанализировано влияние локальных характеристик энерговыделения и теплообмена на температуру топлива, показано, что температура топлива наиболее энергонапряженного твэла, в пределах диапазона неопределенностей соответствует результатам расчетов по коду ЕВКЛИД/V1.

Практическая значимость

Разработанная программная оболочка Coupled Calculation Shell (CCS, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021610112 от 12 января 2021 г.) может использоваться для проведения в автоматизированном режиме связанных стационарных расчетов макроячеек реакторов с водяным или жидкометаллическим теплоносителем по нейтронно-физическим кодам семейства MCU и теплогидравлическим канальным кодам семейства HYDRA-IBRAE или CFD коду OpenFOAM или по другим кодам схожей области применимости.

Верифицированная на базе макроячеек реакторов с водяным теплоносителем программная оболочка для кодов MCU-FREE, MCU-FR, HYDRA-IBRAE/H₂O, HYDRA-IBRAE/LM, OpenFOAM может использоваться для проведения уточняющих связанных расчетов локальных характеристик реакторных установок с водяным или жидкометаллическим теплоносителем, а также для кросс-верификации инженерных расчетных кодов и методик.

Результаты стационарных расчетов макроячеек реакторов с водяным и свинцовым теплоносителем, полученные с применением нейтронно-физических кодов семейства MCU (MCU-FREE и MCU-FR) и канальных теплогидравлических кодов семейства HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H₂O или HYDRA-IBRAE/LM) или CFD кода OpenFOAM, могут быть использованы для сравнения с результатами, получаемыми с помощью других программ.

Положения, выносимые на защиту

Программная оболочка Coupled Calculation Shell (CCS), содержащая инструментальные средства для построения согласованных расчетных моделей и проведения связанных стационарных расчетов по нейтронно-физическим кодам семейства MCU (MCU-FREE и MCU-FR) и CFD коду OpenFOAM или канальным теплогидравлическим кодам семейства HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H₂O и HYDRA-IBRAE/LM) и разработанные с её помощью согласованные модели макроячеек реакторов с водяным и свинцовым теплоносителем.

Результаты стационарных расчетов макроячеек реакторов с водяным теплоносителем, полученные с применением нейтронно-физического кода MCU-FREE и теплогидравлического канального кода HYDRA-IBRAE/H₂O и CFD кода OpenFOAM, на базе расчетных моделей с обоснованием выбора параметров расчета (статистические параметры, параметры источников, зон регистрации и др.).

Результаты стационарных расчетов макроячеек реактора со свинцовым теплоносителем с возмущением параметров, вызванных распуханием оболочек тепловыделяющих элементов, полученные с применением кодов MCU-FR и OpenFOAM.

Расчетная модель установки со свинцовым теплоносителем и результаты расчетов стационарного состояния модельной ТВС на номинальном уровне мощности с применением кодов MCU-FR и OpenFOAM для определения максимальной температуры наиболее энергонапряженного твэла, а также результаты расчетов с помощью интегрального кода ЕВКЛИД/V1.

Достоверность и обоснованность результатов работы

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается сравнением результатов расчетов с реперными значениями, представленными в открытых источниках, результатами методических расчетов, а также результатами многовариантных расчетов, выполненных с применением валидированных или аттестованных расчетных кодов (HYDRA-IBRAE/H₂O, HYDRA-IBRAE/LM, ЕВКЛИД/V1).

Личный вклад автора заключается

В реализации программной оболочки Coupled Calculation Shell (CCS), содержащей инструментальные средства для построения согласованных расчетных моделей и проведения связанных стационарных расчетов по нейтронно-физическим кодам семейства MCU (MCU-FREE и MCU-FR), CFD коду OpenFOAM и теплогидравлическим канальным кодам семейства HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H₂O и HYDRA-IBRAE/LM).

В подготовке расчетных моделей макроячеек реакторов с водяным и жидкометаллическим теплоносителем для расчетов по нейтронно-физическим кодам MCU-FREE и MCU-FR, а также по теплогидравлическим кодам HYDRA-IBRAE/H₂O, HYDRA-IBRAE/LM и OpenFOAM.

В проведении многовариантных расчетов макроячеек реакторов с водяным и свинцовым теплоносителем с применением нейтронно-физических кодов семейства MCU – MCU-FREE и MCU-FR и теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/H₂O и CFD кода OpenFOAM, анализе и обосновании достоверности полученных результатов.

В проведении связанных расчетов наиболее энергонапряженной ТВС реакторной установки со свинцовым теплоносителем с использованием кодов MCU-FR и OpenFOAM, а также в разработке нейтронно-физической модели активной зоны реакторной установки со свинцовым теплоносителем и проведении интегральных расчетов по коду ЕВКЛИД/V1.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

- Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН в 2013 — 2017, 2019 гг. (г. Москва, Россия);
- Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» в 2015, 2017 гг. (г. Москва, Россия);
- 59-я Всероссийская научная конференция МФТИ в 2016 г. (г. Москва, Россия);
- Международная научно-практическая конференция по атомной энергетике. Безопасность, эффективность, ресурс. МНПК-2017 в 2017 г. (г. Севастополь, Россия).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ из них 5 статей, включая 4 статьи в журналах по перечню ВАК Минобрнауки России, 1 препринтов и 9 докладов на российских конференциях и семинарах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы из 59 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 125 страниц основного текста, включая 14 таблиц и 65 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, достоверность результатов, личный вклад автора, информация об апробации работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены публикации по теме исследования.

В первой главе формулируется постановка задачи, приведен обзор литературы и рассматриваются ключевые особенности нейтронно-физических и теплогидравлических кодов, применяющихся при моделировании реакторных установок. Обсуждаются вопросы развития методики прецизионных связанных расчетов и формулируются основные проблемы,

требующие рассмотрения в рамках формирования согласованной расчетной модели.

Раздел 1.1 посвящен описанию особенностей нейтронно-физических инженерных и Монте-Карло кодов, применяющихся в реакторных расчетах. Представлены основные свойства Монте-Карло кодов, обуславливающие их использование в отсутствии реперных и экспериментальных данных при разработке новых систем и расширенном анализе аварийных режимов.

