

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1220-1228

УДК 53.072; 53:004

Теплофизические аспекты фазовых превращений охлаждаемого расплава высокотемпературного кориума в ядерных энергетических установках

Николай Васильевич Пилипенко¹, Артём Олегович Коптюхов²✉

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, 188300, Российской Федерации

¹ pilipenko38@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9328-3166>

² koptyukhov_ao@pnpi.nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9660-3601>

Аннотация

Введение. Рассмотрены вопросы трехмерного моделирования теплового взаимодействия между расплавом активной зоны и устройством локализации расплава (ловушкой) в условиях тяжелой аварии на атомной электростанции. Предложена оптимизированная конфигурация заполнения устройства локализации жертвенным материалом. Выполнены интеграции усредненного по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, численного решения уравнения теплопроводности и модели динамики уровня двух несмешивающихся жидкостей, что позволяет одновременно учитывать турбулентное течение в жидких компонентах расплава, изменение границы расплавляющегося жертвенного материала (задача Стефана) и стратификацию расплавов с инверсией

Границы расплавляющегося жертвенного материала (задача Стефана) и стратификацию расплавов с инверсией. **Метод.** Расчеты произведены в три последовательных этапа. На этапе первом этапе моделируется плавление жертвенного материала, на втором — стратификация слоев, а на третьем — теплоперенос после стратификации. На основе полученных данных формируется оптимальная конфигурация заполнения ловушки. **Основные результаты.** Представлено детальное объемное распределение температур на протяжении всех трех этапов, расчет распределения теплового потока на поверхности стенок ловушки и определение максимальной толщины подплавления корпуса, обусловленной интенсивным тепловым взаимодействием. Сравнение трехмерных расчетов с аналогичными двумерными исследованиями показало, что трехмерное моделирование более точно фиксирует характерные временные интервалы застывания и последующего расплавления металла. **Обсуждение.** Продемонстрированы преимущества предложенного подхода в сравнении с существующими методами. Показана его применимость при проектировании и оптимизации устройств локализации расплава, представлены перспективы дальнейшего развития модели, включая учет химических реакций и адаптацию к другим типам реакторов. Полученные данные убедительно подтверждают, что принятая конфигурация обладает потенциалом для существенного продления периода эффективного противодействия последствиям тяжелой аварии на атомных электростанциях.

Ключевые слова

тигельная ловушка, кориум, локализации расплава активной зоны, аварии атомных станций, жертвенный материал

Ссылка для цитирования: Пилипенко Н.В., Коптюхов А.О. Термофизические аспекты фазовых превращений охлаждаемого расплава высокотемпературного кориума в ядерных энергетических установках // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 6. С. 1220–1228. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1220-1228

Thermophysical aspects of phase transformations of the cooled melt of high-temperature corium in nuclear power plants

Nikolay V. Pilipenko¹, Artem O. Koptyukhov²✉

¹ ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

² NRC “Kurchatov Institute” — PNPI, Gatchina, 188300, Russian Federation

¹ pilipenko38@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9328-3166>

² koptyukhov ao@pnpi.nrcki.ru, https://orcid.org/0000-0002-9660-3601

© Пилипенко Н.В., Коптюхов А.О., 2025

Abstract

This study addresses three-dimensional modeling of the thermal interaction between the core melt and the melt localization device (trap) during a severe accident at a nuclear power plant. An optimized configuration for filling the localization device with sacrificial material is proposed. The calculations incorporate the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, numerical solutions of the heat conduction equation, and a two-fluid interface dynamics model, enabling simultaneous consideration of turbulent flow within the liquid phases, the moving boundary of the melting sacrificial material (Stefan problem), and stratification with inversion. The analysis proceeds in three consecutive stages. The first stage models the melting of the sacrificial material; the second simulates the stratification of layers; the third evaluates heat transfer after stratification. Based on the results, an optimal filling configuration for the trap is developed. The study presents detailed volumetric temperature distributions throughout all three stages, the heat flux distribution on the trap walls, and the maximum thickness of the melted shell caused by intense thermal interaction. Comparison between three-dimensional simulations and similar two-dimensional studies demonstrates that 3D modeling more accurately captures the characteristic timing of solidification and subsequent melting processes. The advantages of the proposed approach over existing methods are highlighted. Its applicability for designing and optimizing melt localization devices is shown, and prospects for future development are discussed, including incorporating chemical reactions and adapting the model to other reactor types. The data convincingly suggest that the adopted configuration has significant potential to extend the period during which effective mitigation of severe accident consequences at nuclear power plants can be maintained.

