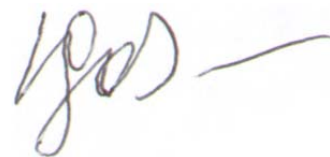


Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно–исследовательский технологический институт им. А.П.Александрова»

На правах рукописи



Юдов Юрий Васильевич

**Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных
контурах реакторных установок с водяным теплоносителем**

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Сосновый Бор – 2021

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

Научный консультант – доктор технических наук Мигров Юрий Андреевич.

Официальные оппоненты: Мелихов Олег Игорьевич,
доктор физико-математических наук, профессор кафедры АЭС
НИУ МЭИ;

Деревич Игорь Владимирович,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной
математики факультета Фундаментальных наук НИУ МГТУ
им. Н.Э. Баумана;

Митрофанова Ольга Викторовна,
доктор технических наук, профессор кафедры теплофизики
НИЯУ МИФИ.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»,
г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «25» ноября 2021 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета
Д 002.070.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте
проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191,
г. Москва, ул. Б. Тульская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук <http://www.ibrae.ac.ru/contents/487/>.

Автореферат разослан «___»_____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н.



В.Е.Калантаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы

Основными инструментами при проектировании, обосновании безопасности и разработке эксплуатационных и аварийных инструкций применительно к объектам атомной энергетики являются вычислительные программы (расчетные коды) для численного моделирования поведения систем и оборудования в различных режимах. Особую сложность для численного моделирования представляют теплогидравлические процессы в двухфазных потоках циркуляционных контуров реакторных установок (РУ) с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) в аварийных режимах с разгерметизацией первого контура.

Расчетные программы, использовавшиеся в 60-е – 70-е годы прошлого века для анализа безопасности водо-водяных реакторов, базировались на одномерных (1D) гомогенных моделях двухфазного течения теплоносителя. Поскольку эти модели не позволяют описывать двухфазные потоки со значительными термической и скоростной неравновесностями фаз, упор при проведении расчетов в те годы делался на консервативную (с запасом) оценку параметров, важных для безопасности РУ. В конце 70-х годов за рубежом произошел качественный скачок в моделировании двухфазных потоков. Были завершены разработки двухжидкостных неравновесных 1D моделей с тремя уравнениями сохранения массы, энергии и импульса для каждой из фаз. На основе таких моделей созданы системные теплогидравлические коды "улучшенной оценки" с гибкой топологической схемой функционирования: TRAC, RELAP5 (США), CATHARE (Франция), ATHLET (Германия), CATHENA (Канада).

К концу 90-х годов в России – одной из ведущих держав в области ядерной энергетики – наметилось значительное отставание от западных стран в части развития расчетного обеспечения новых проектов реакторных установок с ВВЭР. В то время применительно к ВВЭР в Госатомнадзоре было аттестовано для обоснования безопасности только два кода: ТРАП (разработчик ОКБ "ГИДРОПРЕСС", г. Подольск) и РАДУГА (разработчик "Атомэнергопроект", г. Москва), которые базировались на несоответствующих современным требованиям гомогенных теплогидравлических моделях. Такое положение дел способствовало повышению степени зависимости расчетного обоснования отечественных проектов АЭС нового поколения от Запада. Для изменения ситуации Минатомом России было принято решение интенсифицировать работу по созданию отраслевого системного кода, сконцентрировав на нем финансовые и интеллектуальные ресурсы. Для определения перспективного базового кода (из имеющихся разработок в организациях Минатома) в сентябре 1999 г. был объявлен тендер "Разработка и верификация системного теплогидравлического кода для моделирования аварийных и нестационарных процессов для АЭС с ВВЭР". Тендер проводил Отраслевой центр Минатома России по расчетным кодам для АЭС и реакторных установок (ОЦРК). Победителем тендера признан расчетный код (РК) КОРСАР, разрабатываемый с 1996 г. во ФГУП "НИТИ им. А.П. Александрова" (г. Сосновый Бор), отдельные оригинальные модели и алгоритмы которого вынесены на защиту данной диссертационной работы. С начала 2000 г. код развивался под эгидой Минатома, а затем Госкорпорации "Росатом".

В переходных, и особенно аварийных, режимах реакторных установок с водяным теплоносителем возможны ситуации, когда неконденсирующиеся газы (НГ) попадают в контур циркуляции. Они могут появляться в результате:

– дегазации растворенных в воде компонентов;

– проникновения азота из газовой подушки гидроаккумуляторов системы аварийного охлаждения зоны после их опорожнения;

– образования водорода и кислорода в активной зоне вследствие радиолиза воды и парациркониевой реакции в аварийных ситуациях.

Наличие неконденсирующихся газов в контуре циркуляции существенно влияет на теплофизические свойства парогазовой среды, а также приводит к снижению интенсивности межфазных тепломассообменных процессов. В результате создается газовый барьер для подвода пара к межфазной поверхности при конденсации и отвода пара от межфазной поверхности при испарении. Таким образом, НГ влияют на функционирование части оборудования и систем безопасности. Из-за попадания неконденсирующихся компонентов в паровой объем компенсатора давления снижается эффективность спринклерной системы, меняются динамические характеристики компенсатора давления. В авариях с потерей теплоносителя накопление газов в трубках парогенераторов значительно уменьшает тепловую эффективность системы пассивного отвода тепла при длительном расхолаживании. Поскольку НГ оказывают существенное воздействие на процессы в циркуляционном контуре, их влияние учитывается во всех системных теплогидравлических кодах улучшенной оценки.

Можно выделить общие принципы учета неконденсирующихся компонентов в двухжидкостных моделях:

- температура межфазной поверхности полагается равной температуре насыщения при парциальном давлении пара;
- влияние газового барьера на интенсивность генерации и конденсации пара моделируется введением эмпирических множителей, значение которых уменьшается при увеличении концентрации НГ в парогазовой среде;
- в кодах RELAP5 и CATHARE используется модель совместного диффузионного и термического сопротивления межфазному тепломассообмену в присутствии неконденсирующихся компонентов только в режимах пленочной конденсации;
- растворение НГ в жидкой фазе и их выделение из нее моделируются при заданных постоянных коэффициентах массообмена.

В диссертации представлена разработанная автором и программно реализованная в РК КОРСАР усовершенствованная методика учета переноса в фазах и влияния на межфазный тепломассообмен НГ.

При расчетном обосновании безопасности РУ с ВВЭР выделяются режимы с различным динамическим изменением температуры теплоносителя или концентрации борной кислоты по отдельным петлям циркуляционного контура. Особое внимание уделяется опасным сценариям со снижением данных параметров, что приводит к увеличению мощности реактора за счет отрицательных обратных связей. В качестве примеров можно привести режимы с разрывом паропровода одного из парогенераторов (ПГ), с подключением главного циркуляционного насоса (ГЦН) ранее неработавшей петли, с транспортировкой пробки деборированной воды (конденсата) из гидрозатвора холодной нитки при пуске ГЦН, с несанкционированным поступлением деборированной воды из системы подпитки и т.д. Перечисленные ситуации приводят к асимметричному возмущению поля температуры или концентрации борной кислоты на входе в активную зону и соответствующему асимметричному возмущению энерговыделения в тепловыделяющих сборках (ТВС) активной зоны. Динамика и распределение возмущений определяются в значительной мере процессами перемешивания в напорной камере реактора.

Заложенные в системных кодах возможности позволяют осуществлять пространственное моделирование сопряженных теплогидравлических (в поканальном приближении) и нейтронно-физических процессов в активной зоне. Упрощенное описание теплогидравлических процессов в напорной камере снижает уровень обоснованности результатов расчета режимов с несимметричной работой оборудования реакторных установок. Применение квазитрехмерного "гидравлического" приближения с многоканальным моделированием камеры и установлением между каналами поперечных связей дает лишь грубую картину явлений и зависит от подбора заранее неизвестных значений гидравлических сопротивлений. Настройка и обоснование многоканальных расчетных схем осуществляются на базе экспериментальных данных, полученных на стендовых моделях реакторных установок и на натуральных объектах при проведении пуско-наладочных испытаний. Стендовые установки являются дорогостоящими маломасштабными моделями РУ, эксперименты на них проводятся в граничной постановке, т.е. моделируется не весь контур, а только сам реактор. При пуско-наладочных испытаниях действующих энергоблоков АЭС проводятся измерения только в переходных режимах с незначительными возмущениями определяющих параметров, причем количество измеряемых параметров в этих опытах ограничено. Поэтому с полным основанием можно считать перспективным проведение расчетов аварийных режимов РУ ВВЭР по одномерным системным кодам, но при этом моделирование напорной камеры осуществлять в трехмерном (3D) CFD (Computation Fluid Dynamics) приближении. В последние годы предложено несколько технологий объединения посредством интегрирующих оболочек независимо разработанных коммерческих системных и CFD-кодов, например, связки TRACE-CFX, RELAP5-CFX, CATHARE-TRIO_U, RELAP5-STAR-CCM+, ATHLET-ANSYS CFX. Все они базируются на обмене данными по граничным условиям в конце временного шага. Обмен данными реализован либо по явной схеме, либо по полунеявной схеме с использованием итераций. В первом случае возникают проблемы устойчивости, во втором – проблемы сходимости итераций.

В диссертации приводятся результаты разработки специалистами ФГУП "НИТИ им. А.П. Александрова" под руководством и при непосредственном участии автора трехмерного CFD-модуля в составе кода КОРСАР для учета трехмерных эффектов в напорной камере реакторов. Этот модуль адаптирован как типовой элемент в составе новой версии расчетного кода КОРСАР/CFD. При этом впервые связи с элементами одномерной модели реализованы по полунеявной схеме с использованием мономатричного подхода для вычисления давления в расчетных ячейках 1D и 3D областей. Работа выполнена по заказу Главного конструктора РУ с ВВЭР АО ОКБ "ГИДРОПРЕСС".

Инженерные расчеты при обосновании теплотехнической надежности реакторов в настоящее время осуществляются по кодам поканального моделирования. В кодах поканального моделирования ячейки проточной части ТВС представляются в виде системы параллельных каналов, для каждого из которых записываются уравнения сохранения массы, энергии и количества движения теплоносителя в одномерном приближении с учетом обмена с соседними ячейками и поверхностью твэлов. Такие модели требуют дополнительных эмпирических корреляций для коэффициентов обмена: межъячеечного турбулентного перемешивания, поперечного конвективного обмена, сопротивления в продольном и поперечном направлениях и теплообмена с твэлами. Адекватность полученных результатов по инженерным кодам определяется точностью выбранных корреляций для замыкающих моделей. Экспериментальные данные по коэффициентам обмена, особенно по коэффициенту турбулентного перемешивания,

имеют значительный разброс (более 100%). Отсутствуют систематизированные эмпирические корреляции по влиянию дистанционирующих решеток на интенсивность межъячеечного обмена.

В последнее время в мире наблюдается устойчивая тенденция к снижению консерватизма и перехода к реалистичным оценкам при расчетном обосновании безопасности активных зон реакторных установок, что позволяет повысить теплонапряженность и компактность ТВС в новых проектах. По мере развития вычислительной техники при анализе теплогидравлических процессов в ТВС все более перспективным признается прямое численное моделирование (**Directed Numerical Simulation** или **DNS**). В методах **DNS** турбулентные пульсации воспроизводятся непосредственно из решения уравнений Навье-Стокса без привлечения дополнительных моделей. Коды на основе **DNS** применяются для получения данных по корректировке замыкающих соотношений **CFD**-кодов применительно к сборкам и для детального анализа характеристик турбулентного потока в сборках. В этой связи представляется перспективным использование программных средств, базирующихся на методах прямого численного моделирования, для получения и уточнения замыкающих моделей кодов поканального моделирования.

Автором диссертационной работы разработан специализированный код **DINUS** для прямого численного моделирования теплогидравлических процессов в тепловыделяющих сборках реакторов. С помощью кода на основе разработанной методики продемонстрирована возможность определения коэффициентов межъячеечного турбулентного перемешивания для ТВС с треугольной упаковкой с учетом влияния дистанционирующих решеток.

Основные цели и задачи работы

Целями диссертационной работы являются разработка и программная реализация методик, численных схем, алгоритмов следующих математических моделей:

- одномерной двухжидкостной модели двухфазного многокомпонентного потока в разветвленных циркуляционных контурах;
- трехмерной **CFD**-модели однофазной жидкости в напорных камерах реакторов;
- прямого численного моделирования однофазных турбулентных потоков в тепловыделяющих сборках активной зоны.

Исходя из этого, в диссертации решены следующие задачи:

1. Разработана методика учета поведения неконденсирующихся компонентов в двухжидкостной модели двухфазных потоков.
2. Разработана полуняевная численная схема интегрирования уравнений сохранения двухжидкостной модели многокомпонентных двухфазных потоков.
3. Указанные разработки внедрены в системный теплогидравлический код **КОРСАР**, выполнено их тестирование и верификация.
4. Разработан однофазный трехмерный **CFD**-модуль на базе метода обрезанных декартовых ячеек для моделирования теплогидравлических процессов в напорных камерах РУ с ВВЭР.
5. **CFD**-модуль адаптирован в составе функционального наполнения расчетного кода **КОРСАР/CFD**.
6. Выполнен комплекс работ по тестированию и верификации кода **КОРСАР/CFD** при трехмерном моделировании напорной камеры.
7. На основе прямого численного моделирования разработана и апробирована методика определения коэффициентов межъячеечного турбулентного перемешивания в

тепловыделяющих сборках с треугольной упаковкой с учетом влияния дистанционирующих решеток.

Научная новизна

В процессе выполнения диссертационной работы автором получены следующие научные результаты:

1. Предложена оригинальная методика учета влияния НГ в пароводяном теплоносителе на процессы межфазного тепломассообмена для двухжидкостной модели. Методика основана на использовании модели совместного диффузионного и термического сопротивления, методе аналогии процессов тепло- и массообмена, законе Генри, выделении нескольких механизмов межфазного тепломассообмена, отличающихся температурными либо концентрационными напорами, а также интенсивностью, и применяется единообразно для всех режимов течения двухфазного потока.

Предложенный подход естественным образом моделирует снижение интенсивности конденсации (генерации) пара в присутствии неконденсирующихся компонентов в газовой фазе из-за уменьшения (увеличения) температуры межфазной поверхности относительно температуры насыщения при парциальном давлении пара.

2. Разработана полунявная численная схема расчета динамики многокомпонентных двухфазных потоков. В численной схеме используются оригинальные соотношения для линеаризации по времени представленных неявно величин на межфазной поверхности: температуры и концентрации неконденсирующихся компонентов, а также концентрации насыщения компонентов в воде.
3. Предложены два оригинальных алгоритма коррекции полунявной численной схемы интегрирования по времени уравнений сохранения двухжидкостной многокомпонентной модели.

Первый из представленных алгоритмов осуществляет компенсацию численных дисбалансов массы и энергии фаз вследствие линеаризации нестационарных членов дискретных уравнений и обеспечивает консервативность схемы.

Второй алгоритм корректирует нефизичное перераспределение массы и энергии теплоносителя по расчетным ячейкам при изменении направления движения фаз за временной шаг, когда схема аппроксимации конвективных членов становится "антидонорной" по потоку.

4. Предложен оригинальный безытерационный метод расчета поля давления в разветвленных контурах циркуляции произвольной топологии, базирующийся на рекуррентных соотношениях метода прогонки.
5. Для CFD методов вложенной границы на декартовой сетке разработана и программно реализована пространственная аппроксимация конвективных и диффузионных членов на гранях декартовых ячеек второго порядка точности с компактными шаблонами при двукратном измельчении или укрупнении ячеек по координатному направлению.
6. Применительно к методам обрезанных декартовых ячеек предложен оригинальный оператор ограничения для многосеточного алгоритма расчета поля давления. Предложенный оператор ограничения учитывает наличие мелких обрезанных ячеек сетки, которые сливаются с соседними крупными ячейками в объединенную расчетную ячейку.
7. Впервые разработана и реализована методика объединения по полунявной численной схеме в мономатричном варианте расчета поля давления одномерной двухжидкостной модели системного теплогидравлического кода с трехмерной CFD-моделью.

С целью улучшения сходимости при итерационном решении уравнения Пуассона для определения объединенного поля давления используется многосеточный метод на множестве ячеек как 1D, так и 3D областей.

Трехмерная модель программно реализована в виде CFD-модуля как типового элемента нодализационной схемы кода КОРСАР/CFD.

8. С помощью трехмерных расчетов по коду КОРСАР/CFD продемонстрировано анизотропное растекание теплоносителя в напорных камерах РУ с ВВЭР. Поступающие из патрубков потоки теплоносителя движутся по окружности (в азимутальных направлениях) в обе стороны, приобретая направление в нижнюю камеру при слиянии азимутальных потоков. Под патрубками работающих петель образуются области стагнации потока.

На основе расчетного исследования предлагается объяснение данной картины течения.

Показано, что вследствие анизотропного растекания малые изменения условий ввода теплоносителя в напорную камеру оказывают существенное влияние на формирование профиля температуры либо концентрации борной кислоты на входе в активную зону при возмущениях из холодных ниток.

9. Впервые предложена методика определения на основе прямого численного моделирования коэффициентов межъячеечного турбулентного перемешивания в тепловыделяющих сборках с треугольной упаковкой с учетом влияния дистанционирующих решеток для активных зон реакторов. С помощью разработанного автором диссертации кода DINUS получены данные по распределению между дистанционирующими решетками коэффициентов межъячеечного турбулентного перемешивания в ТВС ВВЭР-440.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы способствуют повышению степени адекватности численного моделирования различных теплогидравлических систем с водяным теплоносителем.

Разработанные автором методики и алгоритмы легли в основу системного расчетного кода КОРСАР, который применяется конструкторскими организациями для анализа и обоснования безопасности АЭС с ВВЭР (АО ОКБ "ГИДРОПРЕСС", АО "АТОМПРОЕКТ") и ядерных энергетических установок транспортного назначения (АО "ОКБМ Африкантов"). Главный конструктор ВВЭР ОКБ "ГИДРОПРЕСС" и Генеральный проектировщик энергоблоков АЭС "АТОМПРОЕКТ" использовали код КОРСАР для обоснования безопасности АЭС сооруженных (или сооружаемых) в России: Балаковская, Балтийская, Калининская (4-й энергоблок), Ленинградская АЭС-2, Нововоронежская (4-й энергоблок) и за рубежом: Белорусская, "Белена" (Болгария), "Бушер" (Иран), "Куданкулам" (Индия), Тяньваньская (Китай), "Ханхикиви" (Финляндия).

Санкт-Петербургский политехнический университет, Нижегородский государственный университет, Уральский федеральный университет и Институт ядерной энергетики (г. Сосновый Бор Ленинградской обл.) используют код КОРСАР для обучения студентов.

Безытерационный метод расчета поля давления разветвленных циркуляционных контуров применяется в математических моделях полномасштабных тренажеров судовых ядерных энергетических установок ФГУП "НИТИ им. А.П. Александрова".

