

Григорьев Сергей Юрьевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОГО
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И ПРИСТЕНОЧНОГО МАССООБМЕНА В ЗАДАЧАХ
АНАЛИЗА ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС ПРИ ТЯЖЕЛОЙ
АВАРИИ

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией ИБРАЭ РАН
Филиппов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, зам. директора по научной работе АО «ЭНИЦ»
Мелихов Олег Игорьевич
кандидат технических наук, начальник лаборатории ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»
Будаев Михаил Александрович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Защита состоится «__»_____2017 г. в __ч. __мин. на заседании диссертационного совета Д 002.024.03, созданного на базе Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, по адресу 125047, Москва, Миусская пл., 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Автореферат разослан «__»_____2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

к.ф.-м.н. Корнилина М.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Широкое использование ядерных энергетических установок (ЯЭУ) для производства электроэнергии выдвигает на передний план проблему безопасности. Специфика этой проблемы применительно к ЯЭУ состоит в том, что в результате аварии существует потенциальная опасность нанесения ущерба окружающей среде и обществу. Исторический опыт показывает, что еще более ощутимый «репутационный» ущерб может быть нанесен атомной отрасли в целом, что приводит к снижению темпов ее развития [1].

На сегодняшний день одной из наиболее важных проблем является вопрос обеспечения водородной безопасности (ВБ) АЭС с легководными реакторами. Согласно [2] водород образуется в основном в результате тяжелой аварии (ТА) с разрушением активной зоны. Его выход совместно с паром в атмосферу защитной оболочки (ЗО) реактора может привести к разрушению ЗО - последнего барьера безопасности. Как показала авария на АЭС «Фукусима-дайти» в марте 2011 г., которая сопровождалась также взрывом водорода и выбросом радиоактивных нуклидов в атмосферу, эта проблема сохраняет свою актуальность [3].

Современное понимание феноменологии событий, происходящих во время ТА, иллюстрирует рис. 1 [4]. Во время ТА с потерей теплоносителя на водо-водяных энергетических реакторах (ВВЭР) внутри активной зоны образуется большое количество горячего пара, что создает благоприятные условия для возникновения водорода при парациркониевой реакции. В результате разрыва трубопровода первого контура горячие пар и водород выходят под ЗО. Низкая плотность водорода и высокая температура смеси могут приводить к стратификации газа. При этом основной угрозой целостности ЗО является рост давления, вызванный выходом пара и водорода под защитную оболочку реактора. Горение водорода может поднять давление в ЗО выше предела разрушения оболочки.

С целью уменьшения или устранения риска разгерметизации ЗО используют системы безопасности. Такие системы, в большинстве своем, преследуют две основные цели: во-первых, ограничение давления внутри ЗО в заданных пределах, определяемых прочностью конструкции оболочки (работа спринклерных систем, конденсаторов-теплообменников (КТО)); во-вторых, снижение локальных максимумов концентрации водорода за счет перемешивания смеси (спринклерные системы, КТО) или постепенной рекомбинации водорода (пассивные автокаталитические рекомбинаторы (ПКРВ)). Активизация КТО или спринклерной системы приводит к конденсации пара на стенках теплообменника или на каплях воды. При этом снижение паросодержания увеличивает риск воспламенения смеси водород/воздух/пар. Возникающие при действии спринклера и КТО конвективные течения перемешивают атмосферу внутри ЗО и делают ее

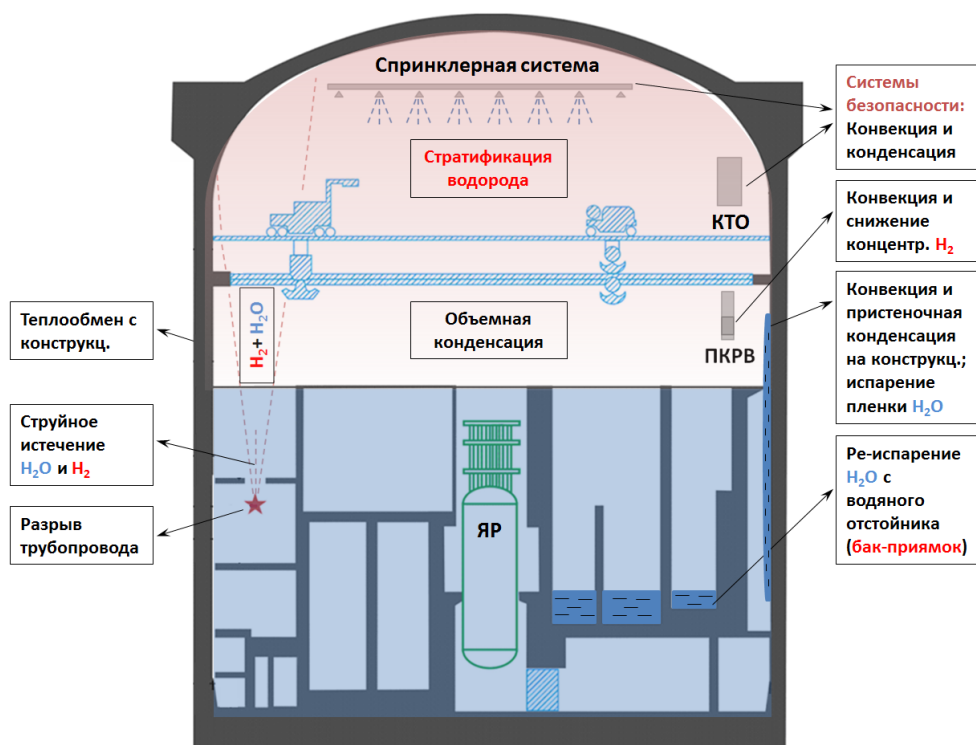


Рис. 1. Схематическое изображение ЗО реактора и процессов, происходящих в условиях тяжелой аварии

более однородной. Следовательно, конденсации пара, приводящей к росту доли водорода и риска возгорания, противопоставлены гомогенизация состава атмосферы и рекомбинация водорода, которые снижают локальные максимумы его концентрации, возможно, до безопасного минимума.

Для обеспечения ВБ АЭС и определения вероятных мест возгорания, во-первых, необходимо уметь предсказывать распространение многокомпонентной смеси газов, содержащей водород, по помещениям ЗО. Определение потенциальных мест воспламенения позволяет противодействовать аварийной ситуации путем установки систем безопасности. Во-вторых, необходимо уметь достоверно предсказывать действие систем безопасности в условиях тяжелой аварии для оптимизации их работы.

Проведение экспериментальных исследований процессов и явлений, связанных с ВБ АЭС в условиях ТА, ограничено высокой стоимостью экспериментов – фактический масштаб линейных размеров установок не превышает 1:10 относительно размеров ЗО. Поэтому математическое моделирование служит основным средством исследования процессов в реальном масштабе. Для этого необходима разработка адекватных математических моделей процессов и явлений, существенных для рассматриваемой задачи. Проблема анализа ВБ с точки зрения физики является комплексной задачей. Характерные масштабы времени и длины процессов лежат в широких диапазонах. При этом численная модель должна

достаточно детально воспроизводить весь комплекс существенных явлений и быть эффективной, чтобы численный расчет занимал приемлемое время.

