

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

Қабдылқақов Ержан Асқарұлы

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ И
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТОПЛИВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА**

Работа, представленная на конференцию-конкурс НИОКР
молодых ученых и специалистов
Национального ядерного центра Республики Казахстан

(инженерно-технические исследования)

Руководитель: Сураев А.С
Научный сотрудник лаборатории
исследований теплофизических и нейтронно-
физических характеристик облучательных
устройств, Филиал «ИАЭ» РГП НЯЦ РК

г. Курчатов, 2020 г.

АВТОР

Қабдылжақов Ержан Асқарұлы

Инженер лабораторий исследований теплофизических и нейтронно-физических характеристик
облучательных устройств

Филиала «Институт атомной энергии» РГП «НЯЦ РК».

1996 года рождения.

образование высшее (окончил ГУ имени Шакарима в 2017 году).

специальность – «Техническая физика»

квалификация по диплому – бакалавр.

работает в Филиале «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК» с 2019 г.,

общий стаж работы – 0,5 лет.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Инженер лабораторий 222

 10.04.2020 Е.А. Қабдылжақов
подпись, дата

Научный сотрудник лабораторий 222

 10.04.2020 А.С. Сураев
подпись, дата

Начальник лабораторий 222

 10.04.2020 Р.А. Иркимбеков
подпись, дата

ҚАБДЫЛҚАҚОВ Е.А.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТОПЛИВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

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. Красноармейская, 10,
тел. (7-722-51) 3-31-25, 4247(вн.)
факс (7-722-51) 3-31-25
e-mail: kabdylkakov@nnc.kz

РЕФЕРАТ

Конкурсная работа содержит 15 страниц, 5 рисунков, 3 таблицы, 7 источников

VOLUME OF FLUID, ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ, ОБЪЕМНАЯ ФРАКЦИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО, РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ

Объект исследования: Экспериментальное устройство.

Цель работы: Исследования возможностей программы Ansys Fluent для моделирование процесса плавления и перемещения жидкой фазы материалов в экспериментальном устройстве.

Задачи исследований:

- построение расчетной двухмерной модели с простой геометрией для моделирование процесса плавления материалов и дальнейшего перемещения жидкой фазы;
- построение расчетной двухмерной модели экспериментального устройства;
- проведение численных расчетов;
- обработка и анализ результатов.

Методика исследований заключается в использовании многофазной Volume of Fluid модели течения жидкости в программе Ansys Fluent для численного расчета процесса плавления и перемещения материалов в экспериментальном устройстве.

Результаты работ: Проведено моделирование процесса перемещения жидкой фазы материалов на упрощенной геометрии и на модели экспериментального устройства.

Актуальность работы: Моделирование процессов плавления и перемещения материалов в явном виде вызвано необходимостью повышения уровня проведения расчетных исследований, проводимых в рамках обоснования безопасности экспериментальных устройств, особенно тех, в которых во время реакторных испытаний происходит плавление и перемещение топлива и конструкционных материалов в объеме устройства.

Научная новизна: использование многофазной Volume of Fluid модели течения жидкости в программе Ansys Fluent при решении задач, связанных с безопасностью экспериментальных устройств.

Практическая ценность: Моделирование процесса непосредственного взаимодействия расплава топлива с конструкционными элементами активной зоны позволит прогнозировать процессы, происходящие в устройстве в период внутриреакторных испытаний.

Личный вклад автора: построение расчетных моделей, проведение численных расчетов, обработка и анализ результатов.

Степень завершенности: Построена двухмерная расчетная модель экспериментального устройства, проведены численные расчеты процесса перемещения жидкой фазы материалов. На простых моделях отработаны методики подготовки и проведения подобных расчетных исследований.

Уровень технических решений: В работе применяется метод многофазной жидкости Volume of Fluid программы Ansys Fluent для моделирования процесса плавления топливных элементов в экспериментальном устройстве для реакторных экспериментов. Моделирование процесса плавления и перемещения топливных элементов позволяет точнее прогнозировать поведение расплава топлива при взаимодействии с конструктивными элементами экспериментального устройства, тем самым повышает уровень безопасности экспериментов.

