

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики  
Российской академии наук

На правах рукописи



Томащик Дмитрий Юрьевич

**Модуль CONT\_TH для расчета теплогидравлических параметров  
атмосферы в герметичном ограждении РУ с водяным теплоносителем при  
тяжелых авариях**

Специальность 2.4.9

«Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная  
безопасность»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2024

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

Научный руководитель:

Киселев Аркадий Евгеньевич,  
доктор технических наук.

Официальные оппоненты:

Болтенко Эдуард Алексеевич,  
доктор технических наук, АО «Электрогорский  
научно-исследовательский центр по безопасности  
атомных электростанций».

Казанцев Анатолий Александрович,  
кандидат технических наук, акционерное общество  
«Государственный научный центр Российской  
Федерации – Физико-энергетический институт имени  
А.И. Лейпунского.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет  
«МЭИ»

Защита состоится 25 сентября 2024 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.1.496.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Б.Тульская, д. 52

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте <http://ibrae.ac.ru/contents/603/>.

Отзыв на автореферат диссертации, заверенный печатью организации, просьба направлять по адресу: 115191, г. Москва, Б. Тульская ул., д.52. Диссертационный совет ИБРАЭ РАН.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
к.т.н.



В.Е. Калантаров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

Современный подход к обоснованию безопасности АЭС является обязательным условием ее проектирования, сооружения и эксплуатации и требует рассмотрения даже маловероятных тяжелых аварий (ТА), связанных с потерей охлаждения активной зоны (а.з.). Для аварий с большой течью первого контура давление в системе реакторная установка (РУ) ↔ герметичное ограждение (ГО) определяет динамику процессов в а.з. и контурах РУ, в том числе динамику выхода радиоактивных веществ (РВ). С точки зрения пожаробезопасности принципиально важен газовый состав атмосферы ГО, который определяется источниками и стоками компонентов газовой фазы, а также процессами перемешивания с учётом конвекции, плавучести, работы спринклерной системы и пассивных каталитических рекомбинаторов водорода (ПКРВ), конденсации, испарения. Всё это определяет важность моделирования процессов в ГО.

Для моделирования протекания ТА на АЭС с РУ ВВЭР в России разработан расчетный код СОКРАТ. На ранних этапах развития код СОКРАТ (версия СОКРАТ-В1/В2) использовался только для расчета протекания ТА без учета выброса РВ, теплогидравлика ГО моделировалась с помощью отдельных контейментных кодов АНГАР или КУПОЛ. В настоящее время он позволяет рассчитывать как внутрикорпусную, так и внекорпусную фазы ТА, способен давать реалистичный прогноз динамики развития ТА на энергоблоках при различных эксплуатационных состояниях. Код согласованно учитывает взаимовлияние процессов, протекающих в РУ и ГО.

Важным этапом развития линейки кодов СОКРАТ стало завершение в 2021 г. разработки моделей накопления РВ в топливе, их переноса по первому контуру, поведения РВ в ГО для задач прогноза источника РВ в окружающую среду при ТА (версия СОКРАТ/В3). Для задач анализа поведения РВ в ГО на длительных временах используемые контейментные коды требовали дополнительной проверки (аттестации) в связке с разработанными и имплементированными в код СОКРАТ моделями поведения РВ. Значительная ресурсоемкость этих работ в условиях неопределённости решений разработчиков по дальнейшему развитию и переаттестации используемых контейментных кодов для отмеченных выше задач обострила вопрос об ускорении разработки в коде СОКРАТ модуля для расчета теплогидравлики ГО.

Настоящая диссертационная работа направлена на создание для кода СОКРАТ теплогидравлического модуля с целью обеспечения согласованного расчета в системе первый контур ↔ ГО при ТА на АЭС с водяным теплоносителем, расчета параметров в ГО для оценки его локализуемой способности и транспорта парагазовой среды в помещениях ГО как несущей газовой фазы для РВ.

Актуальность данного исследования определяется:

- необходимостью учета взаимовлияния процессов между контурной теплогидравликой и теплогидравликой ГО с согласованием описывающей их системы уравнений в рамках единого расчета по коду СОКРАТ для повышения реалистичности расчетных данных и снижения интегральных временных затрат на выполнение расчетов;

- ограниченностью аттестованных российских контейментных кодов для расчетов поведения РВ в ГО при ТА;

– необходимостью обеспечения независимости использования интегрального кода СОКРАТ от решений правообладателей внешних контейментных кодов по их дальнейшей разработке, усовершенствованию и переаттестации.

#### **Цель и задачи исследования**

Целью данной работы является разработка для интегрального кода СОКРАТ теплогидравлического модуля, предназначенного для согласованного расчета протекания ТА на АЭС с водяным теплоносителем, где значительную роль оказывает давление, установившееся в системе РУ ↔ ГО.

Задачами исследования являются:

– разработка модуля теплогидравлики ГО и его реализация в составе интегрального кода СОКРАТ, включая:

– выбор моделей теплогидравлических процессов, и их дальнейшее развитие для реалистичного моделирования давления, температуры, состава газовой среды, включая стратификацию и ее разрушение с сохранением характерного времени протекания процессов на малом количестве расчетных ячеек;

– разработка модели спринклерной системы с акцентом на перемешивание среды каплями спрея и взаимодействие газочапельной среды со стенами помещений.

– валидация и кросс-верификация разработанного модуля для описания динамики давления и изменения состава газовой среды в ГО при работе активных и пассивных СБ.

#### **Научная новизна работы**

Впервые в рамках единого подхода по моделированию процессов для интегрального кода СОКРАТ реализован согласованный расчет теплогидравлических параметров РУ и ГО реакторов с водяным теплоносителем. Решен вопрос о согласовании свойств теплоносителя для контурной гидравлики и в ГО, в том числе в метастабильных областях.

Впервые разработана модель течения газовой фазы, учитывающая импульс, передаваемый газу за счет процессов теплообмена.

Развита модель образования и разрушения стратифицированных слоев за счет плавучести и импульса, не требующая усложнения пространственной дискретизации расчетной области, ее использование формализовано в оригинальной методике построения расчетных схем.

Разработана универсальная модель спринклерной системы, учитывающая взаимодействие капель с конструкциями и ограничение перемешиваемости газовой фазы каплями спрея.

Разработана и проверена на экспериментальных данных универсальная методика моделирования теплообменника-конденсатора с использованием базовых теплогидравлических моделей модуля.

#### **Практическая ценность результатов**

Модуль CONT\_TH в составе кода СОКРАТ-В1/В2 в 2022 г. аттестован для расчета давления, температуры и состава газовой атмосферы в помещениях ГО и используется для расчета запроектных аварий, включая ТА, на энергоблоках АЭС с ВВЭР.

Сопряжение теплогидравлических моделей CONT\_TH с моделями поведения РВ в ГО позволило получить реалистичные оценки выбросов РВ при обосновании безопасности энергоблоков ВВЭР-440 проектов В-179 и



В-213, ВВЭР-1000 проектов В-338 и В-320, ВВЭР-ТОИ в рамках ВАБ второго уровня, а также в задачах аварийного реагирования.

Разработанные автором модели расчета теплогидравлических параметров ГО могут использоваться в составе других программ для ЭВМ.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- теплогидравлический модуль CONT\_TH в составе кода СОКРАТ для обеспечения согласованного расчета в системе первый контур - ГО при ТА на АЭС с водяным теплоносителем, расчета параметров в ГО для оценки его локализующей способности и транспорта парогазовой среды в помещениях ГО как несущей газовой фазы для РВ;

- система разностных уравнений модуля, набор замыкающих соотношений, алгоритм проверки корректности выбранного шага интегрирования по времени;

- разработанные модели форсунки спринклерной системы и перемешивания стратифицированных слоев;

- элементы расчетной схемы модуля и их функционал, методика построения расчетных схем для модуля;

- результаты валидации и кросс-верификации моделей и модуля в целом.

#### **Личный вклад автора**

Автор лично разрабатывал все материалы, составляющие основу представленной диссертации, начиная от постановки задачи и до обоснования приемлемости полученных результатов моделирования явлений на объектах разного масштаба.

Автором лично выполнен анализ феноменологии и взаимной зависимости протекающих процессов с выделением наиболее «узких» мест при моделировании, обычно возлагаемых на пользователей. Проведена квалификация экспериментальных данных, необходимых для валидации совокупности физических моделей.

При личном участии автора выполнена разработка матрица валидации моделей и модуля CONT\_TH и соответствующей ей большой объем валидационных исследований на установках различного масштаба, включая выполнение оценок погрешностей. Результаты этой работы вошли в Отчет о верификации и валидации кода СОКРАТ-В1/В2. При личном участии автора выполнены расчеты ТА по коду СОКРАТ для ВАБ-2 энергоблоков ВВЭР-440 проектов В-179 и В-213, ВВЭР-1000 проектов В-338 и В-320, ВВЭР-ТОИ, включая анализ внутрикорпусной фазы аварии, теплогидравлического поведения ГО и получение источников РВ в окружающую среду.