Для решения задачи количественной оценки состояния атмосферы ЗО с заданной точностью перспективны стандартные пакеты прикладных программ по вычислительной гидродинамике (CFD) [5]. В таких кодах уже реализованы возможности моделирования 3–мерной нестационарной многокомпонентной и многофазной гидродинамики [6]. Однако математические модели, встроенные в стандартные версии кодов CFD, проверены на достаточно простых тестах, и их применимость к комплексным задачам ВБ необходимо устанавливать [7]. Более того, в них не реализованы модели явлений, специфичных для задач ВБ, в частности модели систем безопасности. Поэтому адаптация стандартных средств CFD к проблемам анализа ЗО становится крайне актуальной и требует: 1) проверки CFD моделей в условиях, приближенных к условиям экспериментов по ВБ (в рамках первичной верификации), 2) доработки используемого расчетного кода путем добавления новых физических моделей и их верификации на соответствующем экспериментальном материале.

Цели диссертационной работы

Основная цель диссертационной работы состояла в численном исследовании процессов формирования и разрушения стратификации легкого газа в различных условиях, характерных для тяжелой аварии, создании моделей пристеночного и объемного тепло и массообмена.

Для достижения поставленных целей решаются следующие задачи:

- Проверка расчетного средства (CFD моделей) на новых экспериментах по ВБ АЭС. Исследование возможностей применения CFD к этим задачам.
- Разработка моделей процессов пристеночного тепло и массообмена, универсальных для CFD методологии (пристеночная конденсация, поверхностная химия и др.).
- Разработка единого подхода к моделированию систем безопасности (конденсаторов-теплообменников), имеющих сложную гетерогенную конструкцию, состоящую из пучков трубок.
- Реализация моделей и подходов в виде пакета программ для ЭВМ (используемого в виде подгружаемой библиотеки).

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является атмосфера ЗО АЭС, а также процессы и явления, протекающие в ходе тяжелой аварии внутри неё. Предмет исследования состоит в построении и анализе математических моделей, отражающих сущность рассматриваемых явлений.

Научная новизна

В диссертационной работе впервые:

1. Разработана оригинальная модель пристеночного тепло и массообмена CoRe (Condensation and Recombination), которая позволяет моделировать процессы пристеночной конденсации пара в присутствии неконденсируемых газов и рекомбинации водорода на каталитической поверхности.
2. На основе предложенных в работе корреляций для коэффициентов тепло и массообмена разработана модель конденсатора-теплообменника, представляющего собой гетерогенную структуру из трубок с теплоносителем.
3. Построены численные алгоритмы выделения областей действия представленных моделей, позволяющие использовать их в комплексе. Алгоритмы реализованы в виде подключаемой к универсальному CFD коду Fluent библиотеки и ориентированы на использование в высокопроизводительных вычислительных системах.
4. Представлены результаты численного моделирования новых экспериментов по гидродинамике неоднородных газовых смесей на крупномасштабных установках (PANDA, TOSQAN), полученные в рамках верификации разработанных моделей. Достоверность моделей подтверждается хорошим количественным совпадением с экспериментальными данными.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается верификацией разработанных численных моделей на широком наборе экспериментов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы посвящены широко обсуждаемым научно-техническим проблемам, и имеют важные практические применения. На основании разработанных численных моделей проведено исследование явлений, связанных с формированием и разрушением стратификации в условиях экспериментов и сценариев аварий, а также процессов объемной и пристеночной конденсации, которые определяют рост давления и нагрузку на стены защитной оболочки АЭС. Эти исследования легли в основу оценки применимости CFD к задачам анализа состояния атмосферы внутри ЗО и были использованы в работе [8]. Их применение в рамках расчетного сопровождения экспериментов [9] позволило выявить и исправить ряд недостатков в постановке экспериментов, а также интерпретировать некоторые из их особенностей.

Теоретический характер работы определяется преобладанием математических методов исследований: численный анализ рассматриваемых явлений, основанный на уравнениях механики сплошной среды, сопровождается количественными аналитическими оценками.

Общая методика исследования

Базовая основа расчетов течения газа - коммерческий код ANSYS Fluent [6]. Исходный вид решаемых уравнений гидродинамики одинаков во всех широко используемых расчетных средствах, коммерческих (например, STAR-CD) или открытых (например, OpenFOAM). Поэтому подход для моделирования процессов пристеночного и объемного тепло и массопереноса, предложенный в диссертационной работе, представляется достаточно общим, он может быть перенесен на большинство других CFD кодов.

Физическая основа разработанных численных моделей реализована через добавление источниковых/стоковых слагаемых в исходные уравнения. Соотношения для этих слагаемых брались на базе известных физических закономерностей (таких как пристеночный логарифмический закон) или эмпирических соотношений. Ранее эти соотношения применительно к рассматриваемым задачам в комплексе не применялись.

Для качественной проверки достоверности разработанных моделей выполнены аналитические оценки, проведено сравнение с имеющимися работами по той же тематике. Для количественной проверки работы численных моделей в реальных условиях проводится подробное сравнение результатов моделирования с экспериментами.

Апробация результатов

Материалы диссертационной работы обсуждались на следующих научных семинарах, российских и международных конференциях:

- 56-ая, 57-ая научные конференции МФТИ, Москва, Россия, 2013-2014;
- XIII, XIV, XV Научные школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, Москва, Россия, 2012-2014;
- Шестая Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-6), Москва, Россия, 2014;
- V научный семинар «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», Снежинск, Россия, 2016;
- Научно-технический семинар «Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике», Нижний Новгород, 2016;
- Научно-технический семинар Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2016.
- Научно-технический семинар Института Проблем Механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2016.
- 22nd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-22), Prague, Czech Republic, 2014;
- CFD4NRS-5. Experimental Validation and Application of CFD and CMFD Codes in Nuclear Reactor Technology, Zurich, Switzerland, 2014;
- OECD/NEA HYMERES project: PANDA Test HP1_6_2 blind benchmark, Villigen PSI, Switzerland, 2014;

- OECD/NEA HYMERES Project – 4th workshop meeting, Villigen PSI, Switzerland;
- International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2015), Nice, France, May 2015;
- CFD4NRS-6. Application of CFD/CMFD Codes to Nuclear Reactor Safety and Design and their Experimental Validation, MIT, Cambridge, USA, September 2016.

Результаты исследования используются в отчетах по следующим проектам и договорам:

- «The Euroatom-Rosatom ERCOSAM-SAMARA projects on containment thermal-hydraulics of current and future LWRs for severe accident management»;
- НИОКР «Анализ применимости результатов проектов ERCOSAM-SAMARA к задачам водородной взрывобезопасности на АЭС с реакторами водо-водяного типа», Государственный контракт от 17.02.2014 № Н.4б.43.9Б.14.1038;

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в список ВАК.