Keywords

crucible trap, corium, core-melt localization, nuclear power-plant accidents, sacrificial material

For citation: Pilipenko N.V., Koptyukhov A.O. Thermophysical aspects of phase transformations of the cooled melt of high-temperature corium in nuclear power plants. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 6, pp. 1220–1228 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1220-1228

Введение

Нарушение теплообмена при тяжелых авариях на атомных электростанциях (АЭС) является причиной расплавления активной зоны, в результате чего образуется высокотемпературный кориум. Основу кориума составляют неэвтектические смеси металлов и их оксидов, происходящие из тепловыделяющих элементов и кронштейнов [1]. Поскольку кориум способен проплавить корпус реактора и выйти в окружающую среду, это создает угрозу тяжелых экологических последствий.

Современные реакторы АЭС оснащены системами для предотвращения последствий аварий. Эти системы включают концепции удержания кориума (расплава топлива) либо в корпусе реактора, либо в специальном устройстве локализации расплава под активной зоной [2]. Для отвода остаточного радиационного тепла из ванны с кориумом используется охлаждение стенок корпуса. Чтобы снизить температурное воздействие на корпус и уменьшить выделение водорода при контакте пара с цирконием, применяют теплопоглощающий жертвенный материал на основе оксидов железа и алюминия [3]. Тепло поглощается за счет плавления этого материала и эндотермических химических реакций с кориумом.

При поступлении в систему локализации расплав кориума формирует бислойную оксидно-металлическую ванну. Согласно фазовой диаграмме [4], на начальном этапе плотность металлической фазы уступает плотности оксидной, что обуславливает ее верхнее положение. Тем не менее, по мере достижения критической плотности в результате взаимодействия расплавленного теплопоглощающего материала с оксидными компонентами, металлическая фаза мигрирует вверх.

Одним из факторов, лимитирующих корпусное удержание расплава, выступает формирование металлической корки. В пределах данной зоны проис-

ходит фокусировка максимального теплового потока [5]. Эффективность удержания расплава находится в прямой зависимости от интенсивности теплоотдачи на охлаждаемых водой поверхностях корпуса. Критерием успешного удержания является достижение критического теплового потока. Естественная конвекция тепла играет существенную роль в реализации данных стратегий, поскольку она напрямую определяет величину тепловой нагрузки.

Изучение кориума было предметом многочисленных международных экспериментальных исследований. Работы, проведенные UCLA (1996), АСОРО (1997), RASPLAV (1998), СОРО (1999), BALI (1999), SIMECO (2002) и COPRA (2016), позволили получить ценные данные о теплопередаче в конструкциях, моделирующих бассейн расплава кориума [6]. Следует отметить, что из-за высокой стоимости и технических сложностей, многие из этих экспериментальных установок были мелкомасштабными и характеризовались более низкими числами Рэлея [7]. Основной целью этих экспериментов являлась верификация численных моделей. В настоящее время, благодаря заметному прогрессу в численных методах и росту вычислительных мощностей, методы моделирования турбулентных течений становятся все более применимыми. Однако существуют и ограничения. Дин и Нургалиев (1997) указали на неспособность двумерной модели турбулентности k - ϵ точно описывать тепловые потоки при высоких числах Рэлея [8]. Сравнение моделей турбулентности k - ϵ и больших вихрей (Large Eddy Simulation, LES), основанное на эксперименте BALI [9], показало, что k - ϵ модель демонстрирует низкую точность в описании термической стратификации, в то время как LES-модель завышает теплоотдачу на боковой стенке. Исследования, описанные в работе [10], подтвердили хорошее согласование высокоразрешающих методов Computational Fluid Dynamics, таких как моделирование LES и прямое численное моделирование, с эксперимен-

тальными данными. Тем не менее, эти модели пока не учитывают взаимодействия с жертвенным материалом.

Предложена модель, которая описывает три этапа физических процессов в кориуме внутри системы локализации расплава.

