

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ РАССЛОЕННОГО РАСПЛАВА С ОБЪЕМНЫМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ

*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия, [phil@ibrae.ac.ru](mailto:phil@ibrae.ac.ru)*

### Обозначения.

$g$ – ускорение свободного падения;	$T_b$ – наружная температура;
$h$ – толщина металлического слоя;	$\alpha$ – коэффициент объемного теплового расширения;
$Nu$ – число Нуссельта;	$\gamma$ – показатель степени;
$Q$ – объемное тепловыделение;	$k$ – температуропроводность;
$R$ – характерный размер;	$\lambda$ – теплопроводность;
$Ra$ – число Рэлея;	$\nu$ – кинематическая вязкость;
$Ra_i$ – модифицированное число Рэлея;	$\varepsilon$ – степень черноты поверхности;
$T_{max}$ – максимальная температура расплава;	$\sigma$ – постоянная Стефана–Больцмана.

### ВВЕДЕНИЕ

При гипотетической тяжелой аварии ядерного реактора с разрушением активной зоны (АЗ) возможно перемещение расплава материалов АЗ на днище корпуса реактора. Оценка вероятности и последствий подобной аварии проводится для каждого проекта реакторной установки. При этом возникает задача о распределении конвективного потока тепла на границе расплава со стальным днищем. Идеализированная постановка данной задачи такова. Рассматривается расплав, заключенный в сосуд вращения, имеющий форму полусферы или полуэллипса, дополненного сверху цилиндром. Состав расплава однороден, задано однородное объемное тепловыделение. Стенка корпуса и застывший слой расплава на его границе с корпусом участвуют в постановке задачи через соответствующие краевые условия на границе расплава. На боковой границе задано температурное условие  $T = T_L = const$  – температура плавления расплава. На верхней плоской границе также могут быть заданы краевые условия по температуре вида  $T = T_L$ , либо задано условие теплоотдачи излучением, либо – адиабатические условия. Цель расчета в такой постановке состоит в определении установившегося распределения температуры в объеме и потока тепла на границе расплава. Полуаналитические оценки решения этой задачи о тепловыделяющей жидкости (ТВЖ) были построены в 90-е гг. (см. обзор [1]).

Тепловыделяющий высокотемпературный расплав оксидного топлива содержит, кроме двуоксида урана, также частично окисленный материал оболочек топливных элементов. Этот расплав способен плавить стальные внутрикорпусные устройства реактора и сам корпус. В более реалистической постановке задачи о конвекции ТВЖ необходимо учитывать, что образующийся в большом количестве расплавленный металл практически не растворяется оксидами и, следовательно, расплав, находящийся в нижней части корпуса реактора (исходная средняя толщина его стенок – 0,2 м), должен состоять из двух слоев: металлического и оксидного. Плотности слоев

расплава при температуре  $\sim 2800$  К составляют для стали,  $\rho_{ст} \approx 6900$  кг/м<sup>3</sup>, для смеси оксидов урана и циркония (в равных мольных долях)  $\rho_{окс} \approx 7600$  кг/м<sup>3</sup>. Следовательно, металлический слой должен находиться выше оксидного, причем тепловыделение будет в основном сосредоточено в нижнем оксидном слое.

Это существенно усложняет "классическую" картину поведения ТВЖ, изученную в ряде работ, поэтому расслоенный тепловыделяющий расплав исследован относительно мало. Одним из приближений служит модель теплоотдачи плоского стального слоя, подогреваемого потоком тепла снизу и отдающего тепло как вбок – в стенку, имеющую постоянную температуру плавления стали, так и вверх – излучением. В одной из первых работ [2], где исследовались свойства подобной системы, для построения приближенного решения использовались известные эмпирические зависимости теплоотдачи при конвекции Рэлея–Бенара и при конвекции у вертикальной холодной стенки. Позже эта модель была развита в работе [3]. Математически задача сводится к системе нелинейных алгебраических уравнений, описывающих баланс теплоотдачи расплава. Из решения системы следует, что основная часть входящего потока тепла должна уходить через стальной слой на его боковую границу. Меньшая толщина металлического слоя приводит к большей плотности потока тепла ("эффект фокусировки потока тепла").

