

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»,

доктор технических наук, профессор

В.А. Василенко



2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ФГУП "Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова" по диссертационной работе Юдова Юрия Васильевича на тему: "ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КОНТУРАХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ВОДЯНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ", представленной к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Представляемая к защите диссертационная работа выполнена во ФГУП "НИТИ им. А.П. Александрова" (предприятие Госкорпорации "Росатом").

Юдов Юрий Васильевич окончил в 1984 году физико-механический факультет Ленинградского Политехнического института по специальности "теплофизика". В 2001 году защитил в Совете при Санкт-Петербургском государственном техническом университете кандидатскую диссертацию, выполненную в Научно-исследовательском технологическом институте. В период подготовки докторской диссертации работал в НИТИ им. А.П. Александрова в должности ведущего научного сотрудника.

Научный консультант – доктор технических наук, начальник отдела теплофизических исследований НИТИ Мигров Юрий Андреевич.

Диссертация "Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах реакторных установок с водяным теплоносителем" рассмотрена на заседании отдела теплофизических исследований ФГУП "НИТИ им. А.П. Александрова".

По результатам обсуждения принято следующее заключение.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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 (РУ) 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, не уступающего по своим характеристикам зарубежным аналогам (двухжидкостная многокомпонентная теплогидравлическая модель, гибкая топологическая схема, эффективные численные алгоритмы и т.д.). 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 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.

Применительно к РУ с ВВЭР выделяется спектр режимов с различными динамическими изменениями 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. Поэтому с полным основанием считается перспективным проведение расчетов аварийных режимов по одномерным системным кодам, но при этом моделирование напорной камеры осуществлять в трехмерном 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 KOPCAP для учета трехмерных эффектов в напорной камере реакторов. Этот модуль адаптирован как типовой элемент в составе новой версии расчетного кода KOPCAP/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.

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 (ДР) на интенсивность межъячеечного обмена. В этой связи представляется перспективным использование программных средств, базирующихся на методах прямого численного моделирования (DNS), для получения и уточнения замыкающих моделей кодов поканального моделирования.

Автором диссертационной работы впервые разработана и адаптирована методика определения коэффициентов межъячеечного турбулентного перемешивания на основе расчетов по кодам класса DNS.

2. НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ заключается в следующем:

- 2.1 Впервые предложена и апробирована методика учета влияния неконденсирующихся газов (НГ) на межфазный тепло-массообмен, которая основана на физических законах и применяется единообразно для всех режимов течения двухфазного потока без привлечения дополнительных замыкающих соотношений.
- 2.2 При разработке численной схемы одномерной (1D) модели РК КОРСАР реализовано несколько оригинальных алгоритмов:
 - линеаризация неявных членов уравнений сохранения при наличии НГ в пароводяном потоке;
 - метод расчета поля давления в разветвленных контурах циркуляции произвольной топологии;
 - алгоритм компенсации численных дисбалансов вследствие линеаризации нестационарных членов дискретных уравнений;
 - корректировка «антидонорности» схемы аппроксимации конвективных членов при изменении направления движения фаз за временной шаг.
- 2.3 При разработке CFD-модуля автором предложены:
 - для CFD методов вложенной границы на декартовой сетке пространственная аппроксимация конвективных и диффузионных членов на гранях декартовых ячеек при двукратном измельчении или укрупнении ячеек по координатному направлению второго порядка точности с компактными шаблонами;
 - применительно к методам обрезанных декартовых ячеек оператор ограничения для многосеточного алгоритма расчета поля давления, учитывающий наличие мелких обрезанных ячеек сетки.
- 2.4 Впервые реализована методика объединения трехмерного (3D) CFD-модуля с 1D моделью контурной теплогидравлики по полунявной мономатричной схеме. С целью улучшения сходимости при решении уравнения Пуассона для объединенного поля давления используется многосеточный метод на множестве ячеек как 1D, так и 3D областей.

- 2.5 В процессе верификационных расчетов по РК КОРСАР/CFD установлено существенное влияние условий ввода теплоносителя в напорную камеру на формирование профиля температуры либо концентрации борной кислоты на входе в а.з. при возмущениях из холодных ниток. Влияние обусловлено сложной анизотропной картиной растекания жидкости в кольцевой области напорной камеры.
- 2.6 Автором разработана и апробирована методика определения коэффициентов межъячеечного турбулентного перемешивания с учетом влияния дистанционирующих решеток в ТВС на основе расчетов по кодам класса DNS.

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

- 3.1 Главный конструктор ВВЭР АО ОКБ "ГИДРОПРЕСС" и Генеральный проектировщик энергоблоков АЭС АО "АТОМПРОЕКТ" используют код КОРСАР для обоснования безопасности АЭС 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).