Трехмерное представление напорных камер реакторов с помощью CFD-модуля, внедренного в новую версию кода КОРСАР/CFD как типовой элемент нодализационных схем, позволит Главному конструктору ВВЭР проводить прецизионные расчеты аварийных режимов с несимметричной работой петель теплообмена. Результаты таких расчетов могут использоваться

для проверки и настройки многоканальных с поперечными связями моделей напорных камер, по которым проводится обоснование безопасности большинства режимов данного класса.

По результатам прямого численного моделирования турбулентных потоков в сборках стержней с треугольной упаковкой получено наилучшее совпадение рассчитанного коэффициента межъячеечного турбулентного перемешивания вдали от дистанционирующей решетки с данными корреляции Ким-Чанга. На основании этого факта корреляция Ким-Чанга была предложена автором для реализации в поканальной модели активной зоны ВВЭР кода КОРСАР. Дополнительно введен численный коэффициент, учитывающий интенсификацию межъячеечного перемешивания вследствие турбулизирующего эффекта дистанционирующих решеток.

Методология и методы исследования

В диссертации для решения задач гидродинамики и теплообмена применяются методы математического моделирования, основанные на численном интегрировании систем дифференциальных уравнений сохранения массы, энергии и количества движения в потоке теплоносителя. Используются математические модели трех видов:

1. Одномерная двухжидкостная модель для многокомпонентного двухфазного потока в контурах циркуляции. В двухжидкостной модели процессы, которые являются следствием поперечных градиентов параметров, такие как тепловое и механическое межфазные взаимодействия, а также тепловые и механические взаимодействия фаз со стенками каналов учитываются посредством алгебраических источниковых членов в уравнениях сохранения. Источниковые члены вычисляются по полуэмпирическим замыкающим соотношениям в зависимости от режимов течения и теплообмена двухфазного потока.
2. Трехмерная CFD модель однофазного турбулентного потока, базирующаяся на решении усредненных уравнений Навье-Стокса в форме Рейнольдса. Влияние пульсаций параметров на характеристики потока учитываются при помощи замыкающих соотношений для турбулентных напряжений Рейнольдса (либо турбулентной вязкости).
3. Прямое численное моделирование турбулентных потоков. При прямом численном моделировании не требуются замыкающие модели для турбулентных напряжений. Турбулентные пульсации компонентов скорости и соответствующие им турбулентные напряжения получаются непосредственно из численного решения уравнений сохранения.

Дискретизация уравнений сохранения осуществляется методом контрольного объема на шахматной сетке для одномерной модели и на совмещенной сетке для CFD и DNS-моделей. При аппроксимации по пространству членов уравнений CFD-модели применяется метод обрезанных декартовых ячеек, а DNS-модели – метод обобщенных (криволинейных) координат.

Реализация моделей в разработанных программных комплексах КОРСАР, КОРСАР/CFD, DINUS осуществлялась по принципу поэтапного перехода от простого к сложному, то есть последовательного включения, тщательного тестирования и верификации численных алгоритмов и методик.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика расчета поведения неконденсирующихся газов в пароводяном теплоносителе, базирующаяся на использовании только физических законов без привлечения дополнительных эмпирических коэффициентов, которая позволяет адекватно моделировать в широком диапазоне параметров многокомпонентные двухфазные потоки.

2. Полуявная численная схема интегрирования уравнений сохранения многокомпонентной двухжидкостной модели и ее программная реализация в расчетном коде КОРСАР. При разработке численной схемы предложено несколько оригинальных алгоритмов:
 - линеаризация неявных членов уравнений сохранения массы и энергии при наличии неконденсирующихся компонентов в пароводяном потоке;
 - алгоритм компенсации численных дисбалансов массы, энергии фаз и массы компонентов в газовой фазе вследствие линеаризации нестационарных членов дискретных уравнений, обеспечивающий консервативность схемы;
 - корректировка нефизичного перераспределения массы и энергии теплоносителя по расчетным ячейкам при изменении направления движения фаз за временной шаг, когда схема аппроксимации конвективных членов становится "антидонорной" по потоку;
 - безытерационный метод расчета поля давления по расчетным ячейкам нодализационной схемы разветвленного контура циркуляции произвольной топологии.
3. Верификация модели межфазного тепломассообмена в присутствии неконденсирующихся компонентов расчетного кода КОРСАР по экспериментальным данным с пленочной конденсацией и испарением жидкой пленки в паровоздушных потоках и тестирование на задаче с выделением азота из перенасыщенного раствора воды.
4. Разработка трехмерного CFD-модуля для однофазного теплоносителя на основе метода обрезанных декартовых ячеек.
5. Методика объединения трехмерного CFD-модуля с одномерной двухжидкостной моделью контурной теплогидравлики по полуявной мономатричной схеме.
6. Программная реализация CFD-модуля как типового элемента гибкой топологической схемы системного кода КОРСАР/CFD.
7. Верификация расчетного кода КОРСАР/CFD по режимам реакторной установки ВВЭР-1000 с несимметричной работой оборудования петель при моделировании напорной камеры реактора в трехмерной постановке с помощью CFD-модуля.
8. Расчетный код DINUS для прямого численного моделирования турбулентных потоков в тепловыделяющих сборках активной зоны реакторов, его тестирование и верификация.
9. Методика определения коэффициентов межячеечного турбулентного перемешивания с учетом влияния дистанционирующих решеток в ТВС на основе расчетов по кодам класса DNS.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается:

1. Использованием математических моделей, основанных на фундаментальных законах сохранения массы, энергии и количества движения в двухфазных и однофазных потоках.
2. Применением научно обоснованных физических моделей и численных алгоритмов.
3. Результатами тестирования и верификации разработанных расчетных кодов.
4. Методической проработкой решаемых задач, включающей проверку степени зависимости получаемых решений от расчетной сетки, постановки граничных условий и т.д.
5. Публикацией результатов в рецензируемых журналах и их обсуждением на ведущих российских и международных конференциях и семинарах.

Апробация диссертации

Результаты работы докладывались на:

- международных конференциях: "Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР" (21–24 ноября 1995 г. и 26–29 мая 1998 г., г. Обнинск, РФ), International Conference on Nuclear Engineering (ICONE9, 8–12 апреля 2001 г., г. Ницца, Франция, ICONE11, 20–23 апреля 2003 г., г. Токио, Япония, ICONE14, 17–20 июля 2006 г., Майами, США), международных научно-технических конференциях "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР" (МНТК4, 23–26 мая 2005 г., МНТК5, 29 мая – 1 июня 2007 г., МНТК6, 26–29 мая 2009 г., МНТК7, 17–20 мая 2011 г., МНТК8, 28–31 мая 2013 г., МНТК9, 19–22 мая 2015 г., МНТК10, 16–19 мая 2017 г., МНТК11, 21–24 мая 2019 г., г. Подольск, РФ), на симпозиумах AER (Atom Energy Research) по физике и безопасности реакторов ВВЭР (17^{ый} симпозиум, 24–29 сентября 2007 г., г. Ялта, Украина и 24^{ый} симпозиум, 14–18 октября 2014 г., г. Сочи, РФ), CFD4NRS-4 (CFD for Nuclear Reactor Systems) Workshop "The Experimental Validation and Application CFD and CMFD Codes in Nuclear Reactor Technology" (10–12 сентября 2012г., г. Тэджон, Корея), международной научно-практической конференции (МНПК) по атомной энергетике (2–7 октября 2017 г., г. Севастополь, РФ);
- российских конференциях: отраслевой конференции "Гидродинамика и безопасность АЭС" (28–30 сентября 1999 г., г. Обнинск), отраслевой конференции "Теплогидравлические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация)" (29–31 мая 2001 г., г. Обнинск), всероссийских научно-технических конференциях "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР" (2^{ой}, 19–23 ноября 2001 г. и 3^{ей}, 26–30 мая 2003 г., г. Подольск), научно-практической конференции молодых ученых и специалистов "КОМАНДА" (8–10 июня 2015 г., г. Санкт-Петербург);
- семинарах: Минатома РФ "Динамика энергоблоков атомных станций (проблемы управления и безопасности)" (30 мая–3 июня 1994 г., г. Сосновый Бор), по динамике ядерно-энергетических установок "Математическое и физическое моделирование ядерных реакторов и петлевых установок, проблемы верификации" (Минатом РФ, 9–13 сентября 1996 г., г. Димитровград), секции динамики "Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации" (18–22 сентября 2000 г., г. Сосновый Бор), XIII школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках" (20–25 мая 2001г., г. Санкт-Петербург), межотраслевом научно-техническом семинаре "Расчетные и экспериментальные исследования динамики ядерных энергетических установок на этапах жизненного цикла" (20–22 октября 2015 г., г. Сосновый Бор), межотраслевом научно-техническом семинаре "Моделирование динамики ЯЭУ" (5–7 июня 2018 г., г. Сосновый Бор).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации ее автором опубликованы 53 работы, из них 20 – в реферируемых отечественных журналах из списка ВАК при Минобрнауки ("Теплоэнергетика", "Математическое моделирование", "Вопросы атомной науки и техники", "Технология обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок"), одна – в зарубежном журнале "Kerntechnik" из базы данных и системы цитирования Scopus, 32 – в материалах международных и российских конференций, семинаров. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (№ 2000610816, № 2005612500, № 2011613548).

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в:

1. Разработке методики учета влияния неконденсирующихся газов в рамках одномерной двухжидкостной модели пароводяных потоков.
2. Программной реализации в расчетном коде КОРСАР полунявной численной схемы интегрирования уравнений сохранения многокомпонентной двухжидкостной модели применительно к циркуляционным контурам произвольной топологии.
3. Верификации и тестированию методики учета влияния неконденсирующихся газов РК КОРСАР.
4. Руководстве и непосредственном участии:
 - 4.1 при создании трехмерного CFD-модуля для моделирования однофазного теплоносителя на основе метода обрезанных декартовых ячеек;
 - 4.2 при тестировании и верификации CFD-модуля.
5. Разработке и программной реализации полунявной мономатричной схемы объединения 1D и 3D моделей и адаптации CFD-модуля как типового элемента в составе расчетного кода КОРСАР/CFD.
6. Верификации расчетного кода КОРСАР/CFD по экспериментам с перемешиванием теплоносителя в напорной камере реактора при ее трехмерном моделировании с помощью CFD-модуля и анализе результатов верификационных расчетов.
7. Разработке, тестировании и верификации расчетного кода DINUS для прямого численного моделирования турбулентных потоков через тепловыделяющие сборки реакторов с учетом влияния дистанционирующих решеток.
8. Разработке и апробации методики на основе прямого численного моделирования расчета коэффициента межъячеечного турбулентного перемешивания для ТВС активных зон реакторов.

Вынесенные на защиту оригинальные элементы методик и численных алгоритмов разработаны лично автором.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы, трех приложений и списка иллюстраций. Диссертационная работа изложена на 277 страницах, содержит 18 таблиц, 121 рисунок. Список литературы включает 215 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика диссертационной работы. В частности, обоснована актуальность темы исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В начале **первой главы** дана общая характеристика системного теплогидравлического расчетного кода (РК) КОРСАР, предназначенного для обоснования безопасности реакторных установок с водяным теплоносителем [3, 4, 30, 32, 52].

Основой функционального наполнения кода КОРСАР является блок расчета нестационарной контурной теплогидравлики. В этом блоке реализован алгоритм численного решения уравнений

сохранения многокомпонентной двухжидкостной модели (вода, пар, неконденсирующиеся газы) в одномерном приближении.

Для обеспечения работоспособности блока контурной теплогидравлики в состав функционального наполнения входят два вспомогательных программных блока:

- расчет замыкающих соотношений теплогидравлической модели;
- расчет термодинамических свойств воды и парогазовой смеси.

При разработке программного модуля расчета термодинамических свойств воды и парогазовой смеси учтены требования полунявной численной схемы двухжидкостной модели:

- необходимость расчета полного набора производных термодинамических потенциалов от термодинамических переменных как для водяной, так и для парогазовой фаз и обеспечение непрерывности этих производных во всем диапазоне изменения рассчитываемых переменных;
- обеспечение экстраполируемости свойств в области метастабильных состояний воды (перегретая вода) и пара (переохлажденный пар).

Для расчета нестационарных нейтронно-физических процессов и остаточного тепловыделения в активной зоне в расчетном коде имеются:

- программный блок КАРТА, обеспечивающий трехмерное моделирование кинетики водородного реактора;
- модуль расчета кинетики реактора в сосредоточенных параметрах (точечная модель).

В состав функционального наполнения РК КОРСАР входит набор специализированных программных модулей, обеспечивающих расчет нестационарных процессов в отдельных элементах оборудования (теплопроводящая конструкция, пароводяной сосуд под давлением, гидроаккумулятор, бак со свободным уровнем, центробежный насос, задвижка и т.д.). Специализированные программные модули включены во временной цикл интегрирования уравнений сохранения в блоке контурной теплогидравлики по явной схеме и определяют для них граничные условия.

Для обеспечения функционирования РК КОРСАР в режиме гибкой топологической схемы были разработаны номенклатура, принципы связей и спецификация типовых элементов нодализационных схем моделируемых объектов, а также структура информационного поля расчетного кода. Общение пользователей с кодом осуществляется посредством специализированного, мнемоничного языка DLC (**D**ata **L**anguage for **C**odes). Разработанный и реализованный, как составная часть кода, интерпретатор языка DLC осуществляет обработку файла входных данных, их синтаксический и семантический контроль, выдает соответствующие диагностические сообщения и заполняет информационное поле. Информационное поле представляет собой набор COMMON-блоков, в которых по результатам обработки файла входных данных заносится исчерпывающая информация обо всех элементах нодализационной схемы, связях между элементами и об управляющих воздействиях в процессе решения задачи. Дополнительно программные средства DLC обеспечивают доступ к элементам информационного поля в процессе решения задачи.

С момента создания кода КОРСАР постоянно проводилась его верификация согласно матрицам явлений и экспериментов применительно к ВВЭР. В процессе верификации использовались экспериментальные данные, полученные на локальных стендах [36, 39], интегральных установках [9, 34, 41], натуральных объектах [45], и сопоставление с данными расчетов

по другим кодам [10]. Результаты верификации обобщены в верификационных отчетах при аттестации кода в надзорных органах.

Первая версия расчетного кода КОРСАР/В1.1 была завершена в 2000 г. [2] и была аттестована в Госатомнадзоре в 2003¹ г. Она базируется на двухжидкостной модели пароводяного потока без учета влияния неконденсирующихся газов. Кинетика реактора рассчитывается по точечной модели. В 2005 г. была зарегистрирована версия РК КОРСАР/В2 с пространственной моделью кинетики реактора [11], а в 2009 г. - версия РК КОРСАР/ГП, в которой дополнительно учитывается динамика неконденсирующихся газов в блоке контурной теплогидравлики [13]. В 2009 г. РК КОРСАР/ГП аттестован в Ростехнадзоре². К 2014 г., после добавления моделей явлений, специфических для активных зон и оборудования реакторных установок с реакторами блочной и интегральной компоновки (разработки АО "ОКБМ Африкантов"), создана и аттестована в Ростехнадзоре версия РК КОРСАР/BR³.

В разделе 1.2 приводится описание двухжидкостной модели кода КОРСАР применительно к пароводяным двухфазным потокам [5, 31, 33], а в разделе 1.3 изложена система замыкающих соотношений к уравнениям сохранения этой модели.

Автор диссертации внес определяющий вклад в обоснование и выбор замыкающих соотношений для теплогидравлической модели на основе анализа, модификации приведенных в литературе методик и корреляций, что отражено в работах [6-8, 29, 37]. Логической основой методики расчета замыкающих соотношений для определения межфазного и пристеночного трения, теплообмена на стенке и межфазного теплообмена служат согласованные между собой карты режимов течения и теплообмена двухфазных потоков.

В последнем разделе главы предложена разработанная автором диссертационной работы методика учета в рамках двухжидкостной модели влияния неконденсирующихся газов в части межфазного тепло- и массообмена, а также расчета свойств парогазовой среды.

Описание поведения неконденсирующихся газов осуществляется при следующих допущениях:

1. Учитывается смесь четырех компонентов в любой комбинации: азота (N_2), водорода (H_2), кислорода (O_2) и гелия (He).
2. Перенос неконденсирующихся компонентов происходит как в газовой, так и в жидкой фазах.
3. Компоненты газовой фазы, а также жидкая фаза и растворенные в ней компоненты, находятся в механическом и термическом равновесии.
4. Парогазовая смесь и компоненты неконденсирующихся газов описываются законами Дальтона и Менделеева-Клапейрона, соответственно. Предполагается, что удельная энтальпия компонентов НГ является функцией только температуры и не зависит от давления.
5. Концентрация неконденсирующихся компонентов в жидкой фазе мала, поэтому влиянием этих компонентов на физические свойства жидкости можно пренебречь. Изменения массы и энергии жидкой фазы при дегазации и растворении в ней неконденсирующихся газов не учитываются.

¹ Программный комплекс КОРСАР/В1.1. Аттестационный паспорт программного средства № 168 от 23.12.2003. Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности.

² Программный комплекс КОРСАР/ГП. Аттестационный паспорт программного средства № 263 от 23.09.2009. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.

³ Программное средство КОРСАР/BR. Аттестационный паспорт программного средства № 355 от 17.04.2014. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор).

Учет неконденсирующихся компонентов в двухжидкостной модели при принятых допущениях позволяет оставить без изменения уравнения сохранения массы, энергии и количества движения фаз. Дополнительно добавляются уравнения сохранения массы неконденсирующихся компонентов в фазах и принимается, что плотность газовой фазы зависит как от давления и удельной энтальпии смеси, так и от ее компонентного состава.

Модель межфазного теплообмена при наличии неконденсирующихся газов в расчетном коде КОРСАР базируется на следующих основных предположениях [16, 38]. Межфазный теплообмен происходит как в объемах фаз, так и на межфазной поверхности. В объемах фаз реализуются интенсивные теплообменные процессы при метастабильном состоянии жидкой фазы и пара, такие как вскипание жидкости вследствие ее перегрева выше температуры насыщения при полном давлении теплоносителя, выделение компонентов неконденсирующихся газов из перенасыщенного раствора, спонтанная конденсация парового компонента из-за переохлаждения газовой смеси ниже температуры насыщения при парциальном давлении пара T_{sv} . На межфазной поверхности происходит значительно менее интенсивный, чем в объемах фаз, теплообмен при любом состоянии фаз.

Межфазные тепловые и массовые потоки при метастабильном состоянии фаз пропорциональны отклонению соответствующих параметров от линии насыщения. Удельные тепловые и массовые потоки на межфазной поверхности записываются как произведение коэффициентов теплообмена (массообмена) на температурный (концентрационный) напор относительно параметров на межфазной поверхности.