Оцениваемая доля тепловыделения расплава, идущая в стальной слой, составляет около 50% или более. Это тепло уходит наружу частично через верхнюю границу слоя, а частично – через боковую. Оценка плотности потока тепла через боковую границу металлического слоя при полной мощности остаточного тепловыделения 16МВт и толщине слоя 0,4м (возможные значения для реактора ВВЭР–1000) дает величину 1МВт/м<sup>2</sup> и более. Этот результат важен для анализа безопасности тяжелой аварии. При разрушении АЗ в процессе аварии корпус реактора может охлаждаться водой, и слишком большая плотность потока тепла от корпуса приведет к кризису теплоотдачи. Для реакторов типа ВВЭР-1000 удержание расплава в водоохлаждаемом корпусе для ряда сценариев аварии с разрушением АЗ оказывается невозможным.

Для получения количественной информации в общем случае необходимо решение самосогласованной задачи о теплоотдаче двухслойного расплава. Подобное решение к настоящему времени отсутствует. Возможности эксперимента здесь ограничены. Известны эксперименты по теплоотдаче плоского слоя [4], по теплоотдаче в расслоенном расплаве солей [5], но достичь в эксперименте прототипных условий очень трудно. Одним из средств решения задачи служит численное моделирование методами вычислительной гидродинамики (CFD), чему посвящена настоящая работа. В качестве расчетного средства использовался универсальный коммерческий код FLUENT 6.2 ®.

Методы CFD, в принципе, позволяют получить решение задачи термогидродинамики для любой формы сосуда и при наличии нескольких слоёв расплава. Однако, в силу сложности моделируемых физических процессов (турбулентность, плавление и затвердевание) само получаемое численное решение подлежит проверке. Для этого была проведена верификация кода на более простых задачах, представляющих разные аспекты общей проблемы. Некоторые результаты изложены ниже в качестве обоснования использования CFD. После описания тестов приведены результаты расчётов самосогласованной задачи о теплоотдаче расслоённого расплава в корпусе реактора. Набор входных данных для расчёта отвечал сценарию тяжёлой аварии для реактора ВВЭР-1000.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЖ И ЕЕ ТЕПЛОТДАЧИ

Стационарное состояние ТВЖ характеризуется модифицированным числом Рэлея  $Ra_i$  [1]. Максимальная температура жидкости связана со средними числами Нуссельта, отвечающими теплоотдаче на верхнюю и боковую границы,  $S_{up}$  и  $S_{down}$  :

$$Ra_i = \alpha g Q R^5 / (\nu \kappa \lambda), \quad Nu_{up} = \frac{R}{\lambda(T_{max} - T_{up}) S_{up}} \int_{S_{up}} f_n dS, \quad Nu_{down} = \frac{R}{\lambda(T_{max} - T_{down}) S_{down}} \int_{S_{down}} f_n dS \quad (1)$$

Здесь  $f_n$  – плотность теплового потока на границе. Для данного режима ТВЖ может быть построена зависимость  $Nu(Ra_i)$ , характеризующая эффективность теплоотдачи в зависимости от физических условий, в частности, от мощности объемного источника и характерного размера системы. Эти зависимости обычно представляются в степенном виде

$$Nu(Ra_i) \sim Ra_i^\gamma, \quad (2)$$

где показатель  $\gamma$  в ламинарном режиме близок к 1/4, а в турбулентном –  $\gamma \approx 1/3$ .

Экспериментальные исследования процессов теплоотдачи при конвекции ТВЖ подтверждают основные выводы теории о структуре течения и показателях степенных зависимостей. Эксперименты служат одним из средств верификации расчетных кодов. Ниже приведены результаты решения стационарных задач турбулентной естественной конвекции, проведенных в рамках проверки кода Fluent.

## ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

В качестве тестовых рассматривались следующие задачи.

- Течение между плоско-параллельными пластинами – проверяется возможность описания пристеночных течений и режима конвекции Рэлея–Бенара при высоких числах Рэлея.
- Моделирование экспериментов с расплавами солей, проведенных в рамках программы РАСПЛАВ [5]. В этом тесте проверялась возможность количественного описания теплоотдачи в сосуде с криволинейной границей при средних и высоких значениях модифицированного числа Рэлея в условиях частичного затвердевания расплава.
- Горизонтальный металлический слой, нагреваемый снизу потоком тепла, с теплоотдачей на верхней и боковой границах. Эта задача моделировала верхний металлический слой расслоенного расплава. Имеются приближенные соотношения, описывающие теплоотдачу, основанные на эмпирических зависимостях. В тесте проверялась возможность количественного описания в условиях одновременного существования пристеночного течения (боковая граница) и режима конвекции Рэлея–Бенара при высоких числах Рэлея.