Личный вклад соискателя

Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Автор непосредственно участвовал в выборе объекта исследования, постановке задач, численном моделировании и анализе полученных результатов. Идея модели пристеночной конденсации принадлежит научному руководителю Филиппову А.С. Расширение идеи на модели поверхностной химии (рекомбинации водорода), испарения воды из бака-приямка, их численная реализация и проведение численных расчетов тестовых задач и экспериментов принадлежат автору. Сеточные области для проведения расчетов были построены автором, за исключением некоторых, построенных Щукиным А.А.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 141 странице, состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 109 наименований. Работа иллюстрирована 30 рисунками и 12 таблицами.

Краткое содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы работы, формулируются основные цели и задачи исследования.

В первой главе приводится обзор и сравнение существующих подходов и моделей к анализу атмосферы защитной оболочки АЭС при тяжелых авариях, дается обоснование используемого в работе CFD подхода с моделями турбулентности типа RANS.

Вторая глава посвящена математической формулировке проблемы, приведены вспомогательные результаты, а также дано математическое описание численных моделей, являющихся основным предметом исследований. Глава состоит из двух основных разделов.

В первом разделе второй главы в конспективной форме приводятся сведения о моделях и численных алгоритмах, реализованных в стандартных CFD пакетах, в частности, в коде ANSYS Fluent, эти сведения необходимы для понимания, рассматриваемых в работе явлений. Дается описание осредненных по Рейнольдсу уравнений переноса, замыкание этих уравнений, а также уравнений движения дисперсной фазы и ее теплообмена с газовой средой. ANSYS Fluent обладает широким набором исходных численных и физических моделей, и формирование минимального набора моделей, позволяющих эффективно и с приемлемой точностью проводить анализ ВБ АЭС, является одной из первичных задач. В разделе обсуждаются некоторые из аспектов этого вопроса.

Во втором разделе второй главы рассматриваются математические модели пристеночного и объемного тепло и массообмена, составляющие основное содержание диссертационной работы, приведено описание численной методики и реализации этих моделей. Эти модели представляют собой замыкание уравнений, описанных в первом разделе, модели реализованы в форме источниковых слагаемых.

1. В первом пункте раздела описывается численная модель пристеночного тепло и массообмена. Основой для нее служит реализованная модель пристеночной конденсации. В результате выкипания воды в активной зоне реактора под ЗО может выходить до 200 т горячего пара, большая часть которого конденсируется на холодных стенках и конструкциях оболочки. Пристеночная конденсация существенно влияет на атмосферу внутри ЗО: внутреннее давление газа, паросодержание, сопряженный теплообмен со стенками, поэтому для анализа ВБ требуется учет этого явления.

В предположении, что паросодержание в непосредственной близости от конденсирующей поверхности соответствует точке насыщения (рассчитывается по температуре поверхности и определяется из табличных значений фазовой диаграммы), вблизи стенки формируется градиент концентрации, который приводит к возникновению потока массы пара вблизи конденсирующей поверхности, а, следовательно, к образованию конденсата на ней. Предполагается, что массовый поток $Q_{w,st}$ пропорционален градиенту массовой доли пара:

$$Q_{w,st} = D_w(Y_{w,st} - Y_{st})$$

где конкретный вид коэффициента пропорциональности D_w вычисляется в соответствии с законом массообмена вблизи поверхности и, в общем случае, зависит от характера течения. В большинстве интересующих нас задач течение вблизи стенок является турбулентным. По этой причине для вычисления коэффициента массообмена D_w можно использовать универсальный пристеночный закон, имеющий форму логарифмической зависимости. В работе использовалась следующая зависимость, предложенная в [6]:

$$D_w = \frac{\rho C_\mu^{\frac{1}{4}} k_w^{\frac{1}{2}}}{q^*}$$

$$q^* = \begin{cases} Sc \frac{\rho C_\mu^{\frac{1}{4}} k_w^{\frac{1}{2}} y_w}{\mu} & y_w < y_c \\ Sc_t \left(\frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{\rho C_\mu^{\frac{1}{4}} k_w^{\frac{1}{2}} y_w}{\mu} \right) + P_c \right) & y_w > y_c \end{cases}$$

Здесь приняты следующие обозначения: Sc – молекулярное число Шмидта, Sc_t – турбулентное число Шмидта (равное 0,7), κ – постоянная Кармана, E – постоянная величина, равная 9,793, C_μ – постоянная модели турбулентности (равная 0,09), ρ и μ – плотность и кинематическая вязкость газа, соответственно, k_w – турбулентная кинетическая энергия в приграничной ячейке, y_w – расстояние от центра пристеночной ячейки до граничной поверхности, а P_c – функция, зависящая от турбулентного и молекулярного чисел Шмидта Sc и Sc_t . Рассчитываемый таким образом массовый поток на конденсирующей поверхности используется для вычисления стока массы пара $\dot{\rho}^s$, а также источника тепла \dot{Q}_s , идущего на нагрев стенки в результате фазового перехода:

$$\dot{\rho}^s = R_{st} = D_w \frac{(\dot{Y}_{w,st} - Y_{st})}{y_w}$$

$$\dot{Q}_s = \dot{\rho}^s L_m \frac{y_w}{y_{w,s}}$$

L_m – теплота конденсации (испарения), $y_{w,s}$ - расстояние от центра пристеночной ячейки твердой стенки до граничной поверхности. Вычисленные таким образом источники массы и энергии добавляются в уравнения переноса в виде источниковых слагаемых при помощи специально написанного пакета программ, подключаемого в виде библиотеки к универсальному CFD коду Fluent.

Формулы, использованные при реализации модели (конкретный вид логарифмического закона стенки), представляют собой известные закономерности. Предметом обсуждения в диссертации является подход пристеночных функций, который впервые применен и верифицирован к исследованию процессов пристеночной конденсации в условия тяжелой аварии.

Аналогичный подход был применен к моделированию поверхностной химии, а именно, к рекомбинации водорода на каталитической поверхности, что является основным механизмом сжигания водорода в устройствах ПКРВ. В случае достаточно быстрых поверхностных химических реакций скорость рекомбинации водорода лимитируется скоростью его подвода к каталитической поверхности, эта скорость определяется массовым потоком Q_{w,H_2} , аналогично модели пристеночной конденсации. На основании равенства гидродинамического потока массы и скорости поверхностной реакции могут быть рассчитаны источниковые слагаемые массы реагирующих компонентов смеси и выделяемого в ходе реакции тепла.

