

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
Д 002.070.01 НА БАЗЕ Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного
развития атомной энергетики Российской академии наук

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА
НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 25 ноября 2021 года № 9

О присуждении Юдову Юрию Васильевичу, гражданство – Российская Федерация, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах реакторных установок с водяным теплоносителем» по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» принята к защите 20 июля 2021 года, протокол № 8 диссертационным советом Д 002.070.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, расположенного по адресу: 115191, Москва, ул. Большая Тульская, д. 52. Диссертационный совет создан приказами Минобрнауки России № 75/нк от 15 февраля 2013 года, № 626/нк от 3 июня 2016 года, № 748/нк от 12 июля 2017 г., №92/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Юдов Юрий Васильевич 1961 года рождения. Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка двухжидкостной модели контурной теплогидравлики реакторных установок с водяным теплоносителем» защитил в 2001 году в диссертационном совете, созданном на базе Санкт-Петербургского государственного технического университета, работает ведущим научным сотрудником в отделе теплофизических исследований Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова».

Диссертация выполнена в отделе теплофизических исследований Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова».

Официальные оппоненты:

Мелихов Олег Игорьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры АЭС Национального исследовательского университета «МЭИ»;

Деревич Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики факультета Фундаментальных наук Национального исследовательского университета «МГТУ им. Н.Э. Баумана»;

Митрофанова Ольга Викторовна, доктор технических наук, профессор кафедры теплофизики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова» (г. Санкт-Петербург) в своем положительном отзыве, подписанном исполняющей обязанности заведующей кафедрой «Плазмогазодинамика и теплотехника», кандидатом технических наук Тетериной Ириной Владимировной и научным руководителем семинара по механике жидкости, газа и плазмы, доктором физико-математических наук, профессором кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» Циркуновым Юрием Михайловичем и утвержденном ректором университета, доктором технических наук, профессором Ивановым Константином Михайловичем, указала, что диссертация Юдова Ю.В. удовлетворяет п. 9 Положения о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 года, № 842, утвержденного постановлением Правительства РФ, с последующими изменениями. Она является научно-квалификационной работой, в которой решена важная задача разработки и реализации комплексной математической модели

сложных теплогидравлических процессов в контурах реакторных установок для нужд атомной промышленности. Результаты имеют большое значение для проектирования, обоснования безопасности, диагностики и прогнозирования функционирования водо-водяных реакторов различного назначения. Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, так как объектом исследования в ней являются процессы тепло- и массопереноса в реакторных установках, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Соискатель имеет 72 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации – 53 работы, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 21 работа. Из 53 опубликованных работ по теме диссертации 13 – в научно-техническом журнале «Теплоэнергетика» (тираж 250 экз.), 3 – в научно-техническом сборнике «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» (тираж 200 экз.), 2 – в научном журнале «Математическое моделирование» (тираж 100 экз.), 2 – научно-техническом сборнике «Вопросы атомной науки и техники. Серия математическое моделирование физических процессов» (тираж 250 экз.), 1 – в международном научно-техническом журнале «Kerntechnik» (тираж 150 экз.), 32 – в сборниках докладов российских и международных научных конференций и семинаров. По результатам диссертационной работы получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

В опубликованных работах приведены результаты, полученные лично автором и при его непосредственном участии, разработки моделей, численных алгоритмов и их валидации применительно к одномерным двухфазным многокомпонентным потокам в контурах произвольной топологии, пространственным однофазным течениям в напорных камерах реакторов, объединению трехмерных и одномерных моделей в рамках

единого кода и прямому численному моделированию турбулентных потоков в тепловыделяющих сборках активных зон.

