

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН»
Филиал «Институт атомной энергии»
(Филиал «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК»)

УДК 519.876.5

Сураев Артур Сергеевич

**ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ
СТАЛЬНОЙ СТЕНКИ СТРУЕЙ РАСПЛАВА**

Работа, представляемая на конференцию-конкурс НИОКР
молодых ученых и специалистов
Национального ядерного центра Республики Казахстан
(инженерно-техническое направление)

Руководитель: Иркимбеков Р.А.,
PhD, начальник лаборатории исследований
теплофизических и нейтронно-физических характеристик
облучательных устройств, Филиал «ИАЭ» РГП НЯЦ РК

г. Курчатов, 2020 г.


АВТОР

Сураев Артур Сергеевич


научный сотрудник лаборатории исследований теплофизических и нейтронно-физических характеристик облучательных устройств
Филиала «Институт атомной энергии» РГП «НЯЦ РК»,
1988 года рождения,
образование высшее (ГУ имени Шакарима, 2010 г.),
специальность – техническая физика,
квалификация по диплому – бакалавр технической физики,
магистратура (НИТПУ, 2012 г.),
направление – физика
квалификация по диплому – магистр физики,
работает с 2012 года в Филиале «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК»,
общий стаж работы – 7,5 лет.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный сотрудник лаборатории 222


10.04.2022 А.С. Сураев
подпись, дата

Начальник лаборатории 222


10.04.2022 В.А. Иркимбеков
подпись, дата

СУРАЕВ А.С.
**ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ
СТАЛЬНОЙ СТЕНКИ СТРУЕЙ РАСПЛАВА**

Работа, представляемая на конференцию-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов
Национального ядерного центра Республики Казахстан
от Филиала «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК»

071100, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 10,
тел. (7-72251) 2-31-25, 2-51 (вн.4-247)
факс (7-72251) 2-31-25
E-mail:suraev@nnc.kz

РЕФЕРАТ

Конкурсная работа содержит 17 страниц, 9 рисунков, 2 таблицы, 3 источника, 1 приложение.

**СТРУЯ РАСПЛАВА, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ANSYS FLUENT, VOF-MODEL,
СТАЛЬНАЯ СТЕНКА**

Объект исследования: расчетная модель экспериментального устройства.

Цель работы: исследование возможности численного моделирования процесса разрушения стальной стенки струей расплава в программе Ansys Fluent.

Задачи исследований:

- разработка расчетных моделей;
- подготовка входных данных, граничных условий, свойств материалов;
- проведение теплофизических расчетов различными методами;
- сравнительный анализ результатов, полученных по различным методикам.

Методика исследований основана на использовании методов вычислительной теплогидравлики для моделирования процесса разрушения стальной стенки.

Актуальность: Численное моделирование сложных теплофизических процессов является неотъемлемой частью расчетного сопровождения всех экспериментальных работ, выполняемых в Филиале. Основным инструментом для проведения компьютерного моделирования является лицензионный программный комплекс Ansys, включающий в себя ряд кодов и программ, предназначенных для решения задач из различных областей физики и химии. Наибольший интерес для специалистов в области теплофизики представляет программа Ansys Fluent, которая является специализированным решателем подобных задач. В данной работе будут показаны возможности программы Ansys Fluent, которые прежде не использовались в процессе подготовки и проведения экспериментальных работ на этапе расчетного сопровождения и обоснования условий безопасного проведения экспериментов на реакторных комплексах. Речь идет о явном моделировании процессов плавления и взаимодействия расплава с конструкционными материалами, как в статическом виде, так и воздействием направленной струи. Таким образом актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования вычислительных методов и их применения для обоснования безопасности реакторных экспериментов.

Научная новизна: применяемые сегодня методики проведения численного моделирования поведения расплава топлива основываются на предположениях и допущениях, при этом программный продукт Ansys Fluent имеет достаточный набор функций и методов расчета, правильное применение которых позволит в определенной степени совершенствовать получаемые в ходе моделирования результаты.

Практическая ценность: по результатам проводимых расчетных исследований будут даны рекомендации применимости программы Ansys Fluent для подобного рода моделирования.

Личный вклад автора: обзор методов моделирования, разработка расчетной модели, проведение теплофизических расчетов, анализ результатов и формирование предложений и рекомендаций по совершенствованию расчетных методов.

Степень завершенности: разработана расчетная модель, показан потенциал программы Ansys Fluent, проведено численное моделирование процесса разрушения стальной стенки высокотемпературной струей расплава.

Уровень технических решений: Технические решения, представленные в данной работе, являются современными прецизионными методами проведения численного моделирования сложных многофазных тепловых систем с использованием высокопроизводительной компьютерной техники и лицензионного программного обеспечения. Освоение данных техник и грамотное внедрение в производственный процесс позволят в значительной степени расширить спектр проводимых расчетных исследований.

Публикации: Работы по данному направлению начаты в прошлом году, за это время подготовлена и передана в печать в журнал Вестник НЯЦ РК одна статья «Моделирование взаимодействия струи расплава со стальной стенкой».