В разделе 1.2 обсуждается использование теплогидравлических кодов в прецизионных связанных расчетах. Рассматриваются системные (канальные) коды, обычно применяемые для расчета контура циркуляции теплоносителя реакторной установки, ячейковые коды и CFD коды.

Раздел 1.3 посвящен обзору мирового опыта проведения связанных нейтронно-физических и теплогидравлических кодов и развитию методики прецизионных связанных расчетов. Основная тенденция в проведении связанных расчетов заключается в использовании широко распространенных и хорошо зарекомендовавших себя нейтронно-физических и теплогидравлических кодов на базе комплексных моделей.

В разделе 1.4 рассматриваются основные аспекты построения согласованной расчетной модели. Формулируется проблема корректности и устойчивости распределения плотности потока нейтронов и связанных с ним функционалов, вычисляемых с помощью Монте-Карло кодов. Рассматриваются различные подходы формирования однопараметрических или многопараметрических критериев сходимости связанных расчетов на базе выбранных нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик. Обсуждаются особенности формирования вычислительных сеток в нейтронно-физических и теплогидравлических кодах и особенности этих кодов, влияющие на выбор параметров расчетных сеток.

Во второй главе рассматривается программная оболочка Coupled Calculation Shell (CCS), содержащая инструментальные средства для построения согласованных расчетных моделей и проведения связанных стационарных расчетов по нейтронно-физическим кодам семейства MCU (MCU-FREE и MCU-FR) и CFD коду OpenFOAM или семейству теплогидравлических канальных кодов HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H₂O и HYDRA-IBRAE/LM). Цель использования оболочки – построение согласованной расчетной модели с использованием расчетных кодов различной степени детальности и проведение расчетов на базе последовательных итераций. Связанность расчетов «нейтроника-теплогидравлика» обеспечивается с помощью алгоритма, в котором в качестве «связующих» характеристик используются распределения температуры, плотности и энерговыделения.

В разделе 2.1 представлено краткое описание нейтронно-физических кодов MCU-FREE и MCU-FR, семейства теплогидравлических кодов HYDRA-IBRAE и CFD кода OpenFOAM, использующихся в данной работе.

Рассматриваются некоторые свойства библиотек ядерно-физических данных, поставляемых вместе с кодами MCU-FREE и MCU-FR, и возможности их применения для задания температур материалов в связанных расчетах. Обсуждаются возможности применения в расчетах по кодам MCU-FREE и MCU-FR ядерно-физических данных, подготовленных непосредственно во время расчета с помощью процессинговых систем, например NJOY, или подхода, использующего псевдо-материалы, которые задаются в виде смеси из двух одинаковых по составу материалов, имеющих различные температуры. Традиционно в связанных расчетах рассматриваются два способа задания источников нулевого поколения в Монте-Карло расчетах – равномерный и динамический. Динамический источник формируется на каждой итерации с использованием распределений плотности потока нейтронов, полученных на предыдущих итерациях. В работе используются оба типа источников для анализа их влияния на сходимость.

Отсутствие априорных распределений нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик повышает важность отработки технологии на базе модельных расчетов. Использование в методических расчетах одномерного валидированного кода HYDRA-IBRAE/H₂O и усредненных по ячейкам теплогидравлических параметров, передаваемых для нейтронно-физического расчета, позволяет существенно сэкономить временные и вычислительные ресурсы.

Возможности Монте-Карло кодов позволяют проводить расчёты необходимых для связанного расчета функционалов в малых локальных областях для ячеек с потвэльным представлением (без упрощений), что обуславливает использование в рамках уточненного анализа средств CFD моделирования с использованием пакета OpenFOAM.

Раздел 2.2 посвящен описанию программной оболочки Coupled Calculation Shell (CCS), основные структурные элементы которой, объединенные в логические блоки, и общая схема расчета приведены на рисунке 1.

Ключевым элементом входного блока является построение согласованной расчетной модели (рисунок 2). Согласованная расчетная модель формируется на базе единого набора данных, задаваемых во входном файле. С его использованием осуществляется определение параметров геометрии нейтронно-физической модели (включая расположение и размер материальных зон и зон регистрации) и формирование расчетной сетки теплогидравлической модели. С учетом подготовленных данных формируются обменные интерфейсы для передачи данных. Определение статистических параметров, параметров источника и библиотек ядерно-физических данных в Монте-Карло расчетах, а также параметров для задания граничных условий, свойств материалов и временных параметров теплогидравлического расчета осуществляется на базе тестовых расчетов.

