

ОТЗЫВ

официального оппонента Мелихова Олега Игорьевича на диссертацию Юдова Юрия Васильевича «Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах реакторных установок с водяным теплоносителем», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы диссертации Ю.В. Юдова очевидно следует из рассмотренных автором и решенных им задач, составивших содержание оппонируемой работы: 1) разработка методики учета переноса неконденсирующихся газов и их влияния на межфазный тепломассообмен, 2) разработка CFD-модуля в составе кода КОРСАР для учета трехмерных эффектов в напорной камере реактора, 3) разработка кода для прямого численного моделирования теплогидравлических процессов в тепловыделяющих сборках реакторов, который позволяет определять коэффициенты межъячеечного турбулентного перемешивания для ТВС с учетом влияния дистанционирующих решеток. Решение этих задач позволяет качественно улучшить численное моделирование процессов в контурах реакторных установок, что имеет исключительно важное значение для практики.

Научная новизна диссертации в наибольшей степени характеризуется следующими положениями:

- Предложена оригинальная методика учета влияния неконденсирующихся газов в пароводяном теплоносителе на процессы межфазного тепломассообмена для двухжидкостной модели пароводяной среды. Методика основана на использовании модели совместного диффузионного и термического сопротивления, методе аналогии процессов тепло- и массообмена, законе Генри и применяется единообразно для всех режимов течения двухфазного потока.
- Разработана полуневная численная схема расчета динамики многокомпонентных двухфазных потоков. В схеме используются оригинальные соотношения для линеаризации по времени представленных неявно величин на межфазной поверхности.
- Разработан эффективный безытерационный метод расчета поля давления в разветвленных контурах циркуляции произвольной топологии, базирующийся на рекуррентных соотношениях метода прогонки.

- Впервые разработана методика объединения расчета поля давления одномерной двухжидкостной модели системного теплогидравлического кода с трехмерной CFD–моделью по полуявной численной схеме в мономатричном варианте.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что созданные в результате ее выполнения методики и алгоритмы легли в основу системного расчетного кода КОРСАР, который применяется конструкторскими организациями для анализа и обоснования безопасности АЭС с ВВЭР и ядерных энергетических установок транспортного назначения.

Полнота изложения материалов диссертации является достаточной. Основные результаты диссертации Ю.В. Юдова опубликованы в 53 печатных работах, включая 20 статей в ведущих рецензируемых отечественных из перечня ВАК и статью зарубежном научном журнале "Kerntechnik" из базы данных и системы цитирования Scopus, что позволяет сделать вывод о достаточной обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы.

Структура диссертации

Диссертация изложена на 277 страницах и состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений, списка основных обозначений, списка литературы (215 позиций), трех приложений и списка иллюстраций. Работа содержит 121 рисунок и 18 таблиц.

Содержание диссертации

Во введении охарактеризована тематика исследований, актуальность темы, приведены общие характеристики работы.

Материалы **первой главы** диссертации содержат общую информацию системном теплогидравлическом расчетном коде КОРСАР. Представлены система одномерных уравнений двухжидкостной модели многокомпонентного двухфазного потока и система замыкающих соотношений, описывающих межфазное взаимодействие и взаимодействие потока со стенками. Подробно описана разработанная соискателем методика учета влияния неконденсирующихся газов в части межфазного тепло – и массообмена, а также расчета свойств парогазовой среды.

Методика основана на применении квазиравновесной схемы фазового перехода, согласно которой, давление пара около поверхности воды принимается равным давлению насыщения при температуре межфазной поверхности, что позволяет

моделировать влияние неконденсирующихся газов для всех режимов течения двухфазного потока без привлечения дополнительных замыкающих соотношений.