Температура на межфазной поверхности рассчитывается по модели совместного диффузионного и термического сопротивления теплообмену парового компонента газовой смеси, а концентрация неконденсирующихся компонентов в жидкости на поверхности и концентрация насыщения – по закону Генри.

Наличие неконденсирующихся газов не влияет на значения коэффициентов теплообмена со стороны жидкой фазы. Влияние НГ на коэффициенты теплообмена со стороны газовой фазы учитывается только через свойства парогазовой среды. Коэффициенты массообмена определяются по аналогии процессов тепло- и массообмена.

Модель совместного диффузионного и термического сопротивления базируется на балансовом уравнении сохранения массы парового компонента на межфазной поверхности, из которого определяется ее температура T_i :

$$\frac{\beta_{vi} P M_v}{R T_g} \ln \frac{P - P_v}{P - P_s(T_i)} = \gamma(T_i). \quad (1)$$

Выражение в левой части представляет массовую скорость парового компонента через газовый барьер от межфазной поверхности (либо к межфазной поверхности) при заданной на ней величине парциального давления $P_s(T_i)$. В правой части γ является удельной интенсивностью генерации (конденсации) пара на межфазной поверхности:

$$\gamma(T_i) = \left(\sum_p \alpha_{pi} (T_p - T_i) + \alpha_{wf} (T_w - T_i) \right) / r(T_i). \quad (2)$$

В соотношении (1) β_{vi} – коэффициент массообмена парового компонента газовой смеси к межфазной поверхности, P – давление, M_v – молекулярная масса пара, R – универсальная газовая постоянная, T_g – температура газовой фазы, P_v – парциальное давление парового компонента,

$P_s(T_i)$ – давление насыщения при температуре T_i . В соотношении (2) индекс "p" обозначает произвольную фазу (f – жидкость, g – газ), α_{pi} – коэффициенты межфазного теплообмена со стороны фаз, α_{wf} – коэффициент теплообмена со стенкой при пленочной конденсации, T_p – температура фаз, T_w – температура стенки, $r(T_i)$ – теплота фазового перехода.

При конденсации пара $\gamma(T_i) < 0$ и по соотношению (1) получается, что концентрация пара у межфазной поверхности ниже концентрации пара в объеме газовой фазы и $T_i < T_{sv}$, поскольку $P_s(T_i) < P_v$. В случае испарения, когда $\gamma(T_i) > 0$, $P_s(T_i) > P_v$ и концентрация пара у межфазной поверхности превышает таковую в объеме газовой фазы, а $T_i > T_{sv}$. Согласно соотношению (2) данное обстоятельство снижает интенсивность межфазного тепломассообмена в присутствии НГ.

Интересно рассмотреть предельные случаи уравнения (1). При $P_v \rightarrow 0$ (газовая фаза является только смесью неконденсирующихся компонентов) левая часть уравнения может быть только положительной. Таким образом, в этом случае возможно только испарение пара из существующей жидкой фазы. Если $P_v \rightarrow P$, то $P_s(T_i) \rightarrow P$ и, следовательно, $T_i \rightarrow T_s$. В этом случае возможны ситуации, когда левая часть (1) будет как положительной (испарение), так и отрицательной (конденсация).

Предложенная методика основана на использовании физических законов (совместное диффузионное и термическое сопротивление тепломассообмену, аналогия процессов тепло - и массообмена, закон Генри и т.д.) и позволяет моделировать влияние неконденсирующихся компонентов для всех режимов течения двухфазного потока без привлечения дополнительных замыкающих соотношений.

Во **второй главе** приведена численная схема интегрирования уравнений сохранения двухжидкостной многокомпонентной модели РК КОРСАР. В РК КОРСАР используется полунявная численная схема на шахматной расчетной сетке, которая была разработана применительно к американским кодам RELAP5, TRAC и реализована, в том числе, в канадском коде CATHENA. Фрагменты шахматной сетки изображены на рисунке 1. В полунявных численных схемах выбор степени неявности обусловлен, с одной стороны, возможностью исключения итерационных процедур при переходе по времени от одного слоя к другому, с другой стороны – возможно меньшими ограничениями на величину шага по времени.

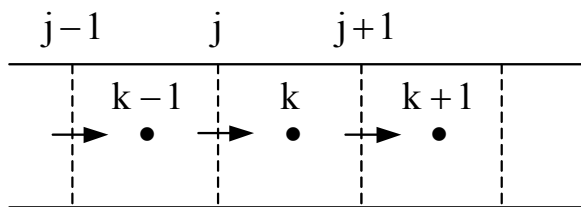
Аппроксимация по неявной схеме применяется только для членов уравнений, которые обеспечивают "мягкие" условия Куранта (по максимальной скорости фаз потока), а также для членов уравнений, описывающих интенсивные межфазные взаимодействия с малыми постоянными времени. Дополнительно неявно учитываются механическое взаимодействие фаз со стенками каналов и потери давления на местных сопротивлениях в уравнениях сохранения количества движения. "Мягкие" условия Куранта достигаются за счет представления неявно конвективных членов в уравнениях сохранения массы фаз относительно их скоростей, а также градиентных членов по давлению в уравнениях сохранения количества движения. Переносимые донорные величины вычисляются явно по параметрам с предыдущего временного слоя. Для соблюдения условий консервативности численной схемы такая аппроксимация конвективных членов применяется также в уравнениях сохранения энергии фаз и массы неконденсирующихся компонентов в фазах. Нестационарные и неявные источниковые члены уравнений сохранения линеаризуются по времени.

Нестационарные члены уравнений сохранения массы и энергии записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{(\varphi_p \rho_p \Phi)^{n+1} - (\varphi_p \rho_p \Phi)^n}{\Delta t} &\approx \frac{\partial(\varphi_p \rho_p \Phi)^L}{\partial t} = \\ &= \varphi_p^n \rho_p^n \frac{\Phi^{n+1} - \Phi^n}{\Delta t} + \varphi_p^n \Phi^n \frac{\rho_p^{n+1} - \rho_p^n}{\Delta t} + \rho_p^n \Phi^n \frac{\varphi_p^{n+1} - \varphi_p^n}{\Delta t}. \end{aligned} \quad (3)$$

В соотношении (3) верхний индекс "n" обозначает временной слой, Δt – шаг интегрирования по времени, φ – объемное содержание фазы, ρ – плотность, Φ – зависимая переменная ($\Phi = 1$ для уравнений сохранения массы фаз, удельная энтальпия h для уравнений сохранения энергии фаз и массовая доля неконденсирующихся компонентов X_{ng} для уравнений сохранения массы НГ в газовой фазе).

а)



б)

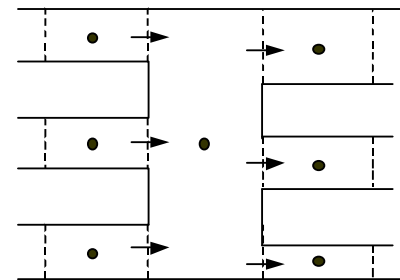


Рисунок 1 – Фрагменты шахматной расчетной сетки

а) канал, б) область ветвления

Дополнительно линеаризуются функции плотностей фаз от зависимых переменных:

$$\begin{aligned} \rho_f^{n+1} &\approx \rho_f^L = \rho_f^n + \left(\frac{\partial \rho_f}{\partial P} \right)^n (P^{n+1} - P^n) + \left(\frac{\partial \rho_f}{\partial h_f} \right)^n (h_f^{n+1} - h_f^n), \\ \rho_g^{n+1} &\approx \rho_g^L = \rho_g^n + \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial P} \right)^n (P^{n+1} - P^n) + \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial h_g} \right)^n (h_g^{n+1} - h_g^n) + \\ &+ \sum_{n=1}^{N_n} \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial X_{ng}} \right)^n (X_{ng}^{n+1} - X_{ng}^n), \end{aligned} \quad (4)$$

где суммирование осуществляется по компонентам НГ, N_n – общее количество компонентов.

В случае многокомпонентной двухфазной среды при линеаризации межфазных потоков кроме производных, определяемых из термодинамических свойств веществ, требуются частные производные параметров на межфазной поверхности от рассчитываемых переменных. В качестве примера можно привести вычисление производной $\partial T_i / \partial P$ из соотношений (1), (2) в предположении, что коэффициент перед логарифмом в (1) и теплота фазового перехода в (2) являются константами:

$$\frac{\partial T_i}{\partial P} = \left[(P - P_s(T_i)) \sum_p \alpha_{pi} \frac{\partial T_p}{\partial P} + C_1 \left(1 - \frac{(1 - \partial P_v / \partial P)(P - P_s(T_i))}{P - P_v} \right) \right] / C_2, \quad (5)$$

где $C_1 = \beta_{vi} P M_{vr}(T_i) / (RTg)$, $C_2 = \left(\sum_p \alpha_{pi} + \alpha_{wf} \right) (P - P_s(T_i)) + C_1 dP_s(T_i) / dT_i$.

Несложно показать, что в предельном случае, когда газовая фаза представляет собой только паровой компонент, $\partial T_i / \partial P \approx dT_s / dP$.

В итоге, после линеаризации получим линейные связи на новом временном слое приращений за временной шаг рассчитываемых переменных в центре ячеек с порядковым номером "k" в каналах (см. рисунок 1а) от скоростей фаз в соединениях ячеек:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{g}_k^I W_{g,j}^{n+1} - \mathbf{g}_k^{II} W_{g,j+1}^{n+1} + \mathbf{l}_k^I W_{f,j}^{n+1} - \mathbf{l}_k^{II} W_{f,j+1}^{n+1} + \mathbf{a}_k, \quad k = \overline{1, N} \quad (6)$$

и скоростей фаз в соединениях с порядковым номером "j" от перепада давления:

$$\mathbf{Y}_j = \mathbf{c}_j + \mathbf{d}_j (P_{k-1}^{n+1} - P_k^{n+1}), \quad j = \overline{1, N+1}. \quad (7)$$

В (6) $\mathbf{X} = (h_g^{n+1} - h_g^n, h_f^{n+1} - h_f^n, \varphi_g^{n+1} - \varphi_g^n, P^{n+1} - P^n, X_{ng}^{n+1} - X_{ng}^n)$ – вектор неизвестных размерностью $4 + N_n$, \mathbf{g}^I , \mathbf{g}^{II} , \mathbf{l}^I , \mathbf{l}^{II} , \mathbf{a} – известные векторы, определяемые по значению параметров в центре расчетных ячеек и донорных величин в соединениях на предыдущем временном слое, N – общее количество расчетных ячеек в канале. В случае, когда расчетная ячейка моделирует область ветвления циркуляционного контура, в правой части (6) суммируются скорости фаз во входных и выходных соединениях (см. рисунок 1б).

В (7) $\mathbf{Y} = (W_g^{n+1}, W_f^{n+1})$ – вектор неизвестных размерностью 2, \mathbf{c} , \mathbf{d} – известные вектора, вычисляемые по параметрам с предыдущего временного слоя в соединениях каналов. Для первого ($j=1$) и последнего ($j=N+1$) соединений канала в качестве давлений P_0 , P_{N+1} используются давления либо в граничных ячейках, либо в ячейках, представляющих область ветвления.

Подставляя (7) в четвертое уравнение связей (6), получим уравнение Пуассона для расчета поля давления на новом временном слое. В кандидатской диссертации автора предложен трехэтапный безытерационный метод решения уравнения Пуассона для разветвленного контура циркуляции произвольной топологии. С тех пор, разработанный автором трехэтапный метод получил развитие в НИТИ им. А.П. Александрова для решения задач реального времени при создании полномасштабных тренажеров судовых ядерных энергетических установок⁴. В численных схемах теплогидравлических моделей тренажеров для снятия ограничения на шаг интегрирования по времени условием Куранта используется неявная аппроксимация переносимых конвективным способом донорных величин. Структура матриц линейных систем уравнений сохранения энергии, массы неконденсирующихся компонентов и борной кислоты идентична структуре матрицы системы уравнений относительно давления, что позволяет использовать трехэтапный метод для их решения.

На первом этапе для каждого канала теплогидравлической системы, используя рекуррентные соотношения метода прогонки, определяются коэффициенты линейных зависимостей давлений первой и последней расчетных ячеек каждого из каналов от давлений на его концах (в областях ветвления или в граничных ячейках). На втором этапе осуществляется расчет давлений в областях ветвления контура. Это оказывается возможным, благодаря преобразованию исходной полной системы уравнений в систему линейных уравнений более низкого порядка для давлений в объемах

⁴ Сулыбкин С.В. Проблемы численного решения уравнений теплогидродинамики парогазоводяных потоков для разветвленных теплогидравлических сетей применительно к задачам реального времени // Технологии и системы обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. Вып. 3. Конкурс научных и инженерных работ НИТИ им. А.П. Александрова 2004 года. Санкт-Петербург: Менделеев. 2005. С. 56-64.

ветвления. На третьем этапе по известным давлениям в областях ветвления обратной прогонкой рассчитываются поля давления в каналах.

После определения поля давления рассчитываются скорости фаз в соединениях по (7), а затем энтальпии фаз, объемные газосодержания и концентрации неконденсирующихся компонентов в газовой фазе по ячейкам из соотношений (6).

Линеаризация нестационарных членов (3), (4) приводит к потере консерватизма численной схемы. Поэтому требуется процедура компенсации численных дисбалансов массы и энергии фаз. Переносимые донорные величины рассчитываются с использованием скоростей на предыдущем временном слое. При изменении направления движения фаз за временной шаг, схема расчета конвективных членов становится по потоку "антидонорной". При наличии градиента скалярного параметра вдоль потока (температуры фаз, газосодержания, массовой доли неконденсирующегося компонента) в этой ситуации происходит его увеличение, то есть реализуется нефизичное перераспределение массы, энергии фаз теплоносителя и компонентов НГ в фазах по объему расчетной области. Особенно существенно данный эффект проявляется при длительной по времени флуктуации скоростей фаз около нулевого значения из-за численной неустойчивости математической модели. Для компенсации численных дисбалансов вследствие линеаризации нестационарных членов и компенсации нефизичного перераспределения массы и энергии по расчетным ячейкам при изменении знака скоростей фаз за временной шаг требуется коррекция полуячейковой схемы, которая разработана автором данной работы [18].

В конце каждого временного шага дисбалансы вычисляются по соотношениям:

$$DL_{\Phi} = \frac{\varphi_p^n (\rho_p^{n+1} - \rho_p^n) + \rho_p^n (\varphi_p^{n+1} - \varphi_p^n) (\Phi^{n+1} - \Phi^n) + \Phi^{n+1} (\rho_p^{n+1} - \rho_p^n) (\varphi_p^{n+1} - \varphi_p^n)}{\Delta t} + \frac{\varphi_p^n \Phi^n \Delta \rho_p^L}{\Delta t}, \quad (8)$$

где $\Delta \rho_p$ – погрешности расчета плотностей фаз при линеаризации:

$$\Delta \rho_f^L = \rho_f(p^{n+1}, h_f^{n+1}) - \rho_f^L; \quad \Delta \rho_g^L = \rho_g(p^{n+1}, h_g^{n+1}, X_{lg}^{n+1}, \dots, X_{Nng}^{n+1}) - \rho_g^L.$$

Данные дисбалансы со знаком "минус" используются на следующем временном шаге в качестве источников уравнений сохранения для их компенсации.

Изменение знака скоростей фаз за временной шаг в предлагаемом алгоритме корректируется также на следующем временном слое путем введения добавок к источникам, учитывающим дисбалансы в расчетных ячейках.

Для ячеек каналов:

$$DL_{\Phi} = \dots + \left[\delta \left(\frac{\varphi_p \rho_p \Phi}{-p-p} \right)_{j+1}^n A_{j+1} W_{p,j+1}^{n+1} - \delta \left(\frac{\varphi_p \rho_p \Phi}{-p-p} \right)_j^n A_j W_{p,j}^{n+1} \right] / V. \quad (9)$$

В выражении (9) $\delta \left(\frac{\varphi_p \rho_p \Phi}{-p-p} \right)_j^n$ – поправки донорных величин при изменении знака скоростей

фаз в соединении j , A_j – площадь проходного сечения соединения, V – объем ячейки. Поправки донорных величин определяются как разность их значений, вычисленных по направлению скоростей на новом и предыдущем временных слоях. Для расчетных ячеек, представляющих область ветвления, осуществляется суммирование по всем входным и выходным соединениям.

На примере разогрева контура с естественной циркуляцией показано, что без компенсации численные дисбалансы массы и энергии двухфазных потоков могут достигать 20% от изменения этих величин при выходе в стационарное состояние.

Для демонстрации работоспособности предлагаемого алгоритма коррекции численной схемы при изменении знака скорости фаз за временной шаг решены три задачи. В задачах рассчитывались процессы в горизонтальном канале диаметром 0.25 м и длиной 2.5 м при давлении 10^6 Па. Канал разбит на пять одинаковых расчетных ячеек. Для одной из задач в начальных условиях задан изотермический профиль температуры 293.15 К, ячейки заполнены смесью азота с кислородом (в ячейках 1, 2 массовая доля азота 0.75, в ячейках 3-5 массовая доля азота 0.25). На входе и выходе канал закрыт непроницаемым соединением. К первой ячейке канала подключен элемент "источник массы" со знакопеременным на каждом шаге по времени входным расходом (донорные величины принимались равными их значениям в ячейке). Выбранная амплитуда входного расхода соответствует амплитуде колебаний скорости газа в третьем соединении порядка 10^{-4} м/с.

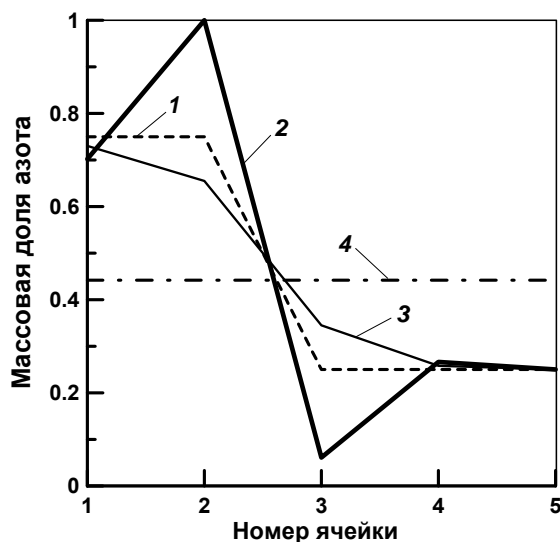


Рисунок 2 – Распределение массовой доли азота по ячейкам канала

1 – начальное распределение; 2 – промежуточное распределение без алгоритма (9); 3 – промежуточное распределение с алгоритмом (9); 4 – конечное распределение с алгоритмом (9)

На рисунке 2 представлены расчетные распределения массовой доли азота вдоль канала для рассматриваемой задачи. Из рисунка видно, что с отключенным алгоритмом (9) распределение массовой доли становится нефизичным в ячейках 2 и 3. Разница значений параметра в ячейках увеличивается со временем. Использование алгоритма (9) приводит к размыванию профиля. В конечном итоге распределение параметра вдоль канала становится равномерным, поскольку флуктуация скоростей в соединениях вызывает перемешивание, аналогичное турбулентному перемешиванию.