Результаты численных расчетов этих задач сравнивались с результатами, полученными экспериментально, и отчасти приведены ниже. Решение проводилось методом установления до квазистационарного состояния. В этом состоянии средняя по времени температура не меняется и сохраняется полный баланс тепла, т.е. среднее по времени изменение энтальпии расплава – нулевое.

**Течение между плоскопараллельными пластинами (ППП) разной температуры.** Рассматривалась конвекция в слое воздуха. В случае горизонтального расположения пластин и неустойчивой температурной стратификации устанавливается режим конвекции Рэлея–Бенара. Аппроксимация результатов экспериментов по теплоотдаче

при турбулентной конвекции Рэлея–Бенара в диапазоне чисел Рэлея  $10^7 \leq Ra \leq 10^{10}$  дает корреляцию для среднего числа Нуссельта [6] вида (2):

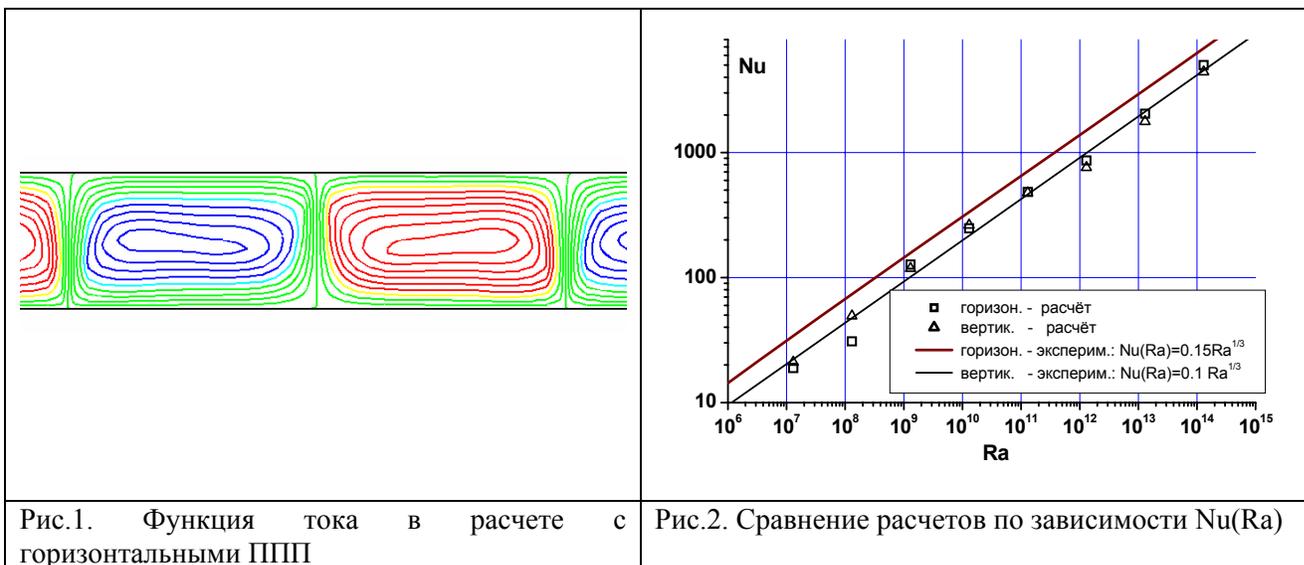
$$Nu = a_{RB} Ra^{1/3}$$

где коэффициент  $a_{RB}$  зависит от числа Прандтля. Для воздуха  $a_{RB} = 0,13 \pm 0,02$ .

В случае турбулентной свободной конвекции у вертикальной пластины зависимость  $Nu(Ra)$  в диапазоне  $10^7 \leq Ra \leq 10^{10}$  имеет аналогичный вид. Для воздуха  $a_v \approx 0,1 \pm 0,01$  [7]–[8]:

$$Nu = a_v Ra^{1/3}$$

Численные расчеты конвекции воздуха проводились в плоской двумерной геометрии. Прямоугольная расчетная область была разбита неравномерной ортогональной сеткой на 20000 ячеек. Длина области  $L=30$  м, ширина,  $h=1$  м (расстояние между пластинами), т.е. было выполнено условие  $h \ll L$ . На границах, отвечающих пластинам, ставились изотермические граничные условия, задающие перепад температуры между пластинами. Боковые границы брались адиабатическими. Использовалась модель турбулентности  $k-\epsilon$ . Проведены расчеты при разных углах наклона пластин  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$  относительно направления силы тяжести в диапазоне чисел Рэлея  $10^7 \leq Ra \leq 10^{14}$ .