Во **второй главе** описана полунеявная численная схема решения уравнений сохранения двухжидкостной модели двухфазного многокомпонентного потока расчетного кода КОРСАР. Приведен разработанный соискателем безытерационный трехэтапный метод расчета поля давления в разветвленных циркуляционных контурах, основанный на методе прогонки, который по быстрдействию на порядки превосходит итерационные мономатричные алгоритмы. Для полунеявной численной схемы разработан оригинальный алгоритм компенсации численных дисбалансов массы и энергии фаз теплоносителя, возникающих вследствие линеаризации нестационарных членов. Предложен алгоритм, обеспечивающий адекватное распределение параметров по расчетным ячейкам в полунеявной численной схеме при изменении знака скоростей фаз за временной шаг, когда схема расчета конвективных членов в уравнениях сохранения массы и энергии становится "антидонорной". Проведена валидация кода КОРСАР применительно к процессам с участием неконденсирующихся газов на опытных данных по пленочной конденсации и испарению пленки в паровоздушных потоках, подтвердившая адекватность разработанной автором модели учета влияния неконденсирующихся газов.

В **третьей главе диссертации** приводится система уравнений сохранения массы, количества движения и энергии для однофазной жидкости, а также граничные условия применительно к трехмерной модели CFD-модуля РК КОРСАР/CFD. Подробно описана численная реализация метода вложенной границы на декартовых сетках для трехмерной модели. Интегрирование уравнений по времени выполняется по схеме второго порядка точности Кима-Чоя, при этом дискретизация конвективных членов осуществляется по эффективной схеме второго порядка точности SDPUS-C1, что значительно улучшает сходимость при итерационном решении. Для аппроксимации конвективных и диффузионных потоков на гранях декартовых ячеек, когда примыкающие к граням ячейки находятся на разных уровнях дробления, соискателем разработаны алгоритмы второго порядка точности с компактными шаблонами. Разработанный расчетный CFD-модуль был тестирован и верифицирован на двух аналитических решениях, результатах трех численных решений и опытных данных 13 экспериментальных исследований. Полученные результаты подтвердили корректность реализованных в модуле алгоритмов и методик.

Четвёртая глава посвящен описанию разработанного диссертантом алгоритма объединения 1D и 3D моделей кода КОРСАР/CFD по полунявной схеме. Конвективные потоки массы и энергии на границе стыковки для 1D модели рассчитываются суммированием соответствующих потоков на граничных гранях 3D модели. Потоки аппроксимируются неявно относительно скоростей для связки матриц уравнения Пуассона в областях различной размерности. Алгоритм обеспечивает сохранение массы и энергии потоков жидкости на границе стыковки областей различной размерности. Решение уравнения Пуассона для давления во всей расчетной области осуществляется эффективным многосеточным методом.

В пятой главе изложены результаты валидации связки 3D и 1D моделей кода КОРСАР/CFD на экспериментах, выполненных на четырехпетлевом стенде в ОКБ "ГИДРОПРЕСС" с моделью реактора ВВЭР-1000 и на шестом блоке АЭС Козлодуй с целью изучения процессов перемешивания теплоносителя в напорной камере. В целом получено достаточно неплохое соответствие расчетных и опытных данных. При этом отмечено сильное влияние наклона осей входных патрубков в напорную камеру на гидродинамику в напорной камере, а также улучшение качества численного моделирования при расширении области трехмерного моделирования вплоть до циркуляционных насосов.

В этой же главе представлены результаты кросс-верификации двух вариантов моделирования напорной камеры ВВЭР-1000 с помощью кода КОРСАР/CFD: 1) трехмерная CFD модель и 2) квазитрехмерная модель, составленная из одномерных элементов кода КОРСАР/CFD. Были рассмотрены три режима с несимметричной работой петель циркуляционного контура. Получено хорошее согласование расчетных результатов по двум схемам расчетов, но в диссертации отмечается, что в квазитрехмерной модели были искусственно завышены сопротивления опускному течению теплоносителя по каналам, моделирующим напорную камеру. При уменьшении этих сопротивлений расхождение результатов, полученных по CFD модели и по квазитрехмерной модели, увеличивается.

Диссертантом было выполнено численное исследование растекания теплоносителя в кольцевой области напорной камеры. Показано, что поступающий из входных патрубков поток теплоносителя движется азимутально в обе стороны, приобретая направление в нижнюю камеру при слиянии азимутальных потоков. Под патрубками работающих петель образуются области стагнации. Методические расчеты показали,

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. Градиент увеличения площади проходного сечения и гидравлическое сопротивление повышаются при изменении радиального направления от азимутального до продольного вдоль камеры. Происходит перетекание теплоносителя, вызывающее загибание потока вдоль камеры и развитие течения вдоль азимутального направления.