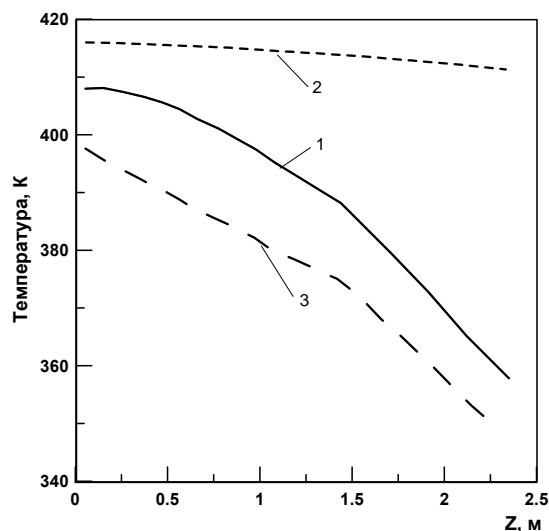
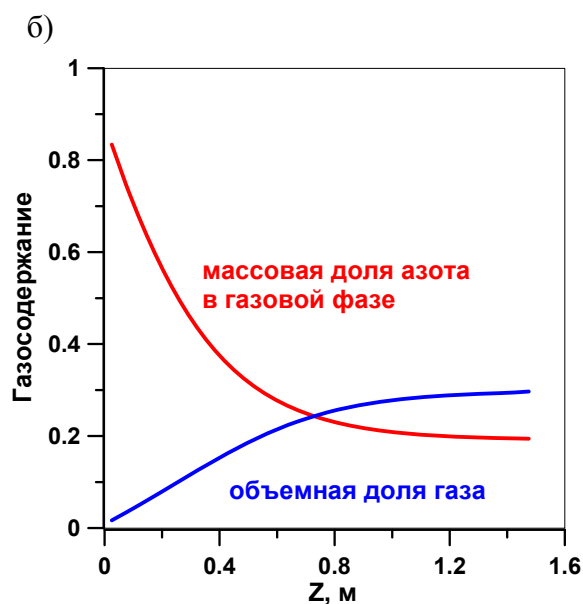
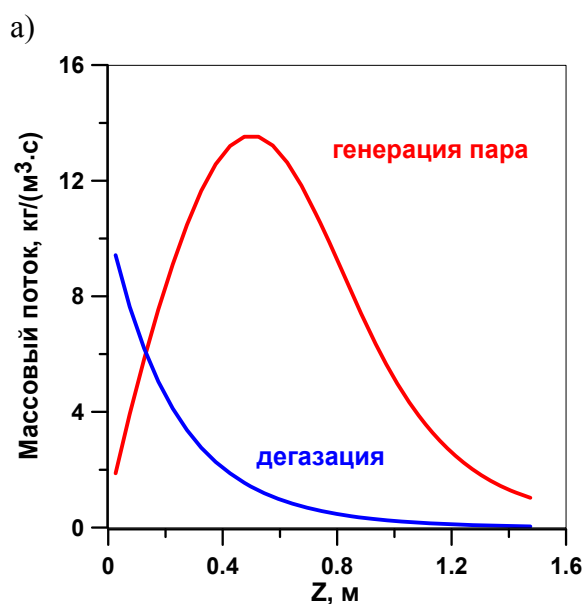


Рисунок 3 – Расчетные профили температур в эксперименте с пленочной конденсацией

$$1 - T_i, 2 - T_{sv}, 3 - T_w$$

В заключительном разделе главы подтверждена работоспособность методики учета неконденсирующихся газов в двухжидкостной модели кода КОРСАР расчетами экспериментальных данных по пленочной конденсации и испарению пленки в паровоздушных потоках (30 экспериментов), а также путем решения тестовой задачи по выделению азота из перенасыщенного раствора воды.

Для условий одного эксперимента с пленочной конденсацией приведены расчетные профили температур межфазной поверхности, насыщения при парциальном давлении пара и внутренней стенки трубы вдоль рабочего участка (рисунок 3). Температура межфазной поверхности значительно ниже температуры насыщения, то есть процесс конденсации лимитируется диффузией пара к межфазной поверхности сквозь газовый барьер. Причем разность между этими температурами увеличивается по длине трубы вследствие роста содержания воздуха и падения температуры стенки.



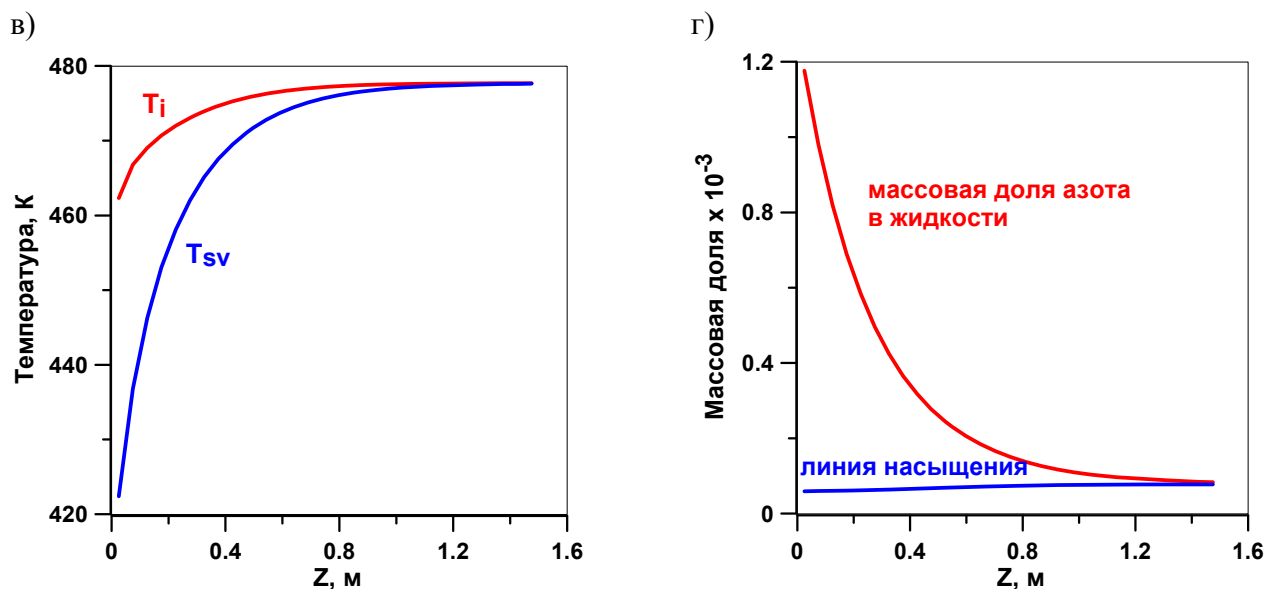


Рисунок 4 – Расчетное распределение параметров теплоносителя вдоль трубы в тестовой задаче модели дегазации

В тестовой задаче в трубу подается перенасыщенный раствор азота в воде. На рисунке 4 приведены рассчитанные по коду КОРСАР распределения параметров теплоносителя вдоль трубы. На входе в трубу сразу возникает массовый поток выделившегося азота, который экспоненциально снижается вдоль трубы по мере уменьшения концентрационного напора. На образовавшихся газовых пузырях начинается процесс испарения жидкости. Массовый поток сгенерированного пара сначала резко возрастает вследствие увеличения межфазной поверхности, а затем, из-за уменьшения температурного напора, убывает. На выходе канала устанавливаются динамически равновесные условия: объемное газосодержание и массовая доля азота в газовой фазе не изменяются по длине трубы и равны 0.3 и 0.2, соответственно.

В третьей главе изложена трехмерная теплогидравлическая модель CFD-модуля РК КОРСАР/CFD для учета пространственных эффектов в напорной камере реакторов при несимметричной работе петель [17, 42, 47, 48].

Приведены система уравнений сохранения массы, количества движения и энергии для однофазной слабосжимаемой жидкости, а также граничные условия. Уравнения записаны в интегральной форме для произвольного контрольного объема. Турбулентные напряжения учитываются по алгебраической модели либо по дифференциальным моделям: k - ε , k - ω , k - ω SST. Взаимодействие турбулентного потока со стенкой рассчитывается по высокорейнольдсовою модели с использованием пристеночных функций.

Для численного решения уравнений сохранения трехмерной модели реализован метод вложенной границы на декартовых сетках в идеологии обрезанных ячеек (Cartesian Cut-Cell), который значительно упрощает процесс генерации расчетной сетки и дискретизации дифференциальных членов уравнений, а также обеспечивает консервативность массы, энергии и импульса теплоносителя. Область моделирования погружается во вмещающий параллелепипед, который произвольным образом делится на равномерные декартовы ячейки. Таким образом, формируется базовая сетка первого уровня дробления. Затем осуществляется последовательное дробление декартовых ячеек до заданного максимального уровня дробления исходной сетки. Выбран самый простой изотропный способ измельчения, когда ячейки разбиваются на две равные части по каждому декартову направлению, образуя восемь мелких ячеек (четыре в двумерном случае). Максимальный уровень дробления исходной сетки может быть различным в разных зонах

вмещающего параллелепипеда. В разработанном CFD-модуле предусмотрено дополнительное измельчение сетки вблизи границ области моделирования, где возможны большие градиенты рассчитываемых параметров (например, пограничные слои). Декартовы ячейки, лежащие полностью в области моделирования, образуют множество *внутренних* ячеек, а ячейки, обрезанные границей, – множество *граничных* ячеек. Декартовы ячейки, лежащие целиком вне области моделирования, отбрасываются.

С целью упрощения алгоритмов решателя CFD-модуля приняты два дополнительных ограничения для расчетной сетки: дробления соседних по граням и ребрам ячеек не должны отличаться более чем на один уровень; для связанных границ расчетной области каждая граничная и две соседние с ней по любому координатному направлению ячейки должны быть на одном уровне дробления. Пример расчетной сетки вблизи границы представлен на рисунке 5. Заштрихованные декартовы ячейки находятся вне области моделирования.

При записи дискретных аналогов уравнений сохранения используется метод конечного объема на совмещенной декартовой сетке. При этом предполагается, что узлы нодализации ячеек (включая граничные ячейки) совпадают с геометрическими центрами образующих их декартовых ячеек.

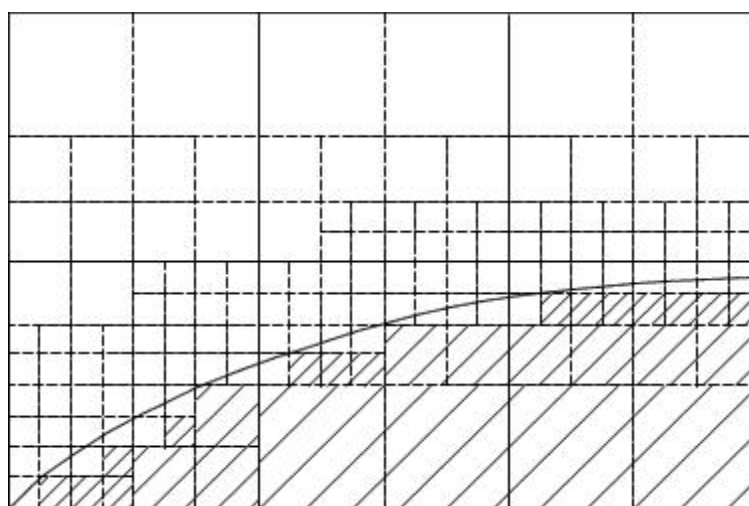


Рисунок 5 – Расчетная сетка вблизи границы

При численной реализации применяется ряд предлагаемых в литературе современных алгоритмов.

Информация о топологии расчетной сетки хранится в формате ФТТ (Fully Threaded Tree). Иерархическая структура данных ФТТ экономична по памяти и обеспечивает для каждой декартовой ячейки быстрый поиск соседних по граням ячеек. Дополнительно хранится вся необходимая информация о сетках на всех уровнях дробления многосеточного метода, используемого для расчета поля давления. В формате ФТТ рассматриваются два типа ячеек: раздробленные ячейки и нераздробленные ячейки. Первый тип представляет собой *родительские* ячейки для группы из восьми более мелких ячеек (из четырех в плоском случае), которые определяются как *детские* для данного типа ячеек. Ячейки второго типа называются *листовыми*. Таким образом, каждая ячейка является либо родительской для мелких ячеек, либо листовой. Одновременно каждая ячейка включается как детская в крупную родительскую ячейку.

С целью повышения устойчивости вычислительной схемы используется алгоритм объединения граничных обрезанных ячеек малого объема (ячейки *раб*) с соседними крупными ячейками (ячейки *хозяин*). Алгоритм обеспечивает гарантированное присоединение всех мелких ячеек с одновременной оптимизацией формы получающихся объединенных ячеек. В дальнейшем

балансовые уравнения сохранения составляются для объединенных ячеек, а потоки через включенные в объединенные ячейки внутренние грани не учитываются. Пример объединения ячеек изображен на рисунке 6. Жирными линиями выделены объединенные ячейки, светлыми стрелками показаны внутренние грани, которые не учитываются при суммировании потоков, черными стрелками помечены грани, через которые осуществляется обмен с соседними ячейками.

Дискретизация конвективных членов уравнений сохранения осуществляется по ограниченной непрерывно дифференцируемой схеме второго порядка точности SDPUS-C1, что значительно улучшает сходимость при итерационном решении.

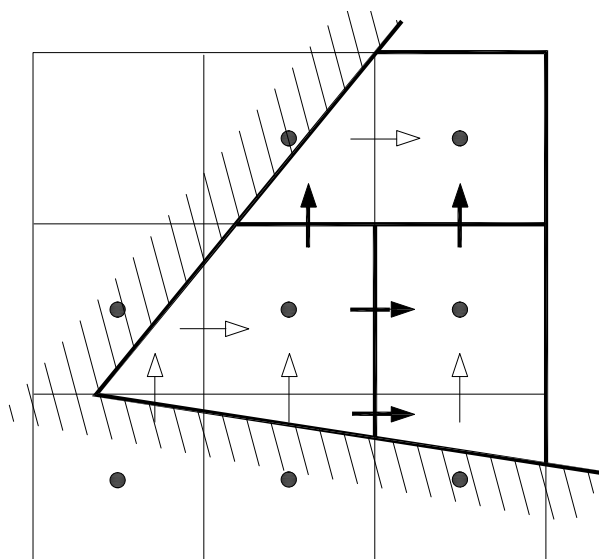


Рисунок 6 – Объединение мелких граничных ячеек

Интегрирование уравнений сохранения по времени производится по неявной схеме второго порядка точности Кима-Чоя. На каждом шаге по времени сначала из уравнения сохранения количества движения, записанного по схеме Кранка - Николсона, рассчитываются компоненты вектора предварительной скорости u_i^* в центрах расчетных ячеек при нулевом градиенте давления. При этом неявные конвективные члены линеаризуются по времени со вторым порядком точности. Затем вычисляются предварительные нормальные массивы скорости на гранях ячеек U^* с помощью интерполяции по значениям u_i^* в узлах ячеек. Поле массовой скорости корректируется из условий неразрывности потока:

$$\int_S U^{n+1} dS = 0, \quad (10)$$

где S – поверхность контрольного объема,

$$U^{n+1} = U^* - \Delta t (\text{grad } P^{n+1}) \mathbf{n} = U^* - \Delta t \partial P / \partial n. \quad (11)$$

Из соотношений (10), (11) получается интегральная форма уравнения Пуассона для давления:

$$\int_S \frac{\partial P^{n+1}}{\partial n} dS = \frac{1}{\Delta t} \int_S U^* dS, \quad (12)$$

которое решается многосеточным методом.

Окончательно определяется поле скорости на новом временном слое в центре ячеек:

$$u_i^{n+1} = u_i^* - \Delta t \left(\text{grad } P^{n+1} \right)_i / \rho \quad (13)$$

и массовой скорости на гранях ячеек по (11).

После определения поля скорости решается уравнение сохранения энергии жидкости.

Используются также оригинальные алгоритмы. Так для аппроксимации конвективных и диффузионных потоков на гранях декартовых ячеек, когда примыкающие к граням ячейки находятся на разных уровнях дробления, разработаны алгоритмы второго порядка точности с компактными шаблонами. При дискретизации конвективных членов для вычисления величины Φ_f на грани в схеме SDPUS-C1 используются значения переменной Φ в трех узлах: в дальнем от грани вверх по потоку Φ_u , в ближайшем к грани вверх по потоку Φ_c и в узле вниз по потоку Φ_d . Схема легко реализуется на равномерной сетке. Когда примыкающие к грани ячейки находятся на разных уровнях дробления, какое-либо из значений Φ_u , Φ_c , Φ_d требуется определить с третьим порядком точности посредством интерполяции. В этом случае можно выделить две ситуации, изображенные на рисунке 7: когда по направлению потока ячейки укрупняются и когда измельчаются.

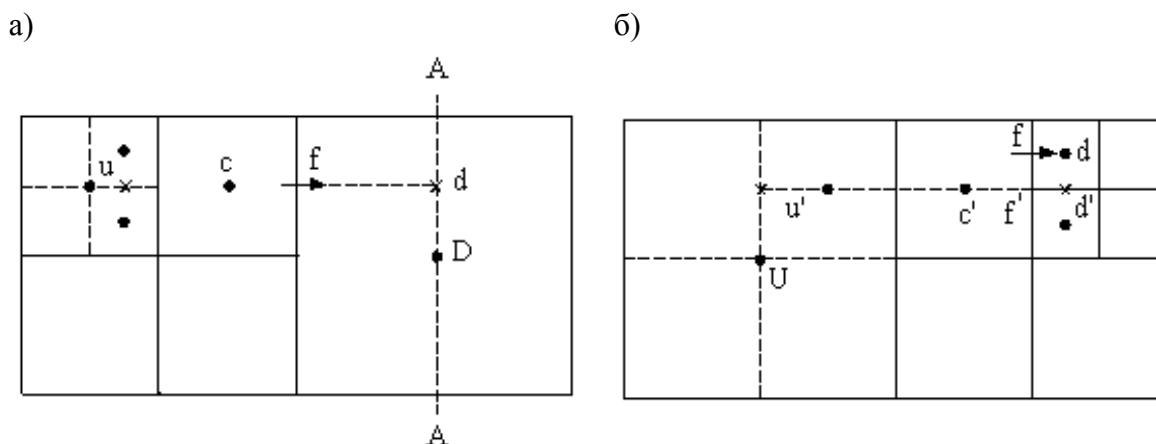


Рисунок 7 – Ситуации при расчете Φ_f на гранях

а) укрупнение ячеек по направлению потока; б) измельчение ячеек по направлению потока

В первой ситуации сложности для вычисления представляет величина Φ_d в точке пересечения нормали к грани f с сечением A , проходящем через узел крупной ячейки D параллельно грани. Для расчета Φ_d используется трехточечная одномерная интерполяция вдоль диагональной линии, соединяющей точку d и узел нодализации D , по значениям Φ_D , Φ_{close} , Φ_{far} (Φ_{close} , Φ_{far} – значения переменной Φ в точках, соответственно, ближней и дальней от d). На рисунке 8 показаны три возможных варианта расположения точки d (согласно первому ограничению расчетной сетки): а) когда три ячейки по диагонали находятся на одном уровне дробления; б) ближайшая по диагонали к точке d ячейка раздроблена; в) ближняя по диагонали к точке d ячейка – крупная, а дальняя по диагонали к точке d ячейка раздроблена. Φ_{close} и Φ_{far} либо являются значениями переменной Φ в узлах (черные кружки на рисунке 8), либо рассчитываются как полусумма значений в двух соседних мелких ячейках по обе стороны от сечения A (белые кружки на рисунке 8).