В случае горизонтальных пластин ( $\alpha = 90^\circ$ ) получена картина течения, отвечающая периодической ячеистой бенаровской конвекции, наблюдаемой экспериментально (рис.1). На рис.2 представлены зависимости среднего числа Нуссельта, полученные в сериях расчетов для вертикальных и горизонтальных ППП.

**Эксперименты РАСПЛАВ–SALT.** Эти эксперименты проводились в рамках международной программы РАСПЛАВ [5], [9]. При постановке использовалась аналогия режимов конвекции ТВЖ в сосуде полусферической формы и в сосуде так называемой "slice-геометрии". Геометрия областей показана на рис.3. Граница slice-сосуда отвечает части границы полусферического сосуда, заключенной между двумя близкими вертикальными плоскостями. Моделирующая жидкость – расплав

композиции солей  $NaF-NaBF_4$ . Толщина округлой стальной стенки в эксперименте – 2 см. Наружное охлаждение создавалось расплавом более легкоплавкой соли.

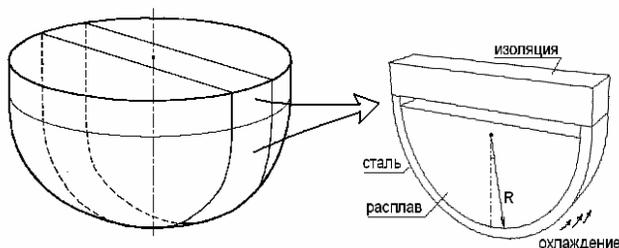


Рис.3. Slice-область и постановка экспериментов РАСПЛАВ-SALT

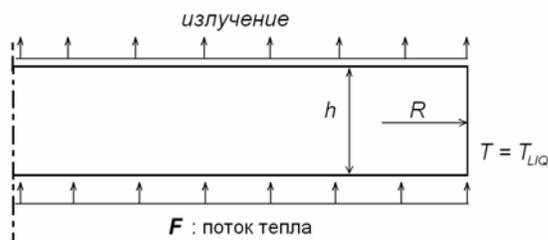


Рис.4. Постановка задачи по теплоотдаче расплавленного стального слоя

Серия экспериментов была проведена для диапазона чисел  $2,7 \cdot 10^{11} \leq Ra_i \leq 1,6 \cdot 10^{13}$ . Режимы течения – ламинарный и переходный к турбулентному. В каждом эксперименте было получено стационарное пространственное распределение температуры. В работе [10] приведено детальное сравнение результатов расчетов по коду Fluent и экспериментальных данных по максимальной температуре расплава и распределению температуры на границе для двух экспериментов. В одном из моделируемых экспериментов расплав затвердевал на охлаждаемой стенке.

По результатам серии измерений была построена зависимость  $Nu(Ra_i)$ . Аналогичная зависимость в диапазоне  $3 \cdot 10^8 \leq Ra_i \leq 3 \cdot 10^{15}$  была получена в серии расчетов [10]. Были сделаны выводы о том, что экспериментально полученные распределения температуры на границе и интегральная теплоотдача хорошо описываются двумерной численной моделью с объемным источником тепла, при этом используемая модель затвердевания позволяет количественно описать застывание расплава на холодной стенке.

**Стальной слой, нагреваемый снизу потоком тепла.** Полагалось, что в цилиндрической области радиусом  $R$  находится расплав стали, нагреваемый снизу потоком тепла (рис. 4). На верхней границе было задано условие по радиационному потоку тепла  $F_{rad}$  во внешнюю среду с температурой  $T_b = 0$  при значении эффективной степени черноты  $\varepsilon = 0,45$ :

$$F_{rad} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_b^4) \quad (3)$$

Полагалось, что боковая поверхность находилась при постоянной температуре, отвечающей плавлению стали,  $T = T_{LM}$ . Необходимо определить зависимость потока тепла на боковой границе от соотношения размеров слоя и подаваемого снизу потока тепла. Исходные данные:  $R = 2,07\text{ м}$ ,  $h = (0,1-0,5)R$ ,  $F = 400-1000 \text{ кВт/м}^2$ . При этих условиях конвекция в расплаве носит турбулентный характер.

Применительно к проблеме разрушения корпуса реактора данная задача рассматривалась в работах [2], [3]. Построена модель, использующая полуэмпирические зависимости по теплоотдаче жидкости, полученные для конвекции Рэлея-Бенара, а также для течения у вертикальной холодной стенки. Модель позволяет рассчитать величину потока тепла на боковую поверхность в зависимости от аспектного отношения  $h/R$ .