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
Основная часть	7
Результаты моделирования	11
Заключение	15
Список источников	16
Приложение А	17

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении анализа условий безопасного проведения экспериментов, предполагающих получение расплава смеси ядерного топлива и конструкционных материалов как объекта исследований, необходимо учитывать возможность выхода расплава за пределы герметичных полостей, в которых происходит разогрев и плавление материалов. Поскольку, как правило, плавление материалов внутри таких полостей сопровождается повышением давления, нельзя исключить возможность струйного истечения расплава из этих полостей в направлении стенок, являющихся элементами барьеров безопасности устройств, предназначенных для плавления материалов. В целях создания защитных барьеров, обеспечивающих реализацию функций безопасности в условиях струйного воздействия расплава на их элементы, необходимо опираться на количественные оценки параметров процессов, происходящих во время такого взаимодействия.

Для количественной оценки процесса взаимодействия струи расплава со стенкой был использован расчетный код Ansys Fluent [1], который, в общем случае, предоставляет возможности для решения теплогидравлических, газодинамических и аэродинамических задач. В нем заложен специальный набор функций и методов для решения задач, связанных с фазовыми переходами материалов такими, как плавление и кристаллизация [2]. Одним из таких методов является применение модели объема жидкости (VOF). Данная физическая модель численно показывает наличие и процентное соотношение компонентов многофазной жидкости. Вместе с тем, без использования специальных приемов, в Ansys Fluent невозможно воспроизвести динамическую картину перемещения материалов и фазовых границ. С этой целью можно задействовать дополнительные возможности программы Ansys Fluent такие, как модель плавления-кристаллизации, пользовательские функции и динамические сетки, но их применение существенно усложняет задачу и требует больших затрат машинного времени.

Альтернативным вариантом, с учетом этих обстоятельств, для описания свойств стальной стенки было предложено использовать модель «квазижидкости», то есть материала с большими величинами вязкости и поверхностного натяжения, при которых жидкость будет иметь характеристики, эквивалентные характеристикам твердого тела, – в конкретном случае, характеристики стали. По мере разогрева такой стенки вязкость «квазижидкости» уменьшается, при этом она приобретает свойства текучести, вплоть до состояния расплава стали.

В данной работе показано применение различных методов численного моделирования для решения задачи взаимодействия струи расплава со стенкой экспериментального устройства.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В рамках данного исследования было рассмотрено четыре способа моделирования взаимодействия расплава со стенкой экспериментального устройства. Все расчеты выполнены в нестационарном режиме в двухмерной осесимметричной постановке. Такой подход обеспечивает полное соответствие размерных и материальных особенностей модели реальной геометрии, а также существенно сокращает количество элементов сетки, что снижает ресурсоемкость при проведении вычислений. Для демонстрации возможностей каждого способа моделирования подготовлен свой расчетный вариант, подробное описание которых приведено далее.

Первый вариант – расплав непосредственно контактирует со стенкой, при этом он неподвижен. В такой постановке модель объема жидкости не используется, так как исследуется только процесс передачи тепла от расплава к стенке без явного ее плавления. Все тела в расчетной области представляются абсолютно "твердыми". Оценка результатов проводится на основании полученного распределения тепла в стенке с нахождением момента достижения максимума температуры и сравнения ее со значением температуры плавления материала. Данный подход имеет ряд плюсов, обусловленных простотой постановки задачи, определения граничных условий, проведения процесса решения и качеством получаемых результатов.