#### **Достоверность и обоснованность результатов работы**

Обоснованность и достоверность основных положений и выводов подтверждается:

- использованием информации из различных отраслей науки и техники, взаимно дополняющей и подтверждающей принятые решения;

- детализацией моделирования различных процессов и степени их взаимосвязи на основе анализа влияния на целевые параметры расчета;

- результатами верификации и валидации разработанных моделей и модуля в целом на большом количестве аналитических тестов и экспериментальных данных, полученных в экспериментах по исследованию отдельных явлений и интегральных экспериментах на установках среднего и большого масштаба с большим количеством помещений;

– результатами кросс-верификации с аттестованным CFD кодом на примере ТА «большая течь первого контура с отказом активных СБ» на АЭС с РУ ВВЭР-1000;

– аттестацией кода СОКРАТ с модулем CONT\_TH в Ростехнадзоре.

### **Апробация работы**

Постановка задач исследования и основные результаты диссертационной работы докладывались на российских и международных конференциях и семинарах, в том числе:

– семинары в рамках Международных стандартных задач (OECD-CSNI ISP-37 по осаждению аэрозолей в ГО PWR, 1995 – 1996 гг., МАГАТЭ по проектам интегральных водоохлаждаемых реакторов, 2011 – 2013 гг., По эффективности пассивных систем безопасности PERSEO WGAMA, 2018 – 2019 гг.);

– 8-я международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 2013 год, г. Подольск, АО ОКБ "ГИДРОПРЕСС".

– Научно-техническая конференция «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2024)», 16 – 19 апреля 2024 года г. Обнинск, Россия.

– Межотраслевая научно-техническая конференция «Моделирование динамики ЯЭУ», (Динамика-2024) 04 – 07 июня 2024 года г. Сосновый Бор, Россия.

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 4 в журналах из перечня ВАК.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и списка литературы. Объём диссертации составляет 120 страниц, включая 44 иллюстрации, 31 таблицу. Список литературы содержит 73 наименования.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведено обоснование актуальности диссертации: сформулированы объект, предмет и цель исследования, описан и реализован способ достижения цели, определены результаты, выносимые на защиту, их научная новизна, обоснованность и практическая ценность, представлены сведения об апробации результатов работы.

**В первой главе** приведено описание модели, предназначенной для расчета давления, состава газовой фазы, температур воды, парогазовой среды и поверхности стен в моделируемых помещениях ГО, массы воды в приемках, скорости парогазовой среды в гидравлических связях между помещениями и в местах утечек из помещений ГО в окружающую среду в каждый момент времени. Используется подход с сосредоточенными параметрами, записываемый с помощью системы дифференциальных уравнений.

В отличие от большинства известных LP кодов для расчета параметров в ГО модель CONT\_TH:

– учитывает поступление двухфазного многокомпонентного теплоносителя в помещения из контуров РУ с передачей импульса источника окружающему газу;

– использует неравновесную термодинамику с метастабильными состояниями воды и водяного пара;

– использует алгоритмы расчета свойств воды и водяного пара вплоть до критических давлений;

– описывает работу спрея с учетом теплообмена капель со стенами и полами помещений;

– имеет методику составления расчетных схем.

В составе кода СОКРАТ-В1/В2 модель реализована в виде контейментного модуля CONT\_TH и аттестована для расчета давления и мольных долей неконденсируемых газов в помещениях герметичных ограждений АЭС с РУ ВВЭР.

При расчете параметров учитываются эффекты нестационарного движения парогазовой смеси в помещениях ГО и между помещениями с учетом взаимного влияния процессов теплообмена газовой фазы со стенами и жидкостью, наличия источников/стоков среды и работы оборудования. В модели рассчитывается среднеобъемная скорость газа в расчетной ячейке, определяемая с учетом источников среды, перетоков из соседних ячеек, конвективных процессов теплообмена с вертикальными стенами и работы оборудования. Эта скорость используется как для определения коэффициентов теплообмена внутри помещения, так и для теплообмена через открытые проемы (турбулентное перемешивание). Свободный объем для газовой фазы изменяется при поступлении воды на пол помещения (в приямок) или ее дренирования. Работа вентиляционной системы может быть смоделирована на активном (вентилятор) или пассивном принципе.

Система уравнений модуля описывает термодинамические параметры двухфазной среды с примесью неконденсирующихся газов и представляет собой систему из  $5+N$  ( $N$  – число учитываемых неконденсируемых газов) дифференциальных уравнений в частных производных с алгебраическими замыкающими соотношениями. Основными уравнениями модели являются уравнения неразрывности и энергии. Для газовой фазы используется уравнение сохранения импульса, которое в разностном виде для связи  $m$  между помещениями  $j$  и  $k$  записывается в виде:

$$\frac{\rho_j \Delta z_k + \rho_k \Delta z_j}{\Delta z_k + \Delta z_j} (V_{gm}^* - V_{gm}) + \tau \frac{P_k^* - P_j^*}{\Delta z_k + \Delta z_j} + \tau \frac{\Delta P_{mom}}{\Delta z_k + \Delta z_j} + \tau \frac{\Delta P_{den}}{\Delta z_k + \Delta z_j} = \tau (k_w + k_{local}) V_g^* - \tau g \frac{(\rho_{gk}(H_k - H_m) + \rho_{gj}(H_m - H_j))}{\Delta z_k + \Delta z_j}$$

Здесь  $\rho$  и  $P$  – плотность и давление газовой фазы,  $\Delta z$  – характерный размер помещения,  $V_g$  – скорость газовой фазы,  $\tau$  – шаг интегрирования,  $k$  – коэффициент сопротивления,  $H$  – высотная отметка центра помещения,  $j$  и  $k$  – индексы связанных помещений. Символом «\*» отмечено значение величины на конец расчетного шага. Величина  $\Delta P_{mom}$ , пропорциональная  $\rho_g V_g^2$ , представляет собой движущую силу, обеспечивающую турбулентное перемешивание среды между двумя расчетными ячейками (в предположении, что интенсивность перемешивания пропорциональна среднеобъемной скорости течения газа в помещении). Для величины  $\Delta P_{den}$ , представляющей собой движущую силу всплытия легкого газа и пропорциональной  $g(\rho_{gj} - \rho_{gk})(H_j - H_k)$ , используются только положительные значения. Такой подход требует наличия двух разнонаправленных связей между помещениями (задаются пользователем согласно методике построения расчетных схем)  $\Delta P_{mom}$  и/или  $\Delta P_{den}$  обеспечивают перемешивание газовой фазы между соседними расчетными ячейками – помещениями или их частями.

Для численного решения в качестве основных независимых переменных выбраны: давление, объемная доля газовой фазы, удельные энтальпии фаз и массовые доли  $N$  неконденсируемых газов. В отличие от «классического» для LP кодов использования температуры, выбор энтальпии обусловлен необходимостью учета метастабильных состояний воды и водяного пара для эффективного моделирования задержки испарения перегретой воды и

образования тумана. Для аппроксимации (линеаризации) уравнений течения теплоносителя по времени используется разностная схема, в основе которой положен один из вариантов метода SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations), когда без итераций решается линеаризованная система уравнений течения теплоносителя и теплообмена.

Описание теплообмена со стенами и переноса тепла внутри стен включает одномерное уравнение теплопроводности для материалов стен, гипотезу аналогии тепло- и массообмена для расчета поверхностной конденсации пара с учетом наличия стационарной по толщине пленки конденсата и эмпирические зависимости для коэффициентов теплоотдачи к стенам, зависящие в том числе, и от ориентации поверхности. Теплообмен между газом и поверхностью за счет излучения основан на эмпирическом соотношении, полученном автором путем аппроксимации данных ВТИ по поглощению излучения в водяном паре.

При моделировании течения в целях ограничения расхода парогазовой смеси при достижении потоком скорости звука рассчитывается критическая массовая скорость газовой фазы  $J_{g,crit}$ :

$$J_{g,crit} = \psi \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{1/\gamma-1} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \dot{p} \dot{\rho}_g}, \quad \gamma = \frac{\dot{c}_v \gamma_v + \sum_{n=1}^N \frac{\dot{c}_n \gamma_n}{\gamma_n - 1}}{\frac{\dot{c}_v}{\gamma_v - 1} + \sum_{n=1}^N \frac{\dot{c}_n}{\gamma_n - 1}}$$

Здесь  $\dot{c}_v$  и  $\dot{c}_n$  – донорные мольные доли пара и неконденсируемых газов,  $\gamma$  – эквивалентный показатель адиабаты,  $\psi$  – коэффициент истечения.

