

На правах рукописи



Шмельков Глеб Борисович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АНАЛИЗУ ПОЗДНЕЙ СТАДИИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА АЭС С
ВВЭР**

Специальность 2.4.9. Ядерные энергетические установки,
топливный цикл, радиационная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА - 2026

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

Научный руководитель: **Мельников Иван Александрович**, кандидат технических наук, начальник Отдела исследования тяжелых аварий НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

Официальные оппоненты: **Герасимов Денис Николаевич**, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой Инженерной теплофизики имени В.А. Кириллина Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва

Морозов Андрей Владимирович, доктор технических наук, ученый секретарь акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», г. Обнинск

Ведущая организация: «Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова», г. Сосновый Бор, Ленинградская область

Защита диссертации состоится 9 июня 2026 г., начало в 14:00, на заседании диссертационного совета 02.1.003.08 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте <https://www.nrcki.ru>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 02.1.003.08
кандидат физико-математических наук



Д.А. Шкаровский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В рамках обоснования безопасности АЭС с ВВЭР демонстрируется ограниченность радиационного воздействия на окружающую среду не только в ходе проектных и гипотетических запроектных аварий, но и аварий с плавлением топлива – тяжелых аварий. На поздней фазе тяжелой аварии (ТА) на АЭС с ВВЭР в нижней части корпуса реактора прогнозируется формирование ванны высокотемпературного расплава. Температура расплава, состоящего из материалов активной зоны и конструкционной стали, в отсутствие эффективного охлаждения превышает 2000°С. При таких температурах теплообмен излучением вносит существенный вклад в процесс теплопередачи от расплава к окружающим конструкциям реакторной установки (РУ), интенсивное тепловое излучение может приводить к нагреву и оплавлению элементов РУ. На внутрикорпусной стадии ТА стекание расплавленных элементов внутрикорпусных устройств в расплав изменяет не только его фазовый состав, но и определяет теплоотдачу, ускоряя процесс разрушения корпуса реактора. На внекорпусной стадии ТА учет теплообмена излучением не менее важен, например, для определения теплового состояния устройства локализации расплава или оценки степени повреждения шахты реактора. Анализ хода протекания ТА осложняется необходимостью одновременного учета большого количества взаимосвязанных физико-химических и теплофизических процессов, для моделирования каждого из которых обычно используется отдельная расчетная модель. Так, например, определение динамики нагрева и плавления конструкций РУ за счет теплового излучения с поверхности расплава осуществляется путем решения задачи теплообмена излучением, реализованного в специализированной модели. Среди всего множества факторов, характерных для поздней фазы ТА на АЭС с ВВЭР и подлежащих учету в ходе решения, целесообразно отметить следующие специфические особенности рассматриваемой задачи:

1. Сложная геометрия конструкции РУ и герметичного ограждения (ГО) с наличием затеняющих друг друга поверхностей;
2. Изменение геометрии конструкции в ходе протекания ТА вследствие воздействия теплового излучения;
3. Существенное неоднородное распределение температуры по поверхностям конструкции РУ;
4. Присутствие парогазовой смеси (ПГС) в объеме над расплавом, для которой характерно поглощение и испускание излучения.

В настоящее время моделирование теплообмена излучением в ряде расчетных кодов, применяемых для анализа поздней фазы ТА, осуществляется со значительными упрощениями. В первом приближении теплообмен излучением моделируется с помощью модели двух серых тел, позволяющей рассчитывать испускаемый от ванны расплава тепловой поток излучением к

абстрактной поверхности с заданной температурой (код ГЕФЕСТ-УЛР). В ряде расчетных кодов (RELAP/SCDAP, СОКРАТ-B1/B2, ASTEC) теплообмен излучением моделируется в приближении оптически-прозрачной среды в объеме расчетной области, заданной в осесимметричной постановке. Способы расчета теплообмена излучением в присутствии ПГС, как правило, ограничиваются использованием приближения серого газа и приближения диффузии излучения, что также не позволяет в полной мере учесть эффекты поглощения и испускания излучения в объеме газа.

Согласно рекомендациям российского регулятора и МАГАТЭ, моделирование процессов, сопровождающих ТА, должно выполняться в реалистическом приближении. С учетом имеющихся существенных упрощений в современных расчетных моделях разработка расчетной методики, предназначенной для моделирования теплообмена излучением применительно к описанной задаче, является актуальной научной и практической задачей.

Цели и задачи. Целью работы является разработка расчетной методики, предназначенной для моделирования теплообмена излучением применительно к анализу поздней фазы тяжелой аварии на АЭС с реактором ВВЭР, а также ее реализация в виде отдельной программы для ЭВМ. В методике должна быть реализована поддержка трехмерной расчетной области с учетом возможного затенения поверхностей, а также возможность моделирования теплообмена излучением как в оптически-прозрачном объеме над расплавом, так и в объеме, заполненном парогазовой смесью с составом, характерным для условий тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Проведен анализ современного состояния вопроса моделирования теплообмена излучением, по результатам которого были отобраны численные методы, наиболее подходящие для расчета теплообмена излучением на поздней фазе ТА на АЭС с ВВЭР;
2. Разработана оригинальная расчетная методика для моделирования теплообмена излучением в трехмерной расчетной области с учетом возможного затенения поверхностей и присутствия ПГС в расчетной области, поглощающей и испускающей излучение с учетом дискретного характера спектра поглощения газов, применительно к анализу поздней фазы ТА на АЭС с ВВЭР. Методика реализована в виде программы для ЭВМ «THERA» на языке программирования C++;
3. Проведена верификация разработанной программы для ЭВМ «THERA», на аналитических и модельных задачах, а также ее валидация на экспериментальных данных;
4. Получены результаты расчетного исследования влияния эффекта затенения и теплофизических параметров ПГС с учетом дискретного характера спектра поглощения газов на распределение плотности теплового потока результирующего излучения в трехмерной расчетной

области применительно к поздней фазе ТА на АЭС с ВВЭР. С помощью программы для ЭВМ «THERA» были получены результаты для следующих прикладных задач:

- Расчетный анализ процесса внутрикорпусного удержания расплава при ТА на АЭС с реактором ВВЭР-С;
- Расчетный анализ процесса локализации расплава в УЛР проектов АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ на внекорпусной стадии ТА на АЭС с реактором ВВЭР-1200;
- Расчетный анализ процесса взаимодействия расплава с бетоном (в шахте реактора) на внекорпусной стадии ТА на АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-320).

Научная новизна. В результате настоящей работы были получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана оригинальная расчетная методика, позволяющая осуществлять моделирование теплообмена излучением в трехмерной расчетной области (с учетом затенения) применительно к анализу поздней фазы ТА на АЭС с ВВЭР в оптически-прозрачной среде и с учетом наличия ПГС, поглощающей и испускающей излучение, принимая во внимание дискретный характер спектра поглощения газов. Для разработанной расчетной методики получены результаты верификации на аналитических и модельных задачах и результаты валидации на экспериментальных данных. Расчетная методика реализована в программе для ЭВМ «THERA» на языке программирования C++;

2. Впервые получены результаты расчетного исследования влияния эффекта затенения на распределение плотности теплового потока результирующего излучения в трехмерной расчетной области, описывающей конструкцию нижней части реактора ВВЭР-С, УЛР проектов АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ и шахты реактора ВВЭР-1000 (В-320), применительно к анализу ТА на АЭС с ВВЭР;

3. Впервые получены результаты расчетного исследования влияния теплофизических параметров ПГС с учетом дискретного характера спектра поглощения на распределение плотности теплового потока результирующего излучения в трехмерных реалистических расчетных областях, описывающих конструкцию нижней части реактора ВВЭР-С, УЛР проектов АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ и шахты реактора ВВЭР-1000 (В-320) применительно к анализу внутрикорпусной и внекорпусной стадий ТА на АЭС с ВВЭР;

4. Впервые получены результаты расчетного исследования воздействия теплового излучения с поверхности расплава на конструкции тепловых защит и фермы-консоли в трехмерной расчетной области применительно к анализу процесса локализации расплава в УЛР проекта АЭС-2006 и в УЛР проекта ВВЭР-ТОИ;

5. Впервые получено распределение плотности теплового потока результирующего излучения на термомеханический элемент (ТМЭ) клапана подачи воды (КПВ) в трехмерной

расчетной области применительно к анализу процесса локализации расплава в УЛР проекта ВВЭР-ТОИ.

