

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА 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. Развитие атомной энергетики предъявляет повышенные требования к безопасности работы атомных станций. Реальные эксперименты, моделирующие аварийные ситуации на действующих энергетических станциях, практически невозможны. Экспериментальные исследования осуществляют на опытных стендах, моделирующих ряд процессов, характерных для аварийных ситуаций или пуско-наладочных работ. Поэтому в настоящее время актуальным является создание цифровых двойников атомных энергетических объектов. Математическое моделирование является единственным способом исследования различных сценариев развития нештатной ситуации на атомной станции и выработки адекватных технологических решений, по предотвращению развития аварийной ситуации. Математические модели и их реализация являются важным элементом в выработке практических рекомендаций при конструировании новых атомных энергетических объектов. Эти математические продукты могут также служить в качестве тренажеров для обучения студентов и персонала атомных энергетических станций. В мире существует целый ряд программных комплексов, моделирующих процессы теплогидравлики в элементах конструкции атомных реакторов. Популярные и широко используемые в мире коды по моделированию теплогидравлических процессов как правило одномерные.

Это позволяет учесть множество факторов при имитации процессов тепло и массопереноса в реакторных установках с многофазным теплоносителем в широком диапазоне режимных параметров. В то же время нестационарный характер процессов переноса тепла, импульса и массы двухфазной системы с принципиальной сменой режимов течения и наличие неконденсирующихся газовых примесей вызывает необходимость существенного усовершенствования существующих численных алгоритмов. В настоящее время проводятся активные поисковые работы по усовершенствованию атомных реакторов, что приводит к усложнению внутренней конструкции активной зоны. В этом случае результаты моделирования по одномерным кодам не являются достаточно достоверными. В связи с этим разработка двух и трехмерных моделей, и методик расчета турбулентной гидродинамики, позволяющих детально анализировать локальные особенности течений теплоносителя в реакторной зоне является актуальной задачей. Существенно трехмерный характер турбулентного течения, в сложной внутренней топологии современного реактора, а также ограниченность современных моделей турбулентности типа RANS требуют развития методов прямого численного моделирования турбулентных процессов тепло и массопереноса (DNS). Диссертационная работа Юрия Васильевича Юдова посвящена развитию современных математических методов расчета существенно нестационарных процессов теплогидравлики атомных установок с учетом перестройки течения в двухфазных системах водяного теплоносителя при наличии неконденсирующихся газовых примесей. В диссертации рассмотрены принципиально новые методы прямого численного моделирования турбулентности в элементах конструкции реакторной зоны сложной внутренней топологии и методики сопряжения алгоритмов одномерного и трехмерного расчетов элементов реакторных установок с водяным теплоносителем.

Наиболее существенные принципиально новые научные и практические результаты диссертации. В диссертационной работе можно выделить ряд результатов, представляющих как научный, так и практический интерес.

1. В диссертации разработана модель и алгоритм численного моделирования процессов тепло и массопереноса в трубопроводных системах реакторных установок с учетом неконденсирующихся газовых примесей. В отличие от популярного компьютерного кода RELAP-5 в диссертации проведен детальный анализ влияния растворенных газов на режимы снижения интенсивности теплообмена между стенкой каналов и жидким теплоносителем.
2. В диссертации проведена модернизация существующего алгоритма численного решения нестационарных уравнений теплогидравлики на основе полунявных разностных схем применительно к моделированию двухфазных течений с неконденсирующимися газами. Разработанные подходы к дискретизации уравнений переноса позволили существенно повысить устойчивость разностных схем и надежность результатов расчетов.
3. Разработана оригинальная схема безытерационного расчета перепадов давления в коллекторных системах с учетом различной структуры двухфазного течения в каналах. Метод позволяет сочетать в одном алгоритме сложные топологические схемы коллекторных систем с существенно различными параметрами двухфазного течения теплоносителя.
4. На основе алгоритма вложенных границ в декартовой геометрии построена методология создания расчетных сеток и предложена оригинальная методика разностной аппроксимации конвективных и диффузионных слагаемых в уравнениях тепло и массопереноса второго порядка точности.
5. На основе многосеточного метода обрезанных ячеек сетки вблизи границ сложной топологии предложен численный алгоритм для ускорения расчета

поля давления в двух и трехмерной постановке задач моделирования тепло и массопереноса.