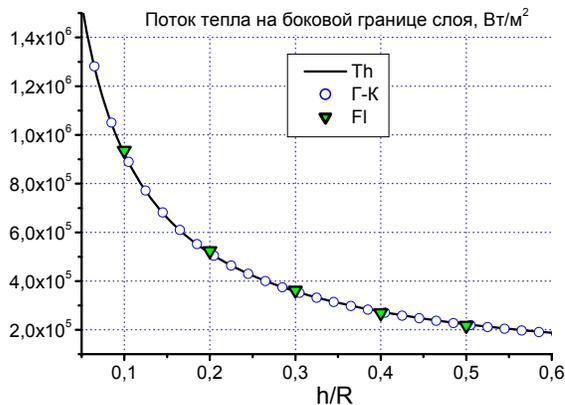


Рис. 5. Зависимость плотности потока тепла к боковой границе стального слоя от аспектного отношения  $h/R$ . "Th" – [2], "Г-К" – [3], "FI" – численный расчет по Fluent 6.2.

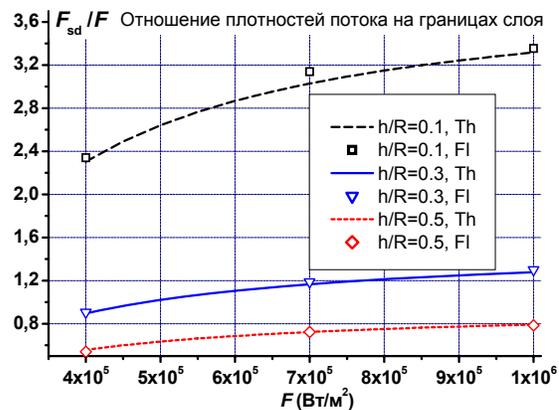


Рис. 6. Отношение плотностей потоков тепла в зависимости от подаваемого снизу потока тепла при разных аспектных отношениях. "Th" – [2], "FI" – численный расчет по Fluent 6.2.

CFD-расчет проводился на неравномерной ортогональной сетке в 20000 ячеек. Для моделирования турбулентности использовалась  $k-\epsilon$  модель. На рис. 5 приведены результаты расчетов величины  $F_{sd}$  – средней плотности потока тепла через боковую границу в зависимости от аспектного отношения  $h/R$ , полученные тремя способами: по моделям [2], [3] и в серии численных расчетов. Величина  $F_{sd}$  находится в обратной зависимости от толщины слоя. На рис.6 приводятся результаты расчета отношения  $F_{sd}/F$  в зависимости от  $F$  – подаваемой снизу плотности потока тепла.

Полученное хорошее совпадение результатов расчета по численной и полуэмпирической моделям свидетельствует о корректности CFD-описания и позволяет рассматривать гидродинамические расчеты по коду Fluent как средство исследования теплоотдачи расплава в более сложных конфигурациях.

## РАССЛОЕННЫЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЙ РАСПЛАВ В ОХЛАЖДАЕМОМ КОРПУСЕ

Перейдем к результатам расчетов самосогласованной задачи о теплоотдаче расслоенного расплава в корпусе реактора. Выше была продемонстрирована возможность количественного описания каждой зоны расплава по-отдельности как для однородного тепловыделяющего расплава, так и для металлического слоя, подогреваемого снизу. При постановке задачи о теплообмене в 2-слойной жидкости физическая картина усложняется процессами плавления и затвердевания на границе слоев расплава и на границе расплава с корпусом, а также турбулентным характером течения. Эти процессы необходимо учитывать для того, чтобы в расчете методом установления получить квазиравновесную конфигурацию расслоенного расплава. Кроме того, в расчете необходимо задаться начальным состоянием.