Практическая значимость работы.

Разработанная расчетная методика, реализованная в программе для ЭВМ «THERA», позволяет осуществлять моделирование теплообмена излучением на поздней стадии ТА на АЭС с реакторами ВВЭР в трехмерной расчетной области в приближении оптически-прозрачной среды, а также с учетом наличия ПГС, поглощающей и испускающей излучение в объеме расчетной области, принимая во внимания дискретный характер спектра поглощения газов. Величины плотностей тепловых потоков результирующего излучения, полученные с использованием расчетной методики, могут быть использованы для разработки исходных данных для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР на поздней фазе ТА – при анализе динамики нагрева и оплавления конструкций РУ за счет теплового излучения при внутрикорпусном удержании расплава и последующем уточнении состава ванны расплава, при обосновании целостности оборудования УЛР, включая анализ срабатывания ТМЭ КПВ, предназначенного для дополнительной подачи воды на поверхность расплава, а также для анализа напряженно-деформированного состояния строительных конструкций шахты реактора. Важность корректного расчета теплообмена на ТМЭ КПВ излучением также обуславливается тем, что срабатывание КПВ осуществляется пассивным способом — за счет достижения критериальной температуры ТМЭ непосредственно вследствие нагрева элемента тепловым излучением от поверхности расплава.

Разработанная расчетная методика применялась при выполнении договорных работ, включая НИР, для расчета распределения плотности теплового потока результирующего излучения. Результаты выполненных расчетов использовались в качестве исходных данных генеральным конструктором реакторных установок и генеральным проектировщиком атомных станций при разработке технических решений и лицензировании для следующих энергоблоков: Курская АЭС-2 (энергоблок № 1), НВАЭС-2 (энергоблоки № 6 и № 7), Кольская АЭС-2.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная расчетная методика, предназначенная для моделирования теплообмена излучением с поверхности расплава в трехмерной расчетной области применительно к анализу протекания поздней фазы ТА на АЭС с ВВЭР в оптически-прозрачной среде, а также с учетом наличия ПГС, поглощающей и испускающей излучение в объеме расчетной области, принимая во внимание дискретный характер спектра поглощения газов;

2. Программа для ЭВМ «THERA», в которой реализована оригинальная расчетная методика;

3. Результаты верификации расчетной методики на модельных и аналитических задачах и ее валидации на экспериментальных данных;

4. Результаты расчетного исследования влияния эффекта затенения и теплофизических параметров ПГС с учетом дискретного характера спектра поглощения газов на распределение плотности теплового потока результирующего излучения в трехмерной расчетной области для следующих прикладных задач:

– Расчетный анализ процесса внутрикорпусного удержания расплава при ТА на АЭС с реактором ВВЭР-С;

– Расчетный анализ процесса локализации расплава в УЛР проектов АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ на внекорпусной стадии ТА на АЭС с реактором ВВЭР-1200;

– Расчетный анализ процесса взаимодействия расплава с бетоном (в шахте реактора) на внекорпусной стадии ТА на АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-320), необорудованном УЛР.

Личный вклад

1. Автором лично разработана расчетная методика, предназначенная для моделирования теплообмена излучением в трехмерной расчетной области применительно к поздней фазе ТА на АЭС с ВВЭР, в приближении оптически-прозрачной среды, а также в случае наличия поглощающей и испускающей излучение ПГС с учетом дискретного характера спектра поглощения газов;

2. Автором лично реализована расчетная методика в виде программы для ЭВМ «THERA» на языке программирования C++;

3. Автором лично проведена валидация расчетной методики на экспериментальных данных, а также ее верификация на аналитических и модельных задачах;

4. Автором лично проведено моделирование теплообмена излучением разработанной программой для ЭВМ «THERA» для следующих прикладных задач:

– Расчетный анализ процесса внутрикорпусного удержания расплава при ТА на АЭС с реактором ВВЭР-С;

– Расчетный анализ процесса локализации расплава в УЛР проектов АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ на внекорпусной стадии ТА на АЭС с реактором ВВЭР-1200;

– Расчетный анализ процесса взаимодействия расплава с бетоном (в шахте реактора) на внекорпусной стадии ТА на АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-320).

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается верификацией расчетной методики на аналитических тестах и модельных задачах, а также ее валидацией на экспериментальных данных.

Апробация результатов. Основные результаты проделанной автором работы представлены в трех статьях журналов, два из которых входят в перечень рецензируемых

научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертации. По результатам проделанной работы получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основные положения и результаты работы были представлены на 7 конференциях: XIII международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам, X международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда-23», всероссийская конференция «XXXIX Сибирский теплофизический семинар», XIII Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике, научно-техническая конференция «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2024)», XIII научный семинар «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», XI международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда-2025».

Структура и объем работы. Диссертация общим объемом 154 страниц состоит из введения, 5 глав, включая заключение, содержащее основные выводы по работе, списка использованных обозначений и списка литературы. Список цитируемых источников составляет 136 наименований. Диссертация содержит 79 рисунков и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, практическая значимость, новизна полученных результатов, степень их достоверности и личный вклад автора.

В первой главе представлены результаты анализа современного состояния вопроса моделирования теплообмена излучением как в общем случае, так и применительно к расчету данного процесса на поздней фазе ТА на АЭС с легководными реакторами под давлением. Проведенный анализ позволил сделать вывод о наличии ряда упрощений в современных расчетных моделях, предназначенных для анализа теплообмена излучением на поздней фазе ТА на АЭС с реакторами под давлением, а также составить общую картину расчетных методик и моделей, которые могут быть использованы при решении поставленных в работе задач и достижению обозначенных целей.

Во второй главе приведено описание феноменологии процессов, протекающих при ТА на АЭС с реактором ВВЭР. Более подробно рассмотрены процессы, сопровождающие ТА на ее поздней фазе после образования ванны расплава на внутрикорпусной стадии, а также применительно к поведению расплава на внекорпусной стадии. Описание процессов, сопровождающих взаимодействие кориума с элементами реакторной установки на внекорпусной стадии ТА, дополнено анализом особенностей процесса локализации кориума в УЛР, а также взаимодействия расплава с бетоном в подреакторной шахте в случае отсутствия УЛР в проекте РУ. По результатам проведенного литературного анализа был сформирован перечень явлений и

параметров, необходимых для учета при разработке расчетной методики. В ходе анализа основное внимание было уделено характерным состояниям ванны расплава и ее поверхности, а также предполагаемому газовому составу атмосферы над расплавом и его теплофизическим параметрам.

В третьей главе приведено описание расчетной методики, разработанной для моделирования теплообмена излучением на поздней фазе ТА на АЭС с ВВЭР. Моделирование предполагается осуществлять в трехмерной расчетной области с использованием расчетной сетки из треугольных элементов конечного размера. В пределах каждого элемента расчетной области задается постоянное и одинаковое значение температуры, элемент рассматривается как серая поверхность, излучающая диффузно. Падающие и отраженные потоки излучения считаются постоянными, ПГС считается однородной по объему и изотермической, эффекты рассеивания не учитываются. Расчетная методика реализована в программе для ЭВМ THERA на языке программирования C++.