Публикации: На текущий момент публикаций по теме работы нет.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	8
1 Построение расчетных моделей.....	8
2 Результаты расчетов.....	10
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	14
Список использованных источников.....	15

ВВЕДЕНИЕ

Расчетное обоснование всех экспериментальных работ, связанных с реакторными и внереакторными экспериментами проводится в Филиале ИАЭ РГП НЯЦ РК с помощью лицензионного программного обеспечения компании ANSYS. Одной из задач, встающих на пути расчетчика, является задача моделирования теплового состояния топливной секции при ее плавлении и перемещении в объеме устройства. На данный момент такие задачи решаются путем итерационного перестроения геометрии модели, полагая новое положение и форму расплава топлива и конструкционных материалов. Такой подход содержит в себе ряд допущений и предположений, а также требует значительного количества времени расчетчика и ресурсов компьютерного оборудования. При этом в программе ANSYS Fluent имеется возможность моделирования многофазных течений методом объема жидкости (VOF) с учетом модели плавления и кристаллизации (solidification and melting).

ANSYS – программный пакет конечно – элементно анализа, который применяется для инженерного анализа и численного моделирования [1, 2]. ANSYS FLUENT – программное обеспечение, которое содержит широкие возможности физического моделирования, необходимые для моделирования потока жидкости или газа, турбулентности, теплообмена и химических реакций для промышленного применения [3]. В нем, в том числе, заложен специальный набор функций и методов для решения задач, связанных с фазовыми переходами материалов, такими как плавление и кристаллизация. 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 пользовательские функции и динамические сетки, но их применение существенно усложняет задачу и требует больших затрат машинного времени. С учетом этих обстоятельств для моделирования процесса плавления топлива и последующего взаимодействия его со стальными стенками было предложено использовать инструмент многофазной жидкости Volume of Fluid (VOF).

Модель VOF может моделировать две или более несмешивающиеся жидкости, решая единый набор уравнений импульса и отслеживая объемную долю каждой из жидкостей по всей области.

Для каждой дополнительной фазы, которую вы добавляете в свою модель, вводится переменная: объемная доля фазы в вычислительной ячейке. В каждом контрольном объеме доли объема всех фаз суммируются в единицу. Если долю объема q -ой фракции в ячейке обозначить как α_q , то при расчете возможны три состояния:

- $\alpha_q = 0$ - в элементе q -ая фракция отсутствует;
- $\alpha_q = 1$ - элемент заполнен q -ой фракцией;
- $0 < \alpha_q < 1$ - конечный элемент частично заполнен жидкостью q -ой фракции.

Использующиеся в уравнениях неразрывности и движения теплофизические свойства жидкости определяются с учетом объемной доли каждой из фракций в расчетном элементе. Например, плотность в элементе вычисляется по формуле:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \alpha_q \cdot \rho_q \quad (1)$$

где:

ρ_q - плотность q -ой фракции, n - количество фракций.

Остальные теплофизические свойства вычисляются аналогично.

Каждая из фракций жидкости в VOF-модели описывается своим уравнением неразрывности. Для q -ой фракции, это уравнение имеет следующую форму:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \nabla \bar{w} \cdot \alpha_q = \frac{S \alpha_q}{\rho_q} \quad (2)$$

где: S_{α_q} - массовая добавка q -ой фракции, τ – время, \vec{w} - вектор скорости, ρ_q - плотность q -ой фракции, $\nabla \cdot \vec{w}$ - дивергенция вектора скорости для декартовой системы координат, которая определяется как:

$$\nabla \cdot \vec{w} = \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \quad (3)$$

Уравнение движения в VOF-модели применяется для описания всех фракций жидкости одновременно и имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial\tau} + \nabla(\rho\bar{w}\bar{w}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\bar{w} + \bar{w}^T)] + \rho \cdot g + S \quad (3)$$

где: g - вектор гравитации, μ - динамическая вязкость среды, p - гидростатическое давление, S - пористость или добавка импульса.