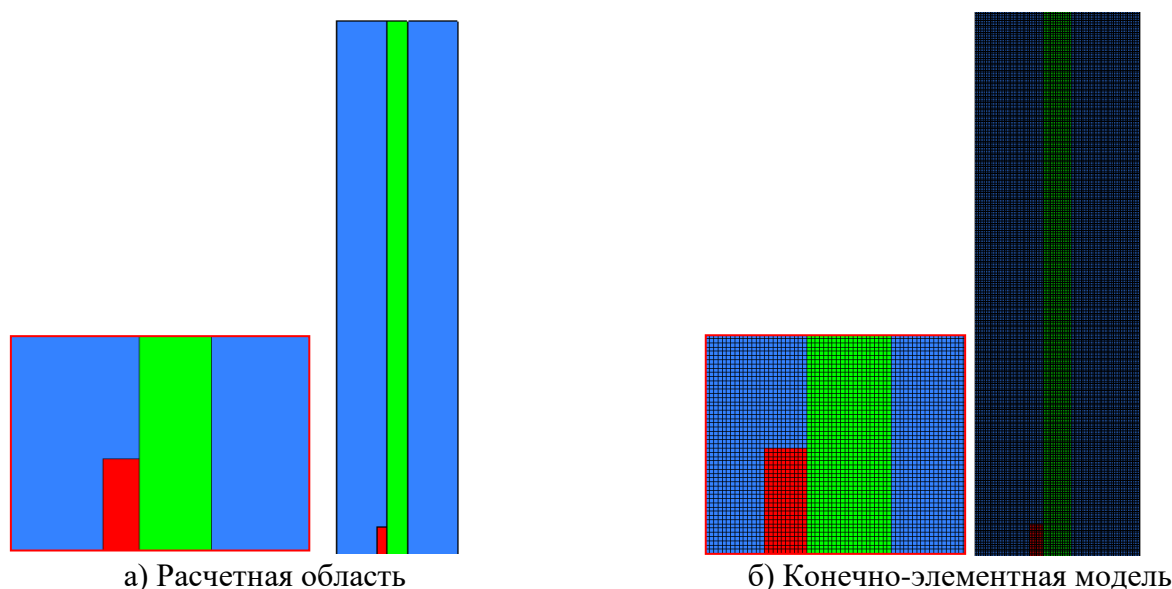
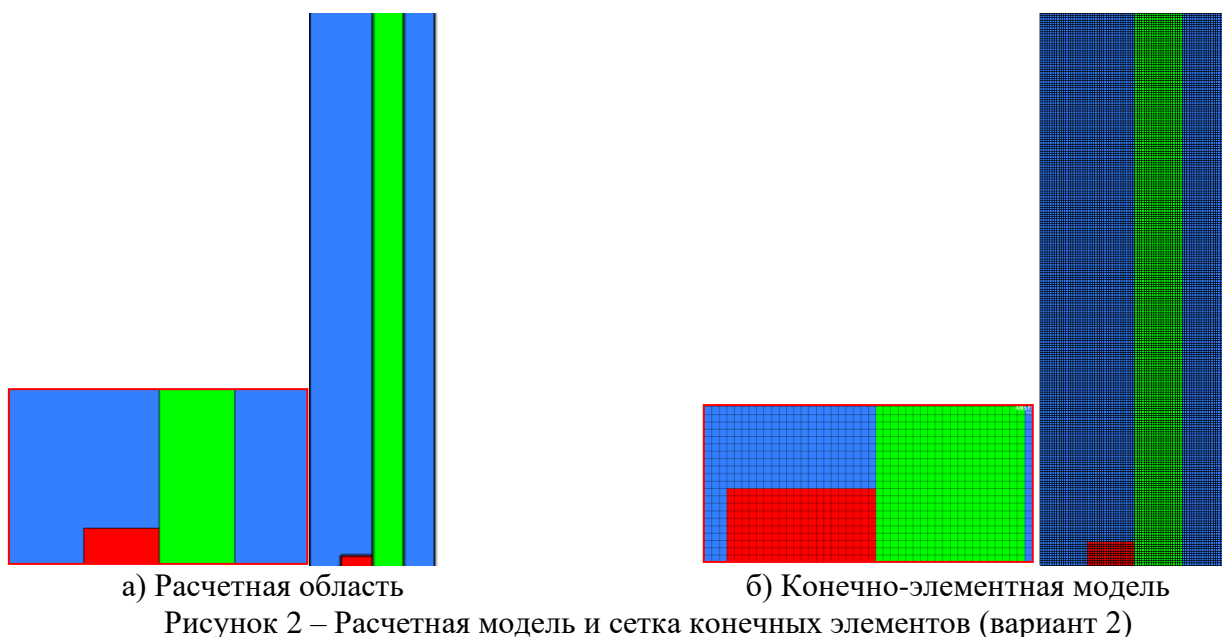


Рисунок 1 – Расчетная модель и сетка конечных элементов (вариант 1)

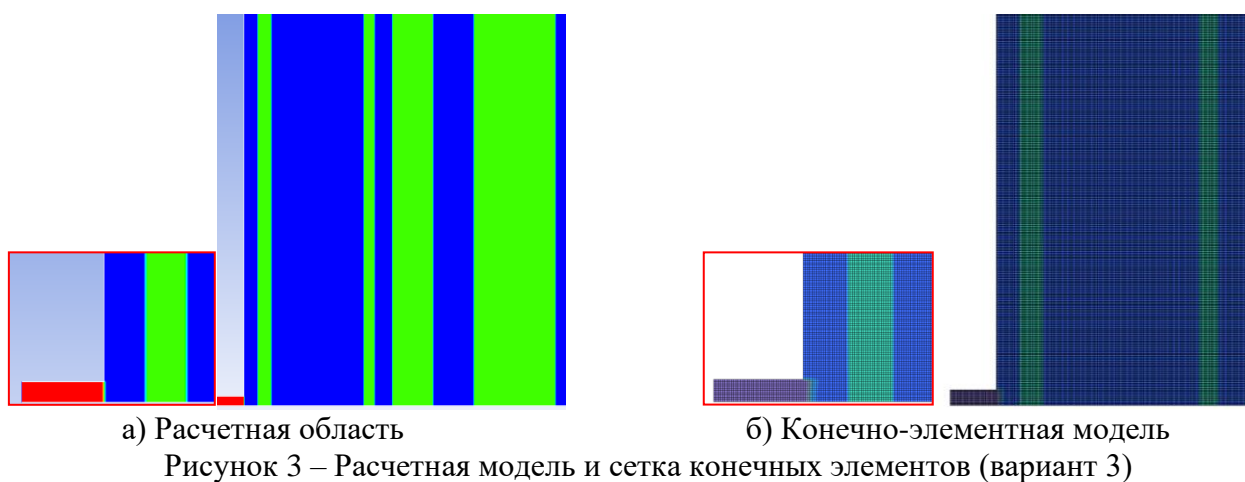
Расчетная модель (рисунок 1) состоит из стенки толщиной 2 мм, фрагмента расплава, плотно прилегающего к стенке и воздуха, который окружает всю область на расстоянии 4 мм. На данной геометрии получена структурированная сетка с размером элемента 0,1 мм. Общее количество элементов расчетной области 240000. Граничные условия – адиабатные стенки слева и справа, ось симметрии внизу области и выходные границы по давлению вверху. Задана начальная температура расплава на уровне 3500 К. Температура окружающего воздуха и стенки имеет значение 400 К. Цель расчета получить поле распределения температуры в расплаве и стенке для оценки возможности ее плавления.