Расчет теплообмена излучением осуществляется с помощью зонального метода с использованием модели средневзвешенной суммы «серых газов» на основе спектральных линий (SLWSGG – Spectral-line weighted sum of grey gases) для учета радиационных свойств газов. Модель основана на переходе от интегрирования радиационных свойств по непрерывному спектру поглощения к суммированию по конечному числу интервалов – «серых газов», в пределах которых коэффициент поглощения считается постоянным. Спектр поглощения газа разбивается на M «серых газов», для каждого из которых система линейных алгебраических уравнений зонального метода записывается следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\delta_{1i}}{\varepsilon_i} - \frac{(1 - \varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \cdot \varphi_{1i} \cdot \overline{\tau_{j,1i}} \right] \cdot q_{j,pez,i} = \sum_{i=1}^N [\overline{\alpha_{j,1i}} \cdot w_j \cdot \sigma \cdot T_g^4 \cdot \varphi_{1i} - (\delta_{1i} - \varphi_{1i} \cdot \overline{\tau_{j,1i}}) \cdot w_j \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N \left[\frac{\delta_{ki}}{\varepsilon_i} - \frac{(1 - \varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \cdot \varphi_{ki} \cdot \overline{\tau_{j,ki}} \right] \cdot q_{j,pez,i} = \sum_{i=1}^N [\overline{\alpha_{j,ki}} \cdot w_j \cdot \sigma \cdot T_g^4 \cdot \varphi_{ki} - (\delta_{ki} - \varphi_{ki} \cdot \overline{\tau_{j,ki}}) \cdot w_j \end{array} \right.$$

$$1 \leq k \leq N$$

где φ_{ki} – угловой коэффициент между k -м и i -м элементами, δ_{ki} – символ Кронекера, ε_i – степень черноты i -го элемента, $\overline{\tau_{j,1i}}$ – среднегеометрическая пропускательная способность, $\overline{\alpha_{j,1i}} = 1 - \overline{\tau_{j,1i}}$ – среднегеометрическая поглощательная способность, $q_{j,pez,i}$ – плотность теплового потока результирующего излучения i -го элемента для j -го серого газа, w_j – весовой коэффициент для j -го «серого газа», рассчитывающийся по SLWSGG модели, T_g – температура газа, T_i – температура i -го элемента.

Для каждого j -го «серого газа» система уравнений решается методом LU -разложения относительно плотности теплового потока результирующего излучения. Плотность теплового потока результирующего излучения для данной системы уравнений записывается в виде:

$$q_{j,рез,k} = q_{j,пад,k} - q_{j,эфф,k},$$

где $q_{j,рез,k}$ - плотность теплового потока результирующего излучения, $q_{j,эфф,k}$ - плотность теплового потока эффективного излучения, исходящего с k -ой поверхности, $q_{j,пад,k}$ - плотность теплового потока падающего излучения на площадку k с остальных площадок расчетной области.

В результате решения M систем уравнений определяются величины плотностей тепловых потоков результирующего излучения для каждого «серого газа», затем производится расчет интегральных величин плотности теплового потока по всему спектру поглощения путем суммирования по M «серым газам»:

$$q_{рез,k} = \sum_j^M q_{j,рез,k},$$

Расчет угловых коэффициентов между каждой парой элементов расчетной сетки осуществляется с помощью пяти методов, реализованных в расчетной методике. Рассмотрим расчет углового коэффициента для произвольных элементов 1 и 2:

1. Метод VF_1 , расчет угловых коэффициентов на основе допущения о том, что рассматриваемые элементы являются элементарными площадками:

$$\varphi_{12} = \frac{\cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2)}{\pi \cdot |\vec{r}_{12}|^2} \cdot A_2,$$

где \vec{r}_{12} - вектор, соединяющий барицентры поверхностей 1 и 2, A_2 - площадь поверхности 2, β_1 и β_2 - углы между нормальными к поверхностям 1 и 2, построенным от барицентров поверхностей, и вектором \vec{r}_{12} ;

2. Метод VF_2 , расчет угловых коэффициентов в случае близко расположенных друг к другу элементов. Все обозначения идентичны аналогичным, представленным в методе VF_1 :

$$\varphi_{12} = \frac{4 \cdot \sqrt{A_1 \cdot A_2}}{\pi^2} \cdot \arctan\left[\frac{\sqrt{\pi \cdot A_1} \cdot \cos(\beta_1)}{2 \cdot |\vec{r}_{12}|^2}\right] \cdot \arctan\left[\frac{\sqrt{\pi \cdot A_2} \cdot \cos(\beta_2)}{2 \cdot |\vec{r}_{12}|^2}\right],$$

3. Метод VF_3 , расчет угловых коэффициентов осуществляется на основе алгоритма линейного разбиения элементов на треугольные подобласти и последующим переходом от интегрирования к суммированию по подобластям. Стороны исходного треугольного элемента разделяются пополам, образуя четыре новых элемента, каждый из которых разбивается в последующем аналогичным образом. Глубина разбиения задается в зависимости от конфигурации элементов, выражение для расчета углового коэффициента выглядит следующим образом:

$$\varphi_{12} = \frac{1}{A_1} \cdot \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \frac{A_{1i} \cdot A_{2j} \cdot \cos(\beta_{1i}) \cdot \cos(\beta_{2j})}{\pi \cdot |\vec{r}_{1izj}|^2},$$

где A_1 – площадь поверхности 1, N_1, N_2 – количество подобластей, на которые разбиты поверхности 1 и 2 соответственно, A_{1i}, A_{2i} – площади i -й и j -й подобластей на поверхностях 1 и 2 соответственно, β_{1i}, β_{2i} – углы между вектором нормали и вектором \vec{r}_{1i2j} для i -й и j -й подобластей на поверхностях 1 и 2 соответственно, \vec{r}_{1i2j} – вектор, соединяющий i -ю и j -ю подобласти.

4. Метод VF_4 предназначен для расчета угловых коэффициентов между элементами с общей стороны. Угловой коэффициент определяется аналогично выражению метода VF_3 , дискретизация выполняется адаптивно: каждый элемент разделяется на три области с разной глубиной разбиения. Наибольшее сгущение подобластей задается у общей стороны, по мере удаления от нее густота снижается;

5. Метод VF_5 , в котором расчет угловых коэффициентов осуществляется с помощью метода контурного интегрирования на основе выражения для произвольно-ориентированных плоских поверхностей:

$$\varphi_{12} = \frac{1}{4\pi S_1} \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \int_0^1 \int_0^1 \ln \left(\lambda_i^2 |\overrightarrow{l_{m,m+1}}|^2 + \lambda_j^2 |\overrightarrow{J_{n,n+1}}|^2 - 2\lambda_i \overrightarrow{l_{m,m+1}} \cdot \overrightarrow{J_{n,n+1}} + 2\lambda_j \overrightarrow{l_{m,m+1}} \cdot \overrightarrow{J_{n,n+1}} - 2\lambda_i \lambda_j \overrightarrow{J_{n,n+1}} \cdot \overrightarrow{l_{m,m+1}} + |\overrightarrow{l_{m,m+1}}|^2 \right) \cdot \overrightarrow{J_{n,n+1}} * \overrightarrow{l_{m,m+1}} d\lambda_i d\lambda_j,$$

где N и M – количество вершин поверхностей (для треугольников $N = M = 3$), индексы m и n соответствуют текущим вершинам при обходе поверхности против часовой стрелки, $\overrightarrow{l_{m,m+1}}$ – вектор от точки m к точке $m + 1$ i -й поверхности, λ – отношение длины вектора от начальной точки на стороне треугольника к длине этой стороны. Численное интегрирование выполняется методом квадратур Гаусса–Лежандра с десятью узлами. В случае наличия общей стороны у рассматриваемой пары элементов в представленное выше выражение вводится дополнительное слагаемое:

$$\Delta\varphi_{12} = |\vec{l}_s|^2 (1,5 - 0,5 * \ln(|l_s|^2)),$$

где \vec{l}_s – вектор, соответствующий общей стороне.

Среднегеометрические пропускательная и поглощательная способности $\overline{\tau}_j$ и $\overline{\alpha}_j$ рассчитываются на основе алгоритма расчета углового коэффициента с использованием определенного по SLWSGG модели коэффициента поглощения для рассматриваемого «серого газа».

Учет эффекта затенения и определение видимости элементов расчетной области осуществляется с помощью алгоритмов Моллера-Трумбора и “back-face culling”. Алгоритм Моллера-Трумбора используется с целью определения пересечения луча, испущенного с произвольного элемента, с любым другим элементом расчетной области. Алгоритм “back-face culling” используется для отбраковки элементов расчетной области, которые не направлены друг

к другу лицевой стороной, снижая общее расчетное время работы проверки элементов на возможное затенение.