Моделируемый процесс сводится к следующему. Однородный горячий расплав при средней температуре 2600 – 2800К перемещается (после разрушения днища шахты реактора) на дно массивного стального корпуса с температурой около 400К. При контакте с холодным корпусом приграничный слой материала застывает, а в остальном объеме развиваются процессы циркуляции и одновременно расслоения

расплава. В нижней части собирается расплав более тяжелого и тугоплавкого материала, состоящего преимущественно из оксидов, а в верхней формируется более легкоплавкий слой, состоящий преимущественно из стали внутрикорпусных конструкций и корпуса. Остаточное объемное тепловыделение сосредоточено в оксидном материале. Теплоотдача и плавление корпуса на его границе с оксидным расплавом затруднены застыванием расплава с образованием корки. На границе с горячим стальным слоем корки не образуется, а боковой поток тепла из металлического расплава высок (порядка  $1 \text{ МВт/м}^2$ ). Корпус при его начальной толщине не способен пропустить такой высокий поток тепла и должен плавиться изнутри. Боковая граница расплава стали и твердого материала должна при этом перемещаться до того момента, пока толщина нерасплавленного слоя не достигнет величины 2–3 см. Установившееся положение границы расплава с корпусом и твердым кориумом надо определить с учетом перехода расплавленной стали корпуса в металлический слой.

Моделирование расслоения расплава с одновременным продвижением его боковых границ сильно усложняет модель и уводит от описанной выше сравнительно проверенной области применения кода. Поэтому цель расчетов ставилась в более узких рамках: получение самосогласованной численной оценки эффекта фокусировки тепла в расслоенном расплаве, подтверждающей аналитические модели. При численном моделировании принимались следующие упрощения:

- расслоение расплава предполагалось заданным в начальный момент времени;
- толщина корпуса полагалась малой и однородной вдоль границы.

**Конфигурация расчетной области и параметры расплава.** Расчетная область показана на рис.7. Сетка содержала около 18000 четырехугольных ячеек. При подготовке данных выделялись две подобласти, отвечающие металлическому слою (вверху) и оксидному слою, который по сложившейся терминологии будем называть "кориум" (внизу). Толщина металлического слоя полагалась равной 0,32 м. Объемное тепловыделение мощностью  $2 \text{ МВт/м}^3$  было задано только в оксидном слое. Константы материалов отвечали константам стали и кориума, для последнего бралось  $\lambda = 7 \text{ Вт/м К}$  ( $\lambda = 12 \text{ Вт/м К}$  в жидкой фазе),  $C_p = 500 \text{ Дж/кг К}$ . Плавление в модели Fluent происходит в интервале температуры солидус–ликвидус. Начальное условие задается однородной температурой  $T = 2650 \text{ К}$  и нулевыми скоростями. Модифицированное число Рэлея для кориума, оцениваемое по высоте оксидного слоя, составляет  $\sim 10^{15}$ . В расчете использовалась  $k$ – $\varepsilon$  модель турбулентности.



Рис. 7. Расчетная область.

в расчете устанавливалась ниже солидуса кориума, поэтому там должна была

**Моделирование границ.** Свободная граница в расслоенной жидкости моделировалась двумя способами. В одном из них использовался метод VOF (Volume Of Fluid) с явным отслеживанием границы жидкостей. В другом способе граница бралась фиксированной, и решалась связанная задача для двух областей течения, сопряженных по потоку тепла и по температуре. Температура в оксидном слое на его верхней границе со сталью в

образовываться корка. Твердая корка может быть тяжелее жидкости. Однако, вопросы о том, устойчива ли эта корка на границе, и какова может быть ее плотность, еще недостаточно исследованы. В расчетах предполагалось, что корка существует на границе слоев.

На верхней горизонтальной границе расплава задавались условия излучения вида (3) при температуре  $T_b$  со степенью черноты поверхности расплава  $\varepsilon = 0,3$ . Температура среды  $T_b$  в расчетах отвечала принимаемой температуре плавления стали,  $T_b = T_L$ , либо бралась нулевой.

Боковая граница всего расплава образована корпусом реактора. Рассматривался случай охлаждаемой наружной боковой границы. Охлаждение учитывалось при задании граничных условий. Плавление, изменение формы стенки корпуса явно не учитывалось, и стенка в расчет не вводилась, но считалось, что она частично расплавлена до той толщины, которая позволяет ей пропускать поток тепла от расплава. Принималось, что сталь и кориум могут плавиться и затвердевать. Граничное условие на боковой охлаждаемой границе области бралось изотермическим – для граничной точки  $x$  температура полагалась равной температуре плавления,

$$T(x) = T_L .$$

В процессе установления стационарного состояния происходило образование корки на наружной охлаждаемой границе. Толщина корки в стационарном состоянии – небольшая относительно размеров области. Отметим, что для расслоенного расплава место стыка границ оксидного расплава, металлического расплава и корпуса является особенным, и указанный способ задания условий на боковой границе позволяет моделировать эту область без введения дополнительных предположений.