Необходимость разработки оригинальной модели спринклерной системы вызвана важностью учета взаимодействия капель со стенами помещений и неравномерности их распределения по объему помещения. Модель предназначена для расчета следующих параметров для каждого из помещений, в которые поступают капли:

- интегральный поток тепла между спреем и газовой атмосферой;
- интегральный поток массы пара между спреем и газовой атмосферой;
- интегральный поток тепла между стенами помещений и каплями, попадающими на них;
- импульс, передаваемый газовой фазе при торможении капель.

Система уравнений (1), связывает скорость  $V_d$ , координату  $z$ , массу  $M_d$  и полную энтальпию капли  $H_d$  (1):

$$\begin{aligned} \frac{d(M_d V_d)}{dt} &= F_{grav} - F_{fr}, & \frac{dz}{dt} &= V_d \cos \frac{\varphi}{2} \\ \frac{d(M_d)}{dt} &= G_{surf}, & \frac{d(H_d)}{dt} &= Q_{surf} + Q_{conv} \end{aligned} \quad (1)$$

Капля в силу малости размера представляется в виде шара, взаимодействие между каплями не учитывается. Действующие на каплю сила тяжести  $F_{grav}$  и сила трения о газовую фазу  $F_{fr}$  приводят к тому, что установившаяся скорость «падения» капль превышает скорость витания на величину  $V_{g,spr}$  – скорость движения газа в конусе распыла. Изменение массы капли обусловлено поверхностным потоком массы  $G_{surf}$  (испарение воды или конденсация пара) с передачей сопутствующей энергии  $Q_{surf}$ . Конвективный поток тепла описывается величиной  $Q_{conv}$ . Для упрощения модели сделано предположение о малости угла  $\varphi$  на значительных расстояниях от форсунки так, что вектор силы тяжести совпадает с направлением движения капли. Интенсивность притока (подсоса) массы газа в конус распыла спринклера, особенно в начальной фазе работы, определяет поступление пара к поверхности капель и, соответственно, ограничивает  $G_{surf}$  по сравнению с

традиционным равновесным подходом. Это особенно важно для случая, когда форсунки установлены в помещении неравномерно. В модели объемный расход газовой фазы определяется через сечение  $A$  и среднюю скорость газа внутри конуса. Осредненная по расчетной ячейке величина  $V_{g,spr}$  позволяет рассчитывать перемешивание газовой фазы между помещениями за счет импульса.

Уравнения состояния воды и водяного пара в диапазоне давлений от 1000 Па до 19 МПа используют полиномиальный способ получения плотности и энтальпии от температуры и давления, а вне диапазона – кусочно-линейный в соответствии с международными таблицами IAPWS-97. Зависимости экстраполируется в метастабильную область для обеспечения неразрывности решения. Для смеси пара с неконденсируемыми газами теплоемкость определяется через массовые доли компонентов и их теплоемкости, динамическая вязкость – по аппроксимации точного решения на основе кинетической теории Чэпмэна-Энскога, теплопроводность – по формуле Васильевой.

Конечно-разностная линеаризованная система алгебраических уравнений течения теплоносителя решается методом Гаусса. Численное интегрирование уравнения теплопроводности для стен проводится по неявной конечно-разностной схеме с использованием метода прогонки. Уравнения тепло- и массообмена спринклерных капель, записанные относительно координаты вдоль линии движения, линеаризуются и решаются в явном виде с приращением скорости, температуры или массы капли не более чем 0,5% за внутренний шаг интегрирования.

Методика построения расчетных схем содержит описание элементов и способов их сопряжения. В модуле CONT\_TH имеются следующие модели элементов и систем, не связанные с контурной гидравликой:

- элементы гидравлической сети:
  - Помещение (ROOM) – гидравлический элемент с сосредоточенными параметрами;
  - Источник массы и энергии (INJECTION) – моделирует объемный источник/сток массы и соответствующей ей энергии в помещениях;
  - Тепловыделение (HEAT\_SOURCE) – моделирует объемный источник тепла в помещениях;
  - Спринклер (SPRAY) – моделирует работу спринклерной системы;
  - Элемент (RECOMB) – моделирует работу ПКРВ;
  - Связь (CONNECTION) – соединение двух помещений по газовой фазе;
  - Вентилятор (FAN) – обеспечивает заданный расход среды в связи;
  - Клапан (VALVE) – используется для изменения проходного сечения;
  - Дренаж (DRAIN) – моделирует сток воды за счет действия гравитационных сил;
  - условия на границах системы (CTH\_BOUNDARY):
    - вывод/ввод теплоносителя с различным расходом;
    - заданное давление, температура и состав газовой фазы;

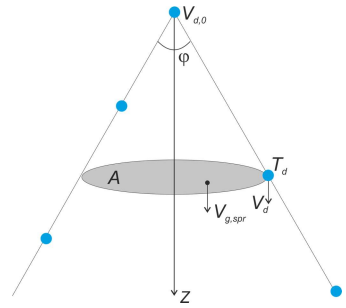


Рисунок 1 – Движение спринклерной капли

- тепловые элементы (WALL): плоская стенка с теплообменом с теплоносителем или с заданными параметрами на двух границах;
- система контроля и управления, аналогичная используемой в других модулях кода СОКРАТ.

На рисунке 2 приведен пример нодализационной схемы, в которой помещение *Пом1* разделено по высоте на две расчетных ячейки *Пом1\_1* и *Пом1\_2* для учета возможной стратификации газовой фазы. Разнонаправленность вертикальных связей (между ними позволяет моделировать обмен массой и энергией в случае, если внизу находится среда с меньшей плотностью (плаваемость) или присутствует движение газа хотя бы в одном из помещений (импульс).

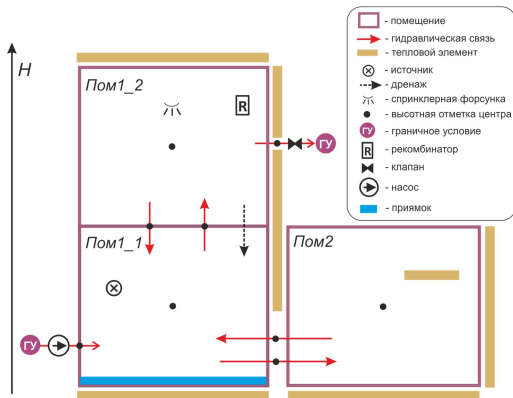


Рисунок 2 – Пример нодализационной схемы для модуля CONT\_TH

**Во второй главе** анализируются возможности модели CONT\_TH описывать теплогидравлические процессы в ГО, возникающие при ТА, с использованием современных экспериментов PE1÷PE5 на установке PANDA, проведённых по линии сотрудничества Евратом-Росатом в период 2010-2014 гг. Хотя эксперименты PE1÷PE5 были направлены на изучение отдельных явлений в области водородной взрывобезопасности (формирования стратификации водорода в ГО и ее разрушения при работе СБ), использованные методические подходы к разработке сценариев экспериментов позволяют провести проверку качества моделирования спектра процессов и явлений, протекающих при ТА.

Основные характеристики рассматриваемых экспериментов серии PE (PE1÷PE5):

- интегральный характер;
- средний масштаб установки;
- масштабирование процессов при переходе от АЭС к экспериментальной установке;
- единый сценарий, воспроизводящий последовательность поступления массы и энергии в ГО в ходе аварии с потерей теплоносителя;
- различные начальные условия экспериментов (холодные стены, вызывающие конденсацию пара в начале экспериментов PE1, PE3, PE4, и горячие стены в экспериментах PE2 и PE5) позволяют оценить влияние поверхностной конденсации на перемешивание среды;
- работа СБ (форсунка, теплообменник-конденсатор, имитатор ПКРВ);

– хорошее качество экспериментов (повторяемость, инструментирование, наличие данных высокого пространственного и временного разрешения, пригодных для валидации расчетных кодов, включая CFD коды).

Конфигурация установки PANDA в экспериментах PE1÷PE5 включала 2 сосуда, соединённых горизонтальным трубопроводом (3а). Свободный газовый объем установки около 200 м<sup>3</sup>. Инжекция пара и водорода осуществлялась в сосуд I, там же установлены имитаторы СБ (3б).