Второй вариант (рисунок 2) повторяет своей геометрией и материальным составом первый, но в данном задействована модель объема жидкости (VOF), с целью обнаружения явной деформации стенки под действием высокотемпературного расплава. Следовательно, все тела в расчетной области представлены "жидкой" фазой.



Геометрические параметры, материальный состав и граничные условия данного варианта аналогичны первому. Единственным существенным отличием является применение модели объема жидкости для оценки возможной деформации части стенки и расплава в результате плавления. Начальная температура расплава также принята на уровне 3500 К, что выше точки плавления материала топлива. Поэтому в начальный момент времени топливо представлено жидкой фазой.

Третий вариант направлен на изучение поведения "холодной" струи расплава. В данном случае выполняется моделирование явного течения струи расплава нормально к поверхности стенки с последующим взаимодействием, обусловленным только кинетическим воздействием без расчета тепловых эффектов. Такая постановка задачи требует однозначного применения многофазной модели течения, в частности модели объема жидкости. Расплав и стеки являются отдельными фазами и имеют индивидуальные размерные и материальные характеристики.



В этом варианте для получения информации о взаимодействии "холодной" струи расплава со стенками, смоделировано четыре стенки экспериментального устройства. Их размеры и взаимное расположение соответствует типичному размещению силовых и защитных корпусов реакторных устройств. Расплав, стенки и воздух имеют температуру 300 К. Движение расплава перпендикулярно к стенкам обеспечивается граничным условием по давлению со значением 1,0 МПа. Цель данного расчета заключается в том, чтобы показать влияние кинетической энергии "холодного" расплава на результаты расчета в случае использования возможностей модели объема

жидкости со стандартными параметрами и свойствами материалов. Сеточная структура расчетной области состоит из 620000 элементов, которые расположены с шагом 0,1 мм.

В четвертом варианте моделируется процесс разрушения стальной стенки высокотемпературной струей расплава, представленной в виде "квазижидкости" нестандартным методом. Показана возможность использования нестандартного подхода, который обеспечивает получение достоверных результатов.

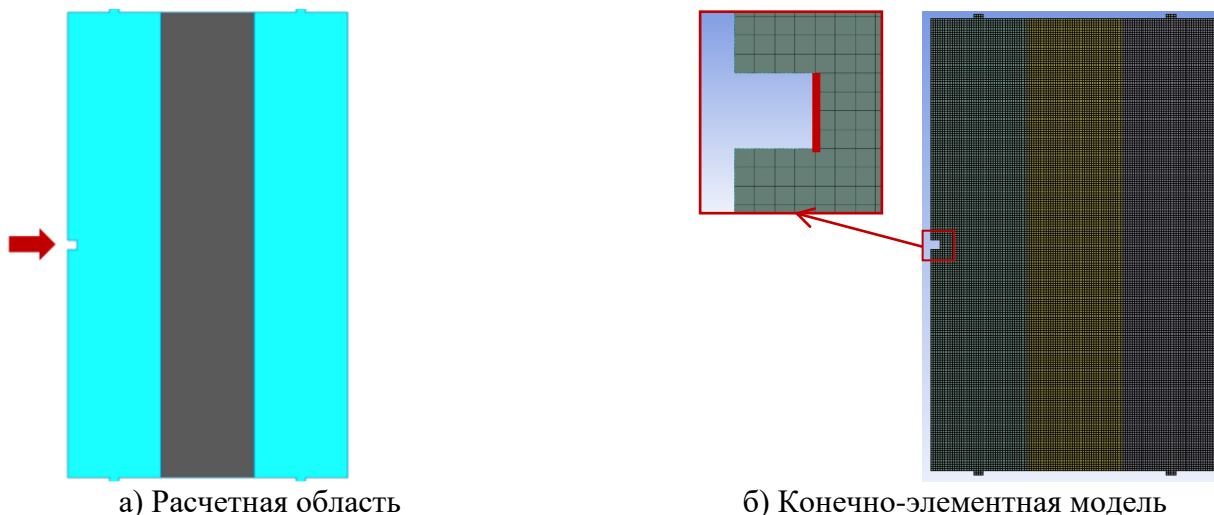


Рисунок 4 – Расчетная модель и сетка конечных элементов (вариант 4)

В четвертом варианте рассматривалось взаимодействие высокотемпературной струи расплава (двуокись урана) с плоской вертикальной стенкой (сталь 12X18H10T) толщиной 2 мм, боковые поверхности которой контактируют с газом. Толщина каждого слоя газа равна 2 мм. Протяженность расчетной области в вертикальном направлении составляет 20 мм. Расчеты проведены для двух вариантов диаметра отверстия, через которое происходит истечение расплава из полости плавления – 0,2 мм. Расплав поступает во входную зону через вертикальную торцевую стенку входной зоны.