Уравнение энергии в VOF-модели, аналогично уравнению сохранения количества движения, применяется для описания всех фракций жидкости одновременно:

$$\frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial\tau} + \nabla(\bar{w}(\rho E + p)) = \nabla(k_{eff}\nabla T) + q_v \quad (4)$$

где: q_v - объемное энерговыделение, k_{eff} - эффективный коэффициент теплопроводности. Внутренняя энергия E и температура T в уравнении энергии для VOF-модели определяются как среднemasовые значения [4, 5].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Построение расчетных моделей

Модель с упрощенной геометрией

С целью исследования возможности применения метода многофазной жидкости Volume of Fluid (VOF) для численного моделирования процесса плавления и перемещения топлива были разработаны следующие модели:

- двухмерная модель с простой геометрией;
- простыми геометрическими объектами;
- двухмерная модель экспериментального устройства (ЭУ).

Первая двухмерная модель была построена с целью моделирования процесса движения жидкой фазы и процесса плавления простых геометрических объектов. Исследуемый объект представляет собой квадрат со стороной 20 мм, который установлен на подставку (рисунок 1).

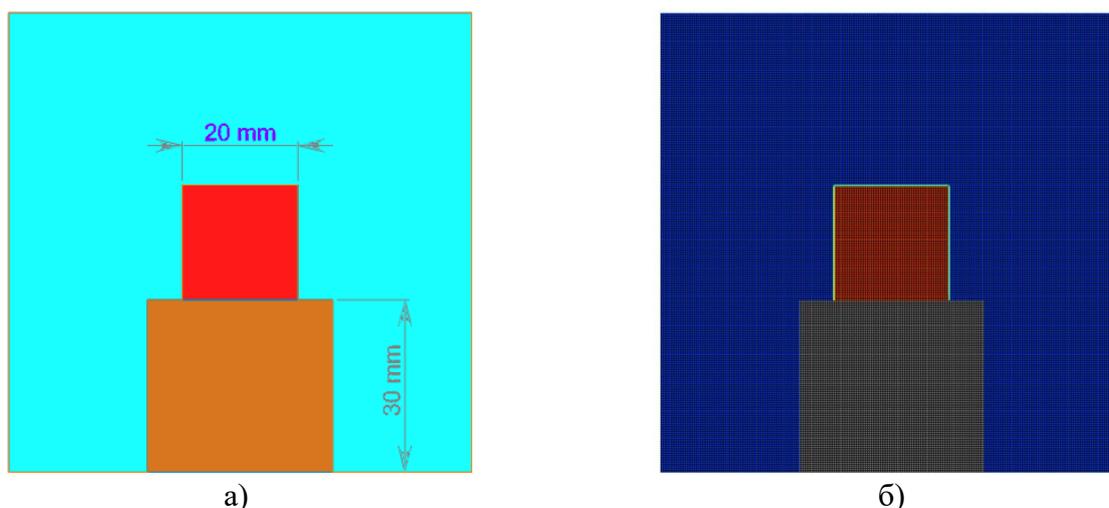


Рисунок 1 – Расчетная двухмерная модель. а-геометрическая модель расчетной сетки, б- расчетная конечно-элементарная сетка.

Конечно –элементарная сетка первой модели состоит из 169000 элементов, а минимальный размер элемента равен 0,2 мм.

В качестве материала для первой модели были выбраны имеющиеся в программе Ansys Fluent материалы. Материалы только такого типа могут быть применены в многофазной модели. В качестве материала для подставки была задана нержавеющая сталь, которая является твердым телом «solid» и не участвует в фазовом переходе. Теплофизические свойства данных материалов приведены в таблице 1.