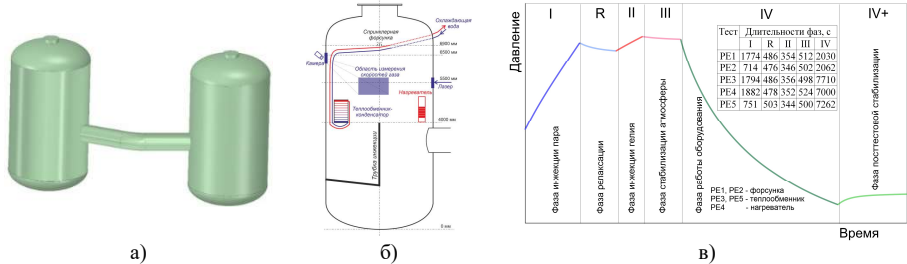
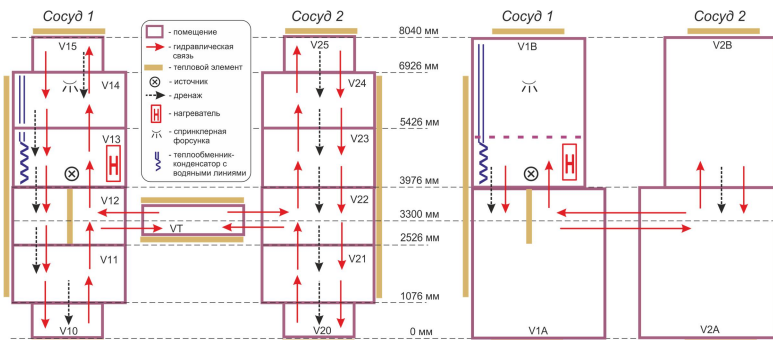


Рисунок 3 - Конфигурация установки PANDA, расположение оборудования в сосуде I и основные фазы экспериментов PE1÷PE5

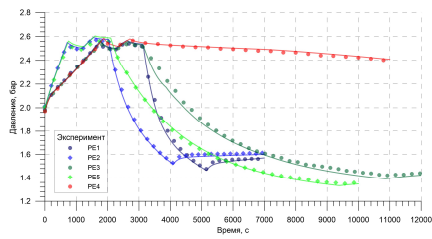
Сценарий экспериментов включал четыре основные фазы, длительность которых приведена на рисунке 3в. В течение фазы I в сосуд I поступает перегретый водяной пар; эта фаза имитирует фазу истечения теплоносителя в ГО. На фазе II производится впрыск легкого газа (гелия). Эта фаза моделирует стадию повреждения а.з., когда в атмосферу ГО АЭС поступает водород, образующийся от окисления оболочек ТВЭЛОВ. Фаза III моделирует стадию аварии с полным осушением а.з., когда ни пар, ни водород не выходят из первого контура в ГО. На фазе IV в экспериментах включается различное оборудование для воспроизведения условий управления аварией и оценки влияния его работы на динамику изменения давления и перемешиваемость среды (исследуется влияние конвективных потоков, вызванных работой оборудования, на устойчивость стратификации).

Для подтверждения возможности описания протекающих процессов при различных уровнях детализации для установки PANDA разработано две нодализационные схемы. Референтная нодализационная схема состоит из 13 расчетных ячеек (рисунок 4), что в значительной мере исключает осреднение параметров среды по высоте сосудов. Упрощенная схема содержит 4 ячейки (минимально возможное количество для оценки наличия стратификации в сосуде). Отметим, что в экспериментах PE3 и PE5 расчетная граница между ячейками VIА и VIВ смещена вверх и проходит над теплообменниками (показана пунктиром на рисунке 4), чтобы корректно учесть охлаждающий и перемешивающий эффект работы теплообменников.

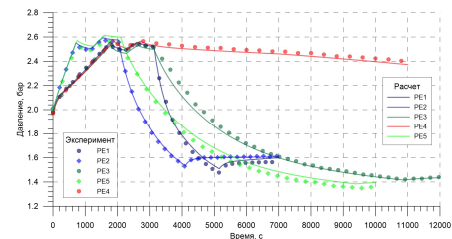
На рисунке 5 представлено сопоставление расчетных результатов по давлению газовой фазы. Здесь и далее экспериментальные данные отмечены символами, расчетные – сплошными линиями. Расчетная динамика изменения давления очень хорошо воспроизводит результаты измерений во всех экспериментах вне зависимости от используемой нодализации. Поэтому для использования модуля только для расчета противодавления достаточно упрощенного разбиения помещений на расчетные объемы с границами по уровням связей.



референтная схема  
Рисунок 4 – Нодализациянная схема установки PANDA



референтная схема



упрощенная схема

Рисунок 5 – Сравнение экспериментального и расчетного давления в экспериментах серии PE на установке PANDA

На фазе I наблюдается почти линейный рост давления, скорость роста зависит от массового расхода инжектируемого пара, интенсивности его конденсации в экспериментах с холодными стенками, теплообмена и переизлучения сжатого газа со стенками в нижней части сосуда 1 и сосуда 2. В ходе инъекции водяной пар и в расчете, и в эксперименте равномерно заполняет всю область над отверстием дуды в сосуда 1 (рисунок 6).

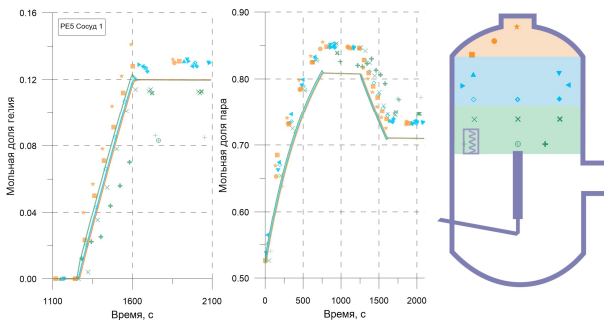


Рисунок 6 – Сравнение экспериментальной и расчетной динамики изменения мольной доли газов в верхней части сосуда 1 на фазах I-III в эксперименте PE5 (референтная схема)

Модель в референтной схеме достаточно интенсивно перемешивает газовую среду между расчетными ячейками V13, V14 и V15 (показаны на рисунке 6 разными цветами) за счет разницы плотностей инжектируемого и имеющегося газа. Часть пара затекает в сосуд 2, вызывая рост мольной доли в



его верхней части на несколько процентов. Небольшое снижение давления на фазе релаксации R вызвано теплообменом со стенками сосудов с последующим стоком тепла в окружающую среду. На фазе II в сосуд 1 инjectируется легкий газ, который в основном аккумулируется в верхней части. На фазе стабилизации атмосферы III наблюдается тренд лишь на незначительное снижение температуры газа за счет теплопотерь в стены, поэтому параметры в установке считать квазистационарными. На рисунке 7 сопоставляются расчетные и экспериментальные вертикальные профили мольных долей пара и гелия на конец фазы III во всех экспериментах. Для сосуда 1 наблюдается резкий концентрационный градиент по пару и гелию (стратификация), при этом большая часть пара и гелия находится в верхней половине сосуда. Расчетные и измеренные профили показывают хорошее совпадение, с учетом дисперсии экспериментальных данных.

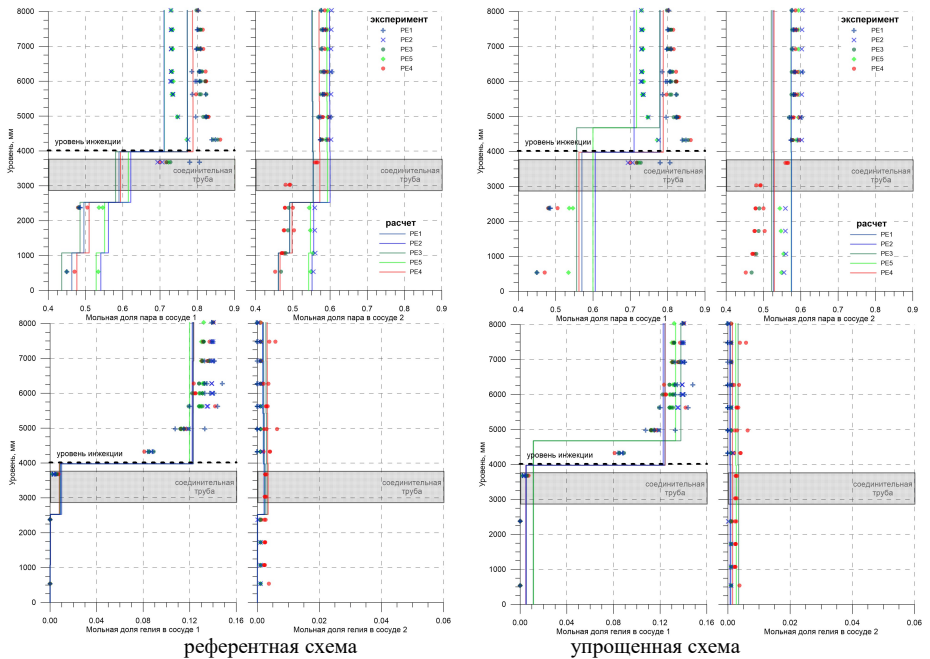


Рисунок 7 – Сравнение экспериментального и расчетного профиля мольных долей пара и гелия по высоте сосудов в конце фазы III

Анализируемыми эффектами работы имитаторов СБ, активируемых на фазе IV, являются снижение давления, перемешивание стратифицированной среды в пределах сосуда и транспорт газа между сосудами. При работе СБ протекает ряд взаимосвязанных процессов и некорректное моделирование одного из них в общем случае невозможно компенсировать за счет искажения интенсивности протекания других процессов. К наиболее важным процессам следует отнести циркуляцию газа в сосуде 1. Она вызывается либо вынужденной конвекцией (передача импульса от спринклерных капель в экспериментах PE1 и PE2), либо естественной конвекцией (нагрев газа в эксперименте PE4, охлаждение газа на теплообменных поверхностях и изменение его состава за счет конденсации водяного пара в экспериментах PE3 и PE5, а также перетечки газа через соединительную трубу). Эта циркуляция

разрушает верхний стратифицированный слой, обогащенный гелием при работе форсунки за несколько минут (рисунок 8), что объясняется высокой ( $\sim 1$  м/с) скоростью течения газа в сосуде 1, полученной в расчетах по модулю CONT\_TH и подтвержденной экспериментальной и аналитической оценками.