Для расчет радиационных свойств газов была выбрана модель SLWSSG. Данная модель позволяет проводить расчеты необходимых свойств для ключевых газов, рассматриваемых при анализе ТА - H_2O CO_2 , CO , в области возможных температур газа от 300 до 3000 К и в диапазоне давлений 0,01 до 5 МПа. В пределах каждого «серого газа» коэффициент поглощения определяется как:

$$\kappa_j = N \cdot x_g \cdot \sqrt{\tilde{C}_{j-1} \cdot \tilde{C}_j},$$

где N , - величина, определяемая через закон идеального газа и соответствующая обратному молярному объему, x_g – мольная доля газа, \tilde{C}_{j-1} , \tilde{C}_j – значения сечений поглощения $(j-1)$ -го и j -го «серых газов» соответственно, значения сечений поглощения логарифмически распределяются между минимальным значением C_{\min} и максимальным значением C_{\max} , которые отражают спектр поглощения газа.

Весовой коэффициент w_j для j -го серого газа определяется с использованием функции распределения линии поглощения абсолютно черного тела (Absorption Line Blackbody Distribution Function – ALBDF), аппроксимирующей реальный спектр поглощения рассматриваемого газа:

$$w_j = F(\tilde{C}_j, T_b, T_g, x_g, P) - F(\tilde{C}_{j-1}, T_b, T_g, x_g, P),$$

где $F(\tilde{C}_j, T_b, T_g, x_g, P)$ – функция ALBDF, T_b , T_g – температуры абсолютно черного тела как источника излучения и газа соответственно, x_g – мольная доля газа, P – давление ПГС.

Для расчета функций ALBDF для смесей газов в THERA реализован подход, основанный на вычислении функции распределения линии поглощения абсолютно черного тела для смеси газов как произведения функций ALBDF. После расчета функции распределения поглощения смеси вычисление весовых коэффициентов и коэффициентов поглощения «серых газов» осуществляется аналогично случаю расчета для одного газа.

В четвертой главе представлены результаты верификации и валидации разработанной расчетной методики. Сравнение результатов расчета с аналитическим решением было проведено для расчетной области, представляющей собой два параллельно-расположенных треугольных элемента. Расчеты по методам VF_1 и VF_2 дают наименее точные результаты с погрешностью 29,02 % и 6,96 % соответственно, расчет с по методу VF_3 приводит к погрешности расчета 1,28 % при разбиении элементов на 32 подобласти.

Сравнение результатов расчета методами VF_1 , VF_2 , VF_3 и VF_4 с наиболее точным методом VF_5 было проведено для ряда характерных конфигураций расчетной области с

вариацией расположения элементов, входящих в расчетную область, друг относительно друга (рисунок 1). Анализ результатов работы метода *VF_4* был проведен для конфигурации пары элементов, имеющих общую сторону.

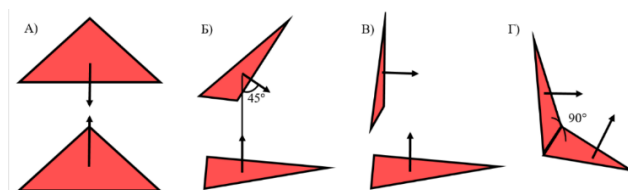


Рисунок 1 – Изображение расчетных областей; а) параллельные элементы, б) элементы, произвольный угол друг к другу, в) элементы, угол в 90 градусов друг к другу, г) элементы, общая грань, угол 90 градусов друг к другу

В качестве безразмерного параметра N , определяющее взаимное расположение элементов, выбрано отношение квадрата расстояния между ними к среднему арифметическому значению их площадей:

$$N = \frac{2 * r_{ij}^2}{(A_i + A_j)},$$

где A_i, A_j – площади элементов i и j соответственно, r_{ij} – расстояние между элементами i и j .

Результаты расчета погрешности методов в зависимости от параметра N для конфигураций А, Б и В представлены на рисунке 2: метод *VF_1* наименее точен, *VF_2* обеспечивает меньшую погрешность на большем диапазоне N , а увеличение числа разбиений в *VF_3* снижает погрешность. Наиболее трудоемким является расчет углового коэффициента для конфигурации Г из-за наличия общей стороны у двух элементов: как показано на рисунке 3, методы *VF_1* и *VF_2* дают крайне высокую погрешность, тогда как метод *VF_4* с адаптивным разбиением треугольных элементов со сгущением к общей стороне обеспечивает погрешность не более 5 %.

На основе результатов расчета углового коэффициента для элементов, не имеющих общую грань, предложен алгоритм, обеспечивающий погрешность менее 5 % в зависимости от безразмерного параметра N :

- $N \leq 0,6$ – расчет по методу *VF_3* с разбиением на 128 подобластей;
- $0,6 < N \leq 8$ – расчет по методу *VF_3* с разбиением на 32 подобласти;
- $8 < N < 18$ – расчет по методу *VF_2*;
- $N \geq 18$ - расчет по методу *VF_1*.

Для элементов с общей гранью применяется метод *VF_4* с суммарной дискретизацией элементов на 482 подобласти.

С целью верификации части расчетной методики, предназначенной для учета эффекта затенения, был проведен расчет угловых коэффициентов для двух задач, для которых характерно

наличие затенения: поверхность диска - соосный цилиндр и внутренняя поверхность внешнего цилиндра – внешняя поверхность внутреннего соосного цилиндра. Отклонение расчетных значений от значения, полученных по аналитическим выражением, составило не более 0,10 %.