**Результаты расчетов и обсуждение.** Квazистационарное распределение температуры приведено на рис.8. Получаемая картина течения в области оксидного расплава отвечает сложившимся представлениям [1]: в расчете наблюдается расширяющийся пограничный слой на охлаждаемой боковой границе, температурная стратификация в областях с ламинарным режимом, турбулентная конвекция Рэлея–Бенара в верхней области оксидного слоя и металлическом слое.

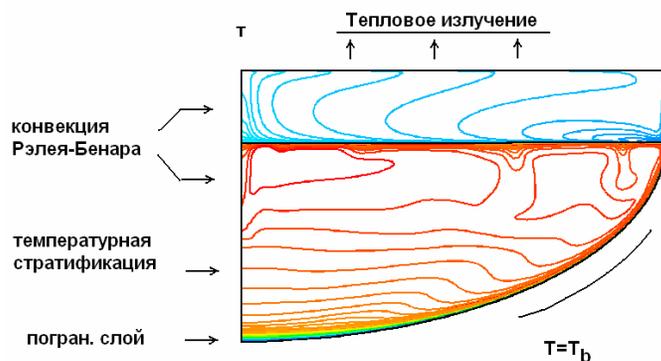


Рис. 8. Температура и структура течения в расслоенной турбулентной ТВЖ ("сопряженная"). Для обоих указанных вариантов в граничных условиях (3) температура на бесконечности  $T_b=1700\text{K}$ . Различие между двумя профилями проявляется только в переходной области и связано с тем, что образование корки между слоями в окрестности боковой границы идет несколько по-разному. После образования корки граница слоев становится фиксированной и модели границы –

На рис. 9 приведены профили стационарного потока теплоотдачи, построенные вдоль образующей боковой границы расплава, начиная от осевой точки. Профили приведены для расчетов с указанными выше способами задания границы слоев расплава – это свободная граница ("VOF") и сопряженная задача

физически эквивалентными. Кроме того, на рис.9 приведено распределение бокового потока тепла для случая, когда излучение идет в окружающую среду с температурой  $T_b=0$ . Поток излучения при этом возрос, а поток тепла на боковой границе стал заметно меньше.

Отметим повышенную величину плотности потока тепла у верхней границы расплава. Этот краевой эффект проявляется в разной степени во всех проведенных численных расчетах ТВЖ и связывается с неточным моделированием течения в углу области, на стыке вертикальной и горизонтальной границ расплава. Детального его исследования не проводилось.

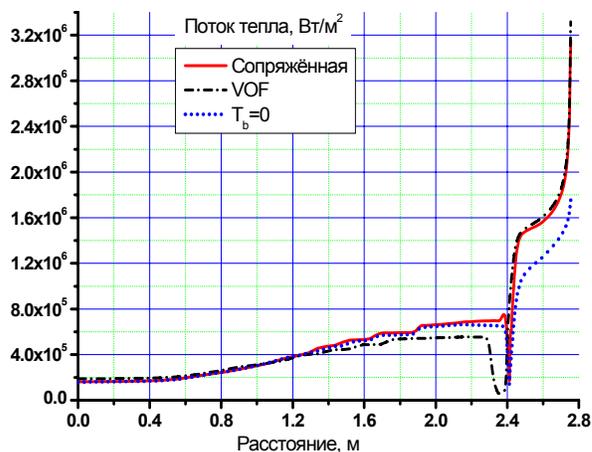


Рис.9. Плотность потока тепла на боковой границе области.