2. Во втором пункте раздела дается математическое описание модели испарения воды из баке-приямка ЗО, рис. 1, и аналогичных систем с открытой водной поверхностью большой площади. Основное действие спринклерной системы, установленной на АЭС, состоит в перемешивании смеси газов воздух/пар/водород и декомпрессии атмосферы ЗО за счет конденсации пара на холодных каплях распыляемой воды и теплообмена с газовой средой. Анализ экспериментов ERCOSAM-SAMARA по ВБ показал, что существенный вклад в общий тепло и массообмен, влияющий на эволюцию давления атмосферы внутри ЗО, вносит испарение воды, скапливающейся в баке-приямке.

В модели вычисляется эволюция полной массы воды в баке-приямке и ее температура. Полная масса воды M вычисляется из массы капель, достигших его границы, и массы испарившегося пара. Эволюция температуры T_{wp} (в предположении, что температура является однородной по всему бассейну) определяется теплообменом на стенке F_w , стоком энтальпии в результате испарения F_{st} и источником энтальпии с поступающими в бассейн каплями \dot{H}_p :

$$MC_w \dot{T}_{wp} = S_{wp} F_w + S_{wp} F_{st} + \dot{H}_p$$

S_{wp} - площадь поверхности бассейна, которая оценивается из известного объема бассейна и предположений о его форме, C_w – удельная теплоемкость воды. Первое слагаемое вычисляется с использованием корреляций для теплообмена на горизонтальной поверхности в режиме свободной конвекции; второе слагаемое - с использованием температуры поверхности бассейна и данных о составе газа вблизи границы подобно тому, как это делается в модели конденсации, но с обратным знаком; третье слагаемое – на основании известных массы и температуры падающих капель. По рассчитываемой температуре воды в баке-приемке задаются соответствующие граничные условия: тепловой поток на границе со стенками, и граничное условие первого рода на границе с газовой средой.

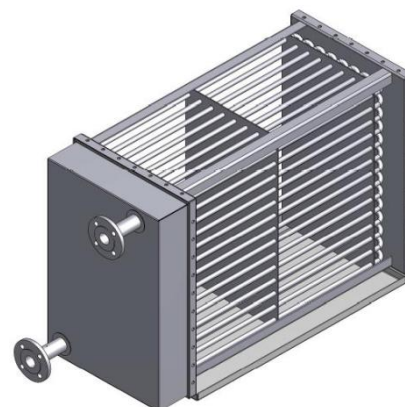


Рис. 2. Конденсатор-теплообменник [10]

3. В третьем пункте раздела дается описание математической модели конденсатора-теплообменника (КТО). В качестве примера рассматривается конденсатор-теплообменник [10], представляющий собой змеевик из трубок, по которым циркулирует вода, охлаждающая окружающий газ, рис. 2. Пар, находящийся в области теплообменника, может конденсироваться на холодных стенках КТО. Прямое моделирование трубчатой решетки конденсатора-теплообменника в контексте длительных расчетов составляет достаточно трудную задачу, т.к. требуется высокое разрешение сетки. Поэтому, принимая во внимание, что модель в дальнейшем будет использована при моделировании ЗО, она была реализована в достаточно грубой форме с минимальным числом параметров. Делаются следующие предположения: 1) явно структура КТО не рассматривается – при моделировании течения газа внутри теплообменника используется подход пористой среды с эффективным стоком импульса; 2) температура КТО при теплообмене предполагается однородной по всей области КТО; и 3) тепловым сопротивлением жидкой пленки пренебрегается.

Для учета сопротивления движению газа внутри КТО из решения модельной задачи обтекания массива трубок были определены коэффициенты для корреляции гидравлического сопротивления [11]. Конвективный теплообмен между газовой средой и трубками КТО моделировался через объемный сток тепла в форме:

$$\dot{Q}(x) = S_c \lambda \frac{T_g(x) - T_c}{d} Nu$$

где T_c – эффективная температура циркулирующей в трубках КТО воды; S_c – площадь поверхности трубок на единицу объема; λ – теплопроводность газа; d – диаметр трубок. Функциональная зависимость для числа Нуссельта Nu бралась из [11]. Аналогично выписывается уравнение для стока массы конденсата, в котором роль числа Нуссельта выполняет безразмерное число Шервуда:

$$\dot{\rho}^s(x) = R_{st}(x) = S_c \rho D \frac{Y(x) - Y_{sat}}{d} Sh$$

ρ – плотность газа; D – коэффициент диффузии пара в смеси; Y_{sat} – массовая доля насыщенных паров при температуре T_c . Соответствующий вклад в нагрев КТО составляет $L_m \dot{\rho}^s$. Выражение для числа Шервуда Sh заведомо неизвестно и определяется условиями атмосферы. В рассматриваемых задачах Sh задается равным Nu , что дает величины для мощности конденсации КТО, близкие к экспериментальным.

При моделировании прогрева теплоносителя используется значение его эффективной температуры, которая берется одинаковой во всем объеме конденсатора-теплообменника. Прогрев характеризуется ростом средней температуры теплоносителя по сравнению с температурой теплоносителя на входе, что вызвано теплообменом с газовой средой и конденсацией пара. Эффективная температура теплоносителя КТО выражается в следующем виде:

$$T_c = T_{c,in} + f \left(\xi \bar{T}_g, \frac{L_m \dot{\rho}^s}{\dot{q}_c C_w} \right)$$

Здесь $T_{c,in}$ – температура теплоносителя на входе, \bar{T}_g – средняя температура газа внутри конденсатора-теплообменника (ξ – коэффициент неоднородности температуры), \dot{q}_c – расход теплоносителя.

На рис. 3 приведена блок-схема общего алгоритма численного решения, который включает в себя реализацию описанных моделей: итерационный цикл состоит из решения уравнений переноса (Fluent) и модификации этих уравнений посредством разработанного комплекса программ CoRe. Перед началом итерационного цикла осуществляется поиск расчетных областей действия моделей (реализованный в виде набора процедур Core_pre). Вычисление непосредственно источников и стоков тепла и массы, вызванных либо объемной или пристеночной конденсацией (испарением) пара, либо химической реакцией водорода на каталитической поверхности, производится в комплексе программ CoRe, рис. 3. Реализация численных моделей пристеночного массообмена включает в себя алгоритмы расчета источников тепла, массы, добавления этих значений в соответствующие

ячейки расчетной области; для полной модели спринклерной системы (участок бака-приямка) – также алгоритмы поиска капель, сталкивающихся с сопряженной с массивными стенками граничной областью, и расчета тепловых потоков для задания граничных условий. Для реализации модели конденсатора-теплообменника помимо объемных источников тепла и массы в пакете программ CoRe производится также вычисление стока импульса. В случае тяжелой аварии все явления, описанные выше, могут происходить одновременно, поэтому пакет программ был реализован таким образом, что все разработанные модели могут работать в комплексе.



Рис. 3. Блок-схема общего алгоритма численного решения

Принимая во внимание факт, что рассматриваемые задачи являются достаточно ресурсозатратными и требуют параллельного счета, численные модели были реализованы также с возможностью проведения расчетов на многопроцессорных системах.

