

ОТЗЫВ

официального оппонента Мелихова Олега Игорьевича на диссертацию Григорьева Сергея Юрьевича «Моделирование процессов конвективного перемешивания и пристеночного массообмена в задачах анализа водородной безопасности АЭС при тяжелой аварии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа Григорьева С.Ю. посвящена разработке математических моделей пристеночного и объемного тепло и массообмена и моделированию распространения многокомпонентной смеси газов применительно к задачам анализа водородной безопасности АЭС. Среди разработанных моделей – модели пристеночной конденсации пара, рекомбинации водорода на каталитической поверхности и конденсатора-теплообменника, представляющего собой сложную гетерогенную конструкцию из пучка трубок. Использование таких моделей совместно с кодами вычислительной гидродинамики (CFD) позволяет расчетным путем анализировать состояние атмосферы внутри защитной оболочки реактора во время тяжелой аварии, тем самым оценивать возможные последствия аварии и принимать конструктивные решения для предотвращения нежелательных сценариев. Авария на АЭС «Фукусима-дайти» в 2011 году, которая сопровождалась взрывом водорода, показывает, что проблемы, рассмотренные в диссертации, являются весьма *актуальными*.

Материалы диссертационной работы изложены на 141 странице, содержат 30 рисунков и 12 таблиц. Работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, приложение и список литературы из 109 источников.

Во введении обсуждается актуальность выбранной темы, формулируются основные цели и задачи исследования. Приводится информация о предмете и объекте исследования, обосновываются научная новизна, практическая значимость диссертационной работы и достоверность

полученных результатов. Также во введении формулируются положения, выносимые на защиту, и приводится список апробированных работ.

В первой главе диссертации делается обзор существующих подходов и моделей для решения задач анализа атмосферы внутри защитной оболочки реактора, приводятся аргументы в пользу использования RANS CFD в качестве инструмента для детального анализа проблем водородной безопасности АЭС. Перечисляются явления и процессы, модели которых не реализованы в стандартных версиях CFD кодов, но важные в рассматриваемых задачах. Делается обзор существующих подходов к моделированию этих явлений, обсуждаются их недостатки. На основе первой главы формулируются основные цели и задачи диссертации.

Во второй главе дается описание математических и численных моделей, которые использованы в диссертационной работе при моделировании экспериментов. В первой части главы приведена необходимая информация о существующих моделях в коде ANSYS Fluent. Обсуждаются вопросы численного моделирования турбулентности, многокомпонентных и двухфазных течений, задания граничных условий и алгоритмы численного решения. Во второй части главы приводится математическое описание разработанных моделей: пристеночной конденсации пара, рекомбинации водорода на каталитической поверхности, испарения воды из бака-приямка и конденсатора-теплообменника. Представлена блок-схема численного алгоритма - взаимодействия основного расчетного средства (ANSYS Fluent) и разработанного пакета программ CoRe, подключаемого в виде сторонней библиотеки.

В третьей главе приводятся результаты численного моделирования процессов формирования и разрушения стратификации легкого газа, имитирующего водород. На примере моделирования экспериментов, проводившихся в России (РФЯЦ ВНИИТФ) и за рубежом (Институт Пауля Шеррера), исследованы вопросы формирования стратификации легкого газа в пустом помещении, в присутствии внутренних конструкций и в связанных

помещениях, а также вопросы разрушения стратификации легкого газа под действием систем безопасности (конденсатора-теплообменника и спринклерной системы). В этой главе также приведены результаты верификации модели конденсатора-теплообменника.

В четвертой главе приводятся результаты верификации моделей пристеночного тепло и массообмена. На примере моделирования эксперимента TOSQAN ISP-47 продемонстрирована работоспособность модели пристеночной конденсации пара в случае изотермической конденсирующей границы, на примере моделирования интегрального эксперимента PANDA PE1 модель апробирована на случай сопряженной границы. Модели рекомбинации водорода на каталитической поверхности и испарения воды из бака-приямка верифицированы на экспериментах RECO-3 и PANDA PE1,2, соответственно. Результаты сравнения проведенных расчетов с экспериментальными данными, в целом, показали хорошее согласие.