Гравитационная сегрегация. На начальном этапе расплав расслаивается по плотности: под действием силы тяжести более тяжелые оксидные компоненты опускаются вниз. Одновременно происходит теплофизическое взаимодействие с жертвенным материалом.

Плотностная инверсия. В процессе смешивания жертвенного материала с кориумом происходит перераспределение фаз: оксидные компоненты перемещаются вверх.

Кристаллизация. На финальном этапе расплав охлаждается и кристаллизуется благодаря естественной конвекции и внешнему охлаждению корпуса тигельной ловушки, в которой локализован расплав.

Модель базируется на решении уравнения Навье–Стокса с использованием k -е модели и задачи Стефана. Задача Стефана с изменяющимися границами раздела фаз сводится к задаче тепло-массообмена в вещественной среде кориумной ловушки. В этой среде присутствуют подвижные источники теплоты: эндотермическое разложение и плавление жертвенного материала, а также теплоэкзотермических реакций с цирконием, хромом и ураном в расплаве активной зоны [11].

В настоящей работе представлены результаты разработки и валидации трехмерной модели теплофизических процессов, происходящих при фазовых превращениях и тепловом взаимодействии в системе локализации расплава кориума при тяжелой аварии на АЭС, с целью выявления оптимальных конструктивных решений для повышения безопасности и продления периода противодействия аварийным последствиям.

Метод

Геометрически-конструктивная система. Геометрическая схема исследуемой ванны расплава (рис. 1) описывает цилиндрическую емкость радиусом $R = 2900$ мм и высотой $H = 2400$ мм, с толщиной стенки 100 мм.

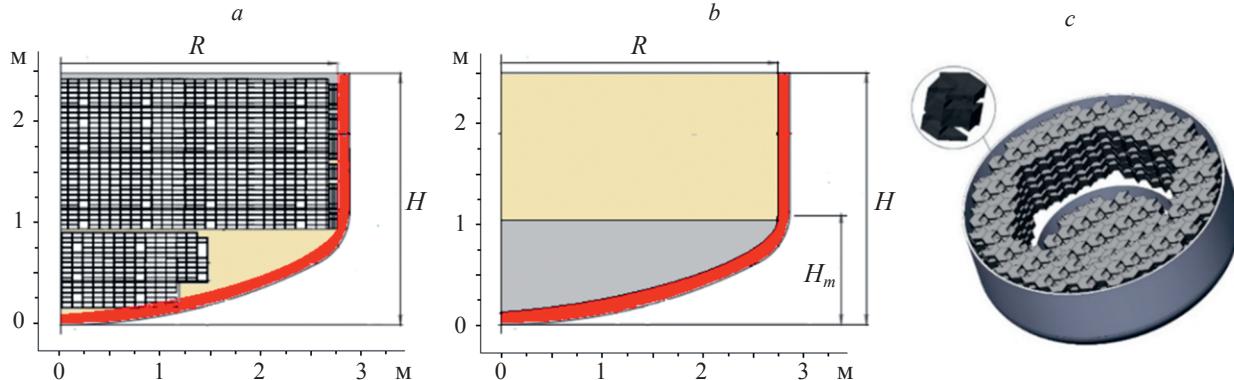


Рис. 1. Габаритный чертеж ванны расплава: до инверсии (а); после инверсии (б); общий трехмерный вид (с).

$H_m = 0,9$ м — высота слоя металлической компоненты после инверсии

Fig. 1. Overall drawing of the melt bath: before inversion (a); after inversion (b); overall three-dimensional view (c).

$H_m = 0,9$ m — height of the metallic component layer after inversion

В качестве жертвенного материала используется конфигурация из треугольных пирамид с ребром 210 мм и высотой 50 мм. Эти элементы формируют шестигранные сборки, в которых каждый ряд имеет два отсутствующих элемента. Последовательные ряды смещены друг относительно друга на 60° , что обеспечивает спиральное движение кориума по сборкам. Общее количество таких элементов в ловушке локализации достигает 26 600 единиц, а их суммарная масса составляет 82 т.