Третья глава посвящена вопросам конвективного перемешивания многокомпонентной смеси газов. Основное внимание здесь уделено процессам формирования и разрушения стратификации легкого газа в различных условиях.

1. Формирование стратификации легкого газа в замкнутом пустом помещении (упрощенно представляющем подкупольное пространство ЗО) исследовано достаточно подробно, теоретически и экспериментально. В первом разделе главы эти процессы исследуются численно: продемонстрирована применимость RANS подхода, а также показана необходимость учета влияния сил плавучести на турбулентность.

2. ЗО представляет собой не просто пустой герметичный объем, но здание больших размеров, состоящее из многочисленных взаимосвязанных помещений, рис. 1. Распространение водородосодержащей смеси газов

внутри помещений со сложной геометрией может вносить свои особенности в процессы формирования стратификации - в диссертации приведены некоторые из них. Численно исследованы вопросы формирования стратификации: 1) в присутствие массивного препятствия (на примере помещения парогенератора в масштабе 1:10); 2) в случае многоблочной геометрии (на примере связанных помещений парогенератора и главного циркуляционного насоса в масштабе 1:10). Показано, что 1) в рассматриваемых случаях массивное препятствие не мешает формированию стратификации, и служит только в качестве вытесняющего объема; 2) в связанных помещениях могут возникать условия, способствующие частичному размыванию стратификации.

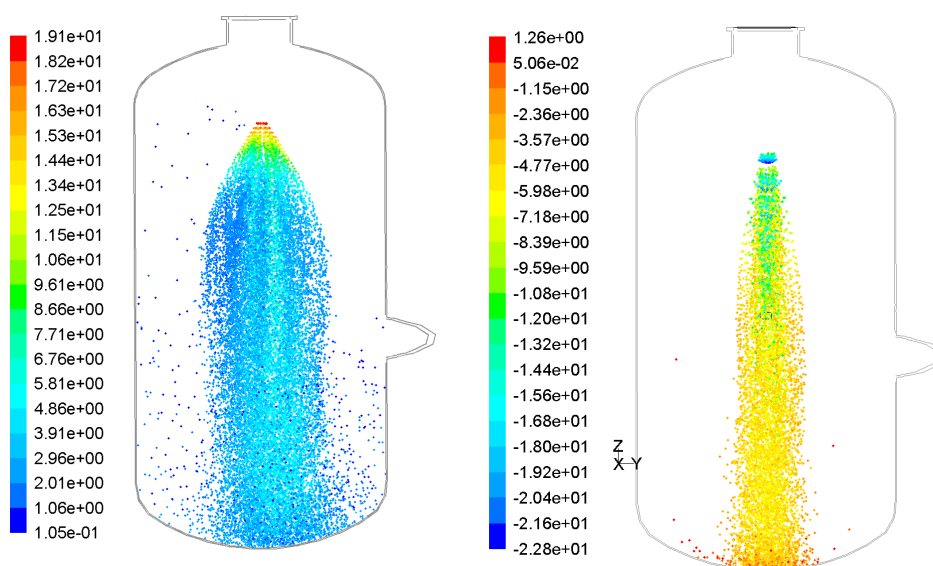


Рис. 4. Спринклерная система с большим (слева) и малым (справа) углом распыления

3. В главе приведены результаты численного исследования процессов разрушения стратификации при воздействии спринклерной системы. Исследовано влияние 1) угла распыления капель воды (рис. 4), 2) скорости распыляемых капель и 3) распределения капель по размеру на скорость размытия стратификации. Результаты численного исследования, которые были подтверждены экспериментами, показали, что 1) действие спринклерной системы приводит к однородному перемешиванию смеси под уровнем инъекции капель за время, сопоставимое со временем полета капель, достаточно быстро. 2) Время размытия облака легкого газа, который сохраняется под потолком, в основном определяется углом распыления капель. Показано, что это связано с близостью распыляемых капель к боковым стенкам. 3) Исследование действия спринклерной системы в многоблочной геометрии продемонстрировало, что могут возникать условия

для формирования инверсной концентрационной стратификации легкого газа, рис. 5.

4. Представлены также результаты верификации описанной во второй главе модели конденсатора-теплообменника. Верификация, проведенная на двух экспериментах на установке PANDA, продемонстрировала, что модель конденсатора-теплообменника качественно и количественно воспроизводит основные черты течения, которые наблюдались в эксперименте. Во-первых, развиваемое конденсатором-теплообменником свободно конвективное течение приводит к перемешиванию смеси только в области ниже уровня расположения КТО, рис. 6. Во-вторых, в соседнем помещении устанавливаются условия для формирования инверсной стратификации легкого газа. Результаты сравнения проведенных расчетов с экспериментальными данными представлены на рис. 7.

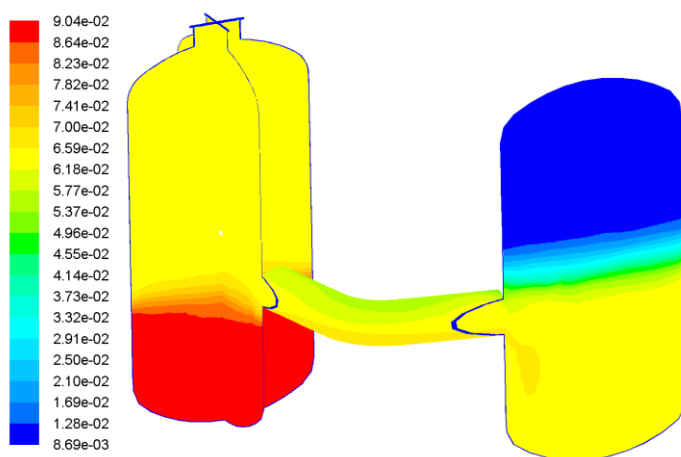


Рис. 5. Формирование инверсной стратификации гелия после окончания действия спринклерной системы

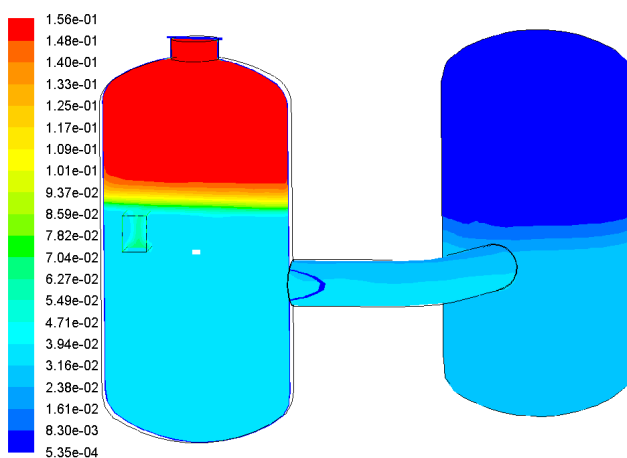


Рис. 6. Картина распределения мольной доли гелия после окончания действия конденсатора-теплообменника

В четвертой главе обсуждаются результаты верификации модели пристеночного тепло и массообмена. В первом пункте приводятся результаты верификации модели пристеночной конденсации на двух экспериментах: TOSQAN ISP-47 [12] и PANDA PE1 [13]. В первом эксперименте [12] процесс конденсации пара исследуется в условиях изотермической конденсирующей границы и изменяющегося состава смеси газов (воздух/пар/гелий). В ходе эксперимента давление варьируется в диапазоне от 1 до 3,5 атм.; состав смеси: мольная доля пара – в диапазоне от 0 до 65%, мольная доля гелия – в диапазоне от 0 до 25%; температура смеси изменяется в интервале от 115 до 125°C, а температура конденсирующей поверхности ~ 100-110°C. В диапазоне рассматриваемых параметров модель пристеночной конденсации продемонстрировала хорошее совпадение с экспериментом, рис. 8(а).