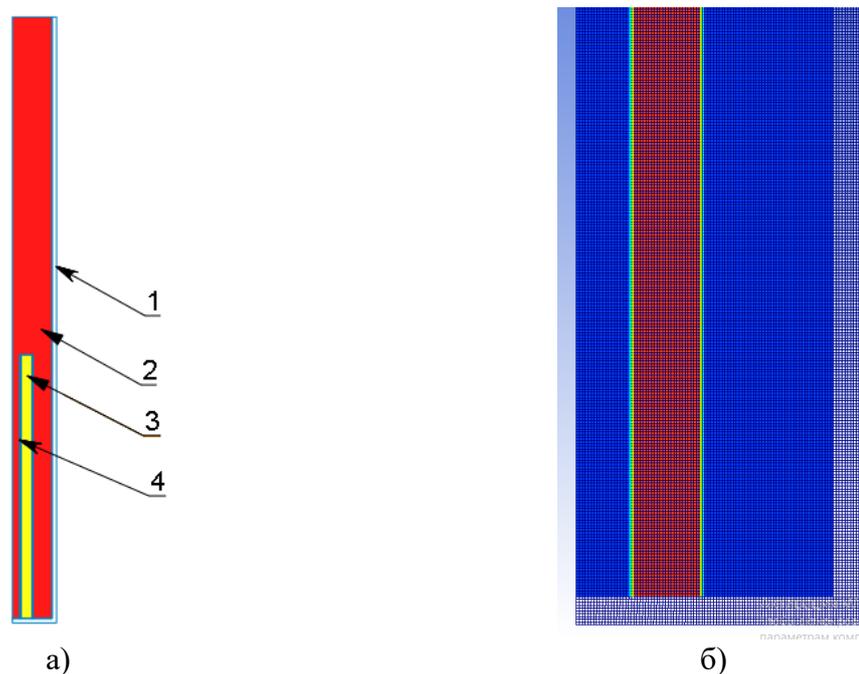
Таблица 1 – Теплофизические свойства материалов

Материал	Тип	C_p , Дж/кг·К	ρ , кг/м ³	λ , Вт/м·К	μ , кг/м·с	T плавл., К
Aluminium-solid	fluid	$f(T)^1$	2719	0,0454	0,0454	670
Ice	fluid	$f(T)^1$	915	0,0454	0,0454	273
Steel (сталь)	solid	502	8030	16,27	–	1700

¹значения данных теплофизических свойств приведены в справочной литературе [6].

Модель экспериментального устройства

Расчетная область второй модели представляет осесимметричную двухмерную модель ЭУ, которое состоит из корпуса, топлива, оболочки топлива и свинца (рисунок 2). Конечно-элементная сетка ЭУ состоит из 139000 элементов. Минимальный размер элемента составляет 0,2 мм.



а) 1-корпус, 2-свинец, 3-топливо, 4-оболочка топлива

Рисунок 2 – Расчетная двухмерная модель ЭУ. а-геометрическая модель расчетной сетки, б- расчетная конечно-элементная сетка.

Учитывая симметричность экспериментального устройства относительно вертикальной оси, расчетная область представляет одну вторую часть двухмерной модели экспериментального устройства. В таблице 2 показаны геометрические параметры двухмерной модели ЭУ.

Таблица 2 – Геометрические параметры ЭУ

Параметр	Значение
Высота экспериментального устройства, мм	278
Высота топливного столба, мм	121
Внутренний радиус корпуса, мм	18
Толщина корпуса, мм	2
Внутренний радиус топлива, мм	3,8
Внешний радиус топлива, мм	8,8
Толщина корпуса, мм	0,6

В качестве материала топлива было задано топливо быстрого реактора, а материалом для корпуса послужила сталь марки 12X18Н10Т. Для оболочки топлива задана сталь марки ЭП-823, которая имеет повышенную устойчивость к свинцовому теплоносителю при высоких температурах. Теплофизические свойства материалов заданы в таблице 3.