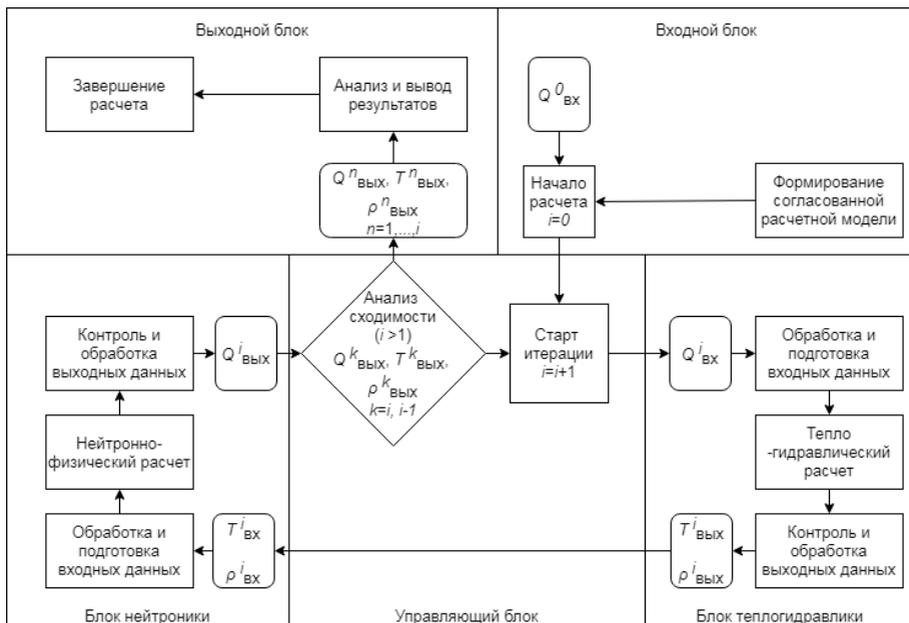


Рисунок 1 – Схема расчета в оболочке CCS

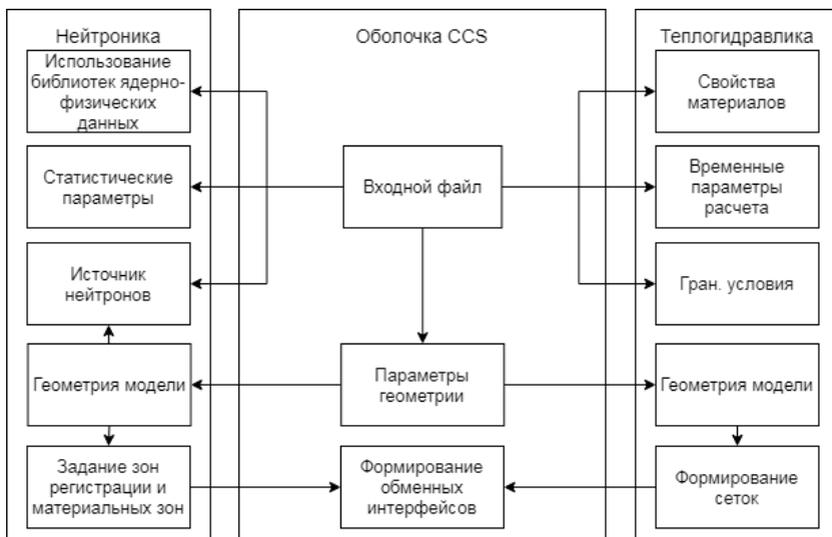


Рисунок 2 – Формирование согласованной расчетной модели

В качестве начального приближения энерговыделения $Q_{\text{вх}}^0$ используется равномерное распределение либо энергораспределение, сформированное в рамках предварительного анализа на базе методических расчетов с упрощенными расчетными моделями, уменьшенной суммарной статистикой и т.д. Теплогидравлический код с учетом энерговыделения $Q_{\text{вх}}^i$ рассчитывает распределение температуры $T_{\text{вых}}^i$ и плотности теплоносителя $\rho_{\text{вых}}^i$, нейтронно-физический код с учетом $T_{\text{вх}}^i$ и $\rho_{\text{вх}}^i$ рассчитывает $Q_{\text{вых}}^i$. Входные данные ($Q_{\text{вх}}^i$) теплогидравлического и нейтронно-физического ($T_{\text{вх}}^i, \rho_{\text{вх}}^i$) кодов формируются с использованием соответствующих выходных данных ($Q_{\text{вых}}^i, T_{\text{вых}}^i, \rho_{\text{вых}}^i$), полученных на текущей или предыдущих итерациях, и параметров расчетных сеток обоих кодов. Анализ сходимости значений $Q_{\text{вых}}^k, T_{\text{вых}}^k$ и $\rho_{\text{вых}}^k$ осуществляется на каждой итерации с использованием распределений, полученных на предшествующих итерациях. При выполнении критерия сходимости расчет завершается с выводом данных, сформированных для всех выполненных итераций.

В третьей главе анализируются результаты связанных расчетов для стационарных задач. **В разделе 3.1** проведена апробация предлагаемой технологии проведения связанных расчетов на базе макроячеек реактора с водяным теплоносителем с применением нейтронно-физического кода MCU-FREE. Ячеенные расчеты позволяют исследовать основные особенности кодов, их чувствительность к изменению геометрических, статистических, температурных параметров и определить расчетные параметры перед построением согласованной модели нейтроника-теплогидравлика.

В рамках предварительного анализа исследуется влияние температурно-плотностных обратных связей на скорость реакции деления для модели ячейки твэла реактора типа ВВЭР в автономных нейтронно-физических расчетах по коду MCU-FREE. Показано значительно меньшее влияние обратных связей по температуре на значения скорости реакции по сравнению с эффектом обратных связей по плотности. В дальнейших расчетах по коду MCU-FREE для воды задается ближайшее к рассчитанной по теплогидравлическому коду температуре значение, представленное в библиотеках ядерных данных.

В рамках отработки технологии анализируется влияние параметров нейтронно-физической модели, включая параметры статистики, источника и зон регистрации, а также расчетных параметров, таких как параметры релаксации и др. на вычисляемые характеристики в связанных расчетах с применением кодов MCU-FREE и HYDRA-IBRAE/H₂O. Для исследования колебательного характера величин, вычисляемых в связанных расчетах, используются модель ячейки твэла реактора ВВЭР, системы BWR и PWR 3x3 Pin Cluster (рисунок 3).

Модель ячейки твэла реактора ВВЭР включает один твэл с диоксидурановым топливом.

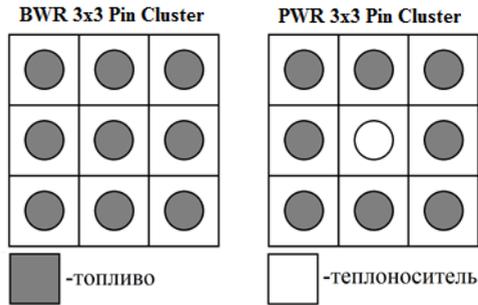


Рисунок 3 – Сечение расчетных моделей BWR и PWR 3x3 Pin Cluster

Система BWR 3x3 Pin Cluster используется для проведения связанных расчетов в условиях кипения теплоносителя. Применение связанных кодов в расчетах реактора с кипящей водой представляют особый интерес, так как при кипении возникают сильные перепады плотности теплоносителя, оказывающие значительное влияние на характер обратных связей. Расчетная модель состоит из 9 твэлов реактора BWR с диоксидурановым топливом.

