

ОТЗЫВ

официального оппонента к.т.н. доцента Казанцева Анатолия Александровича на диссертационную работу Томащика Дмитрия Юрьевича «Модуль CONT_TH для расчета теплогидравлических параметров атмосферы в герметичном ограждении РУ с водяным теплоносителем при тяжелых авариях», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность»

Диссертационная работа Д.Ю. Томащика посвящена исследованию вопросов, связанных с моделированием тяжелых аварий в герметичном ограждении в рамках расчётного обоснования и анализа безопасности водо-водяных реакторов. Добиться повышения скорости работы и точности моделирования можно путем улучшения моделей оборудования, а в интегральных мультифизических пакетах программ типа СОКРАТ улучшения можно добиться синхронизацией основных переменных между отдельными компонентами, синхронизацией расчета свойств теплоносителя и производных теплофизических и транспортных свойств. В результате улучшается скорость работы интегрального кода состоящего из многих кодов в сосредоточенных параметрах.

При рассмотрении запроектных аварий, включая тяжелые аварии (ТА) важно моделировать изменение газового состава атмосферы ГО, особенно динамику водорода, влияющего на пожаро - взрывобезопасность. Согласно требований НП-040-02 для ВВЭР необходимо моделировать динамику более десятка явлений разной физической природы. На изменение концентрации водорода в ГО влияют длительные источники радиолиза воды в негерметичной активной зоне (АЗ) и бассейне выдержки (БВ). Источники H_2 это парациркониевая реакция, реакция пара с железом, водяные смеси с гидразином из САОЗ, радиолиз воды в прямках, срабатывание локализирующих систем безопасности (ЛСБ). Всё оборудование заливается смесями борной кислоты с большими концентрациями гидразин-гидрата. В результате термолиза и радиолиза гидразин разлагается на аммиак и оба компонента быстро разлагаются, выделяя много водорода. Уменьшение концентрации водорода идет при работе пассивных каталитических рекомбинаторов водорода (ПКРВ). Конденсация водяного пара при срабатывании спринклерной системы дает скачок концентрации водорода, что может привести к дефлаграции или детонации водорода. При ТА идет реакция корнума с бетоном с выходом водорода. Контейментные коды должны либо моделировать эти явления, либо учитывать их как источники водорода.

При моделировании выхода РВ в ГО из негерметичной АЗ существенное влияние оказывает моделирование доли вышедших радиоактивных благородных газов (РБГ) и состав радионуклидов, определяющих радиолиз пара в помещениях ГО.

ТА необходимо моделировать на протяжении длительных интервалов времени, порядка месяца, что приводит к необходимости иметь высокую скорость работы пакета программ СОКРАТ с включенными в расчет программными модулями.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

Впервые разработан и численно реализован модуль для расчета теплогидравлических параметров ГО реакторов с водяным теплоносителем в составе интегрального кода СОКРАТ. 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.

О достоверности результатов и обоснованности положений, выводов и рекомендаций диссертационного исследования свидетельствуют следующие факты:

- использование 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.

Практическая значимость результатов исследования заключается в следующем:

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.

Связывание 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.

Личный вклад соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, определяется его непосредственным участием в основной части представленных исследований.

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 матрицы 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.

Структура диссертации.

Материалы диссертации изложены на 120 страницах, включая 44 иллюстрации и 31 таблицу. Диссертация обладает внутренним единством и состоит из введения, трех глав, заключения и перечня литературных источников (73 позиций).

Во введении сформулированы цели и задачи работы, представлены защищаемые положения, личный вклад автора научная новизна и данные о практической ценности, достоверности обоснованности и апробации полученных результатов.

В первой главе приведено описание модели, предназначенной для расчета изменения во времени параметров ГО. Используется подход с сосредоточенными параметрами, записываемый с помощью системы дифференциальных уравнений Основными переменными системы, разработанной для совместного расчета с тепло - гидравлическим модулем РАТЕГ выбраны: $\alpha_g, P, h_g, h_f, V_g, X_1, \dots, X_N$ объёмная доля газа, давление, энтальпия газовой смеси, энтальпия воды, скорость газа, массовые доли газов в смеси. Из системы 6 уравнений сохранения РАТЕГ, включающие законы сохранения массы, энергии и импульса для фаз воды и газа исключено уравнение сохранения импульса для воды и скорость воды. Вместо них используется балансная модель перетечек конденсата. В итоге в модуле CONT_TH имеется 5 основных уравнений плюс N уравнений сохранения массы для N неконденсируемых компонент газовой смеси.