Шестая глава посвящена описанию разработанного соискателем специализированного кода DINUS, предназначенного для прямого численного моделирования турбулентных потоков в тепловыделяющих сборках реакторов. Для построения эффективной численной схемы был выполнен переход от декартовых координат в поперечном сечении к обобщенным координатам, в котором поперечное сечение канала преобразуется в квадрат. Дискретные аналоги преобразованных в новых координатах уравнений сохранения выводятся конечно-разностным методом. Конвективные члены аппроксимируются по шеститочечной схеме 5 порядка.

Выполнено сопоставление расчетов кодом DINUS с реперными расчетными данными на задачах установившегося турбулентного потока между параллельными пластинами и через сборку с треугольной упаковкой. Для задачи с течением между пластинами также проведено сопоставление по тепловым параметрам.

Проведена валидация кода DINUS на экспериментальных данных, полученных на натурной гидравлической модели кассеты активной зоны реактора ВВЭР-440. С учетом разброса результатов измерений продемонстрировано хорошее согласование расчетных и опытных данных по распределению скорости и интенсивности турбулентности в осевом направлении на различных расстояниях от дистанционирующей решетки.

Кодом DINUS были выполнены параметрические расчеты и определены коэффициенты межъячеечного турбулентного перемешивания, которые сопоставлялись с величинами, определенными по различным корреляциям. В результате этой работы корреляция Ким – Чанга с коэффициентом 1.4, учитывающим интенсификацию дистанционирующих решеток, рекомендована для вычисления коэффициента межъячеечного турбулентного перемешивания в одномерной

поканальной модели активной зоны реакторов типа ВВЭР расчетного кода КОРСАР/CFD.

В **заключении** диссертации излагаются общие итоги выполненной работы и перспективы дальнейшего развития исследований в данном направлении.

Возвращаясь к анализу диссертации по основным признакам следует отметить, что она полностью соответствует **критериям новизны**, что следует из полученных диссертантом результатов: оригинальной методики учета влияния неконденсирующихся газов в пароводяном теплоносителе на процессы межфазного теплообмена, эффективной полунявной численной схемы расчета динамики многокомпонентных двухфазных потоков, нового безытерационного метода расчета давления в разветвленных контурах циркуляции, базирующегося на рекуррентных соотношениях метода прогонки, новой методики объединения одномерной двухжидкостной модели системного теплогидравлического кода с трехмерной CFD-моделью и еще целого ряда других оригинальных результатов.

Научная значимость работы определяется тем, что полученные в ходе её выполнения результаты служат развитию системных теплогидравлических кодов, предназначенных для расчетного обоснования безопасности российских проектов реакторных установок и расчетных инструментов для определения характеристик турбулентных потоков в ТВС активных зон ВВЭР.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается применением научно обоснованных расчётных методик и физических моделей и результатами выполненной валидации разработанных расчетных кодов.

Личный вклад соискателя в получение результатов, изложенных в диссертации, заключается в том, что основная часть исследований, результаты которых вошли в диссертацию, были выполнены непосредственно соискателем.

Замечания по диссертационной работе:

1. В диссертации отсутствует обзор работ по теме исследования. Вместо него диссертант в части введения, озаглавленной *«Актуальность и степень разработанности темы»* дал по существу нечто вроде аннотации этого обзора на 5 страницах. Безусловно, этот материал дает определенное представление о работах предшественников, однако не заменяет полноценного обзора, охватывающий работы

в данной области и показывающий место и значение работы, представленной в диссертации.

2. В описании методологии совместной работы одномерного и трехмерного модулей расчетного кода КОРСАР/CFD (глава 4 диссертации) отсутствует информация о том, каким образом на границе их стыковки трехмерный CFD модуль получает сведения о характеристиках турбулентности потока, который входит в область моделирования, за которую ответственен CFD модуль. Знание этой информации необходимо для оценки качества совместной работы одномерного и трехмерного расчетных модулей.