АО «ОКБМ Африкантов» применяет код для анализа и обоснования безопасности ЯЭУ транспортного назначения.

Несколько Вузов (Санкт-Петербургский политехнический университет, Нижегородский государственный университет, Уральский федеральный университет и Институт ядерной энергетики) 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".

- 3.2 3D моделирование напорных камер реакторов с помощью CFD-модуля, внедренного в код КОРСАР/CFD, позволит конструкторам ВВЭР проводить прецизионные расчеты переходных аварийных режимов с несимметричной работой петель и по результатам расчетов настраивать многоканальные модели напорных камер.
- 3.3 По результатам DNS расчетов турбулентных потоков в ТВС предложено использование в ячейковой модели активной зоны ВВЭР кода КОРСАР корреляции Ким-Чанга для коэффициента межъячеечного турбулентного перемешивания с учетом множителя, учитывающего интенсификацию вследствие эффекта ДР.

4. ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА заключается в:

- 4.1 Разработке, тестировании и верификации методики учета влияния неконденсирующихся газов в рамках одномерной двухжидкостной модели пароводяных потоков.
 - 4.2 Программной реализации в расчетном коде КОРСАР полунявной численной схемы интегрирования уравнений сохранения многокомпонентной двухжидкостной модели применительно к циркуляционным контурам произвольной топологии.
 - 4.3 Руководстве и непосредственном участии при создании трехмерного CFD-модуля для моделирования однофазного теплоносителя, его тестировании и верификации.
 - 4.4 Разработке полунявной мономатричной схемы объединения 1D и 3D моделей и адаптации CFD-модуля как типового элемента в составе расчетного кода КОРСАР/CFD.
 - 4.5 Верификации расчетного кода КОРСАР/CFD по экспериментам с перемешиванием теплоносителя в напорной камере реактора и анализе результатов верификационных расчетов.
 - 4.6 Разработке, тестировании и верификации расчетного кода DINUS для DNS моделирования турбулентных потоков через ТВС реакторов с учетом влияния ДР.
 - 4.7 Разработке и апробации методики на основе DNS моделирования расчета коэффициентов межъячеечного турбулентного перемешивания для ТВС активных зон реакторов.
- Вынесенные на защиту оригинальные элементы методик и численных алгоритмов разработаны лично автором.

5. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Материалы диссертации с достаточной полнотой изложены в опубликованных работах. 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).

6. РЕКОМЕНДАЦИИ К ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИИ

Отдел теплофизических исследований ФГУП "НИТИ им. А.П. Александрова" считает диссертацию Юдова Ю.В. "Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах реакторных установок с водяным

теплоносителем" законченной научно-исследовательской работой. В ней представлена совокупность новых научно обоснованных методов численного моделирования двухфазных многокомпонентных потоков в циркуляционных контурах реакторных установок с возможностью трехмерного в CFD приближении моделирования процессов перемешивания однофазного теплоносителя в напорных камерах и DNS методов определения характеристик турбулентных потоков в ТВС активных зон ВВЭР. Методы практически реализованы в системном теплогидравлическом коде КОРСАР/CFD и специализированном коде прямого численного моделирования DINUS, верифицированы и апробированы на практических задачах. Внедрение этих методов в практику расчетного моделирования действующих и проектируемых РУ вносит значительный вклад в повышение безопасности и конкурентоспособности отечественных проектов реакторных установок. Результаты работы востребованы не только на предприятиях ГК "Росатом", но будут полезны специалистам Российской академии наук, научно-технических центров Ростехнадзора, могут быть использованы при подготовке кадров в высших учебных заведениях страны. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Диссертационная работа соответствует степени доктора наук по отрасли "Физико-математические науки", специальности 01.04.14 – "Теплофизика и теоретическая теплотехника" и рекомендуется к официальной защите в Диссертационном совете Д 002.070.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Заключение принято на заседании отдела теплофизических исследований ФГУП "НИТИ им. А.П. Александрова". Присутствовало на заседании - 13 чел. Результаты голосования:

"за" - 13, "против" - нет, воздержавшихся - нет , протокол № 5 от 26.04.2021 г.

Заместитель начальника отдела
теплофизических исследований, к.т.н.



12.05.2021г.

Ефимов В.К.

Ученый секретарь
ФГУП "НИТИ им. А.П. Александрова"



12.05.21.

Дмитриев А.Л.

Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова" (ФГУП "НИТИ им. А.П. Александрова")

188540, Ленинградская область, г. Сосновый Бор, Копорское шоссе, д. 72
тел.: (81369) 22667

www.niti.ru, e-mail: foton@niti.ru