

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

Диссертационная работа Юдова Юрия Васильевича посвящена развитию и совершенствованию отечественного расчетного кода (РК) КОРСАР в целях решения задач численного моделирования теплогидравлических процессов в двухфазных потоках циркуляционных контуров реакторных установок (РУ) с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР).

Актуальность темы диссертации связана с необходимостью решения задач повышения эксплуатационных качеств нового поколения АЭС с реакторами ВВЭР. Особую важность данная работа имеет для решения вопросов обеспечения безопасности и надежности работы реакторов с водой под давлением, для которых исследуемые двухфазные режимы течения теплоносителя следует отнести к разряду предельно допустимых.

Цели, поставленные в диссертационной работе Ю.В. Юдова, соответствуют решению комплекса сложных проблем, связанных с моделированием ряда опасных переходных и аварийных режимов течения теплоносителя и созданием реалистичных математических моделей, учитывающих, в частности, влияние неконденсирующихся газов в контуре циркуляции теплоносителя на теплофизические свойства парогазовой среды.

Проведенные автором многоплановые исследования делают обоснованным применение методов численного моделирования и усовершенствованного универсального расчетного кода КОРСАР при оптимизации затрат на экспериментальные исследования. Это свидетельствует о безусловной **актуальности** диссертации в условиях современности.

Содержание представленной работы изложено в 6 главах диссертации, а также введении, основных выводах, приложениях и заключении.

Формулировке поставленных и решённых в диссертации задач способствуют сведения, систематизированные автором **во введении и 1-ой главе** диссертации, где дана общая характеристика системного теплогидравлического расчетного кода КОРСАР, предназначенного для обоснования безопасности реакторных установок с водяным теплоносителем.

В главе 2 обосновывается численная схема интегрирования уравнений сохранения в двухжидкостной многокомпонентной модели РК КОРСАР, а также выбор и метод построения полунявной численной схемы на шахматной расчетной сетке, которая была разработана ранее применительно к американским кодам.

В главе 3 предложена трехмерная теплогидравлическая модель CFD-модуля РК КОРСАР/CFD для учета пространственных эффектов в напорной камере реакторов при несимметричной работе петель. Рассмотрены процессы генерации расчетной сетки и дискретизации дифференциальных членов уравнений, обеспечивающие выполнение законов сохранения массы, энергии и импульса теплоносителя.

Глава 4 посвящена описанию разработанной и реализованной автором полунявной численной схемы объединения одномерной и трехмерной моделей теплогидравлики РК КОРСАР/CFD.

В главе 5 приведены результаты верификации модифицированной автором версии системного расчетного кода КОРСАР/CFD при сравнении с данными 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 реактора.

Глава 6 посвящена описанию разработанного автором специализированного кода DINUS и результатам прямого численного моделирования турбулентных потоков в тепловыделяющих сборках отечественных реакторов с треугольной упаковкой.

К полученным в диссертационной работе наиболее значимым **новым научным результатам** можно отнести следующие.

- 1). На основе рассмотрения вопросов о причинах появления неконденсирующихся газов (НГ) в контуре циркуляции теплоносителя и их влияния на теплофизические свойства парогазовой среды и интенсивность межфазных тепломассообменных процессов автором разработана и программно реализована в РК КОРСАР усовершенствованная методика учета влияния НГ на межфазный тепломассообмен.
- 2). Для расчета динамики многокомпонентных двухфазных потоков разработана оригинальная полунявная численная схема с использованием корректирующих схемных алгоритмов, обеспечивающих выполнение законов сохранения в физико-математическом моделировании при выполнении численных расчетов.

- 3). Впервые разработана и реализована методика расчета поля давления с объединением по полу неявной численной схеме одномерной двухжидкостной модели системного теплогидравлического кода с трехмерной CFD-моделью.
- 4). Разработан расчетный код DINUS для прямого численного моделирования турбулентных потоков в тепловыделяющих сборках активной зоны реакторов. Проведены его тестирование и верификация для простой геометрии области межтвэльного течения.
- 5). На основе применения метода прямого численного моделирования предложена методика определения коэффициентов межъячеечного турбулентного перемешивания с учетом влияния дистанционирующих решеток в ТВС.