3. В главе 2 описана предложенная соискателем процедура улучшения балансов масс и энергий фаз теплоносителя в численном решении. Процедура основана на введении в уравнения дополнительных членов, которые компенсируют возникающие на разностном уровне дисбалансы массы и энергии. Как показал диссертант, такая процедура действительно улучшает балансы масс и энергий. Однако эта процедура носит эвристический характер, и в диссертации отсутствует доказательное обоснование того, что введенные «компенсирующие» члены не вносят искажения в получаемое численное решение. Балансы улучшаются. Но решение при этом не искажается? Вопрос остался открытым.

4. Описанное в разделе 4.3 тестирование схемы объединения одномерного и трехмерного модулей кода КОРСАР/CFD было выполнено на задаче о контуре естественной циркуляции и показало работоспособность такой схемы. Также было бы интересно выполнить существенно более простое тестирование, рассмотрев два случая: 1) расчет турбулентного течения в трубе только CFD модулем, 2) расчет такого же течения с помощью комбинации одномерного модуля КОРСАР/CFD и трехмерного модуля КОРСАР/CFD. Во втором случае часть трубы считается одномерно, а другая часть – трехмерно. При этом участок одномерного моделирования можно размещать сначала во входной части трубы, потом в её средней части, а затем и в выходной части. Сопоставление полученных во втором случае результатов с расчетом первого случая позволило бы выявить возможные ограничения исследуемой схемы объединения одномерного и трехмерного модулей. Конечно, это замечание является пожеланием на будущее.

5. С моей точки зрения самые сильные результаты диссертационной работы представлены в пятой главе, посвященной верификации кода КОРСАР/CFD и

численному исследованию течения теплоносителя в кольцевой области напорной камеры реактора. Собственно ради этого и разрабатывался код. Я считаю, что диссертант сузил рамки своего исследования этого сложного и важного с практической точки зрения явления. Можно было бы поварьировать геометрию области течения, попробовать найти конфигурацию, при которой улучшается перемешивание потоков и т.д. И это замечание следует рассматривать, как пожелание на будущее.

6. На стр. 127-129 приводится численное решение задачи в безразмерном виде, однако не указаны масштабы длины и времени.

7. Таблицу 3.4 на стр. 126-127 следовало бы дополнить столбцом с информацией о расхождении результатов диссертанта с результатами указанных в таблице исследований.

8. В разделе 5.5 «Основные положения» отсутствует важная информация о количественном отличии результатов расчетов от экспериментальных данных.

9. На стр. 90 при пояснении последней на этой странице формулы, которая не снабжена номером, указано, что это следствие слабой сжимаемости жидкости. С моей точки зрения, следовало бы просто написать, что формула получена в пренебрежении пульсациями плотности жидкости. Термин «слабая сжимаемость» в основном относится к другим случаям.

10. Еще одно замечание по терминологии. В диссертации широко используется слово «верификация» для обозначения сопоставления расчетных и опытных данных с целью проверки моделей, входящих в состав кода. В 90-е годы состоялась дискуссия о различии терминов «верификация» и «валидация», но к настоящему времени, судя по публикациям в отечественной литературе, именно за словом «валидация» закрепилось обозначение процедуры, включающей в себя выполнение расчетов экспериментов с помощью некоторого кода для оценки способностей этого кода воспроизводить явления и процессы, исследованные в экспериментах. Поэтому диссертанту следовало бы использовать термин «валидация».

Эти замечания не снижают мою высокую оценку диссертационной работы.

Автореферат отражает основные положения диссертационной работы. Тема диссертации и ее содержание соответствуют паспорту специальности 01.04.14.

Выполненная диссертационная работа «Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах реакторных установок с водяным теплоносителем» отвечает критериям пунктов 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Юрий Васильевич Юдов, заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент –
профессор кафедры АЭС НИУ «МЭИ»
доктор физ.-мат. наук

Мелихов

Мелихов Олег Игорьевич

Дата: 28.10.2021

удостоверяю
начальник управления по
работе с персоналом

Н.Г. Савин

Тел. +7(916) 686-56-83

E-mail: MelikhovOI@mpei.ru

Н.Г. Савин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ») РФ, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

Тел. +7 (495) 362-75-60 E-mail: universe@mpei.ac.ru Сайт: <https://mpei.ru/>