Расчетная скорость циркуляции газа при работе теплообменника, отнесенная к поперечному сечению сосуда 1, не превышает нескольких сантиметров в секунду, что также согласуется с аналитическими оценками и измерением системой анемометрии по изображению частиц (PIV). В этом случае движущей силой является разность плотностей, а не импульс, передаваемый от капель. Верхний стратифицированный слой не только не успевает разрушиться к окончанию эксперимента, но и продолжает обогащаться гелием за счет конденсации пара на водяных линиях, по которым в теплообменник поступает и удаляется охлаждающая вода.

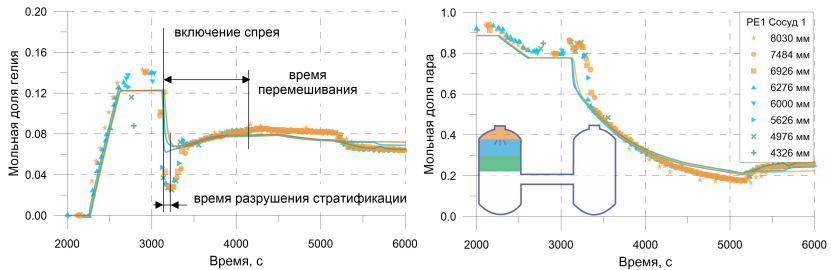


Рисунок 8 – Сравнение экспериментальной и расчетной динамики изменения мольных долей гелия и водяного пара в эксперименте PE1 (референтная схема)

Установление устойчивой циркуляции газа через теплообменник можно видеть по данным пробоотбора на примере PE5 (рисунок 9а): через 500 с после начала работы теплообменника начинается снижение мольной доли гелия на уровне теплообменника. Окончание осцилляции мощности теплообменника на рисунке 9б указывает на образование крупномасштабного циркуляционного контура практически по всей области от теплообменника до низа сосуда с гомогенизацией состава среды в нем. Далее контур циркуляции постепенно расширяется вверх. Это видно по последовательному снижению мольных долей пара и гелия на рисунке 9а.

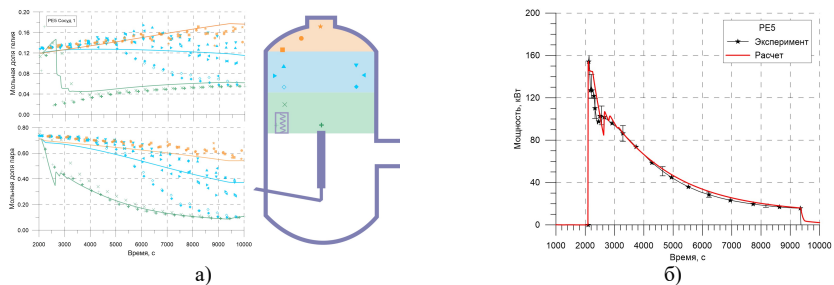


Рисунок 9 – Сравнение экспериментальной и расчетной динамики изменения мольных долей гелия и водяного пара в верхней части сосуда 1 на фазе IV (а) и мощность теплообменника (б) в эксперименте PE5

По мере снижения мощности теплообменника скорость эрозии замедляется, к концу эксперимента наверху сосуда сохраняется стратифицированный слой гелия. Корректное моделирование динамики

изменения объема и состава газовой фазы в области циркуляции моделями CONT\_TH, проиллюстрированное на рисунке 9а, позволило верно описать снимаемую с теплообменника мощность (рисунок 9б) и, соответственно, обеспечить качественно и количественно верную динамику снижения давления в установке (рисунок 5). Результаты расчета по модулю CONT\_TH динамики продвижения границы области стратификации вверх хорошо соответствуют экспериментальным данным, как видно из таблицы 1, где приведены характерные времена достижения границей стратификации определенного высотного уровня. Для полноты картины приведены также обобщенные данные моделирования, полученные по различным кодам в рамках проекта ERCOSAM-SAMARA (обсуждаются ниже по тексту).

Таблица 1 – Сопоставление экспериментальных и расчетных времен, характеризующих динамику продвижения фронта стратификации в экспериментах с теплообменником

Тест	Нижний уровень стратифицированного слоя, обогащенного гелием, мм	Время от включения теплообменника, с			
		Эксперимент	CFD*	LP*	CONT_TH
PE3	4750	500	600	5000**	800
	5100	2800	1800÷7000	3000	~3000
PE5	4750	500	400	-	600
	5100	1500	1000÷3000	-	~1500

\*коды, использованные в проекте ERCOSAM-SAMARA – CFD: FLUENT, GASFLOW; LP: ASTEC, COCOSYS, GOTHIC и КУПОЛ  
 \*\*время гомогенизации области под теплообменником

В расчете эксперимента PE4 работа нагревателя приводит к образованию контура циркуляции, сначала ограниченного областью от уровня входа в нагреватель до крышки сосуда 1, затем граница стратификации постепенно смещается вниз. При достижении уровня соединительной трубы легкая газовая смесь начинает перетекать из облака сосуда 1 в сосуд 2. Таким образом, следствием движения границы вниз является разбавление легкой смеси и потеря массы гелия за счет перетока в сосуд 2. Эта горячая обогащенная гелием смесь, обладая положительной плавучестью, поступает в верхнюю часть сосуда, что обуславливает формирование нормальной концентрационной стратификации. Результаты расчета хорошо совпадают с наблюдаемыми в эксперименте эффектами.

Рисунок 10 иллюстрирует вывод о том, что модели, заложенные в CONT\_TH, для двух нодализаций обеспечивают хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными распределениями состава газовой фазы, полученными в результате работы СБ.

Для количественного сравнения использовалось относительное среднее отклонение  $\bar{E}_\%$  и соответствующее ему среднеквадратическое отклонение  $\sigma_\%$ . В результате статистической обработки получено, что  $\bar{E}_\%$  незначительно зависит от используемой нодализационной схемы и для набора экспериментов находится в диапазоне от минус 1,2% до 2,1%,  $\sigma_\%$  не превышает 1,1%. Для мольной доли гелия абсолютное значение  $|\bar{E}_\%|$  не превышает 1% для референтной схемы и 2% для упрощенной, для пара и воздуха не превышает 5% и 8% соответственно. Проведенные аналитические оценки и имеющиеся экспериментальные данные показывают, что различающиеся на порядок величины времени разрушения/дестабилизации стратификации гелия определяются соответствующими (на порядок величины) различиями в

скоростях циркуляции возникающих конвективных течений, которые корректно описываются модулем CONT\_TH.