Наиболее значительные работы:

1. 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.
2. Юдов Ю.В. Двухжидкостная модель нестационарной контурной теплогидравлики и ее численная реализация в расчетном коде КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. №11. С. 17-21.
3. Юдов Ю.В. Прямое численное моделирование турбулентных потоков в тепловыделяющих сборках ядерных реакторов // Математическое моделирование. 2010. Т. 22. № 8. С. 145-160.
4. Юдов Ю.В. Прямое численное моделирование турбулентных потоков в тепловыделяющих сборках реактора ВВЭР-440 // Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 10. С. 97-107.
5. 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.
6. Юдов Ю.В. Учет влияния неконденсирующихся газов на процессы межфазного теплообмена в двухжидкостной модели кода КОРСАР // Теплоэнергетика. 2018. №3. С. 42-50.
7. 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.
8. Юдов Ю.В. Коррекция полунеевной численной схемы двухжидкостной модели кода КОРСАР // Теплоэнергетика. 2019. №1. С. 1-10.
9. 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.
10. 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.
11. 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.

12. 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.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы из 6 организаций:

1. АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

Отзыв подписал главный специалист отделения теплофизики д.т.н., доцент Ю.Н.Корниенко.

Отзыв положительный. Замечания:

1. В автореферате указано, что предложенная методика с использованием «физических законов (совместное диффузионное и термическое сопротивление теплообмену, 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» (- стр. 16, строки 16-19 сверху). Замечание 1 а, б. С таким заключением в качестве общего вывода нельзя согласиться, например, при разработке моделей и проведении расчетов неравновесных двухфазных потоков в типичных для ЯЭУ с ВВЭР режимах кипения с перегревом теплоносителя относительно T_s в пристенном слое и недогретом до T_s ядре потока без использования дополнительных моделей генерации пара на стенках твэл и замыкающих соотношений для них. Поскольку наличие дополнительного к объему, генерируемого на стенке «чистого» пара, количества неконденсируемых газов влияет как на а) микро-характеристики (такие как плотность центров парообразования, рост паро-газовой фазы и отрывной диаметр пузырьков, частоту отрыва, влияние процессов коалесценции и дробления пузырьков в том числе и на неоднородность распределений парогазовой фракции (седлообразные профили) в поле течения на характеристики турбулентности), так и б) макро-характеристики (коэффициенты тепло- и массоотдачи, функции Генерации и Конденсации пара, а также вязкие напряжения) и, следовательно, на температуру стенки и перепады давления. Именно поэтому при проведении экспериментов с двухфазными потоками производится тщательная дегазация рабочих участков.

2. В автореферате указано, что поворот патрубков на 3° по часовой стрелке в расчете привел к повороту сектора поступления концентрации соли против часовой стрелки на 50° , что улучшило сопоставление с опытными данными. Однако, анализ столь сильного влияния на расчетные результаты незначительного изменения геометрии не представлен.
3. Следует отметить, изложение проведенных исследований представилось бы более лаконичным и наглядным при использовании в табличной форме многочисленных числовых показателей.
4. Возникшая впервые «квазитрехмерная 1D модель» (стр.32, сверху строка 2) в качестве кросс-верификационной никак не определена в тексте. Поэтому ее сопоставление с РК КОРСАР/CFD «повисает в воздухе», ни подтверждая и ни отвергая полученных результатов.

2. ФБУ «НТЦ ЯРБ».

Отзыв подписал начальник лаборатории д.т.н. О.Ю.Кавун.

Отзыв положительный. Замечания:

В автореферате практически не представлены результаты верификации разработанных автором оригинальных методик, что затрудняет оценку качества предложенных в диссертации подходов.

3. ФГАОУ ВО «СПбПУ».

Отзыв подписал д.ф.-м.н., доцент, профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики ФГАОУ ВО «СПбПУ» Д.К.Зайцев.

Отзыв положительный. Замечания:

1. В тексте работы избыточное внимание уделено описанию численных схем и алгоритмов и особенностей их программной реализации в разработанных автором расчетных кодах. В диссертации по специальности «теплофизика и теоретическая теплотехника» следовало бы сместить акцент на обоснование предложенных моделей, их тестирование, анализ полученных результатов и т.п.
2. В качестве подтверждения работоспособности предложенной методики учета неконденсирующихся газов в двухжидкостной модели кода КОРСАР, на рис. 3, 4 автореферата приводятся расчетные зависимости, которые говорят лишь о качественно верном поведении решения. Методику следовало бы тестировать на экспериментальных данных (которые, судя по тексту, имеются).
3. На рис. 14 автореферата, где показаны расчетные поля скорости теплоносителя в напорной камере реакторной установки ВВЭР-1000,

отчетливо видны осцилляции скорости как по окружному направлению, так и по высоте камеры. Из текста реферата неясно, связаны ли эти осцилляции с какими-то особенностями конструкции напорной камеры или же их следует расценивать как дефект решения, обусловленный неустойчивостью численной схемы.