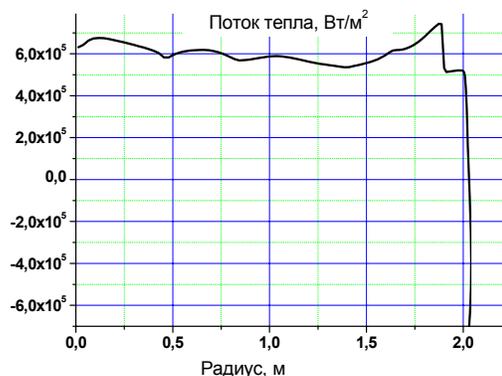


Рис.10. Распределение потока тепла на границе слоев расплава

**Сравнение с полуэмпирической моделью теплоотдачи стального слоя.** Распределение потока тепла на границе слоев приблизительно однородно (рис.10), но имеет нерегулярность у боковой границы расплава. Поток тепла из оксидного в металлический слой, определенный по результатам расчетов, составляет 50% от полного тепловыделения. Зная величину этого потока можно провести сравнение решений самосогласованной задачи и задачи для отдельного металлического слоя. Сравнение проведено для двух значений объемного тепловыделения в кориуме по величине отношения  $F_{sd}/F$ , в котором  $F_{sd}$  – плотность потока тепла через боковую границу металлического слоя,  $F$  – плотность теплового потока из оксидного слоя через границу раздела. Аспектное отношение (см. рис.4)  $h/R=0,167$ . Температура излучения на бесконечности в граничных условиях (3)  $T_b=0$ . Результаты приведены в таблице. Некоторое отличие в полученных величинах  $F_{sd}/F$  имеет систематический характер и может быть связано с затвердеванием кориума у боковой границы, что приводит к нечеткости задания границы областей двух жидкостей.

#### Сравнение результатов расчетов

Полное тепловыделение	Средний поток через границу раздела, кВт/м <sup>2</sup>	Средний поток через боковую границу, кВт/м <sup>2</sup>	$F_{sd}/F$	
			2–слойная модель	плоский слой
16МВт	587	1215	2,082	2,012
32МВт	1127	2658	2,37	2,29

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено тестирование кода Fluent на задачах турбулентной конвекции в тепловыделяющей жидкости, на задачах конвекции в неоднородно нагреваемом плоском слое воздуха и в металлическом расплаве. Полученные результаты позволяют использовать код для таких расчетов.

Проведено моделирование конвекции расслоенного расплава с верхним положением металлического слоя. Для металлического слоя проведена оценка бокового теплового потока по полуэмпирической модели плоского металлического слоя. Полученное хорошее совпадение результатов по потоку теплоотдачи повышает достоверность обоих расчетов и позволяют использовать указанную модель для быстрых оценок потока тепла в расслоенном расплаве.

Максимум потока тепла расслоенного расплава на его боковой границе находится в области металлического слоя.

Величина плотности стационарного потока тепла от стального слоя на боковой поверхности, средней по толщине слоя, составляет  $\sim 1,5 \text{ МВт/м}^2$  при мощности остаточного тепловыделения в расплаве 16 МВт и отвечает критической величине для кипения воды при нормальных условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большов Л.А., Кондратенко П.С., Стрижов В.Ф.* Свободная конвекция тепловыделяющей жидкости // УФН. 2001, Т. 171. № 10, С. 1051.
2. *Theofanous T. G., Liu C., Additon S. et al.* In-Vessel Coolability and Retention of a Core Melt, Nuclear Eng. & Design. 1997. V. 169. P. 1.
3. *Григорук Д.Г., Кондратенко П.С.* Эффект фокусировки в теплоотдаче многокомпонентной жидкости с внутренними источниками тепла // ТВТ. 2001. Т. 39, № 1, С. 161.
4. *Bonnet J.M., Seiler J.M.*, Thermal Hydraulic Phenomena in Corium Pools : the Bali Experiment. 7th Int. Conf. on Nucl. Eng., ICONE-7057. Tokyo, Japan, April 19-23, 1999. P. 1.
5. *Abalin S., Gnidoi I., Semenov V. et al.* The Results and Analysis of the RASPLAV Salt Tests. Proc. RASPLAV Seminar 2000. Garching. Germany. P. 54.
6. *Al-Arabi M., El-Riedy M.K.*, Natural Convection Heat Transfer from Isothermal Horizontal Plates of Different Shapes. Int. J. Heat Mass Transfer // 1976 V. 19. P. 1399.
7. *Warner C.Y., Arpaci V.S.*, An Experimental Investigation of Turbulent Natural Convection in Air at Low Pressure Along a Vertical Heated Flat Plate // Int. J. Heat Mass Transfer. 1968. V. 11/ P. 397.
8. *Зайчик Л.И., Алипченков В.М.* Турбулентная свободная конвекция на наклонной поверхности при больших числах Рэлея // ТВТ. 2000. Т. 338 № 3. С. 445.
9. *Асмолов В.Г., Абалин С.С., Дегальцев Ю.Г. и др.* Поведение бассейна расплава активной зоны в днище корпуса реактора (Проект РАСПЛАВ) // Атомная энергия. 1998 Т. 84, Вып. 4, С.303.
10. *Филиппов А.С.* Численное моделирование экспериментов по теплоотдаче жидкости с объемным энерговыделением (код Fluent) // Тр. IV Рос. нац. конф. по тепломассообмену (РНКТ-IV), Т.1. М.: МЭИ, 2006. С. 136.