Система PWR 3x3 Pin Cluster использовалась в различных работах для отработки технологии связанных расчетов с применением кодов MCNP5/SUBCHANFLOW, MCNP5/STAR-CD и MCNP6/CTF. Расчетная модель состоит из 9 ячеек, при этом в центральной ячейке расположена направляющая трубка, а в остальных ячейках – твэлы реактора PWR с диоксидурановым топливом.

Для модели ячейки твэла реактора ВВЭР и системы BWR 3x3 Pin Cluster анализируются значения локальных характеристик и $K_{эф}$ в зависимости от номера итерации. Анализ $K_{эф}$ используется для отработки технологии исследования устойчивости нейтронно-физических характеристик, которая в дальнейшем применяется для анализа потоков нейтронов и производных от них функционалов. Показано, что отклонения по итерациям вычисляемых характеристик, превосходят статистическую ошибку Монте-Карло расчетов, что подтверждает необходимость применения в связанных расчетах методик для уменьшения наблюдаемых колебаний.

В связанных расчетах применяются разные методы обеспечения сходимости и уменьшения колебаний связующих величин, в частности, с использованием метода релаксаций. Метод основан на применении весового коэффициента ($k_{рел}$) для пересчета значений нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик, полученных на предыдущей итерации:

$$f'_n = (1 - k_{рел}) f_n + k_{рел} f_{n-1},$$

где f_n – значение соответствующей характеристики, на шаге n, f'_n – значение характеристики, полученное с учетом введенного коэффициента релаксации.

Положительный эффект использования коэффициента релаксации ($k_{\text{рел}}$) на $K_{\text{эф}}$ для ячейки твэла реактора ВВЭР продемонстрирован на рисунке 4. Небольшие колебания $K_{\text{эф}}$ наблюдаются при всех значениях $k_{\text{рел}}$, но при увеличении $k_{\text{рел}}$ они уменьшаются. Наибольший эффект дает значение $k_{\text{рел}} \sim 0,4 - 0,5$. Применение метода релаксации в связанных расчетах для ячейки твэла реактора ВВЭР позволило уменьшить расчетное время почти в 4 раза за счет уменьшения суммарной статистики.

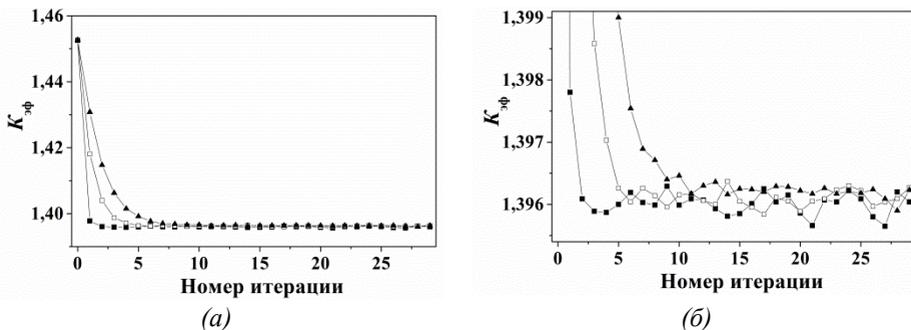


Рисунок 4 – Значения $K_{\text{эф}}$ в зависимости от номера итерации при различных $k_{\text{рел}}$: 0 (■), 0,3 (□) и 0,5 (▲) в обычном (а) и увеличенном масштабе (б)

В таблице 1 для $K_{\text{эф}}$ приведены средние по последним 10 итерациям значения и среднеквадратичные отклонения (σ) при разных значениях $k_{\text{рел}}$.

Таблица 1 – Средние значения $K_{\text{эф}}$ в зависимости от $k_{\text{рел}}$

$k_{\text{рел}}$	$\overline{K_{\text{эф}}}$	$\sigma, 10^{-5}$
0	1,39599	9,6
0,3	1,39609	8,3
0,5	1,39621	8,0

В рамках исследования влияния статистических параметров на $K_{\text{эф}}$ и распределения локальных характеристик анализируются результаты расчетов при различной статистике $NPS = N_n * N_{\text{пок}}$, где N_n – число нейтронов в поколении, $N_{\text{пок}}$ – число поколений. Энергораспределение, полученное для системы BWR 3x3 Pin Cluster с помощью кодов MCU-FREE и HYDRA-IBRAE/H2O, согласуется с энергораспределением, полученным по коду MCNP5/SUBCHANFLOW¹. Наибольшее расхождение в области кипения

¹ Ivanov A., Sanchez V., Stieglitz R., Ivanov K. High fidelity simulation of conventional and innovative LWR with the coupled Monte-Carlo thermal-hydraulic system MCNP-SUBCHANFLOW // Nuclear Engineering and Design. 2013. №262. p. 264–275

теплоносителя объясняется особенностями используемых алгоритмов и теплогидравлических замыкающих соотношений (рисунок 5).

Для системы PWR 3x3 Pin Cluster показано влияние статистических параметров на $K_{эф}$ и распределение энерговыделения. В расчетах анализируются значения $K_{эф}$ для вариантов с $NPS=500*100$, $5000*500$, $20000*1000$, $50000*1000$. Во всех расчетах наблюдаются колебания $K_{эф}$, которые уменьшаются с ростом статистики расчетов (рисунок 6). Результаты анализа $K_{эф}$ показывают, что в дальнейших расчетах целесообразно использовать $NPS = 20000*1000$, ввиду незначительного уменьшения колебаний при дальнейшем росте NPS.