4. Судя по рис. 19 автореферата, полученные в диссертации расчетные данные по коэффициенту турбулентного межъячеечного перемешивания существенно зависят от сетки. В таких условиях хорошее согласие расчетных данных с одной из эмпирических корреляций не дает достаточных оснований рекомендовать именно эту корреляцию для использования в коде КОРСАР/CFD.

4. АО «ОКБМ Африкантов».

Отзыв подписали начальник департамента научно-технического обоснования проектов, к.т.н. М.А.Большухин, заместитель начальника отдела к.т.н. А.А.Фальков, ведущий инженер-конструктор А.С.Носков.

Отзыв положительный. Замечания:

1. В автореферате представлено мало данных о верификации кода КОРСАР по эффектам неконденсирующегося газа. Следует отметить вклад специалистов «ОКБМ Африкантов» в разработку методики расчета, замыкающих соотношений для учета неконденсирующегося газа, подготовку экспериментальных данных и верификацию кода КОРСАР в части расчета поведения неконденсирующегося газа. Наиболее полная верификация по эффектам поведения неконденсирующегося газа выполнена в составе версии кода КОРСАР/BR для реакторов блочной и интегральной компоновки разработки АО «ОКБМ Африкантов».
 2. Результаты выравнивания скоростей и коэффициента турбулентного перемешивания в ТВС с учетом влияния ДР приводятся для малых $Re=10000-50000$. Было бы полезно дать результаты для рабочего диапазона $Re=300000-500000$.
 3. Не представлено определение коэффициента турбулентного перемешивания β_T для тепловыделяющей сборки. Отсутствует информация о сеточной сходимости задачи моделирования коэффициентов межъячеечного турбулентного перемешивания.
- #### 5. АО «ГНЦ НИИАР».

Отзыв подписал к.т.н. А.В.Алексеев.

Отзыв положительный. Замечания:

1. На стр. 4 написано «наличие неконденсирующихся газов в контуре циркуляции существенно влияет на теплофизические свойства парогазовой среды ...», правильно «наличие неконденсирующихся газов в нерастворённом виде ...».
 2. Не приведены данные, используется ли рекомендованная зависимость Ким-Чанга для коэффициент межъячеечного турбулентного перемешивания для ТВС для двухфазных режимов в программе КОРСАР/CFD (верификация сделана для однофазного), или метод DNS используется для двухфазных режимов.
 3. В п. 4 научной новизны написано об безытерационном методе расчета поля давления в разветвленных контурах циркуляции. При этом не приводится способ линеаризации уравнений при учете баланса массы. Это существенно, так как при турбулентном режиме перепад давления пропорционален квадрату скорости, а поток массы - скорости (нелинейная система).
 4. На стр. 21 приведены результаты расчетов эксперимента с пленочной конденсацией, но нет результатов измерений.
 5. В публикации 45 по теме диссертации орфографическая ошибка - «КОРСАО».
6. АО «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ».

Отзыв подписал главный эксперт АО «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ» д.т.н.
В.В.Безлепкин.

Отзыв положительный. Замечания:

1. Из автореферата видно, что методом Кима-Чоя решаются уравнения с постоянной плотностью (уравнение (10) на стр. 24), хотя в тексте диссертации указано, что решаются уравнения с переменной плотностью (уравнение (3.41) на стр. 117).
2. Отсутствует оценка неопределенностей результатов, получаемых с использованием разработанных 3D кодов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что д.ф.-м.н. О.И.Мелихов, д.т.н. И.В.Деревич и д.т.н. О.В.Митрофанова являются известными учеными и признанными специалистами в области расчетного моделирования теплогидравлических процессов, кафедра «Плазмогазодинамика и теплотехника» Федерального

государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» является одной из ведущих организаций в этой области. Кроме этого, выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается списком публикаций оппонентов и сотрудников кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» ведущей организации, подготовивших заключение по диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований получены новые научные результаты:

1. Предложена авторская модель учета влияния неконденсирующихся газов 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. Она позволяет адекватно моделировать двухфазные многокомпонентные потоки во всем диапазоне определяющих параметров без привлечения дополнительных замыкающих соотношений.
2. В полунявной численной схеме расчета динамики многокомпонентных двухфазных потоков 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 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. Представлен авторский 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 разработан и реализован метод объединения по полуявной 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 одномерной, так и трехмерной областей.
8. С помощью трехмерных расчетов 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 предложен метод 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 тепловыделяющей сборке ВВЭР-440.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- Вынесенные на защиту авторские модели и численные алгоритмы легли в основу отраслевого (ГК «Росатом») системного теплогидравлического кода КОРСАР, не уступающего по своим характеристикам мировым аналогам. Главный конструктор ВВЭР АО ОКБ "ГИДРОПРЕСС" и

Генеральный проектировщик энергоблоков АЭС АО "АТОМПРОЕКТ" используют код КОРСАР для обоснования безопасности АЭС, сооружаемых в России и за рубежом. АО «ОКБМ Африкантов» применяет код для анализа и обоснования безопасности ЯЭУ транспортного назначения. Несколько Вузов используют код КОРСАР для обучения студентов.

- Безытерационный метод расчета поля давления разветвленных циркуляционных контуров применяется в математических моделях полномасштабных тренажеров судовых ЯЭУ ФГУП "НИТИ им. А.П.Александрова".
- Трехмерная модель программно реализована в виде CFD-модуля, как типового элемента расчетной схемы кода КОРСАР/CFD. Трехмерное моделирование напорных камер реакторов с помощью CFD-модуля в составе кода КОРСАР/CFD позволит конструкторам ВВЭР проводить прецизионные расчеты переходных аварийных режимов с несимметричной работой петель и по их результатам настраивать одномерные многоканальные модели напорных камер.
- По результатам прямого численного моделирования турбулентных потоков в тепловыделяющих сборках предложено использование в попячейковой модели активной зоны ВВЭР корреляции Ким-Чанга для коэффициента межъячеечного турбулентного перемешивания с учетом множителя, учитывающего интенсификацию вследствие эффекта дистанционирующих решеток.

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 валидации 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.

Личный вклад соискателя состоит в:

1. Разработке, тестировании и верификации метода учета влияния неконденсирующихся газов в рамках одномерной двухжидкостной модели пароводяных потоков.

2. Разработке и программной реализации в расчетном коде КОРСАР полунейвной численной схемы интегрирования уравнений сохранения многокомпонентной двухжидкостной модели применительно к циркуляционным контурам произвольной топологии.
3. Руководстве и непосредственном участии при создании трехмерного CFD-модуля для моделирования однофазного теплоносителя, его тестировании и верификации.
4. Разработке полунейвной мономатричной схемы объединения одномерной и трехмерной моделей и адаптации CFD-модуля, как типового элемента в составе расчетного кода КОРСАР/CFD.
5. Верификации расчетного кода КОРСАР/CFD по экспериментам с перемешиванием теплоносителя в напорной камере реактора и анализе результатов верификационных расчетов.
6. Разработке, тестировании и верификации расчетного кода DINUS для прямого численного моделирования турбулентных потоков через тепловыделяющие сборки реакторов с учетом влияния дистанционирующих решеток.
7. Разработке и апробации метода на основе прямого численного моделирования расчета коэффициентов межъячеечного турбулентного перемешивания для тепловыделяющих сборок активных зон реакторов.

На заседании 25 ноября 2021 года диссертационный совет принял решение присудить Юдову Ю.В. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного электронного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 9 докторов наук по специальности 01.04.14, участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 18, против – 0, недействительных – 0.

Председатель
диссертационного совета
академик РАН

Большов Л.А.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н.

Калантаров В.Е.



25 ноября 2021 года