Если ячейка u раздроблена (см. рисунок 7а), то Φ_u вычисляется как среднее по четырем окружающим точку u мелким ячейкам.

Во второй ситуации (см. рисунок 7б) по описанной выше методике вычисляется значение переменной $\Phi_{f'}$ в центре грани крупной ячейки c' с использованием значений $\Phi_{u'}$, $\Phi_{c'}$, $\Phi_{d'}$. Затем искомое значение Φ_f определяется со вторым порядком точности по соотношению:

$$\Phi_f = \Phi_{f'} + \frac{\Phi_d - \Phi_{d'}}{|dd'|} |dd| = \Phi_{f'} + \Phi_d - \Phi_{d'}. \quad (14)$$

Диффузионные потоки на стандартных гранях со вторым порядком точности также вычисляются с использованием значений Φ в трех точках u , c , d по центрально-разностной схеме.

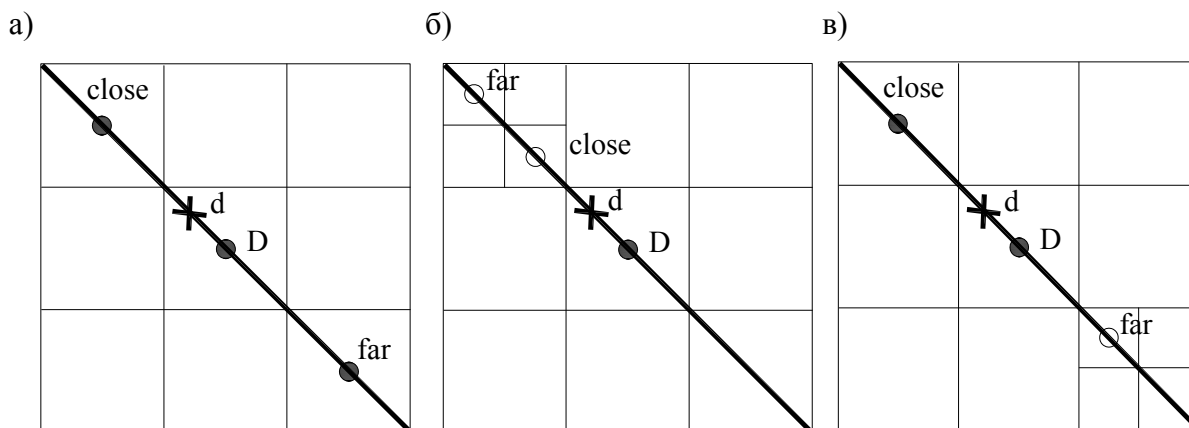


Рисунок 8 – Варианты расположения точки d в сечении А

Следует отметить, что совпадение граней ячеек с декартовыми координатными плоскостями существенно упрощает процедуру дискретизации потоков.

В многосеточном методе для граничных ячеек при переводе невязки решения с мелкой сетки на грубую сетку предложен оператор ограничения, учитывающий наличие объединенных ячеек.

Оператор ограничения R для нелистовых ячеек грубой сетки имеет следующий вид (для листовой ячейки оператор ограничения является тривиальным $R(\Phi) = \Phi$):

$$R(\Phi) = \frac{\sum \varphi_j \Phi_j}{\sum \varphi_j}. \quad (15)$$

В соотношении (15) суммирование производится по восьми детским ячейкам мелкой сетки, φ_j – объемная доля жидкости в детских ячейках. Если ячейка внутренняя $\varphi_j = 1$, если ячейка лежит за границей области моделирования $\varphi_j = 0$. В ситуации, когда детская ячейка j принадлежит к типу *раб*, значение Φ_j берется из приписанной ей ячейки типа *хозяин*.

Значения операторов ограничения для граничных ячеек грубой сетки типа *раб* используются для модификации операторов ограничения применительно к ячейкам типа *хозяин*, объединенных с данными ячейками типа *раб*:

$$R_{\text{объед}}(\Phi) = \frac{\varphi_{\text{хозяин}} R_{\text{хозяин}}(\Phi) + \sum \varphi_{\text{раб}} R_{\text{раб}}(\Phi)}{\varphi_{\text{хозяин}} + \sum \varphi_{\text{раб}}}, \quad (16)$$

где φ – объемная доля жидкости в ячейках грубой сетки.

В заключительной части главы представлен перечень задач, использованных для тестирования и верификации CFD-модуля. В качестве примера изложены решения двух задач: нестационарной тестовой задачи с поперечным обтеканием цилиндра однородным ламинарным потоком жидкости при числе Рейнольдса 100 (дорожка Кармана), расчеты которой подтверждают

адекватность реализации численных алгоритмов; верификация моделей турбулентности по экспериментальным данным при турбулентном течении в трубе с поворотом на 90°.

В **четвертой главе** представлена разработанная и реализованная автором диссертации полунеевая численная схема объединения одномерной и трехмерной моделей теплогидравлики РК КОРСАР/CFD [15, 19, 49–51].

Связка моделей различной размерности кода осуществляется через элемент одномерной модели *канал*. Входные либо выходные соединения каналов образуют граничные плоскости между 1D и 3D областями моделирования, которые в дальнейшем будем называть границами. На рисунке 9а изображена одна из таких границ, отмеченная жирной линией. С точки зрения CFD-модуля данная граница представляет новый тип граничных условий – объединение с одномерной моделью кода. Её пересечение с ячейками 3D области формирует граничные грани. Обозначим через l номера граничных граней. Тогда для каждой грани l , по аналогии с (11), можно записать:

$$U_l = U_l^* - \Delta t \left(\frac{\partial P}{\partial n} \right)_l. \quad (17)$$

При вычислении U_l значения компонент вектора скорости на граничной грани определяются с помощью экстраполяции по значениям данных величин в расчетных узлах 3D области моделирования. Градиент давления в (17) рассчитывается по формуле:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial n} \right)_l = C_{1D}^l P_{1D} + \sum_i C_i^l P_i^l, \quad (18)$$

где P_i^l – значения давления в ячейках, входящих в шаблон для градиента давления на граничной грани с номером l , P_{1D} – давление в приграничной ячейке канала, C_{1D}^l , C_i^l – коэффициенты аппроксимации.

Для обеспечения баланса массы на границе 1D и 3D областей моделирования в соответствующем соединении канала $j=1$ либо $j=N+1$ необходимо принять:

$$A_j = S_b; \quad W_{f,j} = W_{g,j} = U_b / \rho_j^n.$$

Здесь S_b – площадь границы, $S_b = \sum_l S_l$, где S_l – площади граничных граней; U_b – удельный

массовый расход жидкости через границу, который рассчитывается посредством интегрирования по граничным граням: $U_b = \sum_l U_l S_l / S_b$.

На основании вышеизложенного несложно получить:

$$W_{f,j} = W_{g,j} = W_{f,j}^* - C(P_{1D} - P_{cfd}), \quad (19)$$

$$\text{где } C = \frac{\Delta t \sum_l C_{1D}^l S_l}{\rho_j^n A_j}, \quad P_{cfd} = - \frac{\sum_l \sum_i C_i^l P_i^l S_l}{\sum_l C_{1D}^l S_l}, \quad W_{f,j}^* = \sum_l U_l S_l / (\rho_j^n A_j),$$

$$P_{cfd} = - \frac{\sum_l \sum_i C_i^l P_i^l S_l}{\sum_l C_{1D}^l S_l}. \quad (20)$$

В выражениях (17)-(20) для величин на новом временном слое U_l , $\left(\frac{\partial P}{\partial n} \right)_l$, P , $W_{f,j}$, $W_{g,j}$ опущен верхний индекс $n+1$.

Уравнение (19) используется вместо уравнения сохранения количества движения для расчета скоростей фаз в соединениях каналов на границе. Коэффициенты в выражении (7) применительно к данным соединениям принимаются равными $c_{1,j} = c_{2,j} = W_{f,j}^*$; $d_{1,j} = d_{2,j} = C$. Также принимается, что $P_0 = P_{\text{cfd}}$ либо $P_{N+1} = P_{\text{cfd}}$ в случаях, когда канал связан с CFD-модулем по входу или выходу, соответственно.

В соединениях каналов одномерной модели, связанных с CFD-модулем, уравнение количества движения не решается. Следовательно, не моделируются потери давления от границы до узла приграничной ячейки. Поэтому при составлении расчетной схемы следует избегать использования местного сопротивления в данных соединениях. Немоделируемые распределенные потери давления автоматически учитываются в следующем соединении канала посредством соответствующего увеличения его длины и высоты. Расчет осуществляется с временным шагом, выбранным по критериям одномерной модели.

Соотношения (19), (20) связывают матрицы коэффициентов уравнений Пуассона в областях различной размерности. На каждом временном слое требуется расчет объединенного поля давления. Данная процедура является наиболее затратной с точки зрения машинного времени. Размеры ячеек в 1D и 3D областях моделирования, а, следовательно, и коэффициенты в дискретных уравнениях Пуассона для давления различаются на порядки, что приводит к медленной сходимости при итерационном решении. Поэтому для улучшения сходимости многосеточный метод используется на множестве ячеек 1D и 3D моделей. Ячейки 1D модели рассматриваются как листовые ячейки минимального уровня. Операторы пролонгации и ограничения для них являются тривиальными операторами инъекции (производится копирование величин при изменении уровня дробления сеток многосеточного метода). При этом в релаксационной процедуре для 1D-модуля используются также простые итерации Якоби. За счет комбинации релаксационной процедуры и перехода на грубый уровень сеток в многосеточном методе обеспечивается быстрая сходимость как высокочастотных, так и низкочастотных составляющих решения дискретного уравнения. Пример иерархии сеток для многосеточного метода при расчете объединенного поля давления в 1D и 3D областях приведен на рисунке 9.

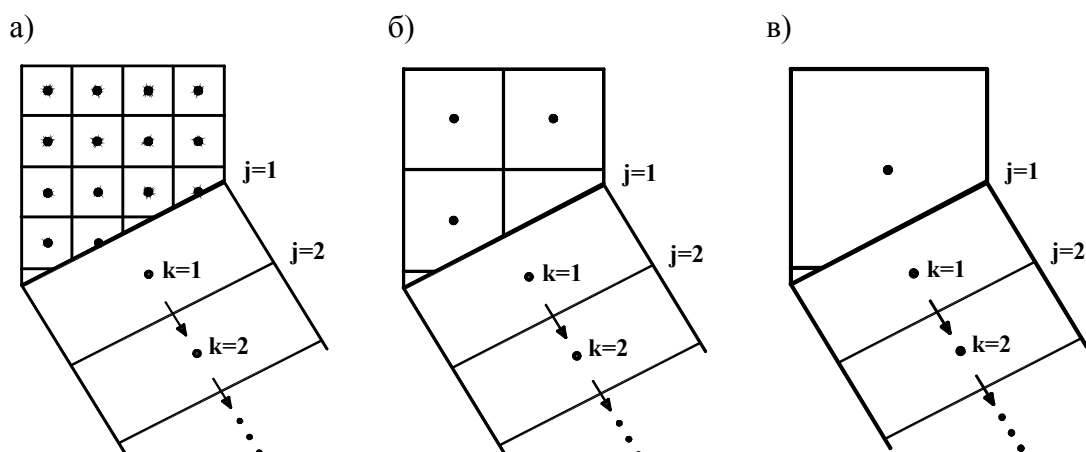


Рисунок 9 – Иерархия сеток для многосеточного метода в 1D и 3D областях моделирования

а) Исходная сетка б) Грубая сетка в) Самая грубая сетка

При поступлении жидкости из 3D области моделирования в канал 1D модели, граничная удельная энтальпия рассчитывается по явной схеме из соотношения:

$$h_{\text{cfd}} = \sum_l U_l h_l S_l / (U_b S_b). \quad (21)$$

В случае, когда вектор свободного падения имеет параллельную плоскости границы составляющую, в соотношении (18) необходимо учитывать линейное поперечное распределение давления в приграничной ячейке канала. В противном случае может искажаться профиль скорости в приграничной области CFD-модуля, вплоть до образования паразитных вихрей. То есть вместо P_{1D} следует использовать граничные давления:

$$P_{1D,l} = P_{1D} + \rho_b [(r_\tau g)_l - C], \quad (22)$$

где r_τ – проекция радиус-вектора центра граничных граней \mathbf{r} на плоскость границы с нормалью \mathbf{n} : $r_\tau = \mathbf{r} - (\mathbf{r}\mathbf{n})\mathbf{n}$, $\rho_b = \sum_l \rho_l S_l / S_b$ – средняя плотность теплоносителя на границе.

Выражение для константы C в (22) получим из условия нормировки $\sum_l P_{1D,l} S_l / S_b = P_{1D}$:

$$C = \sum_l (r_\tau g)_l S_l / S_b.$$

На решении тестовой задачи с контуром естественной циркуляции, где контур разбит на два участка с моделированием в одномерном и трехмерном приближениях, продемонстрировано, что предложенный алгоритм обеспечивает консервативность массы и энергии потоков жидкости на границе стыковки областей различной размерности. Показано, что отключение модели (22) приводит к формированию ложного вихря в трехмерной области вблизи границы стыковки с горизонтальным каналом.

Проведена оценка сходимости многосеточного метода для расчета поля давления при получении начального стационарного состояния РУ ВВЭР-1000, когда напорная камера реактора моделировалась в трехмерном приближении, а остальная часть контура циркуляции теплоносителя представлена одномерными элементами кода КОРСАР/CFD. Определялось среднее количество V-циклов за промежуток времени 0.1 с в течение 1 с процесса выхода на статику с использованием трех расчетных сеток в трехмерной области. Грубая сетка включает около 1.1 миллиона ячеек. Промежуточная и мелкая сетки получены измельчением по каждому координатному направлению в 1.4 раза и в два раза, соответственно.

Многосеточный метод был реализован в двух вариантах: в исходном варианте с применением многосеточного метода для расчетных ячеек 3D и 1D областей (вариант 1); в модифицированном варианте, когда в многосеточный метод включены только расчетные ячейки 3D области и расчет поля давления в 1D области осуществляется после завершения V-цикла трехмерной модели (вариант 2). Во всех расчетах были выбраны одинаковые параметры многосеточного метода: количество уровней дробления сеток, количество итераций релаксационной процедуры, допустимая невязка решения.

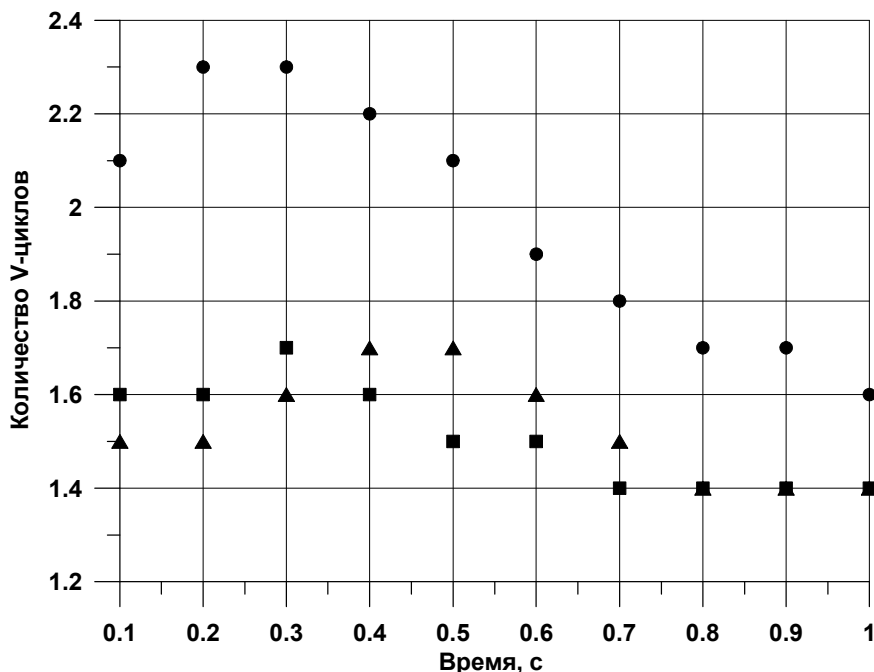


Рисунок 10 – Сходимость многосеточного метода (вариант 1)

● – мелкая сетка; ■ – промежуточная сетка; ▲ – грубая сетка

На рисунках 10, 11 показано изменение требуемого для сходимости количества V-циклов двух вариантов многосеточного метода. Из рисунков видно, что в исходном варианте 1 для сходимости требуется около двух V-циклов. Их количество слабо зависит от степени пространственного дробления области. В случае использования варианта 2 требуемое для сходимости количество итерационных циклов увеличивается на два порядка и существенно растет с измельчением расчетной сетки. То есть, включение расчетных ячеек 1D области в многосеточный метод значительно повышает его эффективность при моделировании с помощью кода КОРСАР/CFD режимов эксплуатации природных реакторных установок.

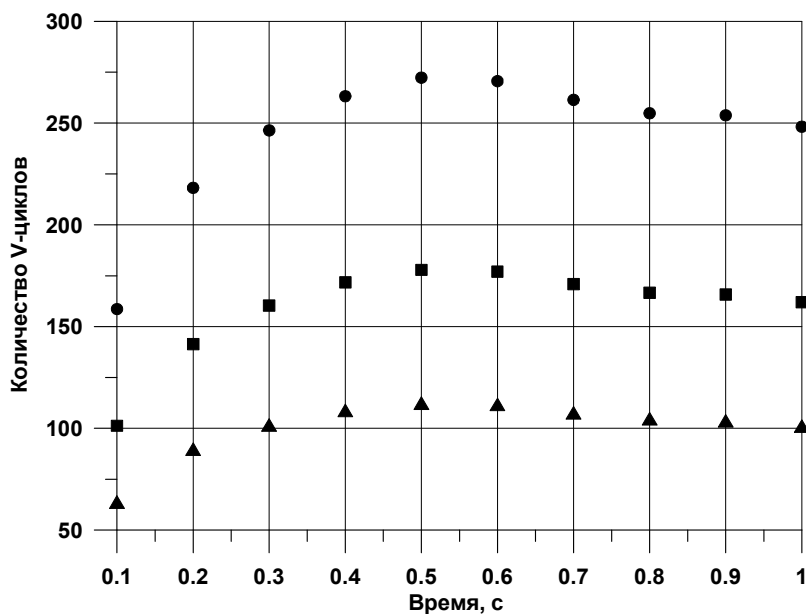


Рисунок 11 – Сходимость многосеточного метода (вариант 2)

● – мелкая сетка; ■ – промежуточная сетка; ▲ – грубая сетка

В пятой главе приведены результаты верификации новой версии системного расчетного кода КОРСАР/CFD на задачах с перемешиванием теплоносителя в напорной камере реакторов [20–24, 53–56].