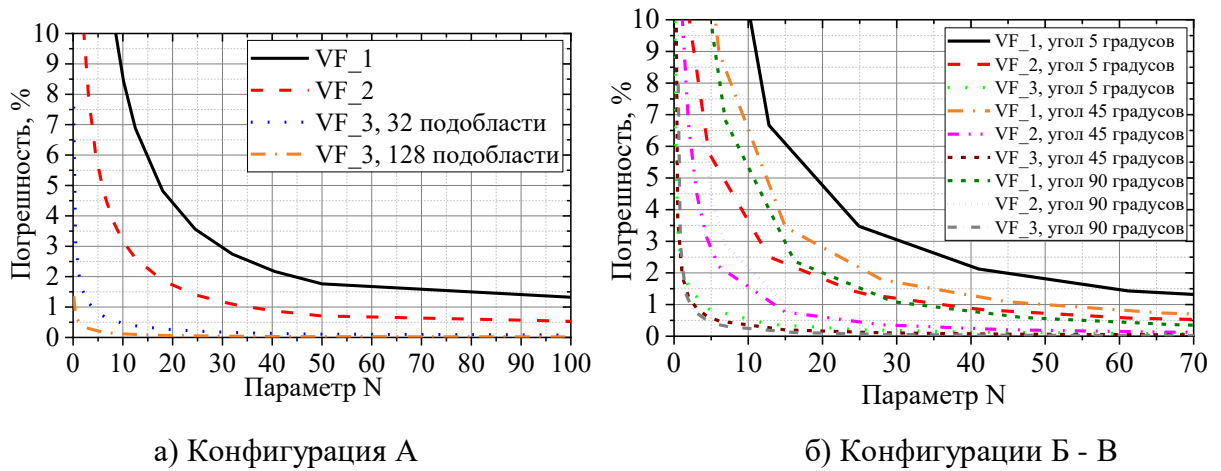


Рисунок 2 – Результаты погрешности расчета угловых коэффициентов

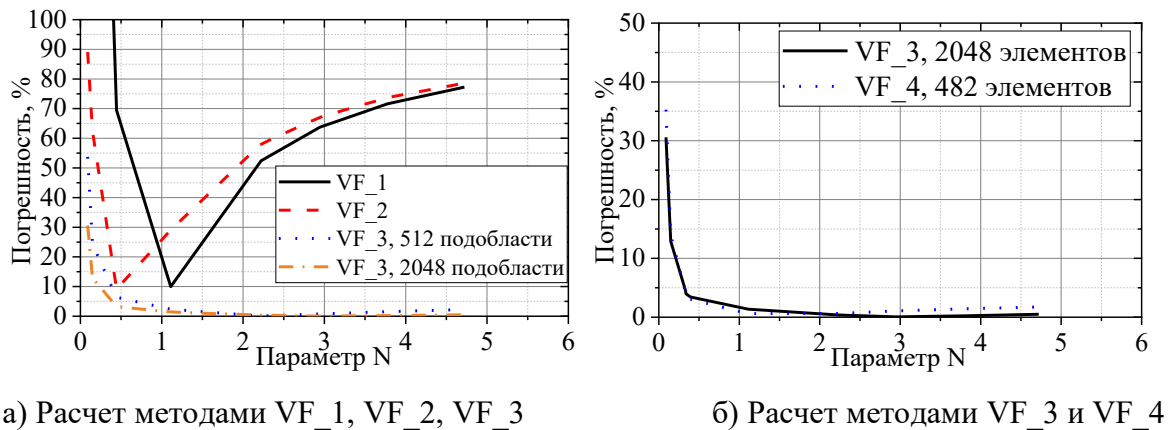


Рисунок 3 – Результаты погрешности расчета для конфигураций Г

Для кросс-верификации разработанной методики выполнены расчеты теплообмена излучением для модельных задач с последующим сравнением с результатами решения аналогичных задач из открытых источников. Первая группа задач включала геометрии с затенением и без него, объем в рассматриваемых конфигурациях заполнялся газовой средой с постоянной температурой и коэффициентом поглощения: рассмотрены куб с абсолютно черными холодными стенками, L-образная область с абсолютно черными стенками и эллиптическая области с абсолютно черными стенками при температуре 500 К (температура газа 1000 К). Дополнительно проведено сравнение с работами, где радиационные свойства газов рассчитывались по различным моделям. В первом случае рассматривались цилиндрическая область с серыми стенками, заполненная ПГС (1000 К, 0,1 МПа). Сравнение осуществлялось с работой, в которой радиационные свойства были рассчитаны с помощью модели WSGG, поэтому для проведения сравнения эта модель была дополнительно реализована в расчетной методике. Во втором случае рассматривался параллелепипед с абсолютно черными стенками (300 К),

заполненный водяным паром (1000 К, 0,1 МПа). Сравнение результатов проводилось с работой, где задача решалась методом дискретных ординат с использованием статистической узкополосной модели для расчета радиационных свойств. Радиационные свойства в ходе решения THERA рассчитывались с помощью реализованной в методике модели SLWSSG. Среднее отклонение результатов разработанной методики от сравниваемых работ не превышает 4,85 %.

С целью валидации расчетной методики выполнено моделирование экспериментов 2005-2006 гг., которые были проведены в Университете Уэльса, по исследованию теплообмена излучением между стальным диском (сторона пластины обозначается как L) и квадратной пластиной (ее диаметр обозначается как D) в зависимости от расстояния S между ними. Расчет теплообмена излучением осуществлялся для каждого стационарного режима, рассчитанные плотности тепловых потоков передавались в сопряженный тепловой расчет, проведенный кодом STAR-CCM+, сравнивались расчетные и экспериментальные значения температур в точках установки термопар (таблица 1). Результаты расчета согласуются с экспериментальными значениями с отклонением не более 4,1 %.

Таблица 1. Результаты валидации расчетной методики

S/D	$T_{\text{эксперимент}}, K$	$T_{\text{расчет}}, K$	$\Delta T, K$	$\partial T, \%$
0.2	489	480	9	1,84
0.5	424	420	4	0,94
1.0	365	350	15	4,10
2.0	332	322	10	3,01
4.0	309	301	8	2,58

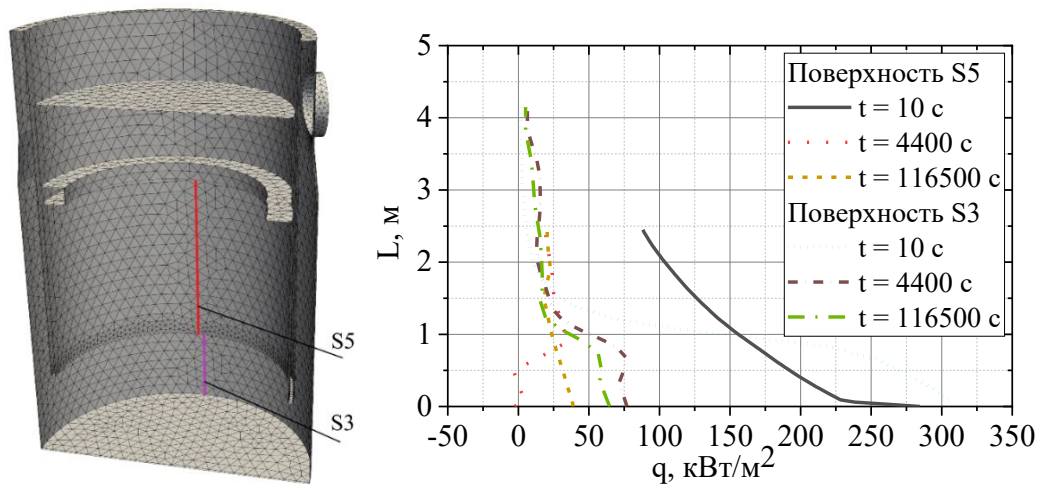
В пятой главе представлены результаты практического применения разработанной расчетной методики к моделированию теплообмена излучением применительно к анализу поздней фазы ТА на АЭС с ВВЭР. Рассмотрен сценарий гипотетической ТА «Большая течь ДУ850» с максимальной ожидаемой мощностью остаточного тепловыделения в расплаве активной зоны. Расчет теплообмена излучением разработанной расчетной методикой был проведен в рамках анализа следующих прикладных задач:

- Расчетный анализ процесса внутрикорпусного удержания расплава при ТА на АЭС с реактором ВВЭР-С;
- Расчетный анализ процесса локализации расплава в УЛР проектов АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ на внекорпусной стадии ТА на АЭС с реактором ВВЭР-1200;
- Расчетный анализ процесса взаимодействия расплава с бетоном (в шахте реактора) на внекорпусной стадии ТА на АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-320).

Исходные данные (состав, конфигурация, температура поверхности расплава) получены с помощью сторонних программных средств СОКРАТ-В1/В2 (внутрикорпусная стадия ТА) и

ГЕФЕСТ-УЛР (внекорпусная стадия ТА). Для ВВЭР-С проведен сопряженный расчет с CFD-кодом STAR-CCM+, в остальных случаях изменение температур конструкций не учитывалось. Моделирование выполнено для оптически прозрачной среды над расплавом. Для каждого сценария были выполнены дополнительные расчеты с варьированием теплофизических параметров ПГС.

Распределение плотности теплового потока результирующего излучения в нижней части корпуса реактора после перемещения расплава на днище корпуса представлено на рисунке 4. Максимальное значение наблюдается в начальный момент вследствие высокой температуры поверхности кориума. По мере теплоотвода от кориума и снижению температуры поверхности интенсивность излучения снижается. Наибольшие значения плотности теплового потока фиксируются на конструкциях вблизи от поверхности кориума. Внутренняя стенка корпуса (S3) частично экранируется стенкой внутрикорпусной шахты (S5): выше отметки 1 м от зеркала расплава тепловой поток снижается, а выше 2 м тепловое воздействие излучением незначительно. Сопряженный расчет показал, что прогрев S5 вызывает разогрев всей конструкции за счет излучения, и внешняя поверхность шахты начинает излучать в направлении S3 (например, на экранированных участках S3 между отметками 3 и 4 м на моменте 116500 с).