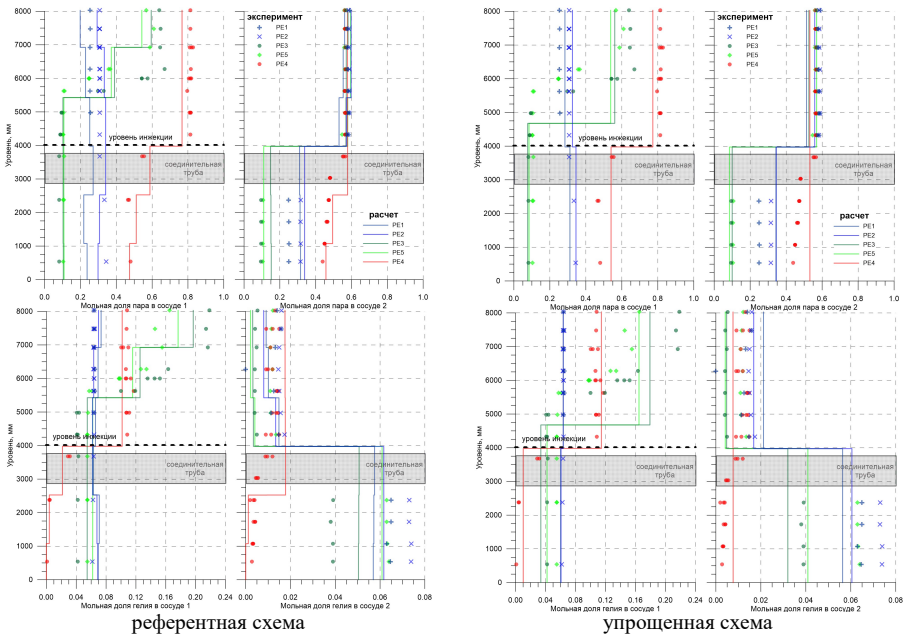


Рисунок 10 – Сравнение экспериментального и расчетного профиля мольных долей пара и гелия по высоте сосудов после стабилизации параметров на фазе IV+

Использованные модели пассивных СБ достаточно универсальны и строятся на описании простых физических процессов – конденсации и теплообмена, приводящих к локальному изменению плотности газа с расчетом импульса, соответствующего положительной или отрицательной плавучести. Моделирование экспериментов показало, что модель форсунки дает хорошие результаты для случаев как с полым, так и заполненным конусом распыла и ее можно рекомендовать для использования в расчетах на АЭС, универсальная модель теплообменника-конденсатора может быть применена к системам СПОТ 30 на АЭС с ВВЭР-1200 и Система Снижения Аварийного Давления ПАТЭС «Ломоносов».

Отметим также несколько важных характеристик моделей CONT\_TH, выгодно отличающих их от «стандартных» LP кодов, предназначенных для описания теплогидравлики ГО. Во-первых, CONT\_TH позволяет прогнозировать стратификацию водяного пара и легкого газа при их поступлении в ГО без специальных стратегий, направленных на моделирование струйных течений. Для примера, нодализационные схемы установки PANDA для LP кодов содержали 80 ячеек для газовой области сосуда 1, 44 ячейки для сосуда 2 и еще 2 ячейки использовались для моделирования соединительной трубы. Модуль CONT\_TH позволяет использовать значительно меньшее количество расчетных ячеек, упрощенная нодализация также воспроизводит динамику изменения давления и состава газовой среды. Во-вторых, модуль CONT\_TH при использовании небольшого количества расчетных ячеек воспроизводит эффект работы имитаторов СБ -

разрушение стратификации верхнего слоя, обогащенного гелием, при работе форсунки и его медленную эрозию в случае работы теплообменника-конденсатора, а также сохранение стратификации при работе ПКРВ (тепловой эффект). Полученные отклонения расчетных значений от измеренных для давления и мольных долей компонентов газовой фазы лежат в пределах отклонений, полученных в рамках проектов ERCOSAM-SAMARA в расчетах по CFD кодам. Это позволяет интерпретировать полученные по модулю CONT\_TH результаты, как приемлемые. В-третьих, как показали результаты проекта ERCOSAM-SAMARA, при использовании «стандартных» LP кодов не удалось получить корректной динамики разрушения стратифицированного слоя легкого газа при работе теплообменника-конденсатора из-за ограничений моделей (таблица 1).

Представленные результаты расчетов по модулю CONT\_TH показывают, что используемая модель течения газа, учитывающая взаимосвязь процессов теплообмена и движения газа на уровне алгоритмов расчета источника импульса (т.е. без выделения дополнительных расчетных ячеек), по своим возможностям описания процессов эрозии стратифицированного слоя ближе к CFD кодам.

**В третьей главе** приведены результаты численного анализа теплогидравлического отклика ГО АЭС с ВВЭР-1000 при ТА, инициированной большой течью теплоносителя первого контура, с использованием разработанного модуля CONT\_TH. Проведено сравнение с результатами расчетов по аттестованному для моделирования распространения, накопления и удаления водорода внутри ГО CFD коду STAR-CCM+. Моделирование по коду STAR-CCM+ было выполнено специалистами ВНИИАЭС.

Разработанная по открытым источникам геометрическая модель не является точной моделью конкретного энергоблока, но содержит в себе основные характеристики ГО ВВЭР-1000 (рисунок 11а). Для упрощения задания граничных условий теплообмен с конструкциями 1 и 2 контуров РУ не моделируется. На рисунке 11б приведено разбиение модели ГО на группы помещений по высотным уровням, а на рисунке 11в – нодализационная схема для модуля CONT\_TH. По степени детализации она соответствует упрощенной схеме для установки PANDA.

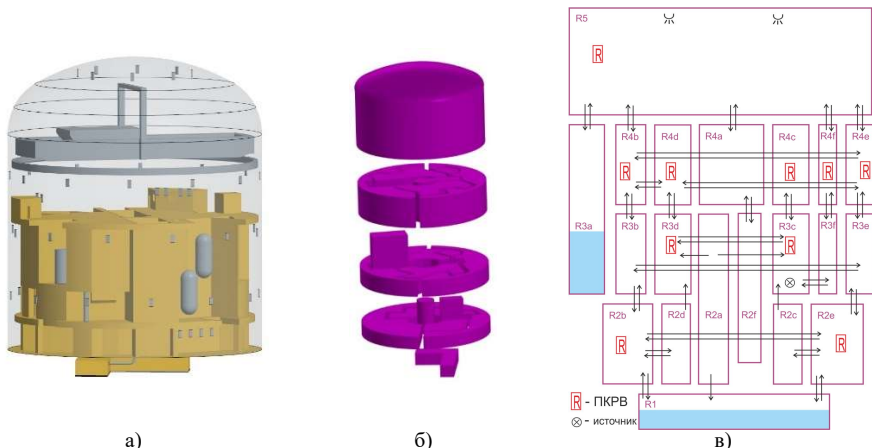


Рисунок 11 – Модель ГО с размещенными ПКРВ (а), ее разбиение на группы помещений (б) и нодализационная схема для модуля CONT\_TH (в)

На первом этапе было проведено численное моделирование ТА по коду СОКРАТ в связке со встроенным модулем CONT\_TH, которое показало, что первичная цель разработки модуля по обеспечению расчетов контурной задачи согласованными граничными условиями по давлению со стороны ГО, выполнена. Для анализа отклика ГО получены источники воды, водяного пара, азота и водорода. Исходным событием ТА постулировалась течь Ду279 из холодной нитки петли №1 в месте врезки трубопровода САОЗ (нижняя часть блока парогенераторов, в расчете по CONT\_TH это помещение R3с на рисунке 11в) при работе энергоблока на номинальной мощности. Дополнительно принят отказ на автоматический запуск ряда активных СБ (САОЗ ВД, САОЗ НД и спринклерная система), остальные системы функционируют. Рассмотрено два варианта развития ТА:

– без мер по управлению аварией (вариант 1, рассмотрено протекание ТА на внутрикорпусной фазе);

– оператор в ручном режиме запускает подачу борированной воды от одного канала САОЗ ВД по факту признаков деградации активной зоны (вариант 2, рассмотрено протекание ТА до захлаживания а.з в корпусе РУ).

На втором этапе выполнялся детальный анализ теплогидравлического отклика ГО по модулю CONT\_TH и сравнение результатов моделирования с CFD кодом. Использовались источники воды, пара, азота и водорода в ГО, полученные на первом этапе; они показаны на рисунке 12.

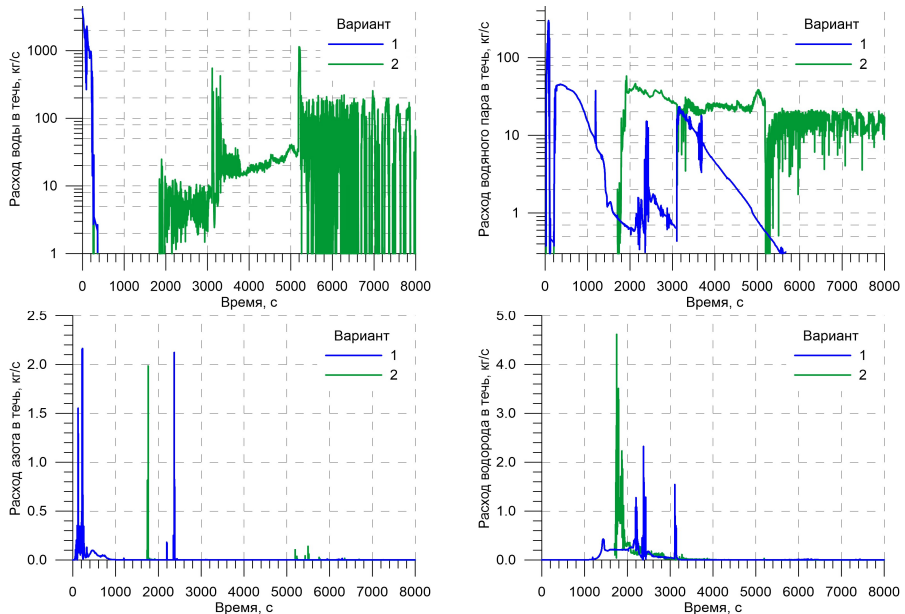


Рисунок 12 – Источники теплоносителя и неконденсируемых газов из 1-го контура в ГО

Поведение источников обусловлено развитием ТА. На начальной фазе (0÷60 с) в ГО поступает перегретая пароводяная смесь, затем при работе ГЕ САОЗ - насыщенная и недогретая вода. После 370 с истечение переходит на чисто паровое, по мере осушения и разогрева верхней части а.з. к источнику пара добавляется водород, образовавшийся при окислении оболочек ТВЭЛОВ.