Напорная камера между корпусом и шахтой от входных патрубков до эллиптического днища шахты моделируется в трехмерной постановке. Остальная часть контура циркуляции РУ представлена одномерными элементами кода. Отверстия в эллиптическом днище имитируются элементами *канал* (ch), которые на выходе объединены с помощью элементов *коллектор* (col) для присоединения к соответствующим шестигранным каналам, моделирующим кассеты активной зоны, включая нижнюю камеру с опорными трубами (рисунок 12). Сечения отверстий нижней огибающей эллиптическое днище шахты и входные сечения холодных патрубков являются общими границами между 3D и 1D областями, через которые осуществляется связь 3D и 1D моделей.

С целью верификации связки 3D и 1D моделей кода КОРСАР/CFD проведены расчеты экспериментов, выполненных на четырехпетлевом стенде в ОКБ "ГИДРОПРЕСС" с моделью реактора ВВЭР-1000 и на шестом блоке АЭС Козлодуй для изучения процессов перемешивания теплоносителя в напорной камере. На четырехпетлевом стенде моделировались процессы перемешивания при проникновении из холодной нитки теплоносителя с повышенной концентрацией соли в активную зону при пуске одного циркуляционного насоса и при функционировании различного количества насосов. На АЭС Козлодуй был реализован эксперимент с повышением температуры теплоносителя в холодной нитке одной петли вследствие отсечения парогенератора.

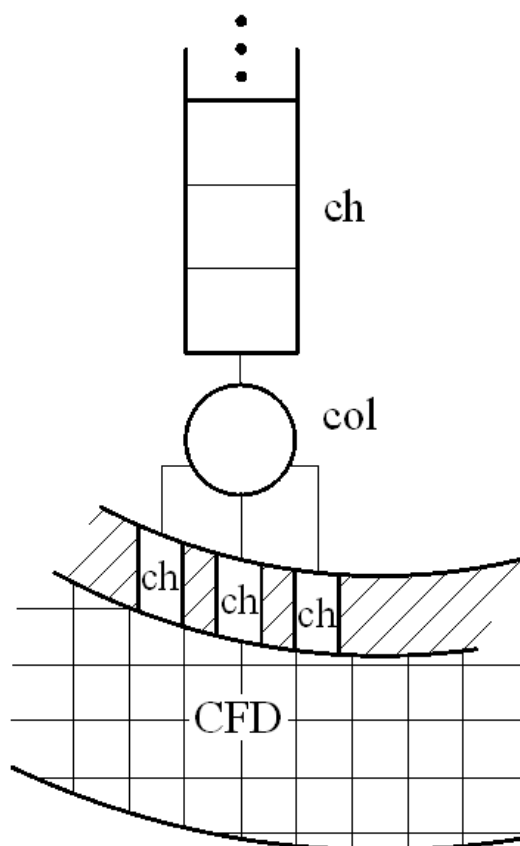


Рисунок 12 – Схема стыковки 3D и 1D областей моделирования на входе в отверстия в эллиптическом днище

На основе численного моделирования трех режимов с несимметричной работой оборудования петель теплообмена проведена кросс-верификация трехмерной в CFD приближении и квазитрехмерной 1D моделей расчетного кода КОРСАР/CFD для напорной камеры. Первый режим моделирует разрыв паропровода одного из ПГ. Он характеризуется снижением давления в аварийном ПГ, что приводит к увеличению отвода тепла от первого контура во второй контур. Как следствие, температура теплоносителя на входе в напорную камеру из аварийной петли уменьшается. Первый сигнал на сброс аварийной защиты по снижению давления в ПГ в расчетах не учитывается. Аварийная защита срабатывает по второму сигналу, вызванному увеличением мощности реактора по показаниям ионизационных камер аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) на 7% от номинальной с учетом погрешности измерений АКНП. Второй режим моделирует подключение ГЦН при исходной работе трех ГЦН на мощности реактора 71% номинальной, а третий режим – подключение ГЦН при исходной работе двух противоположных ГЦН на мощности 52% номинальной. Эти режимы соответствуют ситуациям ошибочного подключения насосов при допустимой мощности стационарного состояния реакторной установки при работе неполного количества насосов.

Результаты трехмерных расчетов демонстрируют анизотропное растекание жидкости в кольцевой области напорной камеры. Поступающий из патрубков поток теплоносителя движется азимутально в обе стороны, приобретая направление в нижнюю камеру при слиянии азимутальных потоков. Под патрубками работающих петель образуются области стагнации потоков. Такая картина течения отчетливо наблюдается при работе одного насоса. На рисунке 13 изображены поля скорости и относительной концентрации соли по результатам расчета режима с проникновением солевой пробки при пуске насоса на четырехпетлевом стенде. Анизотропное растекание теплоносителя обуславливает позонное проникновение пробки в активную зону. Образуются два ярко выраженных языка распространения концентрации, которые являются причиной возникновения двух зон под неработающими петлями. Перед проникновением в нижнюю камеру через отверстия в эллиптическом днище шахты, эти два языка сливаются, дополнительно образуя третью зону повышенной концентрации под работающей петлей.

В работе показано, что причиной такой картины течения в кольцевой области камеры являются различия градиента увеличения площади проходного сечения и гидравлического сопротивления в радиальных направлениях относительно оси патрубка [23]. Градиент увеличения площади проходного сечения и гидравлическое сопротивление повышаются при изменении радиального направления от азимутального до продольного вдоль камеры. Происходит перетекание теплоносителя, вызывающее запираание потока вдоль камеры и развитие течения вдоль азимутального направления.

При работе нескольких ГЦН растекающиеся по окружности кольцевой области потоки теплоносителя из активных патрубков сливаются между этими патрубками, образуя направленные в нижнюю камеру потоки, количество которых равно количеству работающих насосов. В качестве примера на рисунке 14 изображены расчетные поля скорости теплоносителя в напорной камере для стационарных условий работы реакторной установки ВВЭР-1000 при функционировании разного количества ГЦН. Как следствие при функционировании более одного насоса распространение возмущения по петле концентрации либо температуры теплоносителя в активную зону осуществляется в виде сектора.

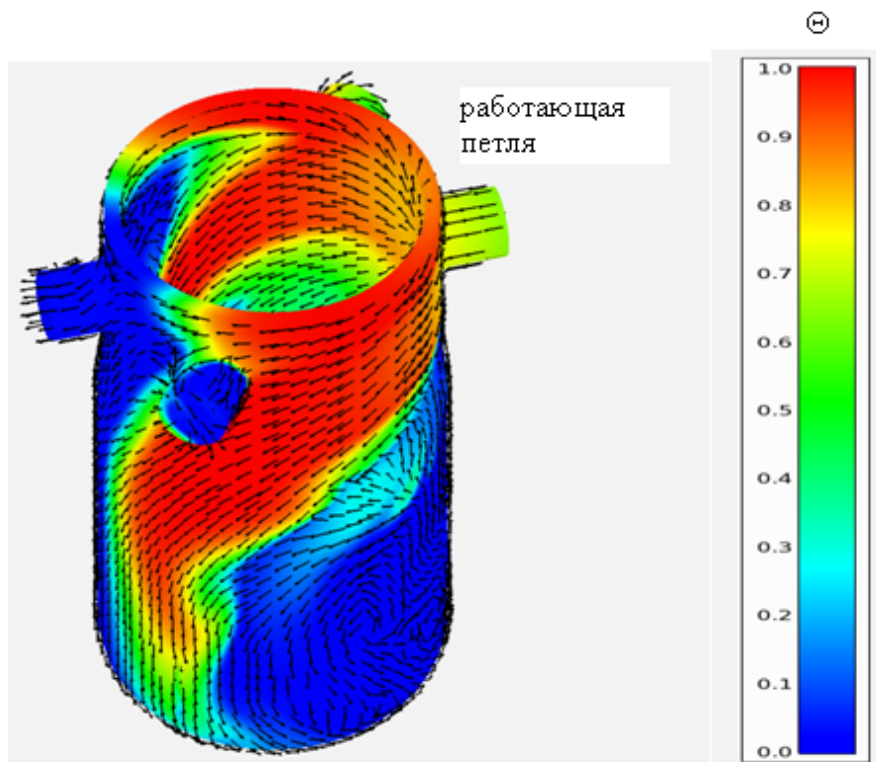


Рисунок 13 – Расчетные поля скорости и относительной концентрации соли при пуске одного насоса на модели ВВЭР-1000

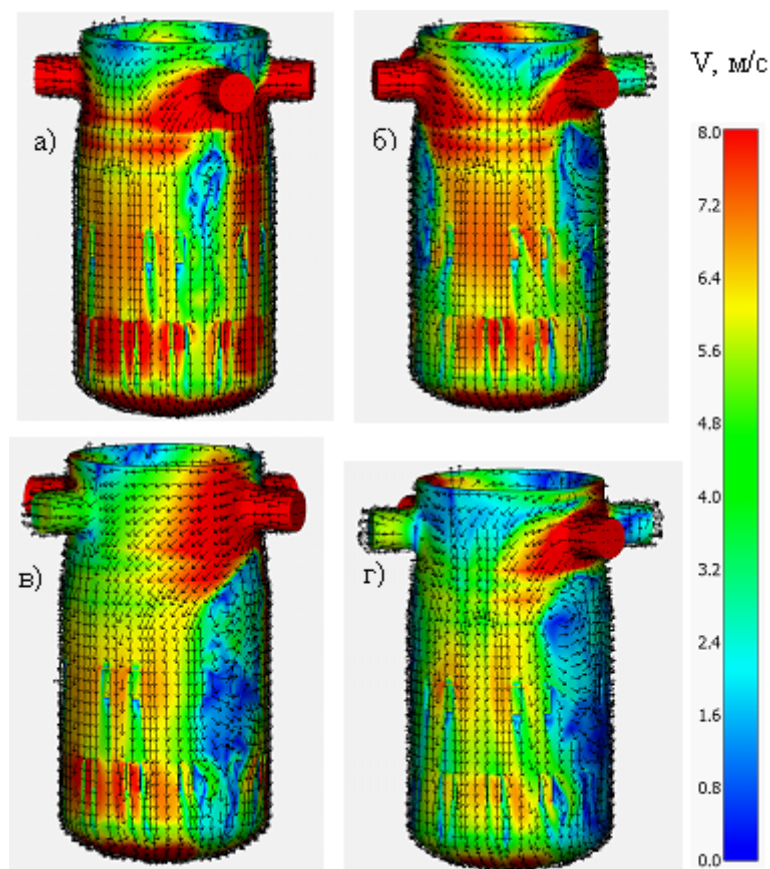


Рисунок 14 – Картина течения теплоносителя в напорной камере ВВЭР-1000 в работе ГЦН: а) четыре; б) три (дан вид между дальними работающими петлями), в) три (дан вид между дальними работающей и неработающей петлями); г) два противоположных

Незначительная асимметрия профиля скорости теплоносителя во входных патрубках в плоскости их расположения (вызванная, например, наклоном патрубков или поворотом трубопроводов холодных ниток) вызывает угловое смещение (поворот) сектора проникновения возмущения. Данный эффект, вероятно, обусловлен передавливанием зон поступления теплоносителя в нижнюю камеру при столкновении азимутальных потоков из патрубков.

Например, поворот патрубков на 3° по часовой стрелке в расчете экспериментального режима на четырехпетлевом стенде с моделью реактора ВВЭР-1000 при функционировании двух смежных насосов привел к повороту сектора поступления концентрации соли против часовой стрелки на 50° , что значительно улучшило согласование с опытными данными. На рисунке 15 показаны распределения средних значений относительной концентрации соли по угловому положению датчиков φ . Угловое положение датчиков отсчитывается от оси патрубка с возмущением по концентрации против часовой стрелки (в сторону работающей петли без возмущения).

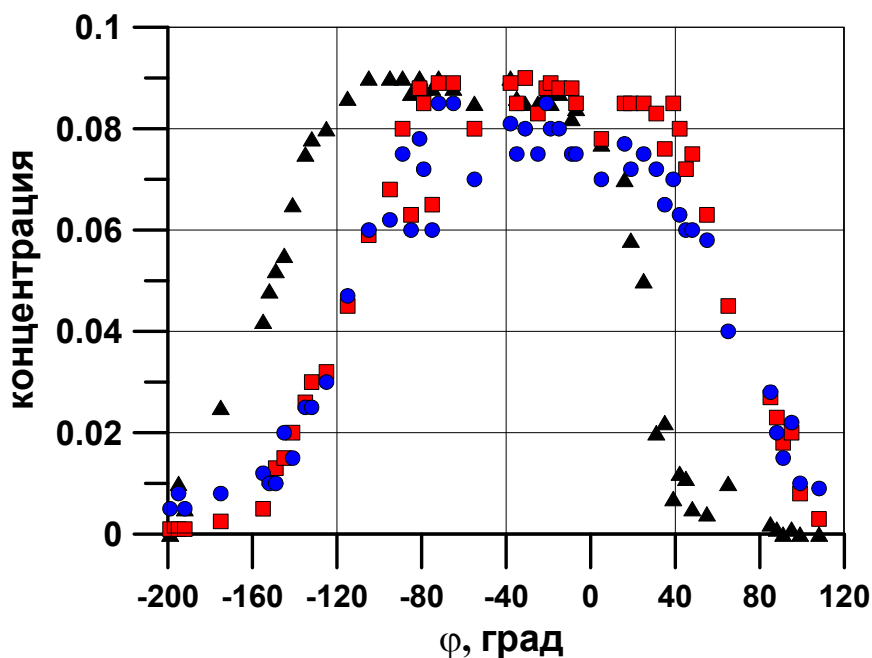


Рисунок 15 – Сектор проникновения концентрации соли в модель активной зоны в режиме с функционированием двух смежных насосов

● – эксперимент, ▲ – базовый расчет, ■ – расчет с наклоном патрубков

При расчете эксперимента на АЭС Козлодуй расширение трехмерной области моделирования и включение в нее холодных ниток от выхода из циркуляционных насосов до патрубков (рисунок 16) привело к уменьшению осредненных отклонений по датчикам температуры на границах сектора проникновения горячего теплоносителя в активную зону с 30% до 10% (относительно перепада температуры теплоносителя в холодных нитках 13.2 К). Принципиальным моментом в расширенной постановке задачи является наличие поворота трубопроводов холодных ниток на 30° против часовой стрелки, который формирует асимметрию профиля продольной скорости потока. Величина скорости у внешней стенки превышает величину скорости у внутренней стенки. Асимметрия профиля сохраняется на расстоянии более десяти диаметров трубы от выхода из поворота, что вызывает поворот сектора против часовой стрелки приблизительно на 7° .

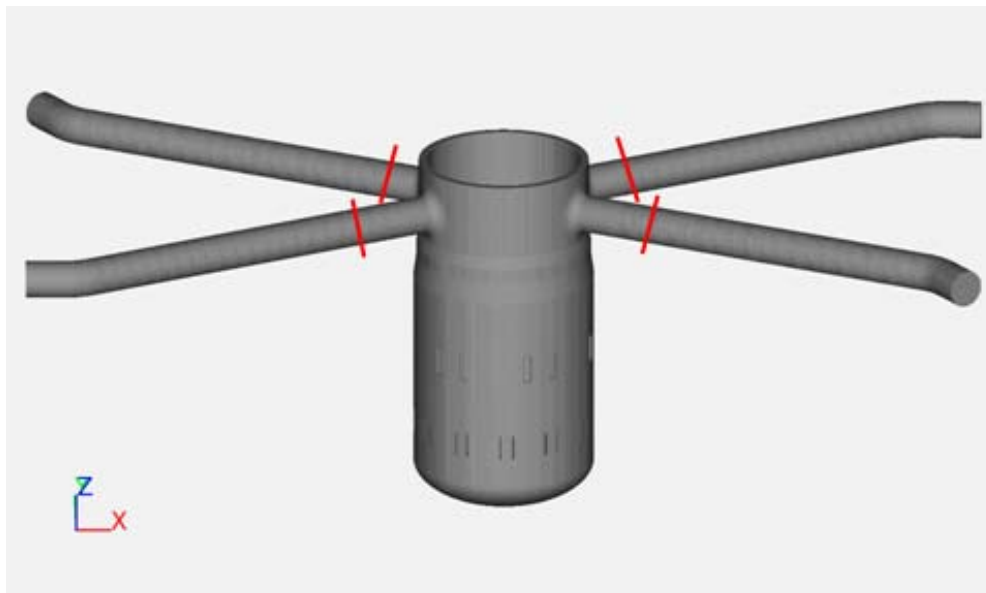


Рисунок 16 – Расширенная трехмерная область моделирования

— - границы исходной области

Результаты расчетов при применении квазитрехмерной многоканальной модели камеры реактора весьма чувствительны к изменению расчетной схемы, особенно для третьего режима с подключением ГЦН к двум работающим. Для демонстрации этого расчеты приведены для двух вариантов моделирования напорной камеры. В первом варианте поставлены одинаковые гидравлические сопротивления в каждом соединении каналов кольцевой области. Объем застойного пространства напорной камеры над патрубками включен в объемы первых расчетных ячеек каналов путем увеличения площади их проходного сечения. Во втором варианте местные гидравлические сопротивления перенесены в последнее соединение на выходе из каналов. Объем застойного пространства учтен в объемах первых ячеек каналов посредством увеличения их длины. Принципиальное отличие двух вариантов заключается в том, что в первом варианте искусственно затруднено протекание теплоносителя вниз к отверстиям в эллиптическом днище шахты вследствие гидравлических сопротивлений и ускорения при сужении прохода. Данный факт способствует растеканию потоков, поступающих из патрубков, через поперечные гидравлические связи по окружности напорной камеры.

В режиме 3 с подключением ГЦН к двум работающим сектор проникновения холодного теплоносителя в активную зону для 3D и 1D в первом варианте моделей напорной камеры составляет 120° . Для второго варианта 1D модели сектор значительно сужен и составляет 90° . Сужение расчетного сектора проникновения холодного теплоносителя в активную зону при использовании второго варианта 1D модели напорной камеры в режиме 3 приводит к снижению на 16.7% прироста мощности в теплонапряженной ТВС и уменьшению подъема мощности реактора на 11.1% по сравнению с изменением мощности с 3D моделью напорной камеры, что видно из рисунка 17. На рисунке мощности приведены к их значениям при номинальной работе РУ.