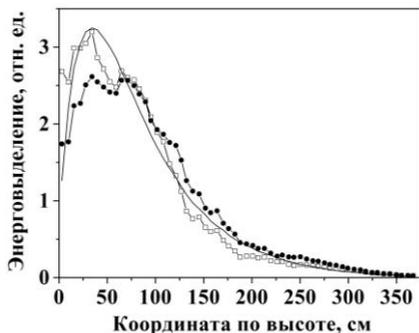


Рисунок 5 – Аксиальное распределение энерговыделения для $NPS=1000*200$ (●), $20000*1000$ (□), по коду MCNP5/SUBCHANFLOW (—)

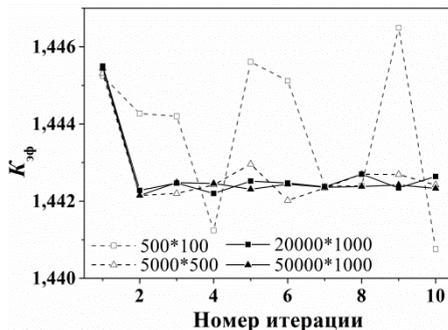


Рисунок 6 – Значение $K_{эф}$ в зависимости от номера итерации при различной статистике

Размеры зон регистрации в Монте-Карло расчетах оказывают существенное влияние на результаты расчетов функционалов потоков. В рамках методических расчетов ячеек BWR 3x3 Pin Cluster и PWR 3x3 Pin Cluster анализируется влияние высоты аксиальных ячеек на интегральные и локальные характеристики.

Расчеты системы BWR 3x3 Pin-cluster с укрупненными ячейками (20 ячеек в нейтронно-физических и теплогидравлических расчетах, вместо стандартных 60) приводят к заметному уменьшению колебаний энергораспределения. При кипении теплоносителя усреднение теплогидравлических параметров, вызванное объединением аксиальных ячеек в области кипения, приводит к изменению формы распределения – исчезает максимум и распределение становится убывающим. Также изменяется характер распределения плотности теплоносителя.

В расчетах модели PWR 3x3 Pin Cluster колебательный характер $K_{эф}$ наблюдается для всех размеров ячеек. При этом увеличение количества аксиальных ячеек приводит к уменьшению амплитуды колебаний и

увеличению усредненного $K_{эф}$, что обусловлено изменением характерной формы аксиального энергораспределения.

По результатам проведенного анализа было определено, что разбиение топливной части на 10 аксиальных ячеек является оптимальным в части точности получаемых результатов и затраченного времени расчета для рассматриваемых задач PWR 3x3 Pin Cluster и модели ячейки твэла ВВЭР. Для системы BWR 3x3 Pin Cluster необходимо использовать не менее 60 расчетных ячеек для корректного учета кипения теплоносителя.

Среди различных температурно-плотностных обратных связей в расчетах тепловых реакторов наибольшее влияние на значения нейтронно-физических характеристик оказывают параметры теплоносителя. При этом для уточняющих расчетов также необходимо исследовать влияние температуры топлива и оболочки твэлов. Влияние температуры топлива и оболочки на интегральные и локальные характеристики анализируется на базе двух вариантов расчетов модели PWR 3x3 Pin-cluster – с учетом рассчитываемых в коде HYDRA-IBRAE/H₂O значений температуры топлива и оболочки и при фиксированных на протяжении всего расчета значениях, заданных на старте расчета. Для этих двух вариантов наблюдается значительное отличие $K_{эф}$, что обусловлено в большей степени Доплер-эффектом при изменении температуры топлива. При этом колебательный характер $K_{эф}$ сохраняется в расчетах независимо от используемого температурного представления модели. Обратные связи по температуре топлива и оболочки имеют значительное влияние на основные нейтронно-физические и теплогидравлические характеристики в связанных расчетах и должны применяться при построении согласованной расчетной модели в уточняющих расчетах.

Использование динамического источника нейтронов в практических расчетах ориентировано на ускорение сходимости Монте-Карло расчетов. Влияние динамического источника на $K_{эф}$ анализируется для системы PWR 3x3 Pin-cluster. Изменение значений $K_{эф}$ от итерации к итерации наблюдается при использовании динамического и равномерного источников, при этом использование динамического источника приводит к незначительному уменьшению амплитуды колебаний $K_{эф}$, что позволяет уменьшить расчетное время практически в 2 раза за счет уменьшения суммарной статистики.

После того как на базе макроячеек реакторов с водяным теплоносителем отработана технология связанных расчетов с использованием кода MCU-FREE и канального кода HYDRA-IBRAE/H₂O и показано согласие результатов с представленными в открытых источниках, осуществляется апробация технологии прецизионных расчетов системы PWR 3x3 Pin Cluster с использованием кода MCU-FREE и трехмерного кода OpenFOAM, реализующего методы вычислительной гидродинамики. Распределения температуры (рисунок 7) и плотности (рисунок 8) теплоносителя по кодам MCU-FREE/OpenFOAM и MCU-FREE/HYDRA-IBRAE/H₂O согласуются с

распределениями, полученными по кодам MCNP5/SUBCHANFLOW и MCNP6/CTF².

