

ОТЗЫВ

официального оппонента Будаева Михаила Александровича 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

Защитная оболочка атомной станции является последним барьером на пути выхода активности за пределы АЭС при авариях. Серьезную угрозу для целостности и герметичности защитной оболочки представляет горение и/или взрыв водорода, образующегося при авариях на АЭС. По этой причине анализ водородной безопасности является одной из приоритетных задач при обосновании безопасной эксплуатации АЭС. Одним из основных инструментов, используемых при анализе водородной безопасности, является компьютерное моделирование.

Диссертационная работа Григорьева С.Ю. посвящена разработке математических моделей процессов в защитной оболочке АЭС при тяжелой аварии применительно к анализу водородной безопасности. Основной акцент в работе сделан на численном исследовании процессов формирования и разрушения стратификации водорода. Понимание феноменологии этих процессов и умение достоверно их моделировать позволит обоснованно принимать конкретные технологические меры по управлению авариями с целью смягчения их последствий, что определяет чрезвычайную важность поставленной в диссертации задачи.

На сегодняшний день в атомной отрасли основным инструментом для решения подобного рода задач являются коды с сосредоточенными параметрами. Эти коды обладают рядом существенных недостатков, о чем упоминает автор диссертации, поэтому в последнее время в научном сообществе сформировалось ясное понимание того, что необходимо развивать новые подходы и инструменты, позволяющие проводить более детальный анализ рассматриваемых явлений. К таким инструментам относятся коды вычислительной гидродинамики (CFD). Один из таких кодов выбран автором диссертации в качестве основного инструмента исследования в работе. Однако прямое применение этих кодов невозможно без их всесторонней верификации и доработки непосредственно под задачи анализа водородной безопасности, что и является основным предметом исследования представленной диссертации.

Все вышеперечисленное говорит о том, что тема, заявленная в диссертационной работе, несомненно, является *актуальной*.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературных источников из 109 наименований.

Во введении представлена общая характеристика проблемы. Сформулированы основные цели и задачи исследования, обосновываются научная новизна, практическая значимость работы и достоверность полученных результатов.

В первой главе сделан обзор существующих подходов и моделей для решения задач анализа процессов в атмосфере защитной оболочки АЭС при тяжелой аварии. Обсуждаются преимущества и недостатки существующих подходов (кодов с сосредоточенными параметрами), указывается необходимость использования RANS CFD для анализа детальной картины течения парогазовой смеси в защитной оболочке АЭС. В главе также сделан обзор существующих моделей пристеночного тепло и массообмена и систем безопасности - конденсаторов-теплообменников, спринклерной системы и рекомбинаторов водорода.

Во второй главе дано описание математических и численных моделей, которые используются при моделировании экспериментов в диссертационной работе. В первой части главы описаны основные модели коммерческого CFD кода Fluent, необходимые для дальнейшего изложения: приведены уравнения переноса осредненных в рамках RANS подхода величин, обсуждается выбор модели турбулентности и моделирования двухфазных течений. Во второй части дано описание разработанных моделей тепло и массообмена: пристеночной конденсации пара, рекомбинации водорода на каталитической поверхности, испарения воды с поверхности водяного бассейна и функционирования конденсатора-теплообменника.

Третья глава посвящена численному исследованию процессов формирования и разрушения стратификации легкого газа, моделирующего водород. На примере моделирования экспериментов по водородной безопасности на установках, имитирующих в уменьшенном масштабе помещения защитной оболочки АЭС, исследованы вопросы формирования стратификации водорода в пустом объеме, в помещении с массивным препятствием и в системе связанных помещений. На экспериментах, проводимых на крупномасштабной установке PANDA, численно исследованы особенности разрушения стратификации легкого газа под действием спринклерной системы, а также конденсатора-теплообменника. В конце главы приведены результаты верификации разработанной модели конденсатора-теплообменника.

В четвертой главе представлены результаты верификации разработанных моделей пристеночного тепло и массообмена. На примере моделирования интегральных экспериментов на установках TOSQAN и PANDA приведены результаты верификации модели пристеночной конденсации пара в условиях изотермической конденсирующей границы и в условиях сопряженного теплообмена. Модель рекомбинации водорода на каталитической поверхности верифицирована на серии экспериментов RECO-3. Помимо этого, на экспериментах PANDA PE1 и PE2 верифицирована модель испарения воды с поверхности водяного бассейна в условиях функционирования спринклерной системы.