Новое решение соискателя состоит в том, что для ускорения работы интегрального кода синхронизированы методики расчета свойств воды и пара, включая метастабильную область свойств, используемую для расчета истечения при авариях. Синхронизированы все основные переменные систем уравнений модулей РАТЕГ и CONT_TH, а также методы решения систем линеаризованных уравнений. Это позволило выполнить согласование расчетных шагов по времени. В результате удалось повысить устойчивость решения, ускорить сходимость и снизить время расчета.

Так как численное решение не дает строгого выполнения закона сохранения, применена двухшаговая численная методика. После расчета шага по времени выполняется коррекция масс в каждом объеме для выполнения баланса массы в каждой ячейке. Такой подход известен в коде TRAC как двухшаговая схема, в которой решаются 6 уравнений законов сохранения, а затем для каждого уравнения корректируются масса и другие интегралы в каждой расчетной ячейке. Соискатель ограничился коррекцией сохранения массы. Это новое для отечественных численных схем уточнение решения.

Код СОКРАТ включает модули с разной физикой, что приводит к увеличению функциональных возможностей контейментного модуля CONT_TH путем совместного расчета. Для расчета распределения водородосодержащих смесей по помещениям ГО модуль CONT_TH выполняет расчеты в связанной постановке с теплогидравлическим модулем РАТЕГ что улучшает его возможности и точность решения за счет обратных связей по давлению. Имеются модули с генерацией радионуклидов в активной зоне, модели разрушения оболочек твэлов, модули переноса РВ из контура теплоносителя в ГО. Расчет синхронизирован с модулем CONT_FP, что повышает функционал контейментного кода, обеспечивая возможность расчета динамики поведения аэрозолей.

Во второй главе диссертации автором выполняется верификация и валидация контейментного модуля CONT_TH интегрального кода СОКРАТ. В главе анализируются возможности моделей CONT_TH описывать теплогидравлические процессы в ГО, возникающие при ТА. Верификация выполняется с использованием современных экспериментов PE1÷PE5 на установке PANDA, проведённых по линии сотрудничества Евратом-Росатом в период 2010-2014 гг. Расчетные и измеренные профили показывают хорошее совпадение, с учетом дисперсии экспериментальных данных.

В главе показано, что числа подобия для РУ ВВЭР-1000 и в эксперименте на установке PANDA перекрываются. Исследованы критерии стратификации в подкупольном пространстве для распространения струи легкого газа в плотной среде критерий (Jirka G.H.) Йирка и критерий Ханта (Hunt G.R.) , который учитывает влияние боковых ограничивающих поверхностей на развитие возвратных течений вдоль стен и рециркуляции потоков. Для РУ ВВЭР-100 и PANDA показано, что выполняются критерии устойчивости стратификации (критерии Йирка, Ханта) на фазе поступления струи легкого газа.

Для количественного сравнения использовалось относительное среднее отклонение $\bar{E}_\%$ и соответствующее ему среднеквадратическое отклонение $\sigma_\%^\square$. 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%, $\sigma_\%^\square$ 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

В третьей главе продемонстрирована кросс-верификация моделей интегрального кода СОКРАТ и CFD кодом STAR-CCM+ на базе расчета с опытными данными для верификации CFD кодов. 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.

В заключении диссертации подведены итоги и перечислены основные результаты выполненной работы.

Материалы диссертации изложены Д.Ю. Томащиком в достаточно полной мере в 11 публикациях, включая 3 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

К диссертационному исследованию имеются следующие замечания.