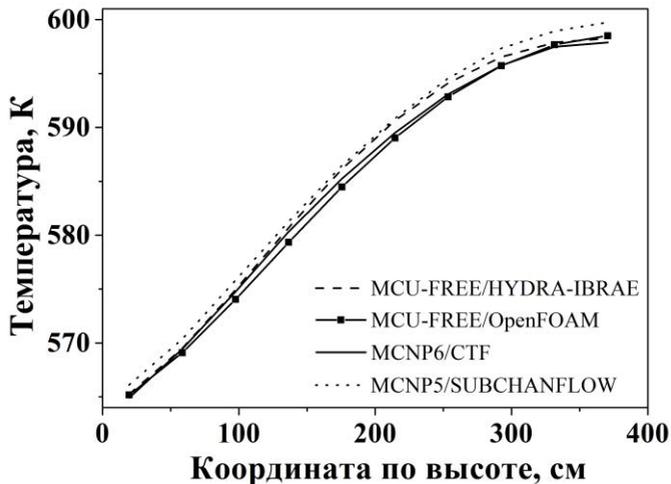


Рисунок 7 – Распределение температуры теплоносителя в связанных расчетах

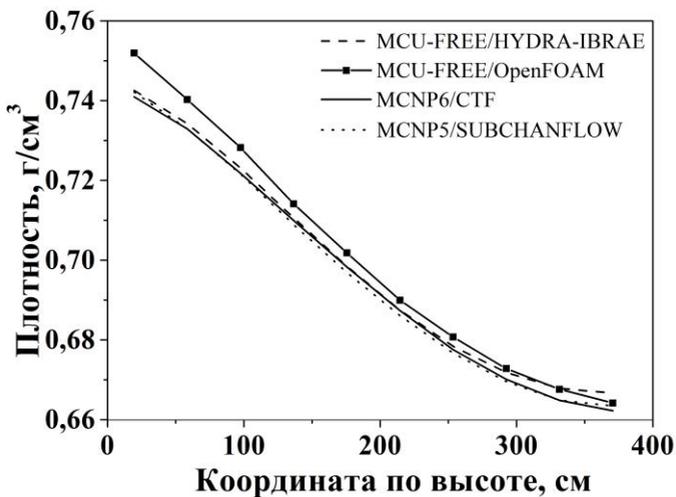


Рисунок 8 – Распределение плотности теплоносителя в связанных расчетах

² Bennett A., Avramova M., Ivanov K. Coupled MCNP6/CTF code: Development, testing, and application. — Annals of Nuclear Energy, 2016, 96, p. 1—11.

Различие плотности теплоносителя (рисунок 8) по кодам MCU-FREE/OpenFOAM и MCNP5/SUBCHANFLOW, MCNP6/CTF достигает 1,5% в нижней части расчетной модели ($z < 100$ см). Распределения температуры топлива по кодам MCU-FREE/OpenFOAM, MCU-FREE/HYDRA-IBRAE/H2O и MCNP5/SUBCHANFLOW, MCNP6/CTF согласуются с наибольшим различием ~ 50 К в центральной части твэла (рисунок 9).

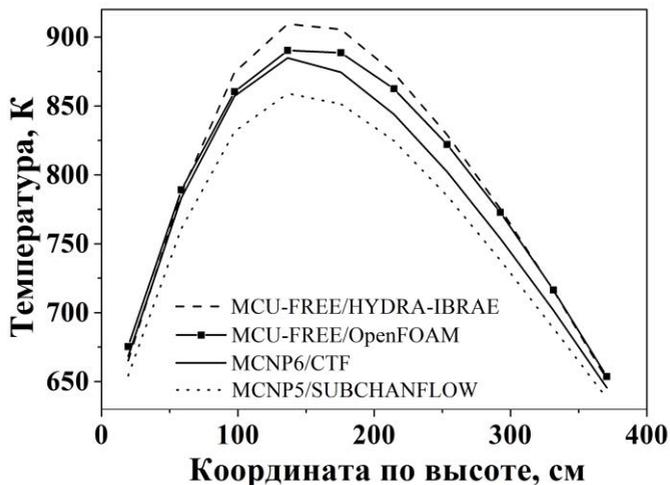


Рисунок 9 – Распределение температуры топлива в связанных расчетах

Отработанная для ячеек тепловых реакторов технология проведения связанных расчетов была применена для расчетов ячеек с жидкометаллическим теплоносителем. В данном случае особую важность при построении согласованной расчетной модели приобретает учет в теплогидравлических расчетах особенностей поперечного теплообмена, обусловленных малыми значениями чисел Прандтля, которые позволяет учесть используемая модель Кайса для определения турбулентного числа Прандтля.

В нейтронно-физических расчетах ячеек с жидкометаллическим теплоносителем выбор библиотеки ядерных констант оказывает большее влияние на рассчитываемые характеристики по сравнению с расчетами ячеек с водяным теплоносителем, что обусловлено спецификой быстрого спектра нейтронов, ядерных данных в резонансной области и большим разбросом ядерных данных для отдельных нуклидов в существующих стандартных библиотеках. Так замена данных только для изотопов свинца, подготовленных на базе РОСФОНД (JEFF-3.1), на данные из ENDF/B-VII.1 в проведенных ячейечных расчетах приводит к отклонениям значений плотности потока нейтронов до 5%. В этой связи во всех представленных связанных расчетах

использовалась единая библиотека ядерно-физических данных на базе РОСФОНД, поставляемая вместе с кодом MCU-FR.

В разделе 3.2 для модельной ячейки из 3x3 твэлов реактора со свинцовым теплоносителем в расчетах по кодам MCU-FR и OpenFOAM анализируются особенности построения согласованной расчетной модели в условиях пространственной гетерогенности, вызванной распуханием оболочки и топлива центрального твэла. Влияние распухания на теплогидравлические характеристики исследуется на основе результатов расчетов с распуханием центральной части центрального твэла.

В расчетах задаются реальные свойства материалов, включая свинцовый теплоноситель, смешанное нитридное уран-плутониевое (СНУП) топливо и оболочечная сталь, при этом используются модельные параметры распухания. Вариант 1 соответствует исходной неизменной геометрии (без распухания), в расчетных вариантах 2–6 моделируются твэлы с распуханием. Вариант 6 соответствует наибольшему распуханию, при этом параметры распухания выбраны таким образом, что изменение площади проходного сечения достигает 50%. Анализируется распределение скорости и температуры теплоносителя по высоте в центральной и периферийной ячейках (рисунок 10). Увеличение скорости теплоносителя в периферийной ячейке достигает ~5%, в центральной ячейке ~25%. В обоих случаях максимальное увеличение скорости потока наблюдается в центре по высоте (область распухания оболочки) в варианте с наибольшим распуханием. Изменение скорости теплоносителя влияет на распределение температур по высоте твэла, что в свою очередь обуславливает изменение нейтронно-физических характеристик.