6. Разработана методика сопряжения расчетов течения теплоносителя в одномерной и трехмерной постановках с учетом различной техники реализации процесса численного моделирования.
7. Предложен оригинальный метод прямого численного моделирования турбулентности с учетом сложной топологии внутренней конструкции реакторной зоны. Представлено обобщение результатов расчета коэффициентов межъячеечного перемешивания с учетом дистанционирующих решеток для активных зон реакторов.
8. Представлены оригинальные результаты сопоставления результатов численного моделирования, проведенного автором диссертации, с опытными данными, полученными на экспериментальных стендах. В частности показано, что несимметричность при подаче теплоносителя в реакторный блок может привести к существенной неравномерности распределения теплоносителя в объеме активной зоны. Изучено влияние конструкции пакетов тепловыделяющих элементов и дистанционирующих решеток на параметры турбулентности в реакторной зоне.

Достоверность результатов диссертации. Диссертационная работа теоретическая, выполнена с помощью современных методов разностной аппроксимации и анализа устойчивости численных схем уравнений турбулентного переноса импульса, тепла и массы в элементах реакторной зоны. Расчеты основаны на классических уравнениях баланса энергии и непротиворечивых граничных условиях, отражающих специфику решенных задач. Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается сопоставлениями результатов расчетов по разработанным автором моделям с опытными данными, полученными на экспериментальных стендах и заимствованных из литературных источников.

Практическая значимость результатов диссертации. Результаты диссертационной работы имеют несомненное научное и практическое значение. Усовершенствованные и разработанные автором диссертации оригинальные алгоритмы разностной аппроксимации уравнений гидродинамики и тепломассопереноса в элементах конструкции реакторной зоны с учетом сложной геометрии имеют существенное научное значение для развития современных компьютерных методов моделирования энергетического оборудования. Создание метода прямого численного моделирования турбулентной трехмерной гидродинамики в реакторной зоне с учетом сложной топологии внутренних конструкций представляют не только научный, но и практический интерес с точки зрения оценки интенсивности турбулентного обмена.

Диссертационная работа имеет большое практическое значение при прогнозировании различных сценариев в результате возникновения аварийной ситуации на атомной энергетической установке. Результаты численного моделирования процессов тепло и массопереноса в элементах атомного энергетического блока могут способствовать выработке адекватных технологических решений для предотвращения развития аварийной ситуации.

Экспертные расчеты, проводимые с помощью теоретических методов диссертационной работы, могут использоваться при анализе новых конструктивных решений перспективного атомного энергетического оборудования. Созданные на основе диссертационной работы компьютерные тренажерные стенды для обучения персонала атомных станций и студентов специализированных кафедр являются современным эффективным способом обучения и развития практических навыков по управлению параметрами реакторной зоны.

Структура диссертации. 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. Диссертация написана литературным русским языком.

Автореферат соответствует тексту диссертации, отражает основные результаты работы, ее новизну и положения, выносимые автором на защиту.

По материалам диссертации опубликованы 53 работы, из них 20 – в реферируемых отечественных журналах из списка ВАК при Минобрнауки. 32 – в материалах международных и российских конференций, семинаров. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты диссертации неоднократно обсуждались на российских и международных конференциях.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, ее научная новизна, практическая ценность полученных результатов. Представлен обзор существующих в мире сертифицированных кодов по численному моделированию теплогидравлических процессов в элементах реакторной зоны атомных энергетических установок. Описаны основные задачи, поставленные перед разработчиками отечественного кода КОРСАР для моделирования реакторных атомных установок. Представлены основные задачи диссертационного исследования. Во введении обозначены основные положения, выносимые автором на защиту, и структура диссертационной работы.