1. Во введении написано: «в случае большой течи, давление в ГО в значительной мере определяет динамику осушения и разогрева а.з.». Это неполное описание. Необходимо учитывать не менее двух стадий истечения. На начальной стадии течи при критическом истечении со скоростью звука из-за запираания канала при критическом истечении давление в ГО никак не влияет на динамику течи. Влияние давления в ГО начинается после момента снижения давления в АЗ с номинального 160 бар до ~2 бар при переходе на режим дозвукового истечения. Давление в ГО начинает влиять спустя некоторое время, когда перенос потока из ГО в АЗ возможен в обе стороны при колебаниях направления потока паро газо капельной смеси из 1 контура в ГО и обратно.

2. В первой главе традиционно выполняется обоснование задач исследования с учетом текущей проблематики моделирования тяжелых аварий на РУ ВВЭР. Необходимость создания кода CONT_TH была связана с тем, что в ходе эксплуатации СОКРАТ обнаружилась техническая проблема. Во включенных в ПП СОКРАТ ранее двух обычных контейментных кодах ANGAR и КУПОЛ-М используются свойства воды и пара в равновесном приближении, а в контурном теплогидравлическом модуле РАТЕГ для расчета течи используются свойства воды в метастабильном состоянии. В итоге наблюдалась плохая сходимость. Для устранения этой технической проблемы был разработан контейментный модуль CONT-TH. Новое решение заключается во введении согласованных метастабильных свойств воды в режиме течи для модулей РАТЕГ и CONT_TH. Система уравнений CONT_TH получена путем упрощения системы уравнений РАТЕГ, то есть все основные переменные одинаковы. Устранен ранее необходимый пересчет из объёмных в массовые доли для всех газовых компонент. Соискатель опустил в первой главе доказательство существования «белого пятна», которое закрывается его работой и сразу перешел к уравнениям.

3. Существует отчет о верификации и валидации пакета программ СОКРАТ-В1/В2, включающий тестирование модуль CONT_TH. Однако при подготовке текста диссертации рассмотрена часть верификационных результатов. Не показана общая картина, какие явления кодом учитываются и какие из них проверены путем представления матрицы верификации процессов и явлений.

4. Раздел 1.4.2 написано «Объёмный источник тепла в воду прямка». Неточная фраза. Формула (1.39) с коэффициентом теплоотдачи, то есть в объём воды поступает путем конвекции тепло с поверхности воды (это не объёмный источник).

5. Так как конечно-разностный метод дает приближенное решение, без строгого выполнения законов сохранения, то в первой главе применена двухшаговая численная схема, для каждой расчетной ячейки выполняется коррекция массы на основании уравнения баланса массы. Такой подход известен в коде TRAC (США) как двухшаговая численная схема. Решаются 6 уравнений законов сохранения, а на втором шаге записываются балансные упрощенные уравнения и для каждой ячейки корректируются масса, импульс и энергия каждой фазы. Соискатель корректирует массу, но не дошел до коррекции других законов сохранения, например коррекции энтальпии на основе баланса энергии.

6. По оформлению диссертации и автореферата имеются следующие замечания:

- в тексте имеются опечатки, например в главе 2. «использовалъся гелий» - лишние буквы;

- автором используются словосочетания, не являющиеся общепринятыми терминами. В разделе 1.2 «Методика построения расчетных схем» написано «Для изменения энергосодержания каждой фазы». Технический термин «энтальпия», который в российской литературе называется «теплосодержание» здесь корректнее.

- в списке литературы не рассмотрены «свежие» публикации других авторов по теме исследования.

Эти замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации. Диссертация Д.Ю. Томащика представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Изложенный в ней материал научно обоснован, а его использование в практике обоснования безопасности с РУ ВВЭР вносит вклад в повышение безопасности АЭС с ВВЭР и в повышение конкурентоспособности технологии РУ ВВЭР.

Автореферат отражает основные положения диссертационной работы.

Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность».

Диссертация «Модуль CONT_TH для расчета теплогидравлических параметров атмосферы в герметичном ограждении РУ с водяным теплоносителем при тяжелых авариях» отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, с последующими изменениями, а автор диссертации Томащик Дмитрий Юрьевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник,

Кандидат технических наук

А.А. Казанцев

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико – энергетический институт имени А.И. Лейпунского (АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»)

Электронная почта: akazancev@ippe.ru