Ванна расплавов окружена водяной оболочкой, поддерживающей температуру около 303 К. Для обеспечения равномерного распределения воды в верхней части устройства локализации установлен кольцевой коллектор. Он включает один входной и 32 выходных патрубка, подключенных к кольцевому каналу. Нижняя часть устройства оборудована выходным патрубком для отвода воды в бак.

Моделирование тепловых процессов. В работе [12] предложена математическая модель, которая описывает динамику расплава как вязкую жидкость с переменной плотностью, зависящей от температуры и состава. При применении модели была использована классическая система уравнений для описания расплава — уравнение Навье–Стокса, уравнение энергии и модели турбулентности — для моделирования вязкой жидкости с переменной плотностью и тепловыми эффектами фазовых переходов. Однако для более точного и полного описания процессов плавления, кристаллизации и межфазных взаимодействий стало очевидно, что необходимо ввести более детализированный учет интерфейсов и фазовых границ.

Для повышения точности модели в настоящей работе дополнительно использован фазово-полевой подход, который позволяет динамически описывать интерфейсы между различными фазами через переменную ϕ . Этот подход является мощным инструментом для моделирования сложных фазовых превращений, особенно когда важны тонкие структуры и взаимодействия на микроскопическом уровне — что критично при моделировании кристаллизации, плавления и образования новых фаз.

Для учета плавления жертвенного материала и кристаллизации кориума применена фазовая переменная ϕ , которая принимает значения $\phi = 0$ в одной фазе и $\phi = 1$ в другой. Эволюция ϕ смоделирована с помощью фазово-полевой модели, например, модифицированного уравнения Алена–Кана, что позволяет описывать распределение интерфейса и толщину краев инверсии. Пример обобщенной формы фазового уравнения [13]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \phi = \frac{\partial f}{\partial \phi} - \varepsilon^2 \nabla^2 \phi,$$

где ϕ — соотношение твердой фазы к жидкой, безразмерная (от 0 до 1); t — время; \mathbf{u} — скорость потока, в котором переносятся фазы, задается отдельно решением уравнения Навье–Стокса; $\nabla \phi$ — градиент ϕ ; ε — параметр, задающий толщину границы; $\nabla^2 \phi$ — Лапласиан ϕ .

Связь ϕ с физическими величинами реализуется через зависимость плотности $\rho(\phi, T) = \rho_2 + (1 - \phi)\rho_1$, где ρ_1 и ρ_2 — плотности фаз. Латентное тепло вводится через член $L = d\phi/dt$ в уравнение теплопереноса, отображая энергию, высвобождающуюся или поглощающуюся при фазовых превращениях.

Реакция между жертвенным материалом и кориумом сопровождается изменением состава и, как следствие, плотности смеси. В результате происходит инверсия стратификации, при которой менее плотная оксидная компонента расплава перемещается вверх под действием силы плавучести. Для описания динамики этого процесса используется фазово-полевая модель, что и при моделировании плавления–кристаллизации, т. е. уравнение переноса скалярной функции уровня ϕ .

Изменение температуры при естественной конвекции в расплаве учитывается конвективным членом $(\mathbf{v} \cdot \nabla T)$ уравнения теплопереноса. Для моделирования естественной и вынужденной конвекций применялась усредненная по скорости система уравнений Навье–Стокса и сохранения массы.

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}, \nabla \mathbf{u} = 0,$$

где ρ — плотность среды; p — давление; μ — вязкость; \mathbf{g} — вектор ускорения свободного падения; \mathbf{F} — составляющие силы поверхностного натяжения. Решение уравнения базируется на использовании замыкания полуэмпирической модели турбулентности согласно стандартной k – ε модели [14].

Если в некоторой зоне плотность снижается (при окислении элементов расплава), в уравнении Навье–Стокса появляется меньший член $\rho \mathbf{g}$, а значит, вес жидкости в этой зоне уменьшается. В результате слой получает дополнительный подъемный импульс, а нижний — опускается.

Вычислительный анализ тепловых процессов в устройстве локализации расплава был выполнен методом конечных элементов. Теплообмен с участием расплава активной зоны моделировался численно с использованием мультифизического пакета COMSOL Multiphysics. Для повышения точности расчетов в области пограничного слоя применялась анизотропная сетка, шаг которой уменьшался на границах расчетной области. Минимальный размер элемента сетки для наибольшей расчетной области бассейна расплава в корпусе охлаждаемой ловушки $2,74 \times 2,85$ м составлял 0,003 м, максимальный — 0,119 м при общем количестве 4 076 212 сеточных элементов.

