

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ  
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПМех РАН)

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва, 119526  
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31  
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735  
ИНН/КПП 7729138338/772901001

УТВЕРЖДАЮ

И.О. ДИРЕКТОРА ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ  
МЕХАНИКИ им. А.Ю. Ишлинского  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



Манжиров А.В.

2017 г.

26.09.2017 № 11804/01-21712-253

На № \_\_\_\_\_

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Григорьева Сергея Юрьевича

«Моделирование процессов конвективного перемешивания и  
пристеночного массообмена в задачах анализа водородной безопасности  
АЭС при тяжелой аварии»,

представленную на соискание степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 05.13.18 – математическое  
моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа Григорьева С.Ю. посвящена численному моделированию многокомпонентной и многофазной газодинамики внутри защитной оболочки реактора в условиях, характерных при тяжелой аварии на атомных электрических станциях (АЭС) с водо-водяными энергетическими реакторными установками.

Для моделирования и анализа тепломассопереноса атмосферы внутри защитной оболочки реактора автор использует трехмерный вычислительный

комплекс программ гидродинамики ANSYS-Fluent, который для сложных геометрий позволяет использовать современные модели турбулентного течения и учитывать специфику задач в виде пользовательских функций (UDF). В связи, с чем данный комплекс программ в последнее время становится все более распространенным не только среди инженеров, но и среди исследователей механики жидкости и газа. Тем не менее основным средством анализа безопасности АЭС на сегодняшний день остаются программные коды с сосредоточенными параметрами, в которых геометрия системы помещений и их теплофизические характеристики внутри защитной оболочки моделируется как тепло гидравлическая сеть. Данный, исторически сложившийся подход, хотя и хорошо верифицирован, но обладает рядом существенных недостатков, например, невозможностью моделирования локальных теплофизических характеристик и детальной картины течения в защитной оболочке атомного реактора, что возможно при численном моделировании. В этом смысле работа имеет большое практическое значение для развития средств улучшенной оценки при анализе безопасности АЭС.

Несмотря на то, что разработка и применение методов многомерной вычислительной гидродинамики к задачам анализа безопасности АЭС, в частности водородной безопасности, относится к 1990-м гг., атмосфера защитной оболочки АЭС во время тяжелой аварии все еще остается очень сложным объектом для моделирования. К основным задачам относятся: моделирование распространения многокомпонентной смеси газов внутри помещений, имеющих сложную геометрическую конфигурацию, распространения пламени и детонационных волн, моделирование динамики радиоактивных аэрозолей и многое другое. Для большинства из рассматриваемых вопросов применения CFD непосредственно к задачам анализа безопасности АЭС требуется разработка и верификация специализированных моделей, которые в стандартных версиях CFD кодах отсутствуют или являются весьма приближенными. Разработке таких

моделей и посвящена диссертационная работа Григорьева С.Ю. с основным акцентом, сделанным на вопросах формирования и разрушения стратификации водорода, поэтому, можно утверждать, диссертационная работа Григорьева С.Ю. выполнена на **актуальную тему**.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Во введении обосновывается актуальность темы, научная новизна, и сформулированы основные цели и задачи работы.

В первой главе дается обзор работ по теме диссертации, и обсуждаются существующие подходы и модели задач, решаемых в диссертационной работе.

Во второй главе описываются математические и численные модели, используемые для решения задач, представленных в последующих главах. В первой части данной главы дано подробное описание математических моделей, используемых автором и реализованных в коммерческом коде ANSYS Fluent. Во второй части второй главы рассмотрены модели, реализованные самим автором в виде пользовательских UDF функций (User Define Function) и подключаемых к CFD коду Fluent в виде сторонней библиотеки прикладных программ. К ним относятся модели пристеночного и объемного тепло и массообмена – пристеночной конденсации пара, рекомбинации водорода на каталитической поверхности и модель конденсатора-теплообменника.

В третьей главе приведены результаты моделирования экспериментов, связанных с вопросами формирования и разрушения стратификации легкого газа, имитирующего водород, в различных условиях. Решены задачи формирования стратификации легкого газа в пустом помещении, в присутствии массивного препятствия, в связанных помещениях, а также разрушения стратификации системами безопасности: спринклерной системой и конденсатором-теплообменником. По результатам

моделирования экспериментов выявлен ряд интересных физических явлений. К примеру, формирование инверсной стратификации под действием систем безопасности или тенденция к ее размытию в связанных помещениях.