В диссертационной работе Ю.В. Юдова успешно сочетаются **новизна** полученных результатов и их **практическая значимость**, что говорит о постановке решаемых научных задач, обусловленной практической необходимостью. Разработанные автором методики и алгоритмы способствует повышению степени адекватности численного моделирования теплогидравлических процессов в различных системах с водяным теплоносителем и поэтому способствуют совершенствованию отечественного системного расчетного кода КОРСАР. Результаты диссертационной работы непосредственно предназначены как для проектных и конструкторских организаций, таких, как АО ОКБ "ГИДРОПРЕСС", АО "АТОМПРОЕКТ", АО "ОКБМ Африкантов", так и для внедрения в образовательный процесс для обучения студентов профильных университетов (Санкт-Петербургский политехнический университет, Нижегородский государственный университет, Уральский федеральный университет, Институт ядерной энергетики (г. Сосновый Бор Ленинградской обл. и др.).

Результаты диссертационной работы докладывались соискателем на ряде международных, российских, отраслевых и межведомственных конференций, семинаров и совещаний, что также свидетельствует об актуальности исследуемых проблем.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обусловлены строгостью постановки задач, внутренней согласованностью, непротиворечивостью используемых физико-математических моделей и верификацией разработанных методов на основе сравнения с результатами экспериментов. Судя по объему представленных в диссертации результатов, можно по достоинству оценить **личный вклад** и труд автора.

По диссертации могут быть сделаны следующие замечания.

1. Несмотря на подробное описание решаемого автором комплекса многозначных и взаимосвязанных проблем численного моделирования теплофизики корпусных ядерных реакторов с водой под давлением, не ясно, можно ли учесть с помощью разработанных расчетных алгоритмов влияние дефлекторов (интенсификаторов) в конструкциях дистанционирующих решеток, предлагаемых, например, в проектах ОКБ «Гидропресс».

2. Насколько оправданы сделанные допущения насчет «поведения» неконденсирующихся газов (НГ) при крупномасштабном вихреобразовании или закрутке потока? В контуре циркуляции теплоносителя содержится достаточно много элементов конструкций, способствующих вихреобразованию: изгибы трубной системы компенсации давления, зоны резкого изменения направления течения потоков и конфигурации проходных сечений в коллекторной системе при петлевом подводе и др. В случае появления крупномасштабных вихреобразований, разрежения в центре вихрей будут способствовать увеличению концентрации НГ в области пониженного давления. Будет ли этот эффект учитываться расчетным алгоритмом?

3. Чем обоснована точность расчетов поля давления безытерационным методом? Будет ли оправдано применение такого алгоритма на участках сложного криволинейного движения теплоносителя при резком или диффузорном расширении проходного сечения?

4. Верификация новой версии системного расчетного кода КОРСАР/CFD на задачах с перемешиванием теплоносителя в напорной камере реакторов показала, что выбор модели турбулентности мало влияет на результаты расчета. Какой модели турбулентности все-таки отдается предпочтение? Или для различных задач нужно использовать разные (их упоминается четыре).

5. Как получаются расчетные значения коэффициента теплоотдачи? Коэффициент теплоотдачи по смыслу является интегральным параметром, величина которого определяется различными механизмами переноса тепла – теплопроводностью жидкости, конвективным и турбулентным переносом.

Сделанные замечания в виде предложенных для разъяснения вопросов не снижают достоинств диссертационной работы и могут быть приняты во внимание для наилучшего обоснования предложенных методов численного моделирования.

В целом диссертационная работа Ю.В. Юдова является объемным многоплановым научным исследованием и отличается оригинальностью подходов к решению комплекса сложных задач численного моделирования.

Следует отметить заслугу автора в изложении материалов диссертации и продуманную логику представления столь обширных результатов. Диссертация представлена на 277 страницах основного текста, включает в себя 121 рисунок, 18 таблиц, список литературы из 215, а также 3 Приложения. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Вышеизложенное позволяет заключить, что в результате обоснования новых подходов в численном физико-математическом моделировании процессов гидродинамики и теплообмена автором внесен существенный вклад в развитие и расширение функциональных возможностей отечественных расчетных кодов, необходимых для решения проблем повышения безопасности и эффективности действующих и проектируемых ЯЭУ с реакторами ВВЭР. Диссертационная работа Ю.В. Юдова является законченным научным трудом, содержащим оригинальные результаты и подтверждающим высокую квалификацию автора. Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне, отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор – Юдов Юрий Васильевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор
Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ»

Митрофанова Ольга Викторовна

115409 г. Москва, Каширское ш., д.31,
ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский
ядерный университет "МИФИ" (НИЯУ МИФИ),
e-mail: OVMitrofanova@mephi.ru

22 октября 2021 г.

Подпись Митрофановой О.В. заверяю