Размерная схема расчетной области и конечно-элементное представление этой области в расчетной модели выбраны исходя из соображений оптимального сочетания качества результатов расчета при допустимых затратах расчетного времени.

Сеточная модель содержит 24416 элементов (минимальный размер элемента равен 0,05 мм).

Для расчетных областей заданы следующие граничные условия:

- верхняя и нижняя границы расчетной области открыты и на них задано постоянное давление, равное начальному давлению в соответствующем слое газа, что подразумевает возможность свободного выхода массы и энергии через границу при увеличении давления в слое газа;
- через правую вертикальную границу расчетной области перемещение массы и энергии невозможно;
- через левую вертикальную границу расчетной области перемещение массы и энергии невозможно по всей протяженности границы, за исключением входной зоны, моделирующей отверстие, через которое расплав поступает в расчетную область. Геометрические размеры входной зоны расчетной области подбирались итерационно, исходя из требования формирования стабильной струи расплава, направленной на стенку.

Начальные условия и допущения при проведении расчетов:

- начальная температура стальной стенки и окружающего газа равна 573 К;
- скорость течения расплава двуокиси урана в струе определяется избыточным давлением в гипотетической полости плавления, равным 1,5 МПа (давление расплава на входе в отверстие);
- температура расплава двуокиси урана в полости плавления равна 4000 К и остается постоянной на протяжении всего расчета;

- теплопроводность (17 Вт/м·К) и вязкость (0,003 Па·с) расплава двуокиси урана остаются постоянными на протяжении всего расчета;
- плотность и теплоемкость двуокиси урана, теплоемкость и вязкость стали, используемые в расчете, меняются с изменением температуры [3];
- течение струи расплава турбулентное.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В этом разделе приводятся подробные результаты численного моделирования каждого варианта. Описание геометрии используемых моделей, сеточной структуры и входных данных приводится в предыдущем разделе.

Вариант 1

Результаты моделирования данного варианта показывают тепловое состояние расчетной области. Выводы о возможном плавлении материала принимаются на основании сравнения данных о максимальной температуре. На рисунке 5 приведена покадровая картина перераспределения тепла от расплава к стенке до 0,15 с. Более полная картина показана графически на рисунке 6.

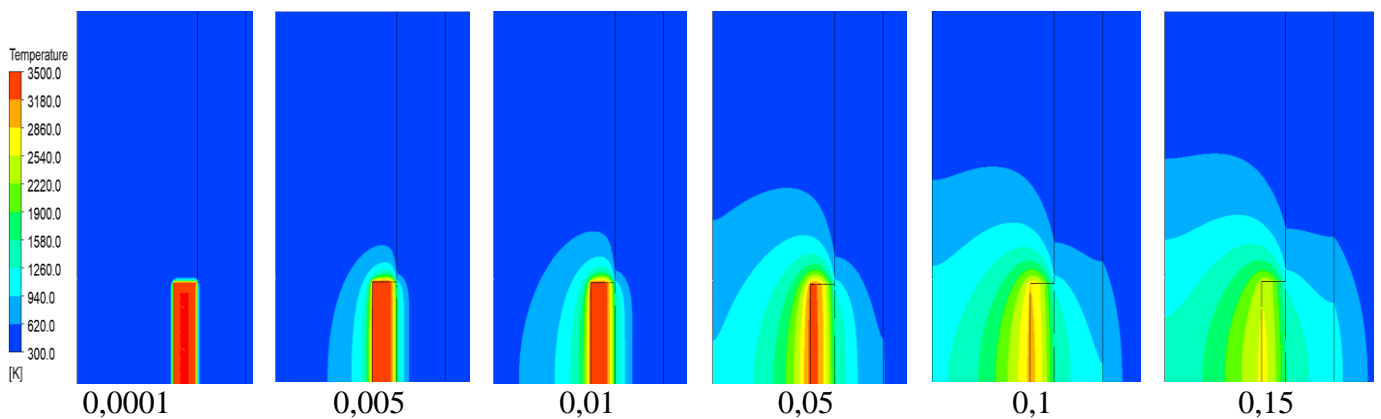


Рисунок 5 – Распределение температуры расплава и стенки

Построен график изменения температуры расплава и стенки. Представлены максимальные значения температуры, которые находятся в месте контакта поверхностей расплава и стенки. Показана динамика остывания расплава и нагрева стенки за счет теплопередачи. Максимальная температура стенки 1618 К достигается практически сразу после начала моделирования и начинает снижаться, при этом она не достигает температуры плавления 1700 К.