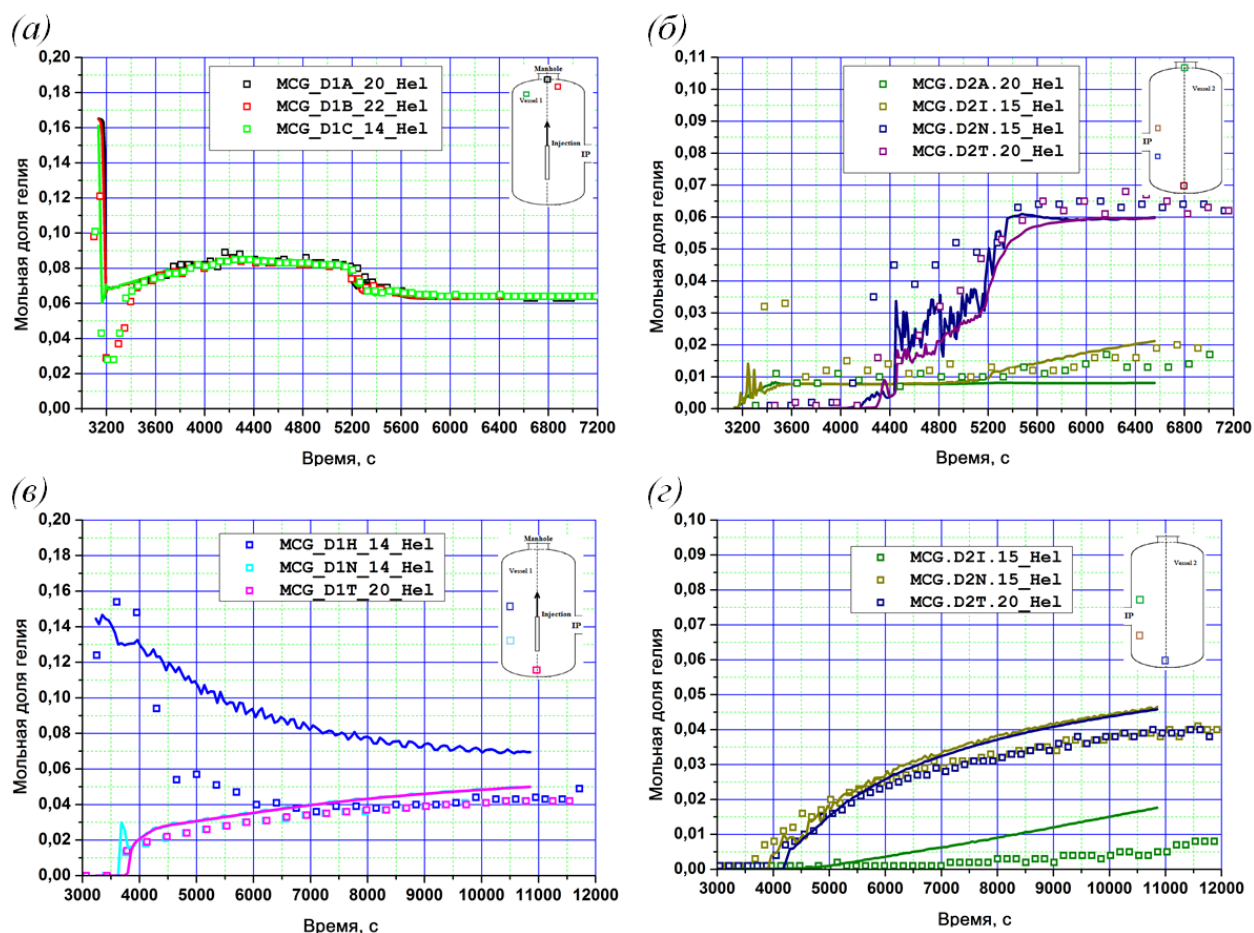


Рис. 7. Мольная доля гелия в зависимости от времени. Результаты сравнения с экспериментальными данными. (а), (б): исследование действия спринклерной системы. (в), (г): исследование действия конденсатора-теплообменника

Во втором эксперименте [13] исследовалась применимость модели в условиях сопряженного теплообмена газовой фазы с конденсирующими стенками, в присутствии неконденсирующихся газов (воздух, гелий). В ходе

эксперимента давление варьируется в диапазоне 2,0-2,6 атм.; состав смеси: мольная доля пара изменяется в интервале 55-95%, мольная доля гелия ~ 0-15%; температура смеси и конденсирующей стенки варьируются в диапазоне от 100 до 130°C. Верификация модели на эксперименте [13], а также на ряде других аналогичных экспериментах продемонстрировала хорошее совпадение результатов расчетов с данными экспериментов в исследуемом диапазоне параметров, рис. 8(б-г).