В первой главе представлены основные характеристики теплогидравлического расчетного кода КОРСАР. Описаны функциональные элементы кода, история развития научных и практических достижений отечественных методик численного моделирования процессов теплогидравлики. В рамках одно и двухжидкостных моделей представлены основные идеи, использующиеся для разработки численных алгоритмов по расчету процессов тепло и массопереноса в теплогидравлических расчетах.

Подчеркивается принципиальное отличие разработанных в диссертации методов разностной аппроксимации уравнений переноса и численной реализации нестационарных расчетов от популярного зарубежного кода RELAP 5. Представлена математическая модель тепло и массопереноса с учетом влияния неконденсирующихся газов вблизи стенки канала. Для прогноза концентрации растворенных газов в воде используется закон Генри и уравнение состояния идеального газа. Учитывается влияние растворенных газов на температуру и давление насыщения раствора. В рамках подхода, развитого в работах Д.А. Франк-Каменецкого, проведен анализ суммарного диффузионного и термического сопротивления тепломассообмену с учетом доли растворенных газов в воде. Подробно описана система уравнений и замыкающих соотношений для моделирования одномерных задач теплогидравлики в трубопроводных системах атомных энергетических блоков.

Во второй главе рассмотрен метод полунеявной аппроксимации численной схемы системы параболических уравнений тепло и массопереноса в задачах термогидравлики. Обсуждается устойчивость явных и полностью неявных схем. Приводятся примеры нарушения консервативности при расчетах с аппроксимацией конвективного переноса разностями против потока. Отмечаются достоинства полунеявного метода аппроксимации нестационарной разностной схемы. Предлагается метод линеаризации нелинейных слагаемых в уравнениях переноса, приводящий к системе линейных алгебраических уравнений для расчета значений искомых функций на следующем временном слое. Подчеркиваются принципиальные отличия при численном моделировании процессов переноса в канале и коллекторной системе. Рассмотрена принципиально новая схема численного интегрирования системы нестационарных уравнений переноса в топологически сложных системах каналов с разветвлениями. Для безытерационного расчета давления в коллекторной системе привлекается

модернизированный метод прогонки. Так как для обеспечения устойчивого счета при наличии конвективного переноса привлекается метод дискретизации с разностями против потока, то для компенсации фиктивного переноса энергии против потока в диссертации разработан метод пересчета, обеспечивающий консервативность массы и других скалярных величин. На примере контура с естественной циркуляцией проведен анализ эффективности предложенного в диссертации метода компенсации с различными вариантами решения нестационарных разностных уравнений. Показано, что численная схема с разностями против потока без коррекции законов сохранения приводит к недопустимому уровню погрешностей в результатах расчетов. В этой же главе представлены результаты моделирования тепло и массопереноса и сопоставление с экспериментом по изучению влияния неконденсированных газов на процессы испарения – конденсации в вертикальной трубе. Показано, что разработанный в диссертационной работе алгоритм моделирования влияния неконденсирующихся газов на теплообмен является корректным.

В третьей главе описана трехмерная модель турбулентного однофазного течения теплоносителя на основе современных алгоритмов типа RANS. Разностная схема записана на основе метода конечных объемов. Рассмотрено несколько моделей замыкания уравнений турбулентного переноса: стандартная $k - \epsilon$ модель, стандартная $k - \omega$ и стандартная $k - \omega - SST$ модель. Используется дробящаяся вблизи границ декартова сетка. Существенная проблема возникает при учете границ, которые пересекают грани сетки. С целью учета особенностей границ используется метод вложенной границы с дополнительным дроблением сетки вблизи омываемой поверхности. Описан алгоритм измельчения сетки вблизи граничной поверхности и включение результатов, полученных на измельченной сетке в расчеты на более крупной сетке, узлы которой лежат в объеме течения. Рассмотрены случаи двух и трехмерной постановки задачи. Большое внимание уделяется различным способам аппроксимации значений искомых функций в межсеточных объемах

по вычисленным значениям в узлах сетки. Рассмотрены различные ситуации расположения узлов сетки вблизи омываемой границы. Предложена итерационная схема интегрирования нестационарной системы уравнений переноса. Разработан численный оператор для решения уравнения Пуассона на многосеточной конструкции.