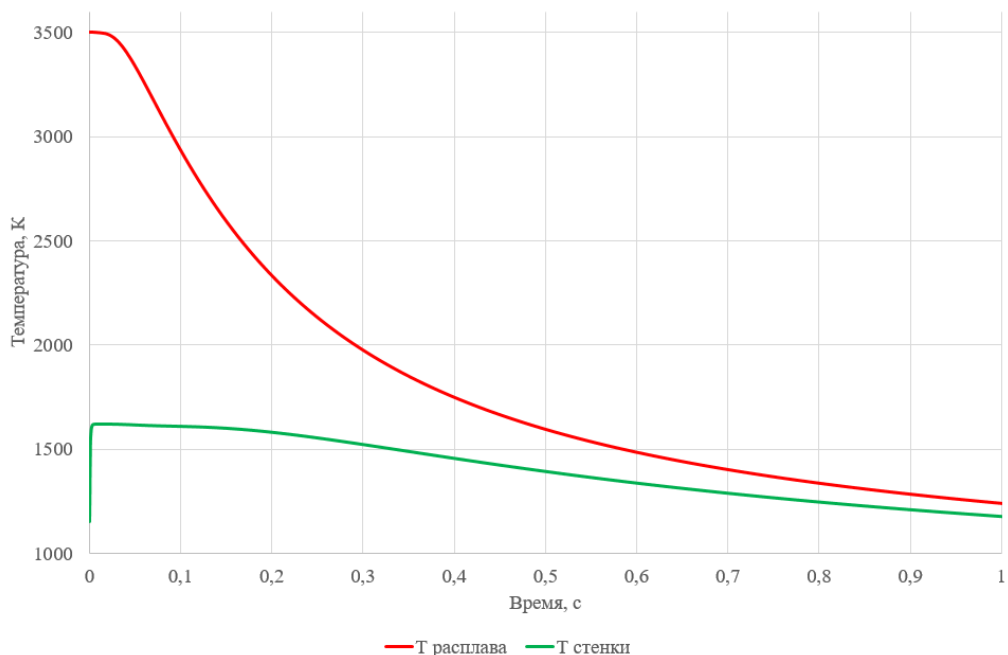


Рисунок 6 – Изменение температуры расплава и стенки по времени

Вариант 2

Условия проведения моделирования этого варианта аналогичны первому. Поле температуры также совпадает показанному на рисунке 5. Цель данного варианта показать возможность явной деформации расплава и стенки при достижении температуры плавления материала.

На рисунке 7 показана деформация стенки и расплава при использовании модели объема жидкости. Начальная температура расплава 3500 К превышала температуру плавления материала, поэтому расплав в начальный момент времени находился в жидкой фазе. Спустя 1 мс после начала моделирования температура расплава резко снижается (рисунок 5) и распределяется между воздухом и стенкой, произошло отверждение расплава.

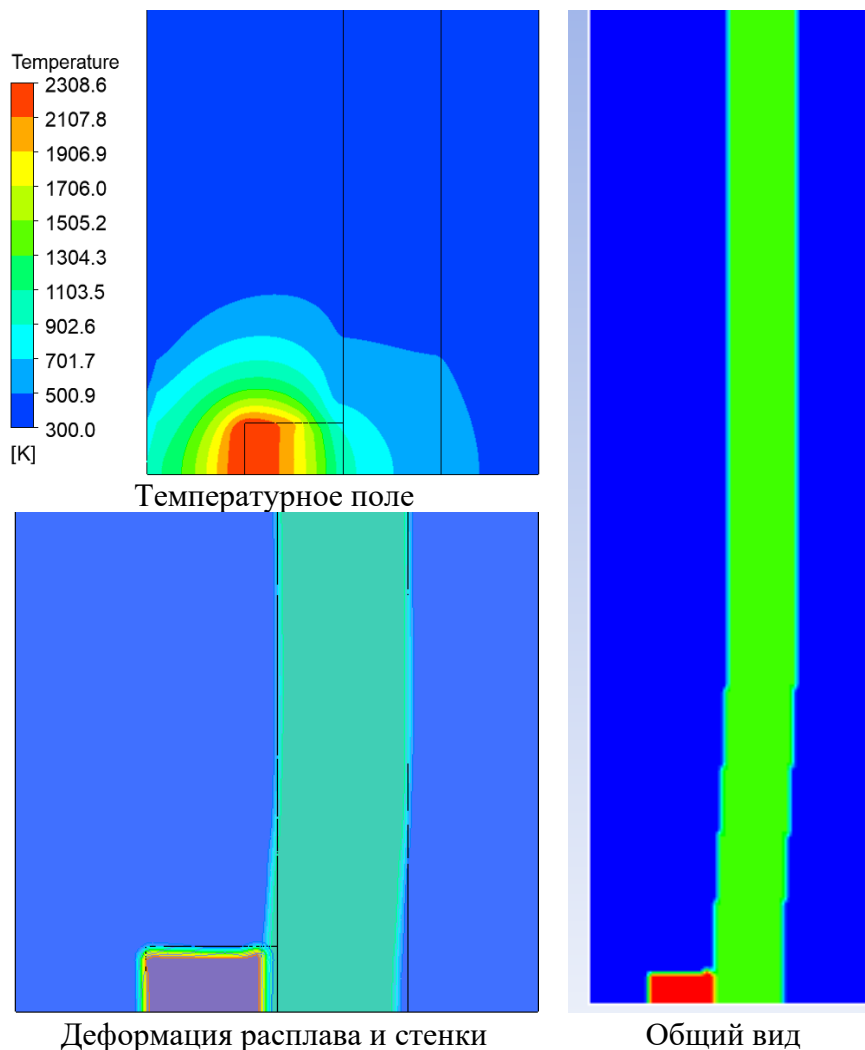


Рисунок 7 – Деформация расплава и стенки (1 мс)