Ряд теплофизических свойств материалов приведенных в таблице 1 и 3 имеют зависимость от температуры и в программе Ansys Fluent задаются различными аппроксимациями. В литературе [6, 7] приведены значения теплофизических свойств материалов заданных в таблицах 1 и 3. В материалах типа solid параметры как температура плавления и вязкость не задаются.

Таблица 3 –Теплофизические свойства материалов модели ЭУ

Материал	Тип	C_p , Дж/кг·К	ρ , кг/м ³	λ , Вт/м·К	μ , кг/м·с	T плавл., К
Топливо	fluid	$f(T)^2$	12282,1	$f(T)^2$	1,06	2895
ЭП-823	fluid	$f(T)^2$	7700	0,0454	0,03	1703
Свинец	fluid	$f(T)^2$	$f(T)^2$	$f(T)^2$	$f(T)^2$	600,5
Сталь 12Х18Н10Т	solid	600	7900	30	-	1700

²значения данных теплофизических свойств заимствованы в справочной литературе [7].

2 Результаты расчетов

Результаты моделирования упрощенной геометрии

Модели с простой геометрией были заданы следующие начальные условия:

- Включен учет влияния сил гравитации;
- Начальная температура окружающего воздуха равна 300 К;
- Начальная температура объекта исследования и основания равна 298 К.

В результате численного расчета первой модели было получено распределение объемной фракции для материалов «aluminum –solid» и «ice», изменяющегося по времени. На рисунке 3 показано распределение объемной фракции «aluminum –solid».