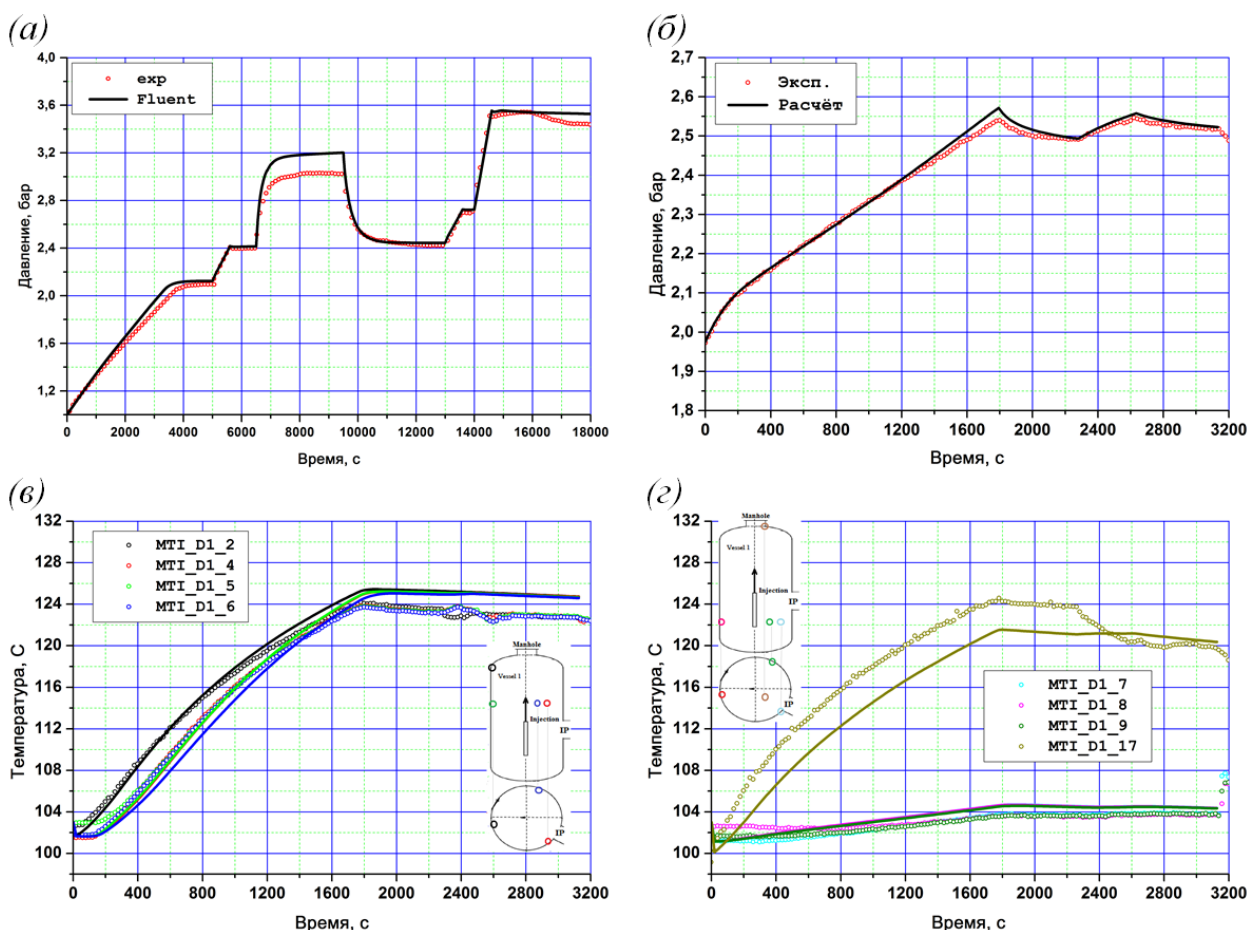


Рис. 8. Эволюция давления в экспериментах TOSQAN ISP-47 (а), PANDA PE1 (б) и эволюция температуры стенок установки в эксперименте PANDA PE1 (в, г). Маркерами обозначены результаты экспериментов, линиями – результаты расчетов.

В заключительной части главы приведены результаты верификации моделей рекомбинации водорода на каталитической поверхности и испарения воды из бака-приямка. Верификация модели рекомбинации водорода была проведена на серии экспериментов RECO-3 на данных, имеющихся в открытой литературе. В различных экспериментах этой серии варьировались начальный состав смеси (мольная доля водорода изменялась в диапазоне от 0,5 % до 5%), скорость смеси газов на входе (от 0,2 до 1,0 м/с), а также ее температура, ~ 300-400 К. Сравнение с экспериментальными данными продемонстрировало хорошее совпадение результатов расчетов с экспериментами во всем диапазоне варьируемых параметров, рис. 9.

Верификация разработанных моделей и программ на широком наборе экспериментов и, в целом, хорошее согласие результатов моделирования с экспериментальными данными говорит о том, что разработанная методика позволяет прогнозировать особенности явлений по части водородной безопасности АЭС, а именно распространение многокомпонентной смеси, содержащей пар и водород, и действие систем безопасности в реальных условиях, характерных для тяжелой аварии.

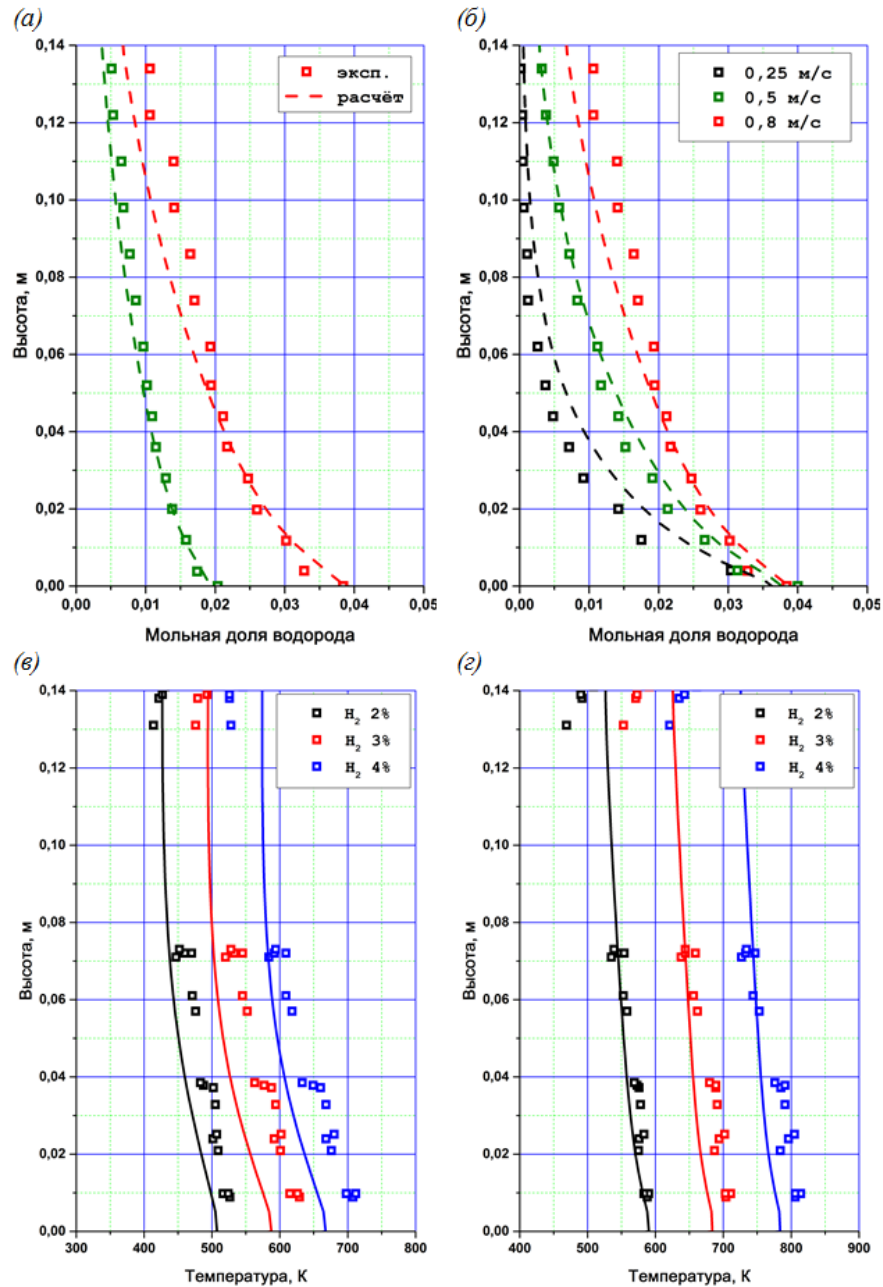


Рис. 9. Профили мольной доли водорода (а, б) и температуры каталитических пластин (в, г). Маркерами обозначены экспериментальные данные, линиями – результаты эксперимента.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту.