В заключении приведены основные результаты работы.

Научная новизна представленной работы.

1. Разработана оригинальная модель пристеночного тепло и массообмена CoRe, которая позволяет моделировать процессы пристеночной конденсации пара в присутствии неконденсируемых газов и рекомбинации водорода на каталитической поверхности.
2. Разработана оригинальная модель конденсатора-теплообменника, представляющего собой трубчатую конструкцию сложной формы.
3. Построены численные алгоритмы разработанных моделей, позволяющие использовать их в комплексе. Алгоритмы реализованы в виде библиотеки, подключаемой к универсальному CFD коду ANSYS Fluent, и ориентированы на использование в высокопроизводительных вычислительных системах.
4. Приведены результаты численного моделирования новых экспериментов (на установках PANDA, TOSQAN) по водородной безопасности АЭС,

посвященные гидродинамике неоднородных газовых смесей. Выполнена валидация расчетов, подтвердившая количественное соответствие результатов численных экспериментов имеющимся экспериментальным данным.

Выводы, утверждения и положения, сформулированные в диссертации, являются хорошо обоснованными и *достоверными*, поскольку была проведена всесторонняя верификация математических моделей и методик, результаты расчётов согласуются с экспериментальными данными, при моделировании используются апробированные пакеты программ, численные методы и алгоритмы.

Автореферат отражает содержание и выводы диссертационной работы. Тема диссертации и ее содержание соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, включая 4 публикации в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК. Все это позволяет сделать вывод об успешной *апробации* работы.

Замечания по работе:

1. Не до конца ясен критерий, по которому выносилось суждение о хорошем совпадении результатов расчетов с экспериментальными данными. К примеру, в подразделе, посвященном валидации модели конденсатора-теплообменника, делается заключение о хорошем согласии результатов расчета и эксперимента, при этом для некоторых из приведенных в диссертации показателей различие с экспериментом является значительным. Так, мольная доля гелия в одном из датчиков, полученная в расчете, превышает экспериментальные значения в 1,5 – 2 раза (см. рис. 3.11(б) на стр. 87). Более того, для экспериментальных данных не указаны погрешности измерений.

2. В диссертации, в главах с верификацией разработанных моделей (главы 3 и 4), не приведены результаты чувствительности расчетов к модификации расчетной сетки. Независимость результатов моделирования от сеточного разбиения является важным показателем работоспособности математической модели, и сравнение результатов моделирования на сетках различного масштаба является хорошим тоном при проведении верификации. Поэтому, несомненно, было бы полезным привести результаты сравнения таких расчетов.

3. В диссертации имеется также ряд редакционных ошибок. К примеру, в приложении указаны ссылки на несуществующие рисунки; в третьей главе на странице 91 приведена ссылка, по-видимому, не на тот рисунок – 3.5(a) вместо 3.12(a).

Несмотря на указанные замечания, диссертация Григорьева С.Ю. выполнена на хорошем научном уровне, содержит элементы научной новизны и практической значимости. Работа представляет собой законченное, самостоятельно выполненное научно-квалификационное исследование, в котором *содержится решение важной задачи* – создание математических моделей тепло и массообмена для анализа атмосферы защитной оболочки реактора при тяжелой аварии, и их реализация в виде пакета программ, подключаемого к CFD коду Fluent в виде сторонней библиотеки.

Диссертационная работа отвечает критериям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор, Григорьев Сергей Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент –
заместитель директора по научной работе –
начальник управления НИР и НИОКР
в области теплофизики АО «ЭНИЦ»,
доктор физ.-мат. наук

Олег Игорьевич Мелихов
тел. (49643) 3-15-45
e-mail: oleg.melikhov@erec.ru
29 апреля 2017 г.

Подпись О.И. Мелихова заверяю

Ученый секретарь АО «ЭНИЦ», к.ф.-м.н.



Н.Ю. Медведева

Акционерное общество «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций», 142530, Московская область, г. Электрогорск, ул. Святого Константина, д. 6, тел. (49643) 3-30-74, e-mail: erec@erec.ru