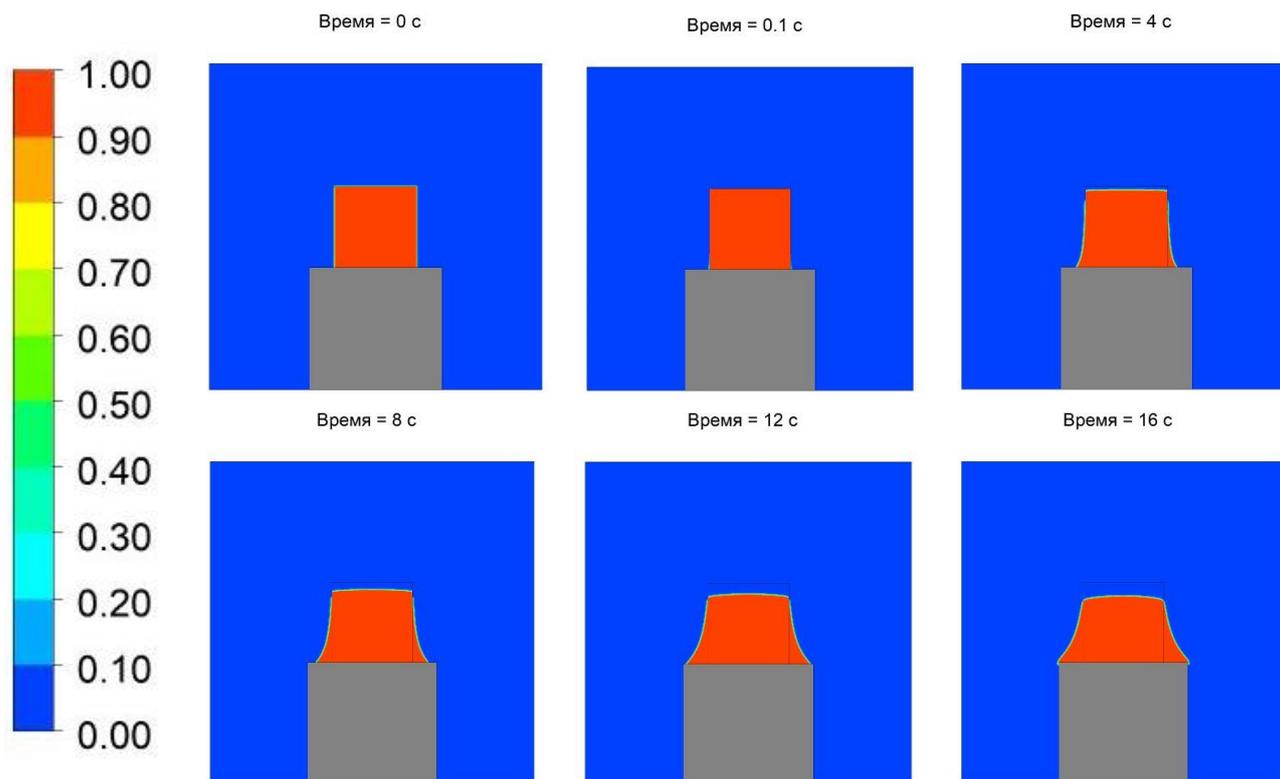


Рисунок 3 – Распределения объемной фракции «aluminum-solid» после различных промежутков времени

Для момента времени 0,1 с объемная фракция «aluminum-solid» практически не меняется, но с увеличением значения времени объемная фракция данного материала постепенно «расплывается» под действием сил гравитации. Расчет проведен до 16 с.

На рисунке 4 показано, что объемная фракция материала «ice» по сравнению с объемной фракцией «aluminum-solid» очень быстро «расплывается», вытекая вниз под действием сил гравитации уже спустя 0,1 с. Тем самым, мы приходим к выводу, что используя метод VOF мы

можем наблюдать изменения объемной фракции по времени, наблюдая процесс движения жидкой фазы в объеме расчетной области.