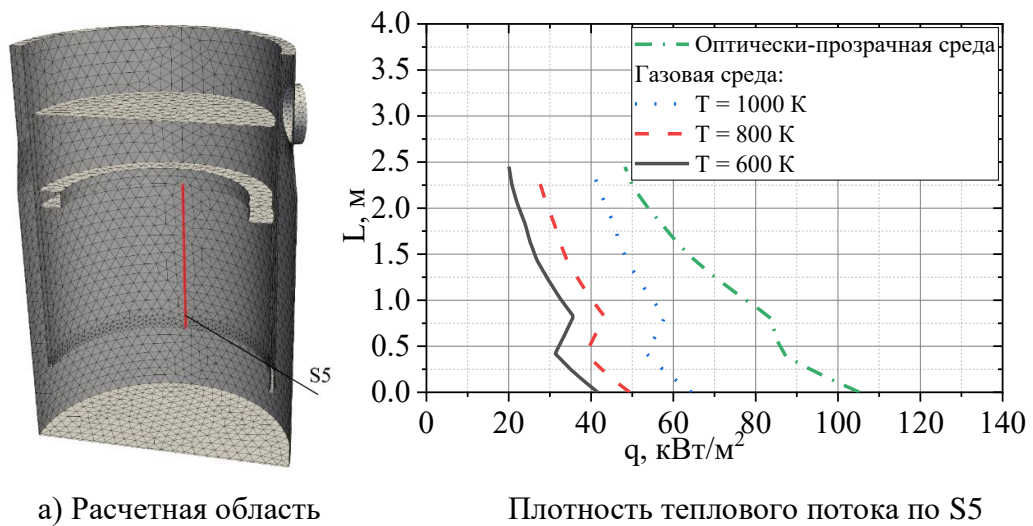


а) Расчетная область

б) Плотность теплового потока по S5 и S3

Рисунок 4 – Результаты расчета

На рисунке 5 представлены результаты дополнительных оценочных расчетов с учетом присутствия ПГС в объеме над расплавом, рассматривались три опорных значения температуры – 600, 800 и 1000 К, считалось, что в объеме над расплавом находится 100 % водяной пар. На рисунке 9 показаны результаты расчета момента времени 10 с, который характеризуется достаточно высокой температурой поверхности расплава. Наблюдается снижение теплового воздействия излучения на поверхность S5 вследствие эффектов поглощения, с ростом температуры ПГС наблюдается увеличение плотности теплового потока.

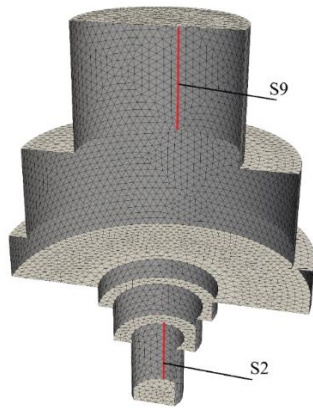


а) Расчетная область

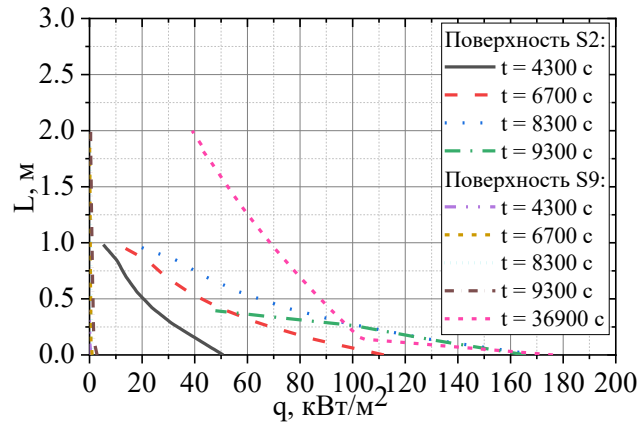
Плотность теплового потока по S5

Рисунок 5 – Результаты расчета, момент времени 10 секунд

При анализе результатов расчета теплообмена излучением при локализации расплава в УЛР основное внимание уделялось сравнению величин тепловых потоков на поверхностях жертвенных материалов (ЖМ) и тепловых защит УЛР. Результаты моделирования (рисунок 6) для случая локализации расплава в УЛР проекта АЭС-2006 показали существенную роль блоков ЖМ (поверхность S2) в экранировании тепловых защит – в частности тепловой защиты фермы-консоли (поверхность S9), на этапе поступления кориума в УЛР. Наблюдается значительный рост плотности теплового потока на S2 при сравнении моментов времени 4300 с и 8300 с, что обусловлено динамикой поступления расплава. На начальном этапе (до 6000 с) температура поступающего кориума составляет 1800 К, после 6000 с поступают более горячие порции с температурой выше 2000 К. К моменту времени 9300 секунд уровень расплава достигает середины S2, до этого момента поверхность S9 практически не испытывает воздействия теплового излучения. К моменту времени 36900 секунд блоки ЖМ полностью обрушены, поверхность расплава беспрепятственно воздействует излучением на конструкции тепловых защит. Результаты моделирования теплообмена излучением для УЛР ВВЭР-ТОИ представлены на рисунках 7 и 8. На рисунке 7 показано сопоставление плотностей тепловых потоков на блоках ЖМ (S4) и верхней тепловой защите (S10). Рост теплового потока в момент 12400 с обусловлен повышением температуры поверхности и переходом к инверсной конфигурации ванны с верхним оксидным слоем, степень черноты которого более чем вдвое выше, чем у металлического. Низкая интенсивность воздействия на S10 объясняется экранированием поверхностью нижней тепловой защиты и блоками ЖМ. Два максимума плотности теплового потока на S10 в момент 12400 с (в нижней и верхней частях) связаны с особенностями конструкции нижней тепловой защиты: ее нижняя часть имеет арочные проемы, открывающие нижнюю часть S10, а верхняя кромка S10 полностью не перекрывается поверхностью нижней тепловой защитой.