Следует отметить, что в расчетах для CFD-модуля применялась алгебраическая модель турбулентности. Дополнительными расчетами с дифференциальной моделью $k-\omega$ SST продемонстрирована слабая зависимость результатов от используемой модели турбулентности. Вероятно, наличие ярко выраженных токов теплоносителя и крупномасштабной турбулентности вследствие столкновения токов между собой и со стенкой шахты (которая напрямую

моделируется кодом) в камере нивелирует значимость выбора моделей турбулентности для результатов расчетов.

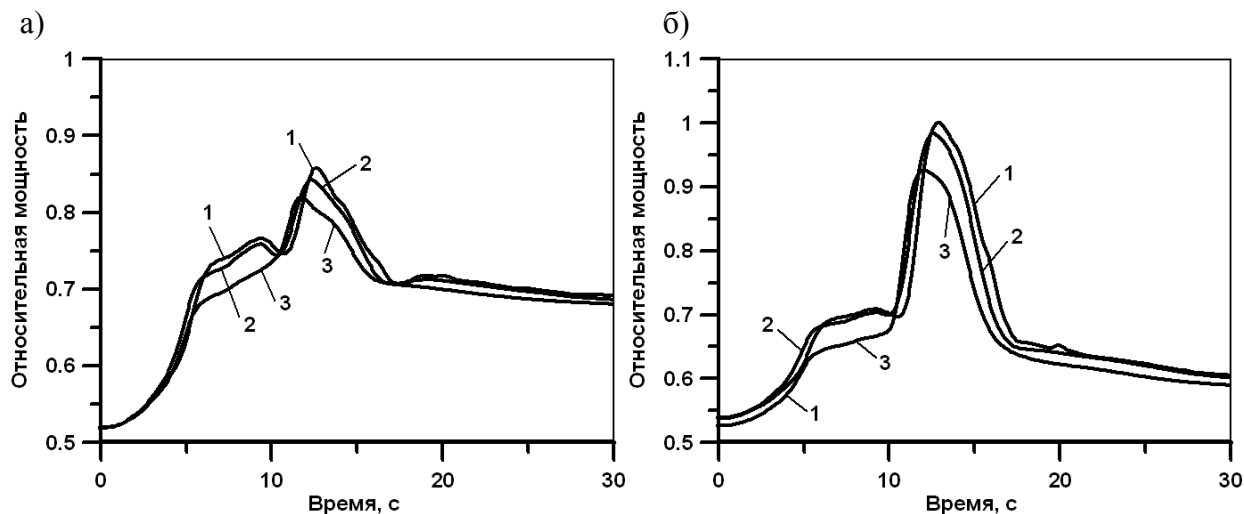


Рисунок 17 – Изменения во времени мощности реактора а) и напряженной ТВС б) модели напорной камеры: 1 – 3D; 2 – 1D (первый вариант); 3 – 1D (второй вариант)

В **шестой главе** представлены результаты прямого численного моделирования турбулентных потоков в тепловыделяющих сборках реакторов с треугольной упаковкой по разработанному автором специализированному коду DINUS [12, 14, 40, 42–44, 46].

Проточная часть сборок в коде DINUS представляется как система последовательно соединенных каналов с произвольным, но постоянным вдоль канала по осевому направлению поперечным сечением двух типов: область между дистанционирующими решетками и область дистанционирующих решеток. Исходя из этого предположения, исключением для моделирования являются ТВС, имеющие твэлы с навивкой и дистанционирующие решетки с завихрителями. Область моделирования включает две ячейки межтвэльного пространства с постановкой периодических граничных условий на открытых границах. Вдоль каналов используются также периодические граничные условия.

Реальная геометрия поперечного сечения каналов в физической плоскости декартовых координат отображается в квадратную расчетную плоскость обобщенных (криволинейных) координат. Дискретные аналоги преобразованных уравнений сохранения в расчетной плоскости получаются конечно-разностным методом на совмещенной сетке. Данный подход, в отличие от метода конечных элементов, позволяет использовать компактные диссипативные схемы высокого порядка точности для аппроксимации конвективных членов, что очень важно при прямом численном моделировании.

В качестве примера на рисунке 18 изображены поперечные сечения каналов для сборки реактора ВВЭР-440. На этом же рисунке приведены расчетные сетки. Вблизи стенок осуществляется сгущение сетки, чтобы в ламинарный подслои было включено несколько узлов. Поверхности полосок дистанционирующей решетки в расчетной модели представлены кусочно-линейным способом (не учитывается плавность изгибов).

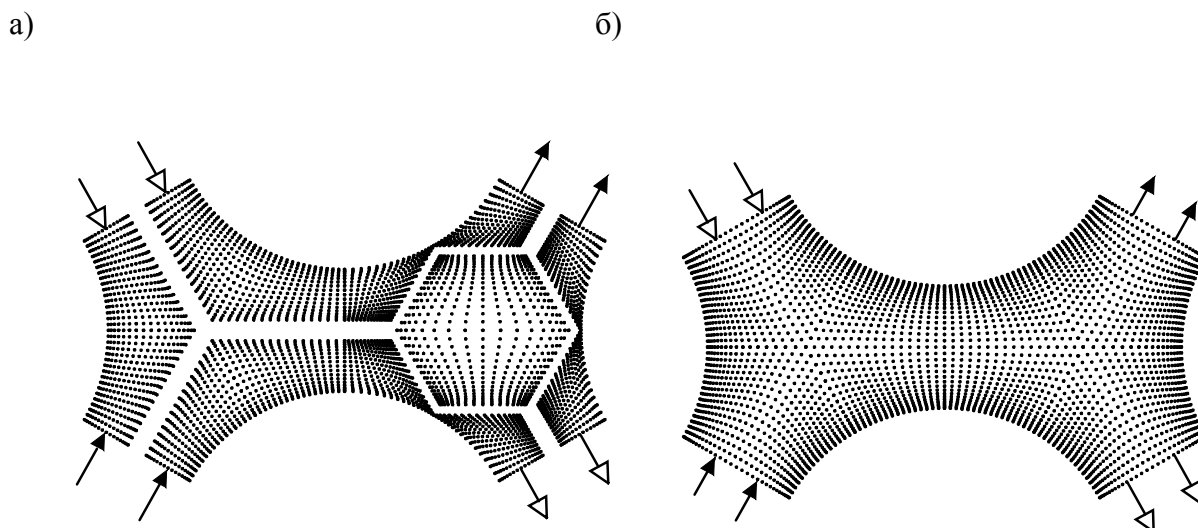


Рисунок 18 – Поперечные сечения области моделирования для сборки ВВЭР-440

а) с дистанционирующей решеткой; б) без дистанционирующей решетки
 → —▷ — периодические граничные условия

Интегрирование уравнений сохранения по времени производится по трехэтапной схеме Рунге - Кутты второго порядка точности. Эллиптическое уравнение Пуассона для давления решается многосеточным методом. В качестве релаксационной процедуры многосеточного метода применяется неполное блочное LU разложение в сочетании с методом быстрого преобразования Фурье вдоль осевой координаты. Алгоритм неполного блочного LU разложения обеспечивает хорошую сходимость многосеточного метода применительно к эллиптическому уравнению общего вида с существенно переменными и анизотропными коэффициентами.

Поскольку конечно-разностные сетки в сечениях разнотипных каналов существенно различаются, осевые сеточные линии на граничной плоскости каналов имеют разрыв. Предлагается разработанный автором алгоритм для учета разрыва осевых сеточных линий с использованием двумерной линейной интерполяции второго порядка точности по пространству. Алгоритм обеспечивает консервативность массы и энергии теплоносителя на граничной плоскости.

Представлена авторская методика расчета с помощью прямого численного моделирования коэффициентов межъячеечного турбулентного перемешивания. С этой целью на открытых границах в плоскости поперечного сечения сборки задается перепад температуры и вычисляется средняя плотность турбулентного теплового потока на границе между ячейками межтвэльного пространства.

По определению коэффициент турбулентного перемешивания:

$$\beta_T = \frac{q_T}{C_p \Delta T W_a}, \quad (23)$$

где q_T – средняя плотность турбулентного теплового потока через границу между ячейками, ΔT – разность температур в соседних ячейках, C – удельная теплоемкость, ρ – плотность, W_a – средняя скорость в осевом направлении потока.

Плотность турбулентного теплового потока вычисляется по соотношению:

$$q_T = C_p \frac{\int \overline{u'T} dy}{S - D}, \quad (24)$$

в котором $\overline{u'T}$ – осредненное по времени значение произведения флуктуаций нормальной скорости и температуры на границе, S – расстояние между стержнями, D – диаметр стержня. Интегрирование в (24) осуществляется по ширине границы.

Посредством сопоставления распределения гидродинамических параметров (осевой скорости и интенсивностей турбулентности) с реперными расчетными данными проведено тестирование кода DINUS на задачах установившегося турбулентного потока между параллельными пластинами и через сборку с треугольной упаковкой (с относительным шагом расположения стержней $S/D=1.2$) при числе Рейнольдса $Re=10000$ [12, 40, 43, 44]. Для задачи с течением между пластинами дополнительно проведено сопоставление по тепловым параметрам: профилям температуры и пульсации температуры. Для сборки с $S/D=1.2$ при $Re=10000$ получены расчетные значения коэффициента теплообмена теплоносителя со стержнями без учета влияния дистанционирующих решеток. Отличие результата расчета от данных эмпирической корреляции по коэффициенту теплообмена составило около 4%.

На основе экспериментальных данных, полученных на стенде в Финляндии с натурной гидравлической моделью кассеты активной зоны реактора ВВЭР-440 ($S/D=1.34$) при числе Рейнольдса 50000, проведена верификация кода DINUS [14, 46]. В модели тепловыделяющие элементы имитировались необогреваемыми стержнями диаметром 9.1 мм. Дистанционирующая решетка представляла собой изогнутые полоски из листового металла, соединенные контактной сваркой, толщиной около 0.3 мм и шириной 10 мм. Расстояние между решетками 230 мм. Проходное сечение решетки состоит из совокупности отверстий двух типов: крестообразные отверстия (примыкающие к стержням) и шестигранные отверстия (образованные полосками).

Область моделирования в расчетах по коду DINUS включала две соседние межствольные ячейки вдали от чехла с одной дистанционирующей решеткой вдоль кассеты. Длина области вдоль сборки 236 мм. Расчеты проводились на грубой и мелкой сетках. При грубой нодализации в поперечном сечении сборка разбивалась на 3584 и 3072 расчетных ячеек в областях с дистанционирующей решеткой и без решетки, соответственно. Грубая сетка в поперечном сечении представлена на рисунке 18. По длине сборки использовалась равномерная сетка из 713 участков. Общее количество расчетных ячеек составляло $2.2 \cdot 10^6$. При мелкой нодализации проведено двойное измельчение по всем направлениям ($17.6 \cdot 10^6$ расчетных ячеек).

С учетом разброса результатов измерений, несмотря на достаточно грубое сеточное разбиение (на мелкой сетке ламинарный подслой включает только две расчетные ячейки), продемонстрировано хорошее согласование расчетных и опытных данных по распределению скорости и интенсивности турбулентности в осевом направлении на различных расстояниях от дистанционирующей решетки. При измельчении сетки получены незначительные изменения в результатах расчета, в целом улучшающие согласование с экспериментальными данными.

В расчетах и эксперименте получены асимметричные профили осевой скорости в межствольных ячейках за дистанционирующей решеткой над крестообразными и шестигранными отверстиями вследствие формирования струй. По мере удаления от решетки и размывания струй профили осевой скорости выравниваются. В расчетах также воспроизводится влияние дистанционирующей решетки на дополнительную турбулизацию потока. Интенсивность турбулентности потока в осевом направлении (отнесенная к локальной осевой скорости) уменьшается с 0.15 на расстоянии 10 мм от решетки до 0.05 на расстоянии 50 мм от решетки.

Рассчитанная по коду и полученная в эксперименте длина участка гидродинамической стабилизации потока теплоносителя после дистанционирующей решетки составляет порядка 50 мм.

С помощью кода DINUS проведены расчеты коэффициента межъячеечного турбулентного перемешивания для сборки с $S/D=1.2$ при $Re=10000$ и его изменения между дистанционирующими решетками для модели кассеты активной зоны реактора ВВЭР-440. На рисунке 19 представлены расчетные профили коэффициента турбулентного перемешивания β_T между дистанционирующими решетками. Из рисунка видно, что коэффициент турбулентного перемешивания при удалении от дистанционирующей решетки падает приблизительно в два раза. При измельчении сетки величина коэффициента β_T существенно уменьшается, а его изменение вдоль сборки становится более монотонным. На рисунке 19 также приведена зависимость, аппроксимирующая расчетные данные при мелкой нодализации:

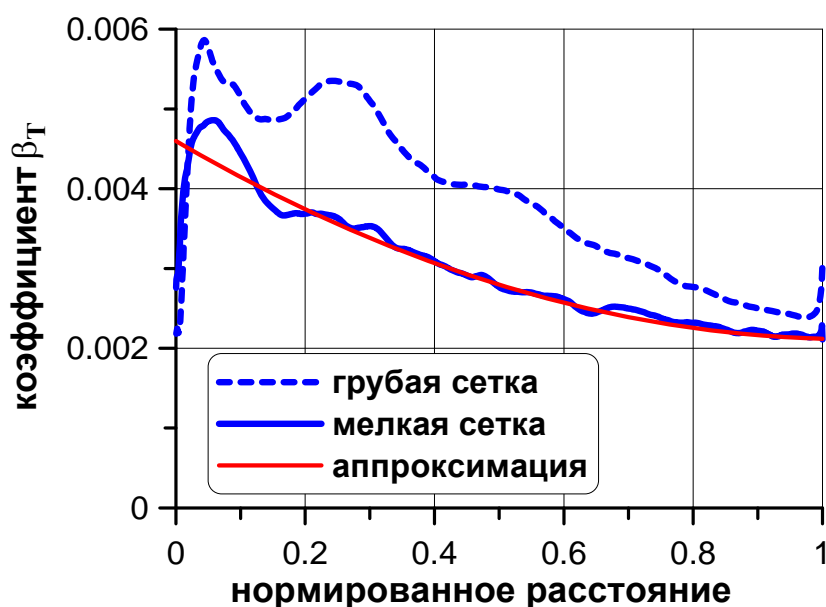


Рисунок 19 – Расчетные профили между дистанционирующими решетками коэффициента турбулентного межъячеечного перемешивания для натурной модели активной зоны реактора ВВЭР-440

$$\beta_T(z) = 10^{-3} (4.60 - 4.73z + 2.25z^2), \quad (25)$$

где z – нормированное расстояние от дистанционирующей решетки. Среднее значение величины коэффициента между решетками приблизительно можно выразить через коэффициент турбулентного перемешивания вдали от дистанционирующей решетки $\beta_T(z=1)$:

$$\int_0^1 \beta_T(z) dz \approx 1.4 \beta_T(z=1). \quad (26)$$

В таблице 1 приведено сопоставление значений коэффициента межъячеечного турбулентного перемешивания вдали от дистанционирующих решеток, полученных при расчетах по коду DINUS и по различным эмпирическим корреляциям. Под чертой в таблице показаны отклонения значений, определенных по корреляциям, от вычисленных прямым численным моделированием (отклонения приведены к данным DNS расчета). Из таблицы видно, что наилучшее согласование расчетных данных по коду DINUS наблюдается с корреляцией Ким – Чанга. Корреляция Ким – Чанга с коэффициентом 1.4, учитывающим интен-

Таблица 1 – Рассчитанные коэффициенты межъячеечного турбулентного перемешивания без учета влияния дистанционирующих решеток

Условия	Расчет DINUS	Корреляции			
		Ким - Чанг	Ченг - Годрес	Роджерс - Тахир	Роджерс - Розехарт
S/D=1.2 Re=10000	0.0032	$\frac{0.0033}{3\%}$	$\frac{0.0036}{13\%}$	$\frac{0.0040}{25\%}$	$\frac{0.0047}{47\%}$
S/D=1.34 Re=50000	0.0022	$\frac{0.0022}{0\%}$	$\frac{0.0027}{23\%}$	$\frac{0.0027}{23\%}$	$\frac{0.0039}{77\%}$

сификацию дистанционирующих решеток, рекомендована для вычисления коэффициента межъячеечного турбулентного перемешивания в одномерной поканальной модели активной зоны реакторов типа ВВЭР расчетного кода КОРСАР/CFD.

В **заклучении** перечислены основные результаты диссертационной работы.

Изложенные в диссертации исследования способствовали:

- развитию системных теплогидравлических кодов, предназначенных для расчетного обоснования безопасности российских проектов реакторных установок;
- созданию расчетного инструмента (в дополнение к экспериментам) на основе DNS методов определения характеристик турбулентных потоков в ТВС активных зон ВВЭР.

Получены следующие основные результаты.

- 1) Разработаны и программно реализованы в системном теплогидравлическом расчетном коде КОРСАР двухжидкостная модель двухфазного многокомпонентного потока и полунявная численная схема интегрирования уравнений сохранения. В процессе разработки математической модели и численной схемы предложены оригинальные методики и алгоритмы, такие как:
 - методика учета в рамках двухжидкостной модели влияния неконденсирующихся газов на межфазный тепло-массообмен, основанная на использовании только физических законов, что обеспечивает ее применение для всех режимов течения двухфазного потока без привлечения дополнительных замыкающих соотношений;
 - линеаризация неявных членов уравнений сохранения массы и энергии при наличии неконденсирующихся компонентов в пароводяном потоке;
 - безытерационный метод расчета поля давления по расчетным ячейкам нодализационной схемы разветвленного контура циркуляции произвольной топологии;
 - алгоритм компенсации численных дисбалансов массы, энергии фаз и массы компонентов в газовой фазе вследствие линеаризации нестационарных членов дискретных уравнений, обеспечивающий консервативность схемы;
 - корректировка нефизичного перераспределения массы и энергии теплоносителя по расчетным ячейкам при изменении направления движения фаз за временной шаг, когда схема аппроксимации конвективных членов становится "антидонорной" по потоку.
- 2) На основе метода обрезанных декартовых ячеек разработан CFD-модуль, который программно реализован как типовой элемент гибкой топологической схемы системного теплогидравлического расчетного кода КОРСАР/CFD.