Его мольная доля постоянно растет, что обусловлено ростом температур в а.з., пики расхода связаны с локальным перемещением расплава вниз (в воду). В варианте 1 через ~3000 с от исходного события расплав полностью перемещается на днище корпуса РУ с сопутствующим выкипанием воды. При подключении оператором подачи воды в первый контур от САОЗ ВД (1700 с, вариант 2) до момента начала расхолаживания а.з. в ГО поступает преимущественно пароводородная смесь, затем истечение переходит на пароводяное. В целом условия разрушения активной зоны в ходе данной ТА близки к условиям проведения экспериментов CORA и PARAMETER, направленных на изучение деградации сборок и выход водорода при ТА, включая повторный залив. Основные тенденции в динамике генерации водорода в аварии и экспериментах соответствуют друг другу.

В расчетах по модулю CONT\_TH и CFD коду эти источники использовались как граничные условия, при этом зависимости расходов и энтальпий задавались в табличном виде.

На рисунке 13а сопоставлена динамика изменения давления в ГО, полученная по двум кодам. Сразу после образования течи резкий рост давления вызван преобладанием источника пара над его конденсацией. Затем, по мере снижения интенсивности источника, с задержкой на транспорт и перемешивание среды, давление в ГО снижается на интервале 110÷450 с. Небольшие отличия в расчетных кривых давления связаны с равновесным подходом к формированию источника пароводяной смеси в CFD коде. Повторный кратковременный рост давления на ~800 с связан с интенсивным (более 20 кг/с) поступлением пара. Для варианта 1 еще один кратковременный рост давления также обусловлен значительным источником. В варианте 2 к росту давления после 1800 с приводит увеличение выброса пара, связанное с расхолаживанием расплава и элементов первого контура. В целом кривые, рассчитанные по обоим кодам, близки друг к другу, отличия не превышают паспортной погрешности расчетов давления (показаны на рисунке для обоих кодов). Среди наиболее важных явлений, влияющих на динамику изменения давления в ГО в рассматриваемой ТА, можно выделить пристеночную конденсацию пара и конвективное перемешивание среды.

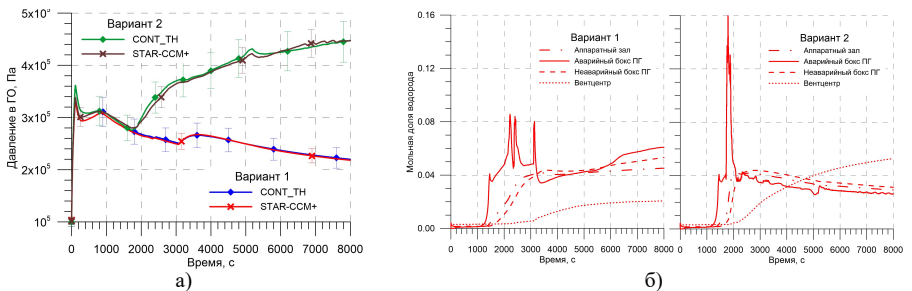


Рисунок 13 – Давление в ГО (а) и динамика изменения мольной доли водорода (б)

При разогреве оболочек выше 1500 К от 0,5 до 0,9 мольной доли газовой фазы, поступающей в ГО, составляет водород. Для варианта 1 поступающая легкая пароводородная смесь заполняет нижнюю и верхнюю части аварийного бокса парогенераторов (помещения R3с и R4с на рисунке 11в), а затем через помещение компенсатора давления (R3f и R4f) поступает в аппаратный зал (R5), вытесняя воздух в нижнюю часть ГО (рисунок 13б). После прогрева



строительных конструкций аварийного бокса образуется поток газа в неаварийный бокс (помещения R3d и R4d) и далее в верхнюю часть кольцевого коридора (R4e). На нижний уровень ГО (помещения R2) водород почти не поступает.

Распределение водорода и водяного пара в помещениях ГО по двум кодам на момент окончания истечения водорода из первого контура (вариант 1) приведено на рисунке 14. В целом результаты расчетов близки. Оба кода показывают две зоны в распределении водорода по ГО – зона преимущественной аккумуляции водорода, охватывающая помещения на уровне источника и выше, и нижняя зона с его малым содержанием. Распределение водорода в пределах зон достаточно равномерное. Различия в мольной доле водорода между кодами укладываются в паспортную погрешность модуля CONT\_TH. В нижних помещениях (вентцентр R2c и R2d, кольцевой коридор R2b и R2e) доля водорода мала и не превышает 0,02 в расчетах по обоим кодам. Различия в локальной мольной доле водяного пара между кодами не превышает 0,1. Это также находится в пределах паспортных значений погрешностей с учетом среднеквадратичного отклонения.

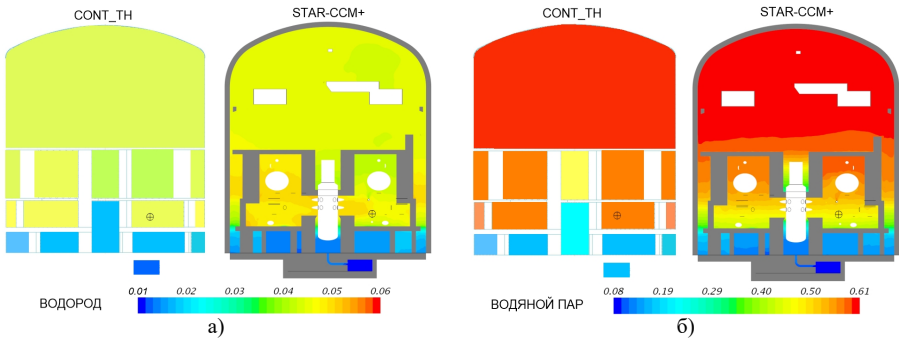


Рисунок 14 – Распределение мольных долей на 5000 с (вариант 1)

Для варианта 2 распределение состава среды по двум кодам также хорошо совпадают между собой. На момент полного расхолаживания РУ (~7500 с) оба кода прогнозируют инверсное распределение - в нижних помещениях ГО мольная доля водорода в 1,5÷2 раза выше, чем в аппаратном зале (рисунок 15а). Это обусловлено конденсацией на развитой поверхности стен и оборудования в нижних помещениях. Снижение мольной доли водорода на уровне инъекции и выше, напротив, происходит за счет поступления в ГО значительного количества пара при повторном заливе и расхолаживании а.з. Плотность газовой фазы здесь оказывается ниже, чем в верхней из-за того, что поступающий пар имеет высокую температуру. Нормальное по плотности расслоение газовой фазы препятствует развитию циркуляции по всему объему ГО. Мольная доля пара в верхней части ГО в этом варианте развития ТА составляет ~0,8 (рисунок 15б), а в нижней (в зависимости от помещения и кода) от 0,2 до 0,4.



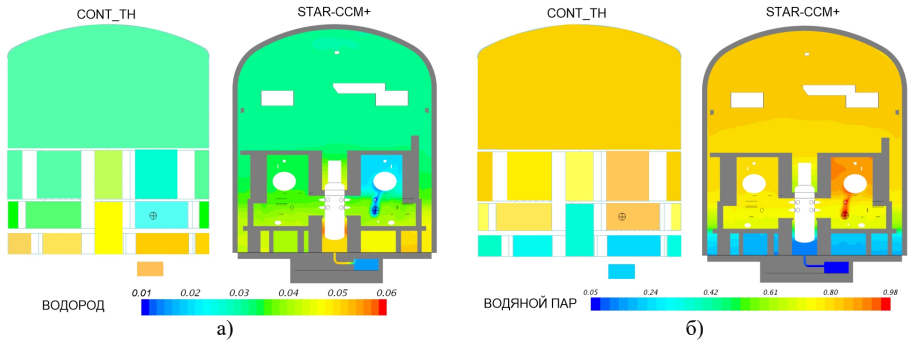


Рисунок 15 – Распределение мольных долей на 7500 с (вариант 2)

На третьем этапе проведен анализ влияния СБ на поведение давления в ГО, перемешивание водорода и эффективность его удаления ПКРВ с источниками для варианта 1 (рисунок 12). Рассмотрено подключение спринклерной системы по уставке давления в 1,3 атм, а также работа 96-ти ПКРВ типа РВК-1000. Расчеты по модулю CONT\_TH показывают, что влияние работы ПКРВ на давление в ГО незначительно (рисунок 16а) – уменьшение количества молей газа компенсируется его нагревом. Расход водорода в источнике рассматриваемой ТА выше суммарной производительности ПКРВ, поэтому уменьшение его массы начинается только после окончания работы источника (рисунок 16в). Работа спринклерной системы в ГО приводит не только к снижению давления, но и обеспечивает гомогенизацию атмосферы почти во всех помещениях. Это видно из сравнения распределений мольных долей водорода на рисунках 14а и 16б. Перемешивание газа и рост мольной доли водорода при работе спринклерной системы действуют в направлении повышения эффективности удаления водорода ПКРВ (рисунок 16в).