По причине небольшого количества расплава, контактирующего со стенкой и высокой теплопроводности последней, температура стенки не превысила температуру плавления материала (максимальное значение температуры стенки 1572 К) и фазового перехода не произошло. Тем не менее она незначительно деформировалась. Неустойчивое поведение «твердого» тела до точки фазового перехода на данный момент не имеет ясного объяснения. Имеется ряд предположений, которые требуют дальнейшего изучения.

Вариант 3

Как видно из представленной картины течения "холодной" струи расплава (рисунок 8), при скорости 15,7 м/с (давление на входе расплава 1 МПа) она взаимодействует со стенками корпуса экспериментального устройства, разрушая их. При этом температура расплава и стенок находится

на уровне 300 К, что исключает расчет процесса плавления, а разрушение происходит только за счет кинетической энергии расплава. Четыре стенки воздействием расплава разрушаются в течение 17,5 мс.

В дальнейшем необходимо принимать во внимание особенности поведения расчетной модели с целью недопущения ошибочных выводов по результатам моделирования. А зависимость от температуры свойства материалов нужно задавать в явном виде на всем диапазоне возможных значений.

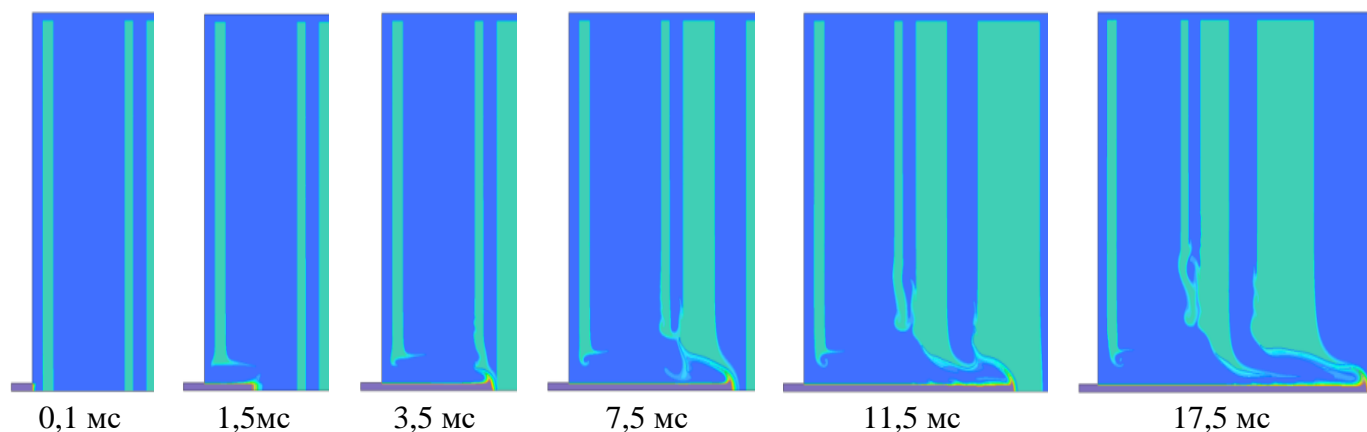


Рисунок 8 – Покадровая картина течения "холодной" струи расплава

Таблица 1 – Результаты моделирования третьего варианта

Параметр	Значение
Начальный диаметр струи расплава, мм	0,2
Средний расход расплава, кг/с	6,3
Масса расплава, кг	0,11
Средняя скорость расплава, м/с	15,7
Время до сквозного проплавления стенки, с	0,0175

Вариант 4

Результаты расчета этого варианта являются наиболее информативными. Здесь учтены все возможные особенности моделирования этого процесса стандартными моделями (VOF модель) и нестандартными подходами (использование «квазижидкости»). Результаты расчетов четвертого варианта приведены в таблице 3 [4].