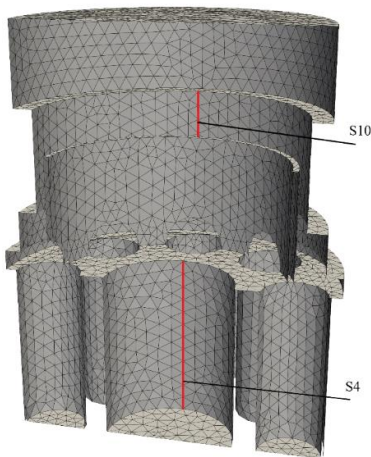


а) Расчетная область

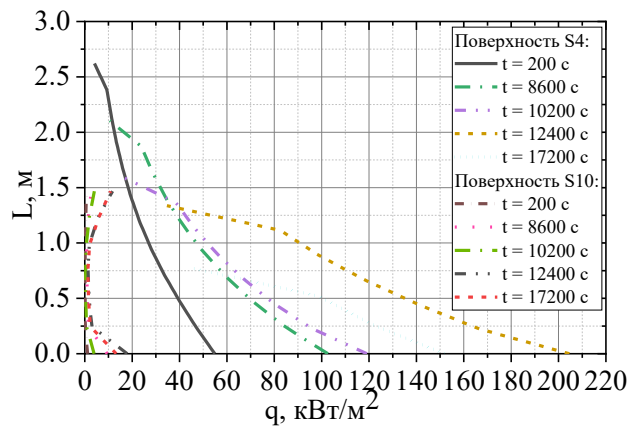


б) Плотность теплового потока по S2 и S9

Рисунок 6 – Результаты расчета



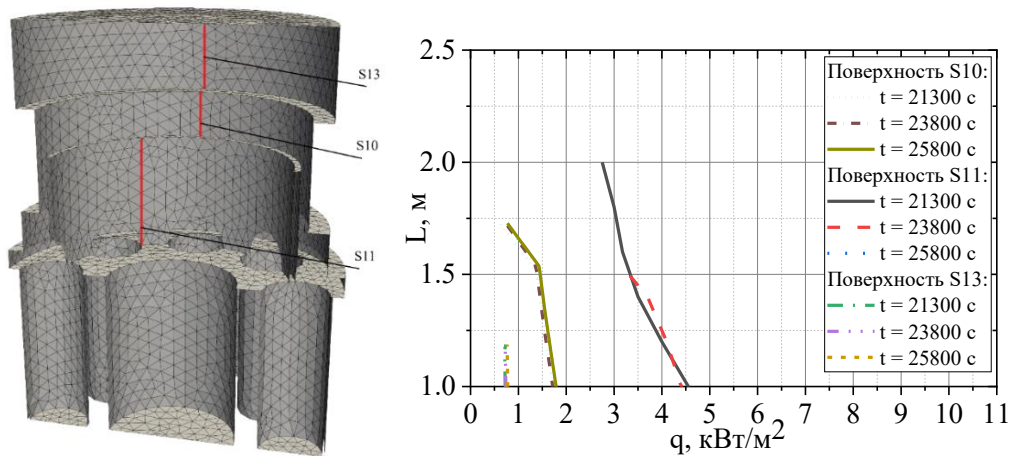
а) Расчетная область



б) Плотность теплового потока по S4 и S10

Рисунок 7 – Результаты расчета

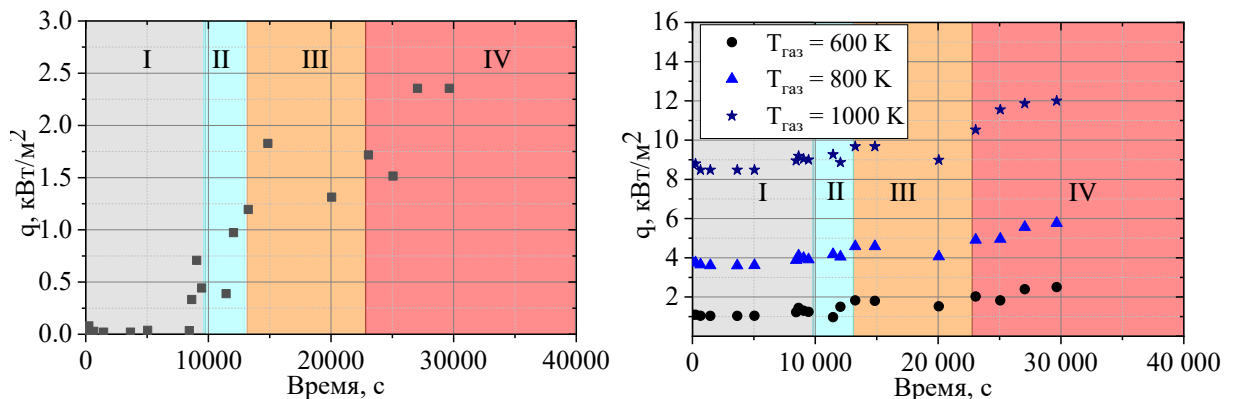
После обрушения последних блоков ЖМ нижняя тепловая защита (поверхность S11), состоящая по большей части из цирконового шлака и бетона, перемещается на поверхность кориума, экранируя конструкции УЛР, прежде всего ТМЭ КПВ. Вследствие теплового и механического разрушения нижняя тепловая защита медленно погружается в расплав с образованием низкотемпературной шлаковой корки. В расчете это учтено путем введения температуры поверхности шлаковой корки в 1200 К на всей ее поверхности и степени черноты 0,5 в качестве опорного значения. Результаты анализа воздействия излучения на конструкции УЛР представлены на рисунке 8. В момент 21300 с поверхность S11 находится на зеркале расплава и частично экранирует верхнюю часть S10. После частичного погружения S11 в расплав (23800 с) плотность теплового потока в верхней части S10 возрастает более чем в 1,5 раза.



а) Изображение расчетной области б) Плотность теплового потока по S10, S11 и S13

Рисунок 8 – Результаты расчета

На рисунке 9 представлены результаты воздействия теплового излучения на поверхность ТМЭ КПВ. Тепловая нагрузка на поверхность ТМЭ остается незначительной до середины рассматриваемого временного промежутка вследствие экранирования. В дальнейшем рост плотности теплового потока объясняется эффектом отражения излучения со стороны окружающих объектов расчетной области, в том числе – со стороны внешней поверхности нижней тепловой защиты. Дополнительное моделирование выполнено в предположении наличия над расплавом ПГС (мольные доли: 0,5 H₂O, 0,03 H₂, 0,47 воздуха) с варьированием температуры (600, 800 и 1000 K) при давлении 0,15 МПа. Результаты показывают рост плотности теплового потока на ТМЭ КПВ в целом за счет теплового воздействия ПГС на клапан.



а) Оптически-прозрачная среда

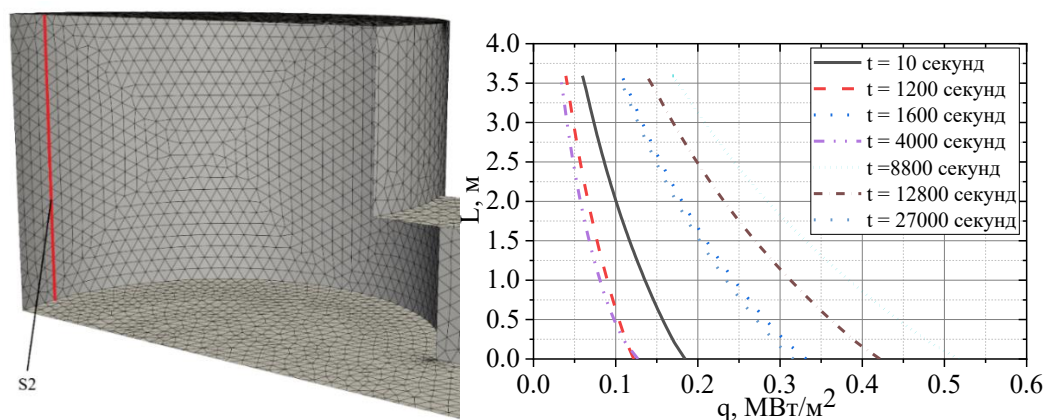
б) ПГС в объеме над расплавом

Рисунок 9 – Результаты расчета (I – нерасслоенная конфигурация расплава, II – прямая стратификация, III – инверсная стратификация, IV – перемещение нижней тепловой защиты на поверхность кориума, полное растворение ЖМ)

На рисунке 10 представлено распределение плотности теплового потока по поверхности стенки шахты реактора ВВЭР-1000 (поверхность S2), наблюдается снижение плотности теплового потока в первые 1000 секунд вследствие уменьшения температуры поверхности кориума на данном промежутке времени. С ростом температуры поверхности фиксируется

увеличение плотности теплового потока. Временной промежуток вплоть до момента инверсии ванны расплава (8800 секунд) характеризуется постепенным снижением тепловой нагрузки вследствие остывания расплава. После всплытия оксидных фракций расплава отмечается существенное увеличение плотности теплового потока.

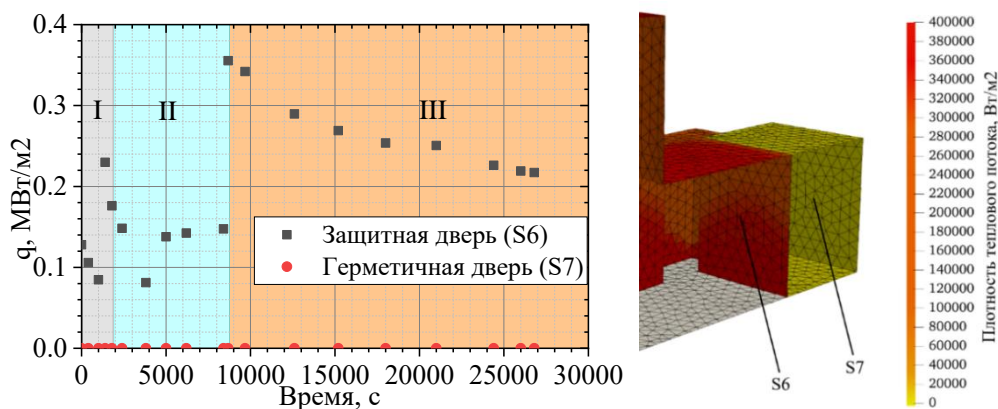
По мере разрушения бетонных конструкций шахты и теплоотвода от расплава, температура его поверхности снижается. Максимальная тепловая нагрузка на защитную дверь (поверхность S6, рисунок 11) достигается в момент 8800 с сразу после инверсии ванны, затем интенсивность излучения снижается вместе с температурой кориума. Поверхность герметичной двери (S7) на всех этапах не подвергается тепловому излучению.