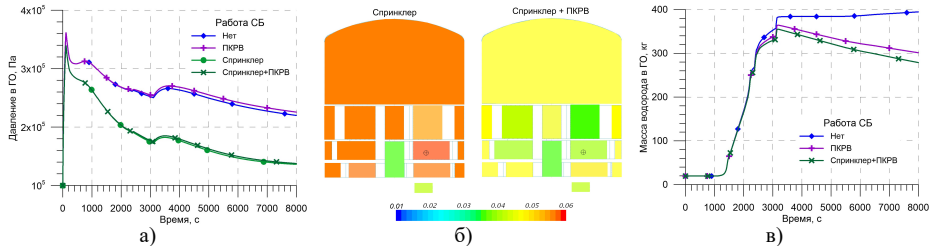


Рисунок 16 – Влияние работы СБ на давление (а), распределение (б) и количество водорода (в)

Таким образом, достигнута цель разработки модуля CONT\_TH – выполнен согласованный расчет ТА для РУ и ГО по коду СОКРАТ.

Результат анализа расчетов модельной задачи, проведенных с последовательным усложнением конфигурации систем безопасности, показал, что модуль CONT\_TH обеспечивает разумный теплогидравлический отклик ГО на источники, образующиеся в ходе протекания ТА. При ТА, вызванной большой течью Ду279 из первого контура, в распределении водорода по системе связанных помещений ГО можно выделить две зоны с границей приблизительно по уровню расположения источника. Преимущественная аккумуляция водорода в верхней части ГО при отсутствии мер по управлению аварией обусловлена плавучестью поступающей водородсодержащей смеси.

При повторном заливе активной зоны распределение водорода принимает инверсный характер за счет поступления горячего пара и продолжающейся конденсацией в нижних помещениях ГО. Крупномасштабные контуры циркуляции не развиваются, поскольку импульс источника мал, а распределение плотности газа и его температуры по высоте ГО нормально. Инверсная стратификация легкого газа наблюдалось экспериментально, например, в сосуде 2 в экспериментах на установке PANDA, хотя там она была вызвана перетеканием холодной обогащенной гелием смеси. Работа спринклерной системы вызывает перемешивание не только в аппаратном зале, но и за счет плотностного эффекта при частичной конденсации пара и охлаждении газа - по всем помещениям ГО. Это согласуется с результатами эксперимента на установке NUPEG (модель ГО PWR в масштабе 1:4) в международной стандартной задаче по перемешиванию и распространению водорода.

Результаты расчетов динамики изменения давления и распределения пара и водорода по помещениям ГО, полученные по модулю CONT\_TH и аттестованному CFD коду STAR-CCM+ близки.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ**

В настоящей диссертационной работе решена научно-техническая задача разработки модуля численного анализа теплогидравлического отклика атмосферы ГО для кода СОКРАТ. Данная разработка имеет существенное значение для обеспечения предприятий атомной отрасли отечественным расчетным инструментом, позволяя выполнять согласованный расчет протекания ТА в системе первый контур – ГО на АЭС с водяным теплоносителем.

В результате выполненной работы решены задачи диссертационного исследования:

- проведен анализ и выбраны модели теплогидравлических процессов для реалистичного описания поведения давления, температуры и состава газовой среды, включая стратификацию и ее разрушение с сохранением характерного времени протекания процессов на малом количестве расчетных ячеек;

- разработана универсальная модель спринклерной форсунки, учитывающая перемешивание среды каплями спрея и взаимодействие газокапельной среды со стенами помещений;

- проведена интеграция разработанного модуля CONT\_TH в код СОКРАТ;

- проведена валидация модуля на экспериментальных данных высокого пространственного разрешения в части поведения давления и изменения состава газовой среды в ГО, при работе активных и пассивных СБ, применяемых для смягчения последствий ТА;

- разработана нодализационная схема ГО АЭС с ВВЭР-1000, проведена ее апробация в составе кода СОКРАТ с получением источников для модельной ТА;

- для ряда сценариев ТА по модулю CONT\_TH получен теплогидравлический отклик ГО, проведено его сопоставление с имеющимися экспериментальными данными и с результатами расчетов по аттестованному CFD коду.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Томашик Д.Ю. Модуль CONT TH для расчета теплогидравлических параметров защитных оболочек РУ с водяным теплоносителем //Сборник

- тезисов докладов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2024)», — Обнинск: АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2024. – 186 с.
2. F. Mascari, D.Y. Tomashchik et al, OECD/NEA/CSNI/WGAMA PERSEO benchmark: Main outcomes and conclusions, Nuclear Engineering and Design 405 (2023) 112220.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612912 Российская Федерация. Система сквозного моделирования развития аварийных процессов и параметров радиационной обстановки в СЗЗ и ЗН АЭС в случае тяжелых запроектных аварий на АЭС с выходом радиоактивных веществ в атмосферу (ERCARD). Версия 2.0: № 2023610969: заявл. 19.01.2023: опублик. 08.02.2023 / Т.А. Юдина, А.Л. Фокин, В.А. Томащук [и др.].
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662893 Российская Федерация. RELTRAN. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ГАЗООБРАЗНОЙ ФОРМЕ. ВЕРСИЯ 1.0.: № 2023662040: заявл. 08.06.2023: опублик. 16.06.2023 / Томащук Д.Ю., Киселев А.Е., и др.
5. V. B. Morozov, A. E. Kiselev, A. A. Kiselev [et al.] Issues of Safety Assessment of New Russian NPP Projects in View of Current Requirements for the Probability of a Large Release // Nuclear Technology. – 2021. – Vol. 207, No. 2. – P. 204-216.
6. NUMERICAL ASSESSMENT OF PARAMETER-SF1 TEST ON OXIDATION AND MELTING OF LWR FUEL ASSEMBLY UNDER TOP FLOODING CONDITIONS Tomashchik D.Y., Dolganov K.S., Kiselev A.E., Ryzhov N.I., Yudina T.A. Nuclear Engineering and Design. 2020. Т. 369. С. 110852.
7. POST-TEST ANALYSES OF THE CORA-15 BUNDLE TEST WITH THE SYSTEM CODES ATHLET-CD AND SOCRAT Stuckert J., Austregesilo H., Bals C., Hollands T., Kiselev A., Tomashchik D., Yudina T. Nuclear Engineering and Design. 2019. Т. 342. С. 320-335.
8. Киселев А.Е., Долганов К.С., Томащук Д.Ю., Бакин Р.И., Киселев А.А., Красноперов С.Н. Расчетный комплекс для задач обоснования безопасности АЭС при запроектных тяжелых авариях / В сборнике: МНТК-2018 Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. Пленарные и секционные доклады. 2018. С. 381-385.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661573 Российская Федерация. «Программа для численного моделирования тяжелых запроектных аварий, включая образование и перенос радиоактивных веществ, на реакторных установках корпусного типа с водой под давлением типа ВВЭР «СОКРАТ/ВЗ»: № 2017615707 : заявл. 14.06.2017 : опублик. 17.10.2017 / Л. А. Большов, М. А. Затевахин, Л. Э. Лебедев [и др.] ; заявитель АО «Концерн Росэнергоатом», ИБРАЭ РАН, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», АО «АТОМПРОЕКТ».
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010610562 Российская Федерация. Программа для численного моделирования внутрикорпусной стадии запроектных аварий на реакторных установках с водой под давлением (СОКРАТ-В1/В2) : № 2009617416 : заявл. 22.12.2009 : опублик. 14.01.2010 / В.Ф. Стрижов, К.С. Долганов, С.В. Цаун [и др]; владелец: Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий «Атомпроект».

Томашик Дмитрий Юрьевич

Модуль CONT\_TH для расчета теплогидравлических параметров атмосферы в герметичном ограждении РУ с водяным теплоносителем при тяжелых авариях

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 10.07.2024  
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 100 экз.  
Печать на аппарате Rex-Rotary.  
ИБРАЭ РАН. 115191, Москва, ул. Б.Тульская, 52  
Телефон: 8-495-955-22-66