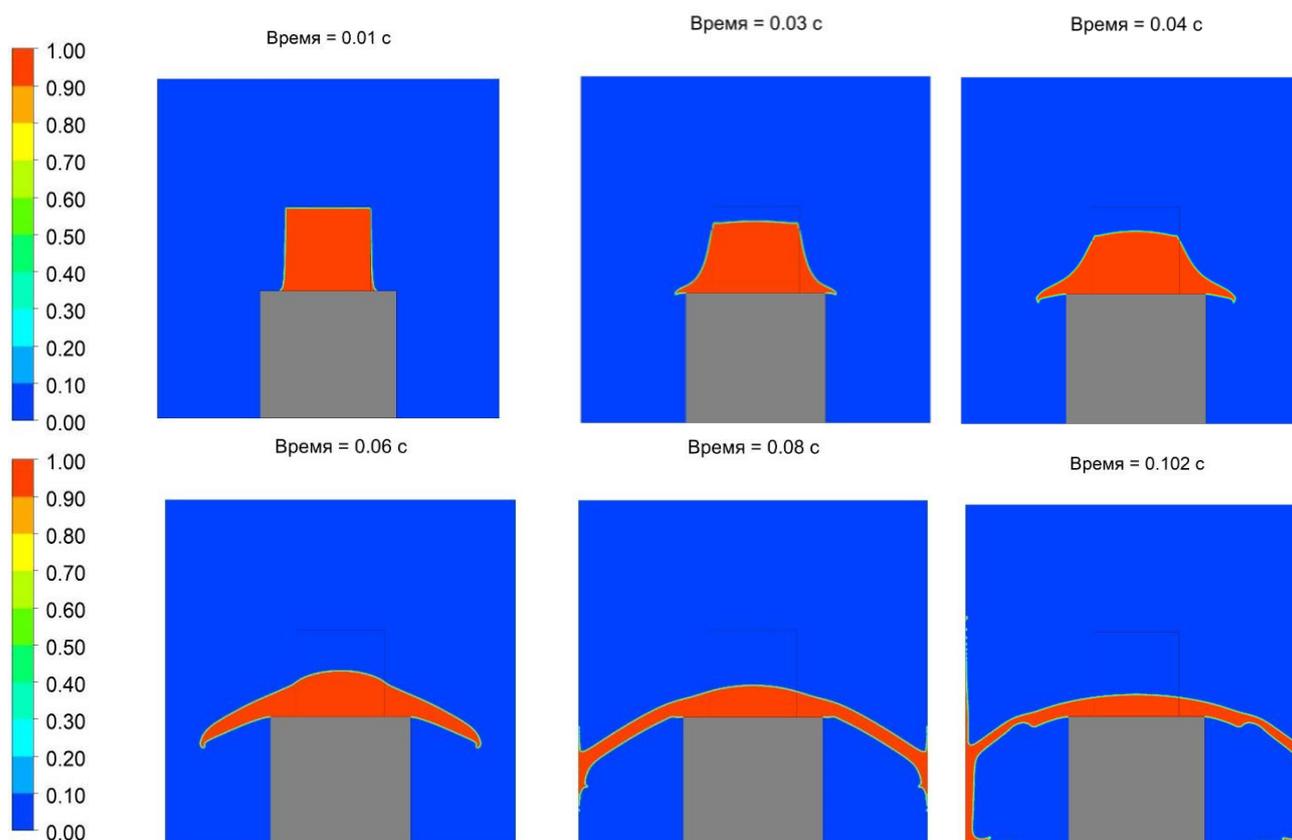


Рисунок 4 – Распределения объемной фракции «ice» после различных промежутков времени

Следует также заметить, что для материала «aluminum-solid» температура плавления была задана равной 670 К, тогда как начальная заданная температура равна 298 К и в течение расчета не увеличивалась, так как источники внешнего нагрева или внутреннее энерговыделение отсутствует. Даже при таких условиях материал перемещается вниз под действием сил гравитации.

Используя программу CFD Post можно создавать анимацию из результатов нестационарного расчета, что позволяет наблюдать покадровую картину изменения объемной фракции ЭУ и температуры элементов по времени.

Результаты моделирования ЭУ

Для модели ЭУ были заданы следующие начальные условия:

- Включен учет влияния сил гравитации;
- Начальная температура топлива равна 3500 К;
- Начальная температура оболочки топлива равна 1600 К;
- Начальная температура свинца 700 К;
- Начальная температура корпуса 600 К.

В результате численного расчета модели ЭУ было получено распределение объемной фракции для материалов ЭУ. Топливу, оболочке топлива, свинцу были заданы свойства материала типа fluid, тогда как корпусу материал типа solid.