В этой же главе представлена верификация разработанных алгоритмов на примерах расчета параметров турбулентного переноса в двух и трехмерной постановке. Получено удовлетворительное согласие с интегральными параметрами течений, полученным другими авторами в экспериментах или путем прямого численного моделирования турбулентности. Верификация алгоритма численного интегрирования трехмерного турбулентного потока проведена на основе сопоставления с экспериментальными данными по течению в трубе с резким изгибом. Получено удовлетворительное согласие с интегральными параметрами потока.

Четвертая глава посвящена методике объединения полуневяжных численных схем расчета параметров течения в одномерной и трехмерной постановке. Разработана идеология сопряжения данных, полученных по одномерной модели расчета с уравнениями по моделированию параметров потока в трехмерной постановке. Подробна описана технология сопряжений различных алгоритмов интегрирования систем уравнений переноса и описана схема распараллеливания вычислений для инженерных приложений.

На основе модельной задачи о контуре естественной циркуляции с подводом горячей и холодной воды проиллюстрирована методология сопряжения трехмерной методики расчета конвективного движения в баке и одномерных задач по моделированию гидродинамики в одномерных подводящих каналах.

Путем последовательных вычислений на более мелких сетках проведен анализ скорости сходимости предложенного алгоритма и числовой устойчивости процедуры интегрирования.

Пятая глава представляет результаты верификации метода сопряжения алгоритмов решения одномерных и трехмерных задач при перемешивании теплоносителя в напорной камере реактора. Описан экспериментальный стенд в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и методика эксперимента. В качестве пассивной примеси, показывающей неравномерность при смешении в реакторе выбран раствор соли. Представлена трехмерная область моделирования в реакторе и одномерные каналы для подвода теплоносителя. Подробно описана методика построения сеточной конструкции и алгоритм численного интегрирования системы уравнений переноса. Представлены результаты сопоставления данных натурного и численного экспериментов. Получено удовлетворительное согласие между данными. Показано, что выбор конкретной модели турбулентности слабо отражается на результатах расчетов.

В этой же главе описан эксперимент по изучению процессов перемешивания теплоносителя в напорной камере реактора ВВЭР-1000 при несимметричном функционировании петель теплообмена. На основе сопоставления с экспериментальными данными по температуре теплоносителя в реакторной зоне сделан вывод об удовлетворительном согласии опытных и расчетных данных. Проиллюстрировано качественное отличие в результатах расчетов по одномерным и трехмерным моделям.

Представлены результаты численного моделирования двухмерной задачи о растекании жидкости в кольцевой камере при радиальном вводе через патрубков. Проведено сопоставление результатов расчета растекания жидкости в двух и трехмерной постановке.

Шестая глава посвящена разработке метода прямого численного моделирования турбулентного однофазного течения в реакторной зоне с учетом сложной внутренней топологии (DINUS). Выделяется характерная трехмерная область между тепловыделяющими элементами и дистанционирующими решетками. При аппроксимации конвективного

переноса используются разностные схемы повышенного порядка точности. Нестационарные уравнения интегрируются методом Рунге-Кутты пятого порядка. Существенная проблема возникает при моделировании поперечного движения жидкости через решетки. Рассмотрен также методика поканального моделирования течения теплоносителя с учетом дистанционирующих решеток.

Развитый в диссертации метод трехмерного прямого численного моделирования турбулентности сопоставляется с данными DNS из работ других авторов. Рассмотрено неизотермическое течение в плоском канале. Представлены результаты расчетов турбулентной энергии, распределения осредненных скорости и температуры, и интенсивности их флуктуаций.

В качестве примера методом прямого численного моделирования исследуется установившееся турбулентное течение через сборку стержней с треугольной упаковкой. Показано удовлетворительное согласие с расчетными данными других авторов. Установлено, что интенсивность межъячеечного перемешивания, вычисленная методом прямого численного моделирования, удовлетворительно согласуется с полуэмпирическими оценками, сделанными в работе Sin Kim, Bum-Jin Chung (2001). Это дает основания упростить расчеты гидродинамики в инженерных приложениях.

