

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Юдова Юрия Васильевича по теме:

**«Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах реакторных установок с водяным теплоносителем»**

представленной на соискание ученой степени доктора  
физико-математических наук по специальности 01.04.14  
«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

### **Актуальность темы выполненной работы**

В связи с возрастающими требованиями по обеспечению безопасности АЭС и внедрением новых технических средств обеспечения безопасности, включая системы с пассивными принципами действия, возникла потребность в создании кодов нового поколения, позволяющих получить быстрое и реалистичное решение ряда задач для обоснования безопасности новых проектов АЭС с ВВЭР. С 1996 г. во ФГУП «НИТИ им. Александрова А.П.» ведется работа по созданию двухжидкостного неравновесного 1D кода КОРСАР.

На защиту данной диссертационной работы вынесена методика учета переноса в фазах и влияния на межфазный тепломассообмен неконденсирующихся газов, реализованная в коде КОРСАР. Методика позволяет получить улучшенную оценку параметров систем и оборудования реакторной установки при наличии неконденсирующихся газов в контурах циркуляции в переходных и аварийных режимах, включая так называемые запроектные аварии с множественными отказами элементов систем безопасности. Обоснование безопасности АЭС на таком уровне является актуальной задачей, решение которой позволяет выполнить комплексную оценку безопасности АЭС и удовлетворить современным требованиям российских и зарубежных надзорных органов.

В диссертационной работе представлены результаты разработки специалистами ФГУП "НИТИ им. А.П. Александрова" под руководством и при непосредственном участии автора трехмерного CFD-модуля в составе кода КОРСАР для учета трехмерных эффектов в напорной камере реакторов. Этот модуль адаптирован как типовой элемент в составе новой версии расчетного кода КОРСАР/CFD. Гибридные 1D/3D коды, к которым относится код КОРСАР/CFD, являются крайне востребованными в настоящее время при решении ряда задач моделирования теплогидравлических процессов на АЭС. Эти коды позволяют обеспечить быстроту обоснования и реалистичность. В этом отношении код КОРСАР/CFD появился очень своевременно.

Автором диссертационной работы разработан специализированный код DINUS для прямого численного моделирования теплогидравлических процессов в тепловыделяющих сборках реакторов. Эта разработка

соответствует мировой тенденции по снижению консерватизма при обосновании теплотехнической надежности активных зон реакторных установок, что позволяет повысить теплонапряженность тепловыделяющих сборок.

### **Научная новизна выполненной работы**

Данная диссертационная работа характеризуется большим перечнем разработок, содержащих признаки научной новизны. Не подвергая сомнению оценки автора по полученным научным результатам, необходимо выделить наиболее значимые из них:

1. Методика учета влияния НГ в пароводяном теплоносителе на процессы межфазного теплообмена 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 теплообмена, отличающихся температурными либо концентрационными напорами, а также интенсивностью, и применяется единообразно для всех режимов течения двухфазного потока.
2. 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.
3. Применительно к методам обрезанных декартовых ячеек предложен оригинальный оператор ограничения для многосеточного алгоритма расчета поля давления.
4. Методика объединения по полунеявной численной схеме в мономатричном варианте расчета поля давления одномерной двухжидкостной модели системного теплогидравлического кода с трехмерной CFD-моделью.
5. С помощью трехмерных расчетов по коду КОРСАР/CFD продемонстрировано анизотропное растекание теплоносителя в напорных камерах РУ с ВВЭР.
6. Методика 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.

### **Практическая значимость работы**

Разработанные автором методики и алгоритмы легли в основу системного расчетного кода КОРСАР, который применяется конструкторскими организациями для анализа и обоснования безопасности АЭС с ВВЭР (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», АО «Атомэнергопроект»). Главный конструктор ВВЭР - ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и Генеральный проектировщик энергоблоков - АЭС «Атомэнергопроект» использовали код КОРСАР для обоснования безопасности более чем десяти АЭС с ВВЭР сооруженных (или сооружаемых) в России и за рубежом.

По результатам прямого численного моделирования турбулентных потоков в сборках стержней с треугольной упаковкой конструкторским организациям предоставлена рекомендация для использования в поканальной модели активной зоны корреляции Ким-Чанга с введением коэффициента, учитывающего интенсификацию межъячеечного перемешивания вследствие турбулизирующего эффекта дистанционирующих решеток.

### **Достоверность результатов работы**

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, применением научно обоснованных физических моделей и численных алгоритмов.
2. Результатами тестирования и верификации разработанных расчетных кодов.
3. Методической проработкой решаемых задач, включающей проверку степени зависимости получаемых решений от расчетной сетки, постановки граничных условий и входных данных.
4. Публикацией результатов в рецензируемых журналах и их обсуждением на ведущих российских и международных конференциях и семинарах.

При ознакомлении с авторефератом диссертационной работы Юдова Ю.В. возникли некоторые замечания и вопросы:

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 плотность (уравнение (3.41) на стр. 117).
2. Отсутствует оценка неопределенностей результатов, получаемых с использованием разработанных 3D кодов.

Указанные замечания не снижают научную и практическую значимость представленной работы в целом.

Диссертационная работа Юдова Ю.В. отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, в том числе требованиям п. 9, предъявляемым ВАК к научно-квалификационной работе. Основные результаты работы опубликованы в 24 рецензируемых изданиях.

Диссертация Юдова Ю.В. выполнена на высоком профессиональном уровне и является законченной научно-исследовательской работой. Автор продемонстрировал практические навыки и глубокое понимание численных методов, используемых для 1D и 3D расчетов гидродинамики и теплообмена реакторных установок. Диссертация Юдова Ю.В. является методической основой для совершенствования технологии обоснования безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР. Автор, без сомнения, заслуживает присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Главный эксперт  
АО «Атомэнергопроект»,  
д.т.н.



Безлепкина Владимир Викторович

ул. Савушкина,  
дом 82, лит А, г. Санкт-Петербург, 197183  
e-mail: spbpi@aep.ru

Подпись Безлепкина В.В. удостоверяю,

Первый заместитель генерального  
директора – директор Санкт-  
Петербургского филиала  
АО «Атомэнергопроект» – «Санкт-  
Петербургский проектный институт»

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.



К.М. Ильинский