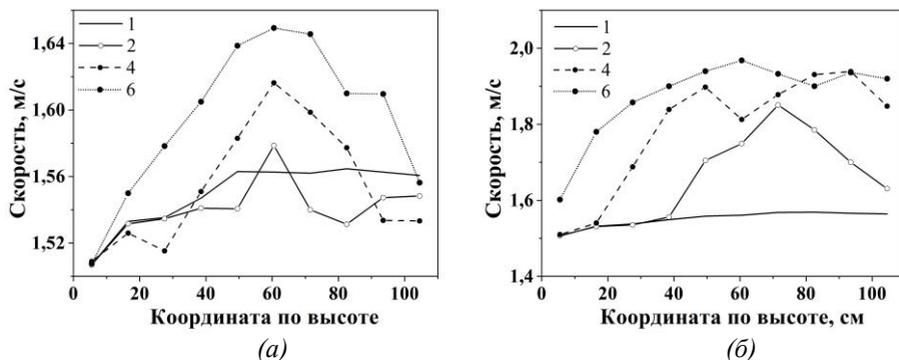


Рисунок 10 – Скорость теплоносителя в периферийной (а) и центральной (б) ячейках для различного распухания

В центральной ячейке максимальное увеличение температуры теплоносителя (рисунок 11) достигает ~10°C. В периферийной ячейке наблюдается увеличение до ~5°C, в данной связи графики температуры для периферийной ячейки при различном распухании не приводятся ввиду малого

отличия друг от друга. В обоих случаях максимальное увеличение наблюдается в верхней ячейке в варианте с наибольшим распуханием. Распухание центрального твэла оказывает значительное влияние на теплогидравлические характеристики центральной ячейки, характеристики периферийной ячейки изменяются в меньшей степени. Нейтронно-физические характеристики изменяются незначительно и не приводятся.

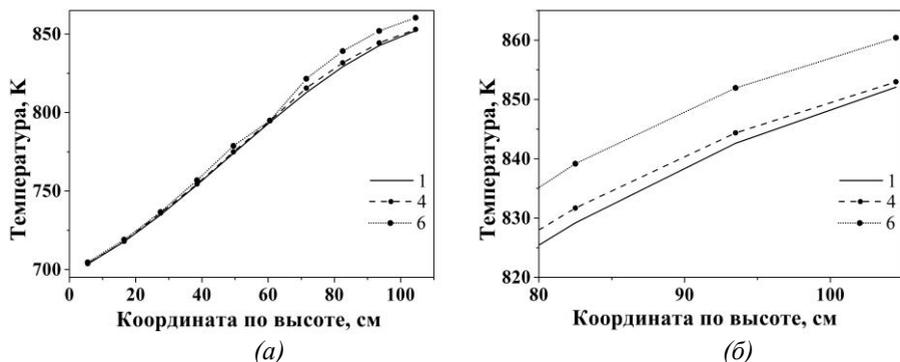


Рисунок 11 – Температура теплоносителя в центральной ячейке в обычном (а) и увеличенном (б) масштабе для различного распухания

Стоит отметить, что данный расчет является модельным и иллюстрирует качественную зависимость теплогидравлических параметров от распухания топлива и оболочки.

В разделе 3.3 рассматриваются результаты расчетов стационарного состояния на номинальном уровне мощности для модели реакторной установки со свинцовым теплоносителем и СНУП топливом с использованием аттестованного для элементов РУ со свинцовым теплоносителем кода ЕВКЛИД/V1. В расчете с применением интегрального кода все нейтронно-физические и теплогидравлические характеристики усредняются по аксиальным ячейкам ТВС, таким образом, с учетом анализа неопределенности получено усредненное значение температуры твэла для наиболее энергонапряженной ТВС.

Прецизионные связанные расчеты указанной ТВС проводятся с помощью кодов MCU-FR и OpenFOAM для уточнения оценки значений температуры топлива. Применение прецизионных связанных расчетов позволяет рассчитать распределение температуры твэлов внутри ТВС с учетом температурно-плотностных обратных связей. Полученные таким образом распределения максимальной и минимальной температуры твэлов в указанной ТВС сравниваются с усредненным распределением, полученным с применением интегрального кода ЕВКЛИД/V1 (рисунок 12).

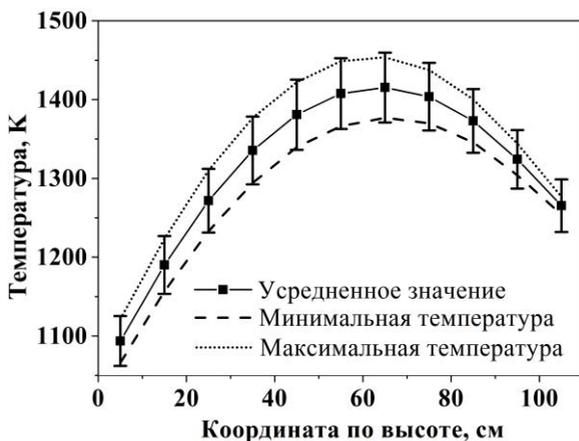


Рисунок 12 – Аксиальное распределение температуры топлива

Полученные в прецизионных расчетах с применением кодов MCU-FR и OpenFOAM значения максимальной температуры топлива превышают усредненные значения, полученные в рамках инженерного интегрального расчета по коду ЕВКЛИД, на величину до 41 К (3,0%), однако даже с учетом такого отклонения значения укладываются в доверительный интервал полученный с учетом анализа неопределенностей (до 45 К). Полученное различие обусловлено использованием в расчетах по коду ЕВКЛИД/V1 усредненных значений нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик.

Таким образом, продемонстрировано возможное практическое применение разработанной технологии связанных расчетов для обоснования консервативности получаемых по инженерным методикам результатов или для расчета соответствующих корректирующих коэффициентов (коэффициентов запаса).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана программная оболочка Coupled Calculation Shell (CCS, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021610112 от 12 января 2021 г.), содержащая инструментальные средства для построения согласованных расчетных моделей и проведения связанных стационарных расчетов по нейтронно-физическим кодам семейства MCU (MCU-FREE и MCU-FR) и CFD коду OpenFOAM и канальным теплогидравлическим кодам семейства HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H₂O и HYDRA-IBRAE/LM).
2. Выполнена верификация разработанной программной оболочки на базе ячеечных расчетов макроячеек реактора с водяным теплоносителем с

применением нейтронно-физического кода MCU-FREE и теплогидравлических кодов HYDRA-IBRAE/H2O и OpenFOAM. Подтверждено удовлетворительное согласие интегральных характеристик, полученных с применением одномерного кода HYDRA-IBRAE/H2O и CFD-моделирования на базе пакета OpenFOAM, с международными данными, представленными в открытых источниках.