В этой же главе представлены результаты верификации кода DINUS по данным экспериментального исследования гидродинамических процессов в кассете реактора ВВЭР-440 на натурном стенде. Описана схема разбиения на разностные ячейки и выделения типичной области реакторной зоны. Представлены удовлетворительные результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных по распределению скоростей в реакторе, интенсивности турбулентных флуктуаций скорости. Расчетные данные, полученные по методу DINUS, обработаны с целью получения простых инженерных аппроксимаций по коэффициентам межъячеечного обмена. Проведено сопоставление вычисленных коэффициентов межъячеечного обмена с литературными данными.

В заключении представлены основные научные и практические достижения диссертационной работы. Подчеркивается прикладное значение полученных в диссертации результатов, оценивается эффективность и реализуемость предложенных в диссертационной работе методик численного моделирования процессов турбулентного тепло и массопереноса двухфазного теплоносителя в элементах конструкции современных энергетических атомных реакторов.

По диссертации имеются замечания.

1. Автореферат перегружен описанием деталей построения разностных схем и алгоритмов численного интегрирования уравнений переноса. Следовало бы включить в автореферат больше информации о результатах верификации предложенных алгоритмов. Сами алгоритмы изложить фрагментарно.
2. В тексте диссертации много места уделяется детальному описанию методик численной реализации разработанных схем. В то же время описанию основной формулы (1.29) на стр. 41, представляющей связь между процессами диффузионного переноса при растворении газов, и теплообмену, уделено недостаточно внимания. Следовало бы более подробно осветить методику вывода формулы и ее физическое обоснование.
3. При тестировании методики расчета турбулентных течений на основе методологии RANS представлены данные только по осредненным параметрам. В то же время для тестовых течений, которые используются при верификации алгоритма, существуют подробные экспериментальные данные и результаты расчетов DNS по параметрам турбулентности. Также в литературе существуют результаты расчетов параметров турбулентности при течении в резко изогнутом канале. Следовало бы привести сопоставление данных диссертации с результатами других авторов.

4. При прямом численном моделировании методом DINUS течения в кассете реактора ВВЭР–440 на натурном стенде используется число Рейнольдса, вычисленное по динамической скорости (раздел 6.3.3). Непонятно как оценивалась динамическая скорость в такой сложной внутренней геометрии.
5. При расчетах методом прямого численного моделирования DINUS выбрана характерная ячейка внутри реакторной зоны. Непонятно, как строить ячейку вблизи кожуха реактора поскольку, как показано в диссертации, на периферии при подаче теплоносителя возникают сложные трехмерные завихренные структуры, меняющие тепловую обстановку периферийных тепловыделяющих элементов.
6. При моделировании гидродинамики в реакторной зоне в главе 6 не учитываются эффекты, вызванные свободной конвекцией. Следовало бы в тексте диссертации дать аргументацию этому существенному упрощению в постановке задачи.

Сделанные замечания и пожелания не снижают принципиальных результатов и выводов диссертационной работы. Диссертационная работа Юрия Васильевича Юдова выполнена на высоком научном и техническом уровне и является законченной научно-квалификационной работой. На основании научных исследований, выполненных Ю.В. Юдовым, в диссертации изложены новые теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение для развития перспективных направлений атомной энергетики в стране.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора физико-

математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, а ее автор Юрий Васильевич Юдов заслуживает ученой степени доктора физико-математических наук по этой специальности.

Доктор технических наук, профессор
 Профессор кафедры «Прикладная математика»
 Факультета фундаментальных наук
 Московского государственного технического университета
 им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)

Деревич

Игорь Владимирович Деревич
 29.10.2020.

Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Место нахождения	РФ, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
Почтовый адрес	РФ, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
Телефон организации	+7 (499) 263-6391
Адрес электронной почты; адрес официального сайта организации	bauman@bmstu.ru http://www.bmstu.ru

Подпись Деревича И.В. заверяю



ЗАМ. НАЧАЛЬНИКА
 ПРАВЛЕНИЯ КАРДРОВ
 О. В.
 8-499-263-60-48