При реализации численной схемы в модуле применяются оригинальные алгоритмы:

- для аппроксимации конвективных и диффузионных потоков на гранях декартовых ячеек, когда примыкающие к граням ячейки находятся на разных уровнях дробления, разработаны алгоритмы второго порядка точности с компактными шаблонами;
 - в многосеточном методе для граничных ячеек при переводе невязки решения с мелкой сетки на грубую сетку предложен оператор ограничения, учитывающий наличие объединенных ячеек.
- 3) CFD-модуль впервые объединен с одномерной двухжидкостной моделью контурной теплогидравлики по полуневязной мономатричной схеме. С целью улучшения сходимости при итерационном решении уравнения Пуассона для объединенного поля давления на новом временном шаге реализован многосеточный метод на множестве расчетных ячеек всей области моделирования.
 - 4) Выполнена комплексная верификация расчетного кода КОРСАР/CFD на основе имеющихся экспериментальных данных по изучению процессов перемешивания теплоносителя в напорной камере.
 - 5) В процессе верификационных расчетов установлено существенное влияние условий ввода теплоносителя в напорную камеру на формирование профиля фронта температуры либо концентрации борной кислоты на входе в активную зону при возмущениях из холодных ниток. Влияние обусловлено сложной анизотропной картиной растекания жидкости в кольцевой области напорной камеры.
 - 6) Разработаны и программно реализованы в коде DINUS методы прямого численного моделирования теплогидравлических процессов для однофазного теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторов с учетом влияния дистанционирующих решеток. Проведены апробация методов на тестовых задачах с течением установившегося турбулентного потока между параллельными пластинами и через сборку стержней с треугольной упаковкой и их верификация по экспериментальным данным, полученным на натурной гидравлической модели кассеты активной зоны реактора ВВЭР-440 при числе Рейнольдса 50000.

На основе расчетов по коду DINUS предложена методика определения коэффициентов межъячеечного турбулентного перемешивания. Выполнены расчеты коэффициента для установившегося потока через сборку стержней с треугольной упаковкой без учета дистанционирующих решеток и его изменения между дистанционирующими решетками для ВВЭР-440.

Представлено сопоставление рассчитанного коэффициента турбулентного перемешивания вдали от дистанционирующей решетки с его значениями, определенными по различным корреляциям.

Публикации по теме диссертации

Публикации в журналах, включенных в перечень ВАК или в базу данных и систему цитирования Scopus, а также свидетельства на программы для ЭВМ

1. Мигров Ю.А., Чернов И.В., Юдов Ю.В. Результаты верификации расчетных кодов ДЖИП и RELAP5 на стенде ИСБ-ВВЭР на основе стандартных проблем безопасности СПБ-1 и СПБ-2 // Теплоэнергетика. 1999. № 3. С. 8-13.
2. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000610816. Программный комплекс "Интегральный теплогидравлический расчетный код улучшенной оценки КОРСАР/В1.1" (ПК КОРСАР/В1.1). Авторы: Мигров Ю.А., Юдов Ю.В., Данилов И.Г.,

- Волкова С.Н., Коротаев В.Г., Бондарчик Б.Р., Кутьин В.В., Бенедиктов Д.В. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 31 августа 2000 г.
3. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Коротаев В.Г., Кутьин В.В., Бондарчик Б.Р., Бенедиктов Д.В. КОРСАР - теплогидравлический расчетный код нового поколения для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2001. №9. С. 36-49.
 4. Василенко В.А., Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Коротаев В.Г., Кутьин В.В., Бондарчик Б.Р., Бенедиктов Д.В. Опыт создания и основные характеристики теплогидравлического расчетного кода нового поколения КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. №11. С. 11-16.
 5. Юдов Ю.В. Двухжидкостная модель нестационарной контурной теплогидравлики и ее численная реализация в расчетном коде КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. №11. С. 17-21.
 6. Юдов Ю.В., Волкова С.Н., Мигров Ю.А. Замыкающие соотношения теплогидравлической модели расчетного кода КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. №11. С. 22-29.
 7. Юдов Ю.В. Особенности моделирования гидродинамики расслоенного и дисперсно-кольцевого режимов течения двухфазного потока в расчетном коде КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. №11. С. 30-35.
 8. Сулацкий А.А., Юдов Ю.В., Бондарчик Б.Р. Особенности моделирования ограничения противоточного движения фаз в расчетном коде КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. №11. С. 36-41.
 9. Гашенко М.П., Липатов И.А., Шмаль И.И., Дремин Г.И., Галчанская С.А., Ревнов А.А., Никонов С.М., Горбунов Ю.С., Молошников А.С., Елкин И.В., Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Юдов Ю.В. Экспериментальные исследования на интегральных стендах (ИСБ-ВВЭР и ПСБ-ВВЭР), обеспечивающие верификацию теплогидравлических кодов // Теплоэнергетика. 2002. №11. С. 49-55.
 10. Беляев Ю.В., Зайцев С.И., Волкова С.Н., Гудошников А.Н., Мигров Ю.А., Юдов Ю.В. Численное моделирование аварийных режимов реакторной установки с ВВЭР-1000 с помощью расчетных кодов ТРАП и КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. №11. С. 62-65.
 11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005612500. Программный комплекс "Интегральный теплогидравлический расчетный код улучшенной оценки КОРСАР/В2". Авторы: Мигров Ю.А., Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Волкова С.Н., Коротаев В.Г., Владимиров А.А., Кутьин В.В., Бенедиктов Д.В., Гусев В.И., Егоров А.П., Артемов В.Г., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 26 сентября 2005 г.
 12. Юдов Ю.В. Прямое численное моделирование турбулентных потоков в тепловыделяющих сборках ядерных реакторов // Математическое моделирование. 2010. Т. 22. № 8. С. 145-160.
 13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011613548. Программный комплекс "Интегральный теплогидравлический расчетный код улучшенной оценки КОРСАР/ГП". Авторы: Мигров Ю.А., Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Волкова С.Н., Коротаев В.Г., Владимиров А.А., Бенедиктов Д.В., Гусев В.И., Егоров А.П., Артемов В.Г., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П., Алехин Г.В., Семишкин В.П., Фризен Е.А. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 6 мая 2011 г.
 14. Юдов Ю.В. Прямое численное моделирование турбулентных потоков в тепловыделяющих сборках реактора ВВЭР-440 // Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 10. С. 97-107.
 15. Yudov Yu., Danilov I., Chepilko S. Implementation of CFD module in the KORSAR thermal – hydraulic system code // Kerntechnik. 2015. V. 80. № 4. P. 359-365.

16. Юдов Ю.В. Учет влияния неконденсирующихся газов на процессы межфазного теплообмена в двухжидкостной модели кода КОРСАР // Теплоэнергетика. 2018. №3. С. 42-50.
17. Юдов Ю.В., Чепилко С.С., Данилов И.Г. Численная реализация трехмерной модели теплогидравлики на основе метода вложенной границы в расчетном коде "КОРСАР/CFD" // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 4. С. 46-56.
18. Юдов Ю.В. Коррекция полунейвной численной схемы двухжидкостной модели кода КОРСАР // Теплоэнергетика. 2019. №1. С. 1-10.
19. Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Чепилко С.С., Кастерин Д.С. Объединение одномерной и трехмерной моделей теплогидравлики в расчетном коде КОРСАР/CFD // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. Вып. 1. С. 57-68.
20. Юдов Ю.В., Петкевич И.Г., В.Г. Артемов В.Г., Кастерин Д.С., Румянцев С.Н. Трехмерное моделирование напорной камеры реактора ВВЭР-1000 в режимах с несимметричной работой петель с помощью расчетного кода КОРСАР/CFD // Теплоэнергетика. 2019. №11. С. 91-101.
21. Юдов Ю.В., Петкевич И.Г., В.Г. Артемов В.Г. Кросс-верификация 1-D и 3-D моделей напорной камеры реактора ВВЭР-1000 расчетного кода КОРСАР/CFD по режимам с несимметричной работой петель // Теплоэнергетика. 2019. №12. С. 97-104.
22. Юдов Ю.В., Румянцев С.Н., Чепилко С.С., Кастерин Д.С. Расчеты по коду КОРСАР/CFD процессов перемешивания пробки конденсата при пуске циркуляционного насоса в модели реактора ВВЭР-1000 на стенде ОКБ "ГИДРОПРЕСС" // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. 2020. № 1 (19). С. 40-53.
23. Юдов Ю.В., Румянцев С.Н., Чепилко С.С. Расчетные исследования растекания теплоносителя в кольцевой камере при радиальном вводе через патрубок // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. 2020. № 3 (21). С. 32-41.
24. Юдов Ю.В., Румянцев С.Н., Чепилко С.С. Расчеты по коду КОРСАР/CFD процессов перемешивания в модели реактора ВВЭР-1000 стенда ОКБ «ГИДРОПРЕСС» при функционировании различного количества циркуляционных насосов // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. 2020. № 4 (22). С. 26-41.
Прочие публикации
25. Юдов Ю.В. Пакет программ расчета теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах водо-водяных энергетических реакторов // Тезисы семинара Минатома РФ "Динамика энергоблоков атомных станций нового поколения (проблемы управления и безопасности)", 30 мая-3 июня 1994. Сосновый Бор. С. 47.
26. Юдов Ю.В. Верификация пакета программ ДЖИП на интегральном стенде безопасности ИСБ-ВВЭР // Труды Международной конференции "Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР", 21-24 ноября 1995. Обнинск. Т.2. С. 165-175.
27. Мигров Ю.А., Чернов И.В., Юдов Ю.В. Опыт верификации расчетных кодов на стенде ИСБ-ВВЭР по технологии стандартных проблем безопасности // Тезисы семинара Минатома РФ по динамике ядерно-энергетических установок "Математическое и физическое моделирование

- ядерных реакторов и петлевых установок, проблемы верификации", 9-13 сентября 1996. Дмитровград. С. 41-42.
28. Мигров Ю.А., Чернов И.В., Юдов Ю.В. Опыт и результаты верификации расчетных кодов ДЖИП и RELAP5 на стенде ИСБ-ВВЭР в процессе выполнения стандартных проблем безопасности СПБ-1 и СПБ-2 // Труды Международной конференции "Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР", 26-29 мая 1998. Обнинск. Т.2. С. 233-242.
 29. Юдов Ю.В., Мигров Ю.А., Бенедиктов Д.В. Двухжидкостная модель стратифицированного двухфазного потока в горизонтальных трубах // Тезисы докладов отраслевой конференции "Гидродинамика и безопасность АЭС", 28-30 сентября 1999. Обнинск. С. 41-44.
 30. Мигров Ю.А., Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Волкова С.Н., Коротаев В.Г., Кутьин В.В., Бондарчик Б.Р., Бенедиктов Д.В. КОРСАР - расчетный код нового поколения для численного моделирования динамики ЯЭУ // Тезисы докладов семинара по динамике ЯЭУ "Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации", 18-22 сентября 2000. Сосновый Бор. С. 5-6.
 31. Yudov Yu. Numerical solution of conservation equations in the transient model for the system thermal-hydraulics in the KORSAR computer code // The International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-9). Book of abstracts. V.2, 8-12 April 2001. Nice. France. Paper-544. P.545.
 32. Migrov Yu., Yudov Yu., Danilov I., Volkova S., Korotaev V., Kutuyin V., Bondarchik B., Benediktov D. KORSAR: A new generation computer code for numerically modeling dynamic behavior of nuclear power installations. // The 9th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-9), 8-12 April 2001. Nice. France. Paper - 545. 7 p.
 33. Юдов Ю.В. Особенности численного решения уравнений сохранения двухжидкостной модели нестационарной контурной теплогидравлики в РК КОРСАР // Труды XIII школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках ", 20-25 мая 2001. Санкт-Петербург. Т.2. С. 134-137.
 34. Мигров Ю.А., Юдов Ю.В., Волкова С.Н., Бондарчик Б.Р., Чернов И.В., Кутьин В.В., Гудошников А.Н., Бенедиктов Д.В., Кувшинова О.В. Верификация РК КОРСАР на интегральных теплогидравлических стендах и на АЭС с ВВЭР-1000 // Тезисы докладов отраслевой конференции "Теплофизика 2001" "Теплогидравлические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация)", 29-31 мая 2001. Обнинск. С. 137-139.
 35. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Коротаев В.Г., Кутьин В.В., Бондарчик Б.Р., Бенедиктов Д.В. Опыт создания и верификация расчетного кода КОРСАР // Сборник тезисов докладов 2^й Всероссийской научно-технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 19-23 ноября 2001. Подольск. С. 22.
 36. Виноградов В.Н., Ложкин В.В., Сергеев В.В., Зайцев С.И., Юдов Ю.В. Верификация российских теплогидравлических кодов на стандартных задачах повторного залива ВВЭР // Сборник тезисов докладов 2^й Всероссийской научно-технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 19-23 ноября 2001. Подольск. С. 37.
 37. Yudov Yu. The KORSAR computer code modeling of annular-dispersed two-phase flow hydrodynamics // The 11th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-11), 20-23 April 2003. Tokyo. Japan. Paper - 36150. 8 p.
 38. Юдов Ю.В. Моделирование поведения неконденсирующихся газов в двухфазном потоке в приближении двухжидкостной модели // Сборник тезисов докладов 3^й Всероссийской научно-

технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 26-30 мая 2003.

Подольск. С. 90-91.

39. Мигров Ю.А., Юдов Ю.В., Волкова С.Н., Кутьин В.В., Фальков А.А., Гусев А.С. Верификация расчетного кода КОРСАР при моделировании поведения неконденсирующихся газов в теплоносителе // Сборник тезисов докладов 4^й Международной научно-технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 23-26 мая 2005. Подольск. С. 66-67.
40. Yudov Yu. Calculation of inter-subchannel turbulent mixing rate and heat transfer in a triangular-arrayed rod bundle using direct numerical simulation // The 14th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-14), 17-20 July 2006. Miami. USA. Paper ICONE-14-89111.7 p.
41. Гудошников А.Н., Мигров Ю.А., Юдов Ю.В., Румянцев С.Н. Верификация кода КОРСАР с учетом поведения неконденсирующихся газов в теплоносителе на основе интегральных экспериментов // Сборник тезисов 5^й Международной научно-технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 29 мая-1 июня 2007. Подольск. С. 35.
42. Юдов Ю.В., Владимиров А.В. Параллельный алгоритм расчета трехмерного поля давления при моделировании пространственных теплогидравлических процессов // 5^я Международная научно - техническая конференция "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 29 мая -1 июня 2007 г., г. Подольск. Доклад f74. 10 с.
43. Юдов Ю.В. Численное моделирование теплогидравлических характеристик ТВС на основе методов DNS // 5^я Международная научно - техническая конференция "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 29 мая -1 июня 2007 г., г. Подольск. Доклад f75. 12 с.
44. Yudov Yu. Using DNS methods for numerical simulation of thermal-hydraulic effects in fuel rod bundles // The 17th Symposium of AER on VVER reactor physics and reactor safety, 24-28 September 2007. Yalta. Ukraine. Technical Programme and Book of Abstracts. P. 42.
45. Артемов В.Г., Коротаев В.Г., Юдов Ю.В., Иванов А.С., Пискарев А.В., Артемова Л.М. Верификация НФТГ/3D модели кода КОРСАО/ГП в области низких значений плотности теплоносителя на основе стационарных состояний кипящего реактора ВК-50 // Сборник тезисов 6^й Международной научно-технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 26-29 мая 2009. Подольск. С. 47.
46. Yudov Yu. Using the DINUS code for direct numerical simulation of hydrodynamic processes in VVER-440 fuel rod bundles // CFD4NRS-4 OECD/NEA and IAEA Workshop "Experimental validation and application of CFD and CMFD codes in nuclear reactor technology", 10-12 September 2012. Daejeon. Korea. Paper S05#3, 9 p.
47. Юдов Ю.В., Чепилко С.С. Разработка генератора декартовых сеток CFD модуля на основе метода вложенных границ // Сборник тезисов 8^й Международной научно-технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 28-31 мая 2013. Подольск. С. 66-67.
48. Юдов Ю.В., Чепилко С.С., Данилов И.Г. Разработка CFD модуля в составе РК КОРСАР на основе метода вложенных границ // Сборник тезисов 8^й Международной научно-технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 28-31 мая 2013. Подольск. С. 64-65.
49. Yudov Yu., Danilov I., Chepilko S. Implementation of CFD module in the KORSAR thermal – hydraulic system code // Proceedings of the 24th Symposium of AER, V.2, 14-18 October 2014. Sochi. Russia. P. 633-648.
50. Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Чепилко С.С. Технология адаптации CFD модуля в составе функционального наполнения РК КОРСАР/ГП // 9^я Международная научно - техническая конференция "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 19-22 мая 2015 г. Подольск. Доклад mntk2015-165. 13 с.

51. Кастерин Д.С., Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Чепилко С.С. Параллельная версия CFD модуля расчетного кода КОРСАР // Сборник тезисов докладов научно-практической конференции молодых ученых и специалистов "КОМАНДА", 8-10 июня 2015 г. Санкт-Петербург. С. 107-109.
52. Данилов И.Г., Коротаев В.Г., Мигров Ю.А., Юдов Ю.В. Системный расчетный код КОРСАР (опыт разработки и перспективы развития) // Тезисы Межотраслевого научно-технического семинара "Расчетные и экспериментальные исследования динамики ядерных энергетических установок на этапах жизненного цикла", 20-22 октября 2015. Сосновый Бор. С. 31.
53. Юдов Ю.В., Румянцев С.Н., Чепилко С.С., Кастерин Д.С. Верификация расчетного кода КОРСАР/CFD по экспериментальным данным с перемешиванием бора на модели реактора ВВЭР-1000 / /10^я Международная научно - техническая конференция "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 16-19 мая 2017 г. Подольск. Доклад mntk2017-095. 12 с.
54. Кастерин Д.С., Румянцев С.Н., Чепилко С.С., Юдов Ю.В. Расчетный анализ эксперимента с перемешиванием пробки деборированной воды на модели реактора ВВЭР-1000 по системному коду КОРСАР/CFD // Сборник тезисов докладов 13^{ой} Международной научно-практической конференции по атомной энергетике "Безопасность. Эффективность. Ресурс", 3-6 октября 2017, г. Севастополь. С. 106-108.
55. Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Чепилко С.С., Кастерин Д.С. Моделирование пространственных нейтронно-физических и теплогидравлических процессов с помощью расчетного кода КОРСАР/CFD // Сборник тезисов докладов межотраслевого научно-технического семинара "Моделирование динамики ЯЭУ" (разработка программных средств, верификация, оценка точности расчета), 5-7 июня 2018. г. Сосновый Бор. С. 37.
56. Юдов Ю.В., Петкевич И.Г., Артемов В.Г., Кастерин Д.С., Румянцев С.Н. Моделирование режимов РУ ВВЭР-1000 при несимметричной работе петель с помощью расчетного кода КОРСАР/CFD // 11^я Международная научно-техническая конференция "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 21-24 мая 2019. г. Подольск. Доклад mntk 2019-063. 18 с.

Юдов Юрий Васильевич

Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах
реакторных установок с водяным теплоносителем

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Подписано в печать 20.07.2021 г.
Формат 60 x 90 1/16. Бумага 80 г/м². Гарнитура «Times»
1,98 авт. л.

Тираж 120 экз.

Печать на аппарате Konica Minolta. ИБРАЭ РАН.
115191, Москва, ул. Б.Тульская, 52
Телефон: 8-495-955-22-66