В четвертой главе приведены результаты валидации разработанных моделей на новых экспериментах по водородной безопасности. Модель пристеночной конденсации была апробирована на двух интегральных экспериментах на установках различного масштаба и показала хорошее совпадение с экспериментальными данными. Модель рекомбинации водорода была опробована на серии экспериментов и также показала хорошее совпадение с экспериментом.

В заключении сформулированы основные результаты работы, выносимые на защиту.

Наиболее важными, определяющими **новизну научной работы**, являются следующие результаты диссертационной работы Григорьева С.Ю.:

- 1) разработка и верификация модели пристеночного тепло- и массообмена, позволяющая моделировать процессы конденсации пара и поверхностной химии водорода;
- 2) создание и верификация модели конденсатора-теплообменника в приближении пористой среды;
- 3) представление широкого набора результатов численного моделирования новых интегральных экспериментов по водородной безопасности, полученных в рамках верификации разработанных моделей.

**Обоснованность научных положений** и достоверность результатов исследований подтверждаются корректностью применения математического аппарата вычислительной гидродинамики к рассматриваемым задачам, успешной апробацией результатов численного моделирования и хорошей

согласованностью полученных результатов моделирования с результатами экспериментов. Результаты диссертационной работы Григорьева С.Ю. прошли апробацию на научно-технических конференциях и семинарах, а также опубликованы в ведущих научных журналах.

**Практическая значимость** настоящей работы определяется тем, что разработанные автором подходы и модели могут быть использованы при решении различных задач анализа безопасности защитной оболочки АЭС при тяжелой аварии.

Учитывая актуальность исследованных проблем, считаем целесообразным **рекомендовать к использованию результаты**, полученные в диссертационной работе Григорьева С.Ю., в следующих организациях: НИЦ «Курчатовский институт», РФЯЦ ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина, ИБРАЭ РАН, НИЯУ «МИФИ», НИУ «МЭИ», ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» и др.

По диссертационной работе Григорьева С.Ю. можно сделать следующие замечания:

- Автор диссертационной работы не включил в обзор работы по смежной тематике обеспечения безопасности при хранении и эксплуатации ракетного топлива, в том числе по исследованию образования стратификации, температурному и концентрационному расслоению водорода. Данные работы ведутся уже более полувека, имеют определенные результаты, близки к теме диссертационной работы соискателя, опубликованы в доступных изданиях, например, в журнале «Механика жидкости и газа».
- При использовании некоторых эмпирических корреляций для безразмерных чисел не указаны области их применимости, что ставит под вопрос о диапазоне и обоснованности их использования.

- Для отдельных численных экспериментов дано достаточно скудное описание постановок задач, в частности, геометрической схемы установки.
- Диссертационная работа изобилует узкоспециализированными не общепринятыми сокращениями, значение которых не всегда очевидно из контекста, и для понимания которых необходимо обращаться к списку сокращений, что в значительной степени осложняет знакомство с текстом диссертации.

Следует подчеркнуть, что отмеченные недостатки не снижают научной значимости и практической ценности полученных в работе результатов. Диссертация выполнена на достаточно высоком научном уровне.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

**Общая оценка работы.** Диссертация Григорьева С.Ю. является законченной и самостоятельной научно-квалификационной работой. Все основные результаты диссертационной работы выполнены на актуальную тему, опубликованы в ведущих научных журналах, включенных в перечень рекомендуемых научных изданий ВАК, и неоднократно докладывались на научных конференциях и семинарах.

Таким образом, на основании изложенного можно сделать вывод о том, что диссертационная работа Григорьева С.Ю. «Моделирование процессов конвективного перемешивания и пристеночного массообмена в задачах анализа водородной безопасности АЭС при тяжелой аварии» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Григорьев С.Ю., безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Работа была доложена автором на семинаре лаборатории «Механики сложных жидкостей» ИПМех РАН. Результаты работы и отзыв были обсуждены и одобрены на семинаре 20.10.2016 г., протокол № 1.

Отзыв составлен кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории «Механики сложных жидкостей» Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН Федюшкиным Алексеем Ивановичем.

Старший научный сотрудник  
лаборатории «Механики сложных жидкостей»  
ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
к.ф.-м.н.

Федюшкин А.И.

119526, г. Москва, пр. Вернадского, д. 101, корп. 1,  
тел. +7(495)433 34 97  
E-mail: fai@ipmnet.ru

Подпись Федюшкина А.И. подтверждаю:

Ученый секретарь  
ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
к.ф.-м.н.



Сысоева Е.Я.