а) Изображение расчетной области

б) Плотность теплового потока на S2

Рисунок 10 – Результаты расчета



а) Плотность теплового потока на S6 и S7

б) Расчетная область

Рисунок 11 – Результаты расчета (I – нерасслоенная конфигурация расплава, II – прямая стратификация, III – инверсная стратификация)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе настоящей работы были получены следующие результаты:

1. Проведенный анализ современных подходов к моделированию теплообмена излучением на поздней фазе ТА в расчетных кодах выявил ряд существенных упрощений. В существующих моделях, представленных в открытых источниках, данный процесс чаще всего

рассматривается в осесимметричной постановке, не принимая во внимание эффекты затенения между перекрывающимися поверхностями. Кроме того, влияние поглощающей и излучающей газовой среды в объеме над расплавом либо игнорируется, либо учитывается упрощенно. В рамках данной работы разработана оригинальная расчетная методика, предназначенная для моделирования теплообмена излучением в трехмерной расчетной области с учетом эффекта затенения как в приближении оптически-прозрачной среды, так и с учетом присутствия ПГС в объеме расчетной области, поглощающей и испускающей излучение. Разработанная расчетная методика была реализована в виде программы для ЭВМ «THERA»;

2. Для разработанной расчетной методики проведена верификация на аналитических и модельных задачах, а также валидация на экспериментальных данных. Полученные результаты свидетельствуют о качественном и количественном согласии результатов разработанной методики как с известными аналитическими и расчетными работами, так и с экспериментальными данными;

3. С использованием разработанной методики получены результаты расчетного исследования влияния эффекта затенения и теплофизических параметров ПГС с учетом дискретного характера спектра поглощения газов на распределение плотности теплового потока результирующего излучения в трехмерной расчетной области для следующих прикладных задач:

- Расчетный анализ процесса внутрикорпусного удержания расплава при ТА на АЭС с реактором ВВЭР-С;
- Расчетный анализ процесса локализации расплава в УЛР проектов АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ на внекорпусной стадии ТА на АЭС с реактором ВВЭР-1200;
- Расчетный анализ процесса взаимодействия расплава с бетоном (в шахте реактора) на внекорпусной стадии ТА на АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-320).

Проведенное расчетное исследование позволяет сделать следующие выводы:

- Получено, что необрушенные части внутрикорпусной шахты экранируют внутреннюю часть корпуса реактора от теплового излучения со стороны поверхности кориума при анализе процесса внутрикорпусного удержания расплава для проекта ВВЭР-С. Для УЛР проектов АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ показано, что блоки наполнителя с ЖМ, расположенные внутри корпуса, эффективно экранируют от теплового излучения конструкции тепловых защит и фермы-консоли на всем этапе поступления кориума в объем УЛР. За счет экранирования блоками наполнителя и тепловыми защитами исключается непосредственное воздействие излучающей поверхности расплава на ТМЭ КПВ, которое может привести к его преждевременному срабатыванию. Получено, что возможен опосредованный разогрев ТМЭ КПВ за счет отраженного теплового потока со стороны окружающих конструкций;

- Рассмотренные в ходе работы практические задачи могут быть приближенно описаны в осесимметричной постановке. Однако, для расчета теплообмена излучением с поверхности расплава в бетонной шахте данное приближение некорректно вследствие отсутствия осевой симметрии у конструкции шахты. Возможности, реализованные в программе для ЭВМ «THERA», позволяют решать задачу в трехмерной постановке, что позволило впервые получить реалистическое распределение плотности теплового потока результирующего излучения на бетонные конструкции шахты ВВЭР-1000 (В-320);

- Наличие ПГС, испускающей и поглощающей тепловое излучение в объеме над расплавом может приводить как к завышению тепловых потоков на поверхности, так и их занижению в зависимости от их температуры, а также температуры ПГС для различных составов и давлений, характерных для условий ТА. Результаты моделирования теплообмена излучением с учетом ПГС показали, что тепловая нагрузка на ТМЭ КПВ от излучения может быть существенно выше при учёте ПГС в объёме над расплавом по сравнению с оптически-прозрачной средой. Для реалистической оценки разогрева ТМЭ КПВ и времени его срабатывания необходим учёт ПГС в объеме над расплавом;

- Результаты расчета плотности тепловых потоков за счет теплового излучения, выполненные с помощью программы для ЭВМ THERA, могут быть использованы в качестве исходных данных для расчета теплового состояния конструкций, расположенных выше уровня расплава, и уточнения динамики поступления оплавленных материалов в расплав. Применение результатов, полученных в THERA, позволяет уточнить распределение тепловой нагрузки от теплообмена излучением на конструкции моделируемых объектов, тем самым снижая степень консерватизма моделирования.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в научных журналах:

1. Мельников И.А., **Шмельков Г.Б.**, Голубев М.А., Великанов А.В. Моделирование радиационного теплообмена применительно к анализу процесса локализации расплава // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2024, № 4, с. 212–225;

2. Мельников И.А., **Шмельков Г.Б.**, Голубев М.А. Моделирование теплообмена излучением применительно к процессу локализации расплава в УЛР ВВЭР-ТОИ // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2025, № 1, с. 62–72;

3. Ivan Melnikov, **Gleb Shmelkov**, Maksim Golubev, Aleksandr Velikanov, Yury Shmelkov and Sergey Savekin, Approaches to radiative heat transfer simulation in a cavity above melt, E3S Web Conf., 459 (2023).

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

1. **Шмельков Г.Б.**, Мельников И.А., Великанов А.В., Голубев М.А., Канин П.К., Кобзарь В.Л. THERA. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025696564 от 18.12.2025.

Публикации в сборниках тезисов и докладов:

1. Мельников И.А., **Шмельков Г.Б.**, Голубев М.А., Великанов А.В. Численное моделирование радиационного теплообмена в полости над расплавом // Материалы XXIII Международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, Россия, 12-13 апреля 2023 г.;

2. Мельников И.А., **Шмельков Г.Б.**, Голубев М.А., Великанов А.В. Моделирование радиационного теплообмена в полости над расплавом // Материалы X Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда-23», АО АЭП, г. Санкт-Петербург, Россия, 28 июня – 1 июля 2023 г.;

3. Мельников И.А., **Шмельков Г.Б.**, Голубев М.А., Великанов А.В. Подходы к моделированию радиационного теплообмена в полости над расплавом // Материалы Всероссийской конференции «XXXIX Сибирский теплофизический семинар», Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия, 28-31 августа 2023 г.;

4. Мельников И.А., **Шмельков Г.Б.**, Голубев М.А., Великанов А.В. Моделирование радиационного теплообмена в полости над расплавом // Материалы XIII семинара ВУЗов по теплофизике и энергетике, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, 12 - 14 октября 2023 г.;

5. Мельников И.А., **Шмельков Г.Б.**, Голубев М.А., Великанов А.В. Моделирование радиационного теплообмена применительно к анализу живучести устройства локализации расплава реактора ВВЭР-1200 // Материалы Научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2024)». АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, Россия, 16-19 апреля 2024 г.;

6. Мельников И.А., **Шмельков Г.Б.**, Голубев М.А. Моделирование теплообмена излучением применительно к локализации расплава активной зоны в УЛР ВВЭР-ТОИ // Материалы XIII научного семинара «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия, 11 – 14 марта 2025 г.;

7. Мельников И.А., **Шмельков Г.Б.**, Голубев М.А. Моделирование теплообмена излучением применительно к локализации расплава активной зоны в УЛР ВВЭР-ТОИ // Материалы XI международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда-2025», АО АЭП, г. Санкт-Петербург, Россия, 3 сентября – 6 сентября 2025 г.