В заключении к работе сформулированы основные выводы и перечислены положения, выносимые на защиту.

Научная новизна представленной работы состоит в том, что в ней 1) разработана оригинальная модель пристеночного тепло и массообмена, позволяющая моделировать процессы пристеночной конденсации пара и рекомбинации водорода; 2) разработана оригинальная модель конденсатора-теплообменника; 3) построены численные алгоритмы, реализующие разработанные модели, в виде пакета программ, которые подключаются к коду Fluent в качестве сторонней библиотеки; 4) приведены результаты верификации моделей на новых интегральных экспериментах по водородной безопасности.

Достоверность основных выводов и положений, сформулированных в диссертационной работе, хорошо обоснована: проведена верификация разработанных моделей и методик, результаты проведенных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными; в качестве основного инструмента исследования при моделировании используются проверенные программы, модели и численные алгоритмы.

Автореферат соответствует материалу диссертационной работы. Тема диссертации и ее содержание соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Основные результаты работы докладывались на научных семинарах, всероссийских и международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 9 статей, 4 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК. Все это указывает на успешную *апробацию* диссертационной работы.

Тем не менее, по работе имеется ряд *замечаний*:

1. В тексте диссертации достаточно часто используется словосочетание «пристеночный и объемный тепло и массообмен» (см. «Цели работы ...» - стр.11, название раздела 2.2 - стр.49, название главы 4 - стр. 97). Описанию разработки моделей пристеночного тепло и массообмена и их верификации уделено достаточно много внимания. При этом в тексте всегда подчеркивается, что речь идет именно о

пристеночном тепло и массообмене. А об объемном тепло и массообмене в явном виде практически ничего не говорится.

2. В Главе 2 рассматривается «Модель испарения воды из бака-приямка» (стр. 55-58). Использование в названии данной модели слов «бак-приямок» не вполне корректно по следующей причине. Бак-приямок, расположенный в защитной оболочке АЭС, играет важную роль в обеспечении безопасности. В частности при авариях на АЭС с реактором ВВЭР-1000 вода из бака-приямка насосами подается в систему аварийного охлаждения активной зоны низкого давления и в спринклерную систему. В диссертации в балансном уравнении 2.44 (стр.57) эти процессы не учитываются. Модель испарения воды, предложенная в диссертации, может быть применена к воде, собирающейся на полу помещений защитной оболочки. При авариях на АЭС такой воды может быть достаточно много и ее испарение оказывает определенное влияние на параметры парогазовой смеси в защитной оболочке. Данное замечание относится не к самой модели, а к использованию в ее названии слов «бак-приямок».

3. Два замечания к разделу «3.2.3 Разрушение стратификации под действием спринклерной системы».

А. Нет объяснения почему расчет скорости капель на выходе из форсунки в экспериментах PE1 и PE2 проводится по различным формулам (стр. 89, 3.3). В числителе формулы расчета скорости в эксперименте PE2 отсутствует 4. На стр. 94 сказано, что рассмотрено влияние типа форсунки, но никакой информации о типе форсунки (или о типах форсунок) в разделе не приводится.

В. Из текста этого раздела следует, что при анализе влияния спринклерной системы на разрушение стратификации было проведено достаточно большое количество расчетов. Однако в разделе нет полного и четкого описания, какие именно расчеты (с изменением каких параметров и диапазона изменения этих параметров) были проведены. В частности нет объяснения того, результаты каких расчетов приведены на рис 3.14д и 3.14е (стр. 93).

4. В выводах по главе 3 в последнем абзаце записано, что «достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с экспериментами и результатами расчетов, полученными другими кодами». О каких кодах идет речь? Где об этом сравнении говорится в диссертации?

5. Ряд редакционных замечаний: в некоторых местах отсутствуют пояснения к обозначениям в формулах и на графиках; на стр. 91 неправильная ссылка на рис. 3.5 а; вместо гелия назван водород (рис. 4.3 на стр. 110); на стр. 128 даны ссылки на несуществующие рисунки.