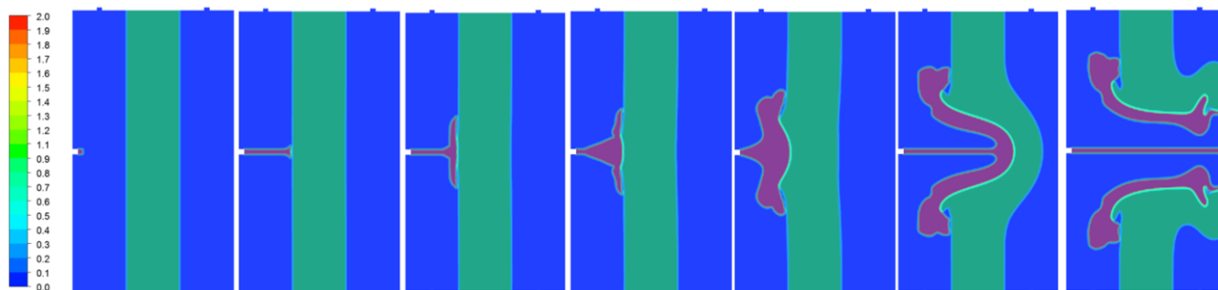
Таблица 2 – Результаты моделирования четвертого варианта

Параметр	Значение
Начальный диаметр струи расплава, мм	0,2
Средний расход расплава, кг/с	7,82
Масса расплава, кг	0,0275
Средняя скорость расплава, м/с	19,5
Время до сквозного проплавления стенки, с	0,0035

Моделирование с применением нестандартного метода «квазижидкости» позволяет точно контролировать момент фазового перехода (плавления). Это достигается путем явного задания всех зависимых от температуры свойств материалов. К недостаткам данного метода относится трудоемкость подготовки модели и ресурсоемкость вычислительного процесса.

Покадровое представление результатов расчета этого варианта показано на рисунке 9.

Картина течения струи расплава



Поле температуры

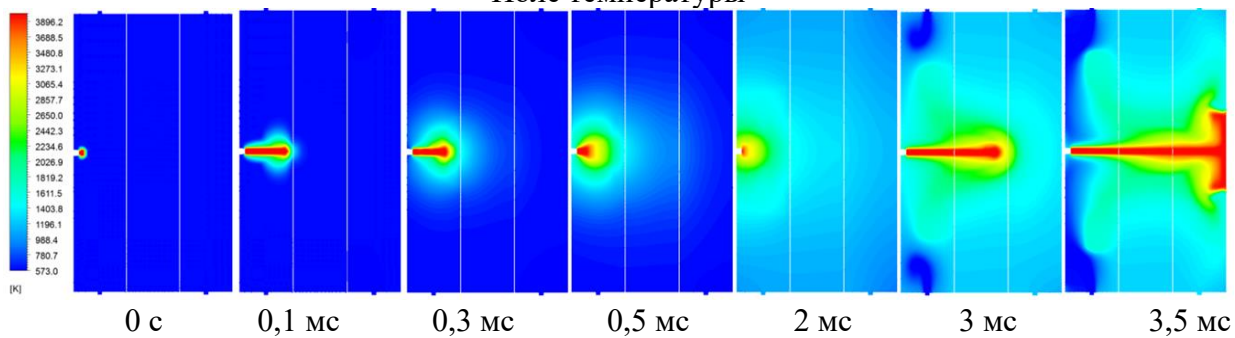


Рисунок 9 – Покадровая анимация разрушения стенки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам расчета первого варианта можно сделать вывод о том, что данный подход является полноценным способом численного моделирования широкого спектра тепловых задач, в том числе и задач, связанных с плавлением конструкционных материалов экспериментальных устройств. Единственным недостатком является отсутствие возможности исследования перемещения расплава топлива и стенки.

Во втором варианте помимо тепловых характеристик рассчитана явная динамика поведения стенки, на которую воздействует расплав. В рассмотренной конфигурации имеется лишь небольшое количество расплава, энергии которого не достаточно для более интенсивного воздействия на стенку. Однако имеющиеся результаты доказывают состоятельность данного метода и возможность его применения при проведении подобных расчетов.

Анализ результатов третьего варианта демонстрирует ряд сложностей, связанных с применением данного метода при решении подобных задач. Предположительно это может быть вызвано спецификой применения данного метода, которая в корне отличается от поставленных в рамках данного исследования задач. Необходимо проводить дополнительные исследования возможностей применения метода объема жидкости для численного моделирования взаимодействия высокотемпературной струи расплава со стенками экспериментального устройства.

Результаты расчетов четвертого варианта показывают, что использование модели «квазижидкости» при описании свойств стальной стенки позволяет воспроизвести качественную картину разрушения стальной стенки струей расплава двуокиси урана. Данный метод не является стандартным методом программы Ansys Fluent, но его применение показывает возможность достижения представительных результатов при решении подобных задач.

Проведены расчетные исследования способов численного моделирования взаимодействия расплава со стенками экспериментального устройства. Показаны преимущества и недостатки отдельных методик. Требуется проведение дополнительных исследований с целью выбора оптимального способа численного моделирования процесса разрушения стенки струей расплава.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 1 Ansys Fluent User's Guide, Release 13.0; Ansys, Inc.; November, 2010.
- 2 Ansys Fluent Theory Guide, Release 15.0; Ansys, Inc.; November, 2013.
- 3 Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data / IAEA, Vienna, 2008.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций по теме

1 Сураев А.С., Иркимбеков Р.А., Вурим А.Д. «Моделирование взаимодействия струи расплава со стальной стенкой» / Вестник НЯЦ РК, 2020 (в печати)