Основные результаты

1. Модель пристеночного тепло и массообмена CoRe (Condensation and Recombination), которая позволяет моделировать процессы пристеночной конденсации пара в присутствии неконденсируемых газов и рекомбинации водорода на каталитической поверхности.
2. Разработанная на основе предложенных в работе корреляций для коэффициентов тепло и массообмена модель конденсатора-теплообменника, представляющего собой гетерогенную структуру из трубок с теплоносителем.
3. Численные алгоритмы выделения областей действия представленных моделей, позволяющие использовать их в комплексе. Алгоритмы реализованы в виде подключаемой к универсальному CFD коду Fluent библиотеки и ориентированы на использование в высокопроизводительных вычислительных системах.
4. Результаты численного моделирования новых экспериментов по гидродинамике неоднородных газовых смесей на крупномасштабных установках (PANDA, TOSQAN), полученные в рамках верификации разработанных моделей. Достоверность моделей подтверждается хорошим количественным совпадением с экспериментальными данными.

Работы автора по теме диссертации

Публикации в изданиях из перечня ВАК

1. Григорьев С.Ю., Филиппов А.С., Щукин А.А., Разработка и верификация модели конденсации для CFD расчетов задач водородной безопасности АЭС, Известия АН. Энергетика, 4(2014), 123-141.
2. A.Filippov, S.Grigoryev, N.Drobyshevsky, A.Kiselev, A.Shyukin, T.Yudina, CMFD simulation of ERCOSAM PANDA spray tests PE1 and PE2, Nucl.Eng.Des., 299(2016), pp. 81-94.
3. С.Ю. Григорьев, А.Е. Киселёв, А.С. Филиппов, О некоторых факторах разогрева и теплообмена атмосферы защитной оболочки АЭС, вызванного её наддувом при течи из первого контура в процессе тяжёлой аварии, Известия АН. Энергетика, 6(2016), 86-100.
4. Filippov A.S., Grigoryev S.Yu., Tarasov O.V., On the role of thermal radiation in severe accident containment atmosphere: CFD simulation of TOSQAN T114 air-He test, Nucl.Eng.Des., 310(2016), pp. 175-186.

Остальные публикации

5. A.S.Filippov, S.Y.Grigoryev, O.V.Tarasov, T.A.Iudina, CFD simulation of PANDA and MISTRA cooler tests of ERCOSAM-SAMARA projects, In. Proc. ICONE, July 7-11, Prague, 2014, ICONE22-30557.
6. A.S.Filippov, S.Y.Grigoryev, A.E.Kiselev, O.V.Tarasov, T.A.Yudina, I.V.Ivanov, Complete CFD Analysis of ERCOSAM-SAMARA Exercises: A Step Towards Advanced Modeling of LWR Containment under Severe Accident Conditions, Proceedings of ICAPP 2015.
7. С.Ю. Григорьев, А.С. Филиппов, А.Е. Киселёв, О.В. Тарасов, Т.А. Юдина, Моделирование интегральных экспериментов CFD качества с целью верификации кодов, перспективных в задачах водородной безопасности, Докл. науч.-техн. семинара «Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике», Нижний Новгород, 2016.
8. Филиппов А.С., Григорьев С.Ю., Киселёв А.Е., Тарасов О.В., Юдина Т.А., Моделирование поведения среды защитной оболочки АЭС с водородным реактором при тяжёлой аварии, Докл. науч.-техн. семинара «Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике», Нижний Новгород, 2016.
9. Michele Andreani, Yan Daqiang, Avinash J Gaikwad, Sunil Ganju, Sergey Grigoryev, Luis Enrique Herranz, Risto Huhtanen, Anton Kanaev, Stephan Kelm, Jongtae Kim, Takeshi Nishimura, Berthold Schramm, Medhat Sharabi, Domenico Paladino, Synthesis of a Blind Benchmark Exercise Based on a Test in the PANDA facility addressing the stratification erosion by a vertical jet in presence of a flow obstruction, Proceeding of CFD4NRS-6, 2016.

Цитированная литература

1. Большов Л.А., Ядерные аварии: последствия для человека, общества и энергетики, Симпозиум «30 лет аварии на Чернобыльской АЭС», Москва, 2016г.
2. Микеев А.К., Противопожарная защита АЭС, Энергоатомиздат, 1990г.
3. Авария на АЭС «Фукусима дайити». Доклад Генерального директора, МАГАТЭ, 2015г.
4. SOAR on Containment Thermalhydraulics and Hydrogen Distribution, Tech. Report, Prepared by an OECD/NEA Group of Experts, 1999.
5. Assessment of Computational Fluid Dynamics (CFD) for nuclear reactor safety problems, NEA/CSNI/R(2007)13, 2008.
6. ANSYS Fluent 12.0, Theory guide, 2009.
7. Abou-Rjeily Y. et al. Mitigation of hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants //Technical Report IAEA-TECDOC-1661. – 2011.

8. НИОКР «Анализ применимости результатов проектов ERCASAM-SAMARA к задачам водородной взрывобезопасности на АЭС с реакторами водо-водяного типа», Государственный контракт от 17.02.2014 № Н.46.43.9Б.14.1038.
9. Е.В. Безгодов, И.В. Лавренюк, В.А. Симоненко и др., Результаты экспериментальных исследований процессов стратификации и горения ВПГС в макетных помещениях защитной оболочки АЭС с ВВЭР при атмосферном давлении, V научный семинар «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», Снежинск, Россия, 2016.
10. G. Mignot, S. Paranjape, R. Kapulla, R. Zboray, M. Fehlmann, W. Bissels, D. Paladino, Test report for test PE3 cooler test with wall condensation, ERCOSAM/WP3/P3.7c/2013-04.
11. П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков, Справочник по теплогидравлическим расчетам, 1990г.
12. K. Fischer, P. Royl, M. Heitsch, et al., International Standard Problem ISP-47 on containment thermal-hydraulics, OECD, 2005.
13. G. Mignot, R. Kapulla, R. Zboray, M. Fehlmann, C. Wellauer, W. Bissels, D. Paladino, Test protocol for test PE1 hollow cone spray test, ERCOSAM/WP3/P3.6A/2012-02.