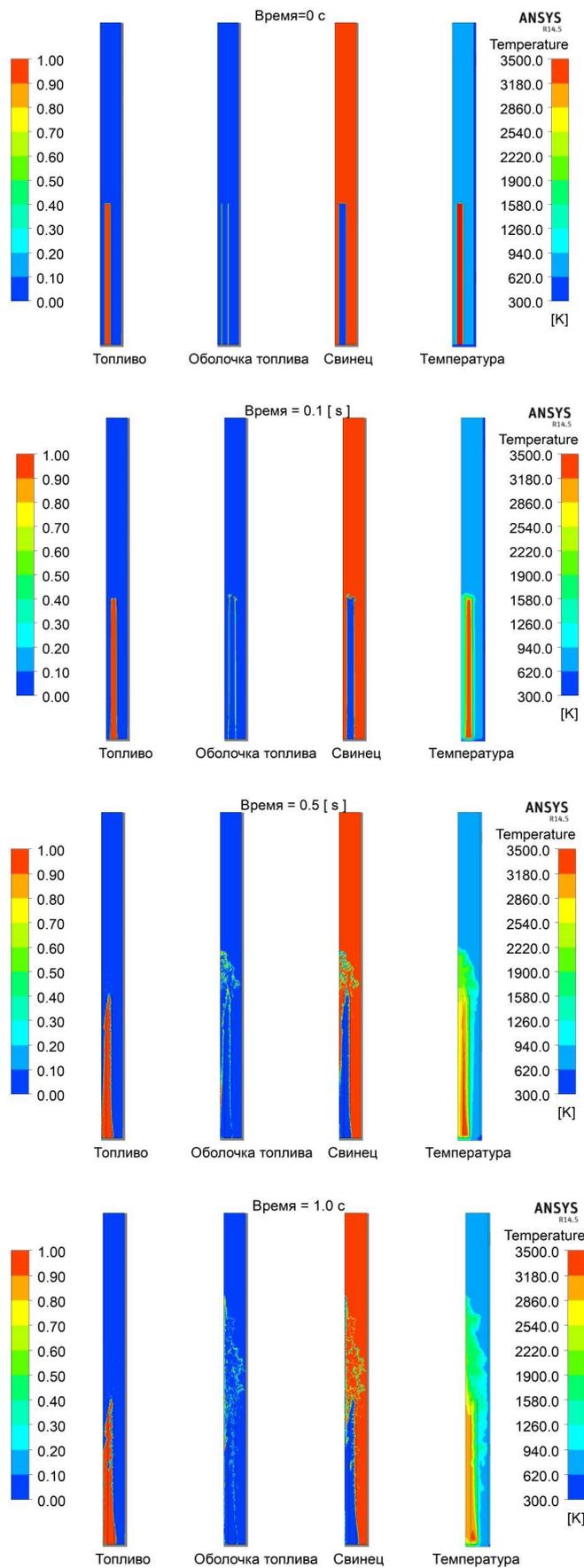


Рисунок 5 – Распределения объемной фракции и температуры в ЭУ

Из распределения объемной фракции и температуры в ЭУ для различных времен расчета можно увидеть движения жидкой фазы топлива и его оболочки. Плотность материала оболочки ($\rho=7700 \text{ кг/м}^3$) меньше чем у свинца ($\rho=11200 \text{ кг/м}^3$) [6], поэтому оболочка топлива под действием силы Архимеда должна перемещаться вверх, а материал топлива перемещаться вниз, поскольку плотность топлива (12282 кг/м^3) больше плотности свинца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На программе Ansys Fluent с использованием метода многофазной жидкости Volume of Fluid было проведено численное моделирование процесса движения жидкой фазы материалов. Численный расчет был проведен для двух расчетных моделей:

- Двухмерная модель для простых геометрических объектов;
- Двухмерная модель ЭУ.

В результате численных расчетов первой модели, было получено распределения объемной фракции для различных материалов, в различный момент времени, по которому можно наблюдать движения жидкой фазы. Движения жидкой фазы материалов происходило с различной скоростью, что говорит о том, что характер движения жидкой фазы зависит от заданных свойств материалу. Процесс движения жидкой фазы материалов происходил при температуре ниже температуры плавления, поэтому метод VOF на данный момент не позволяет численно моделировать процесс плавления материала с дальнейшим движением жидкой фазы.

В результате численных расчетов двухмерной модели ЭУ было получено распределение объемной фракции в различные моменты времени. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что метод VOF можно использовать для моделирования процесса взаимодействия расплава топлива с конструктивными элементами ЭУ для внутривыпускных испытаний при тщательном задании всех свойств материалов и анализируя правильность протекания процессов перемещения элементов устройства.

Для полного понимания метода многофазной жидкости VOF необходимы дальнейшие исследования. На данный момент, нет ясного понимания степени влияния различных свойств материалов на характер движения жидкой фазы. Также неизвестна причина по которой происходит движение жидкой фазы материалов при температуре ниже температуры плавления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ссылка <https://ru.wikipedia.org/wiki/ANSYS>.
2. Ссылка <https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/>.
3. Ссылка <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>.
4. Fluent A. et al. Ansys fluent theory guide //ANSYS Inc., USA. – 2011. – Т. 15317. – С. 724-746.
5. Анализ результатов эксперимента WF. Отчет по научно-исследовательской работе // Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 2006.
6. Haynes W. M. CRC handbook of chemistry and physics. – CRC press, 2014.
7. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. – Атомиздат, 1968.