3. Получены результаты расчетов макроячейки реактора со свинцовым теплоносителем с возмущением параметров, вызванных распуханием оболочки и топлива тепловыделяющих элементов. Показано влияние параметров распухания на рассчитываемые теплогидравлические характеристики. Нейтронно-физические характеристики при этом изменяются незначительно.
4. С использованием кода ЕВКЛИД/V1 проведен расчет стационарного состояния на номинальном уровне мощности для модели реакторной установки со свинцовым теплоносителем. В связанном расчете с применением кодов MCU-FR и OpenFOAM получены уточненные значения максимальной температуры топлива, которые попали в диапазон неопределенностей результатов расчетов по коду ЕВКЛИД/V1.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в ведущих реферируемых отечественных журналах из списка, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России:

- 1) Митенкова Е.Ф., Колташев Д.А., Кизуб П.А. Распределение скорости реакции деления в слабосвязанной системе для тестовой модели «шахматная доска». – Атомная энергия, том 116, выпуск 6, Москва, 2014, с. 345 – 349.
- 2) Колташев Д.А., Митенкова Е.Ф. Особенности связанных расчетов на базе кодов MCU и HYDRA-IBRAE для систем с сильной пространственной и плотностной гетерогенностью. – Известия РАН. Энергетика, вып. 1, Москва, январь-февраль 2017, с. 149 – 163.
- 3) Колташев Д.А., Митенкова Е.Ф. Разработка согласованной модели в прецизионных расчетах «нейтроника–теплогидравлика» с использованием CFD кодов. – Атомная энергия, том 125, вып. 2, Москва, 2018, с. 125 – 127.
- 4) Колташев Д.А. Моделирование активной зоны реактора со свинцовым теплоносителем при попадании водяного пара с помощью кода ЕВКЛИД/V1. – Атомная энергия, том 128, вып. 2, Москва, 2020, с. 114 – 116.

Другие публикации:

- 1) Кизуб П.А., Колташев Д.А., Митенкова Е.Ф. Анализ нейтронно-физических характеристик в ячеечных расчетах реактора ВВЭР с использованием кодов MCNP5 и MCU-FREE: Препринт № IBRAE-2013-04. 23 с.
- 2) Колташев Д.А. Отработка технологии связанных расчетов с применением кода MCU, базирующегося на методах Монте-Карло. Сборник трудов XIV научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, проходившей 25 – 26 апреля 2013 г. – (Препринт / Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, апрель 2013, № IBRAE-2013-03).-М. ИБРАЭ РАН, 2013. с. 112 – 115.
- 3) Колташев Д.А. Особенности расчетов Кэф и распределения скорости деления в слабосвязанных системах методом Монте-Карло. Сборник трудов XV научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, проходившей 24 – 25 апреля 2014 г. – (Препринт / Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, апрель 2014, № IBRAE-2014-02).-М. ИБРАЭ РАН, 2014. с. 116 – 119.
- 4) Колташев Д.А. Особенности связанных расчетов с использованием нейтронно-физического кода, базирующегося на методах Монте-Карло. Сборник трудов XVI научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, проходившей 23 – 24 апреля 2015 г. – (Препринт / Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, апрель 2015, № IBRAE-2015-01).-М. ИБРАЭ РАН, 2015. с. 100 – 103.
- 5) Колташев Д.А. Проведение связанных расчетов тестовой задачи BWR 3x3 Pin Cluster с применением нейтронно-физического кода, базирующегося на методах Монте-Карло. Сборник трудов XVII научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, проходившей 21 – 22 апреля 2016 г. / под общ. ред чл.-кор. РАН Л.А.Большова; Ин-тут проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук. - М.: ИБРАЭ РАН, 2016. с. 114 – 117.
- 6) Колташев Д.А. Проведение связанных расчетов тестовой задачи PWR 3x3 Pin Cluster с помощью кодов MCU-FREE и HYDRA-IBRAE. Труды 59-й научной конференции МФТИ. Проблемы современной физики / под общей ред. проф. А. Г. Леонова; сост. Е. Ю. Чиркина.– М. : МФТИ, 2016. с. 98 – 100.
- 7) Колташев Д.А. Связные расчеты тестовой задачи PWR 3x3 Pin Cluster по кодам MCU и OpenFOAM. Сборник трудов XVIII научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, проходившей 16 – 17 ноября 2017 г. / под общ. ред чл.-кор. РАН Л.А.Большова; Ин-тут проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук. -М.: ИБРАЭ РАН, 2017. с. 90 – 93.
- 8) Колташев Д.А., Митенкова Е.Ф. Обеспечение надежности связанных расчетов тепловых реакторных систем с использованием кодов MCU и

HYDRA-IBRAE. Сборник тезисов докладов 13-й Международной научно-практической конференции по атомной энергетике «Безопасность, эффективность, ресурс». – Севастополь, Оргкомитет МНПК АЭ-2017. – 132 с.: илл. с. 90 – 92.

9) Koltashev D. A., Stakhanova A. A. Neutronic calculation of fast reactors by the EUCLID/V1 integrated code //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 781. – №. 1. – С. 012003.

10) Колташев Д.А., Митенкова Е.Ф. Обеспечение надежности связанных расчетов тепловых реакторных систем с использованием кодов MCU и HYDRA-IBRAE. – Энергетические установки и технологии, том 4, номер 1, Севастополь, 2018, с. 30 – 35.

11) Колташев Д.А. Расширенная модель нейтронно-физического модуля кода ЕВКЛИД/V1 для расчета активной зоны РУ БРЕСТ-ОД-300 при разрыве трубок парогенератора. Сборник трудов XX научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, проходившей 12-13 сентября 2019 г. – (Препринт / Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, сентябрь 2019, № IBRAE-2019-02). – М. ИБРАЭ РАН, 2019. С. 103-106.

Колташев Дмитрий Александрович

Связанные расчеты макроячеек реактора на базе трехмерных
нейтронно-физических и теплогидравлических кодов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 27.04.2021
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 120 экз.
Печать на аппарате Rex-Rotary. ИБРАЭ РАН.
115191, Москва, ул. Б.Тульская, 52
Телефон: 8-495-955-22-66