Моделирование проводилось в три этапа (рис. 2).

Этап 1. Изучение тепловых процессов при плавлении жертвенного материала. Расчет остаточной мощности осуществлялся по экспоненциальному закону, исходя из номинальной мощности реактора 1000 МВт.

Этап 2. Стратификация оксидного и металлических слоев.

Этап 3. Моделирование теплопереноса в инверсном бассейне. На этом этапе учитывалось затвердевание корки кориума и дополнительное граничное условие охлаждения бассейна сверху — впрыск воды, сопровождающийся пузырьковым кипением.

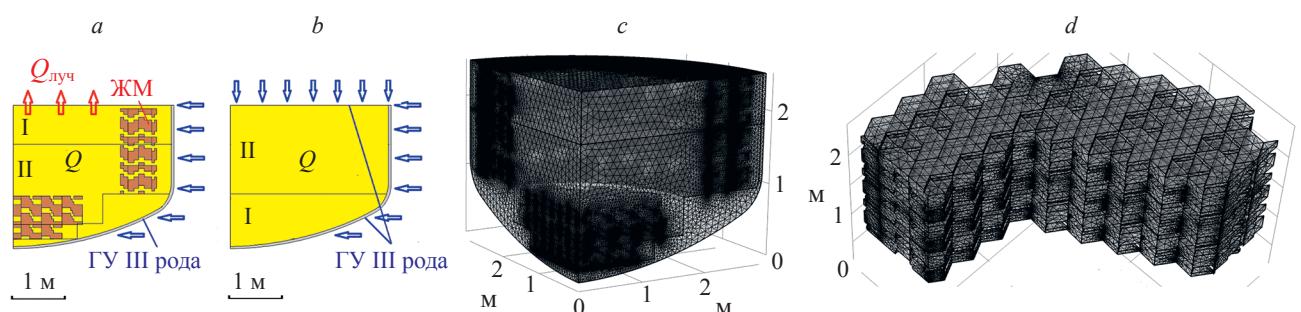


Рис. 2. Расчетная модель взаимодействия расплава кориума с корзиной жертвенного материала при плавлении жертвенного материала (a), кристаллизация расплавов после инверсии (b) и сетка конечных элементов (c, d).

ЖМ — жертвенный материал; ГУ — граничное условие; I — металлические компоненты; II — оксидные компоненты; III — конвективный теплообмен; Q — объемные тепловыделения; $Q_{луч}$ — тепловой поток излучением

Fig. 2. Computational model of the interaction between the core melt and the sacrificial material basket during melting (a), crystallization of melts after inversion (b), and the finite element mesh (c, d)

ЖМ — жертвенный материал; ГУ — граничное условие; I — металлические компоненты; II — оксидные компоненты; III — конвективный теплообмен; Q — объемные тепловыделения; $Q_{луч}$ — тепловой поток излучением

Основные результаты

Результаты численного моделирования включают объемное распределение температур на всех трех этапах, а также идентификацию фазовых областей, связанных с плавлением жертвенного материала и последующим затвердеванием кориума. Динамика температурных полей и фазовых состояний в ловушке, охватывающая весь цикл от плавления жертвенного материала до затвердевания кориума, показана на рис. 3.

В течение 60 мин жертвенный материал полностью расплавляется. Мощность остаточных тепловыделений в кориуме заметно снижается, демонстрируя экспонен-

циальное затухание во времени. Одновременно с этим наблюдается затвердевание оксидных и металлических компонентов (рис. 4).

На начальном этапе (рис. 4, a) наблюдается охлаждение кориума несмотря на остаточное радиационное тепловыделение. Это обусловлено затратами тепловой энергии на нагрев и плавление жертвенного материала. При медленном прогреве кориумом поверхности холодного жертвенного материала образуется тонкий слой кристаллической корки из тугоплавких компонентов расплава (рис. 4, d). Это связано с высокой теплоемкостью жертвенного материала. Низкая теплопроводность образованной корки ограничивает тепловой

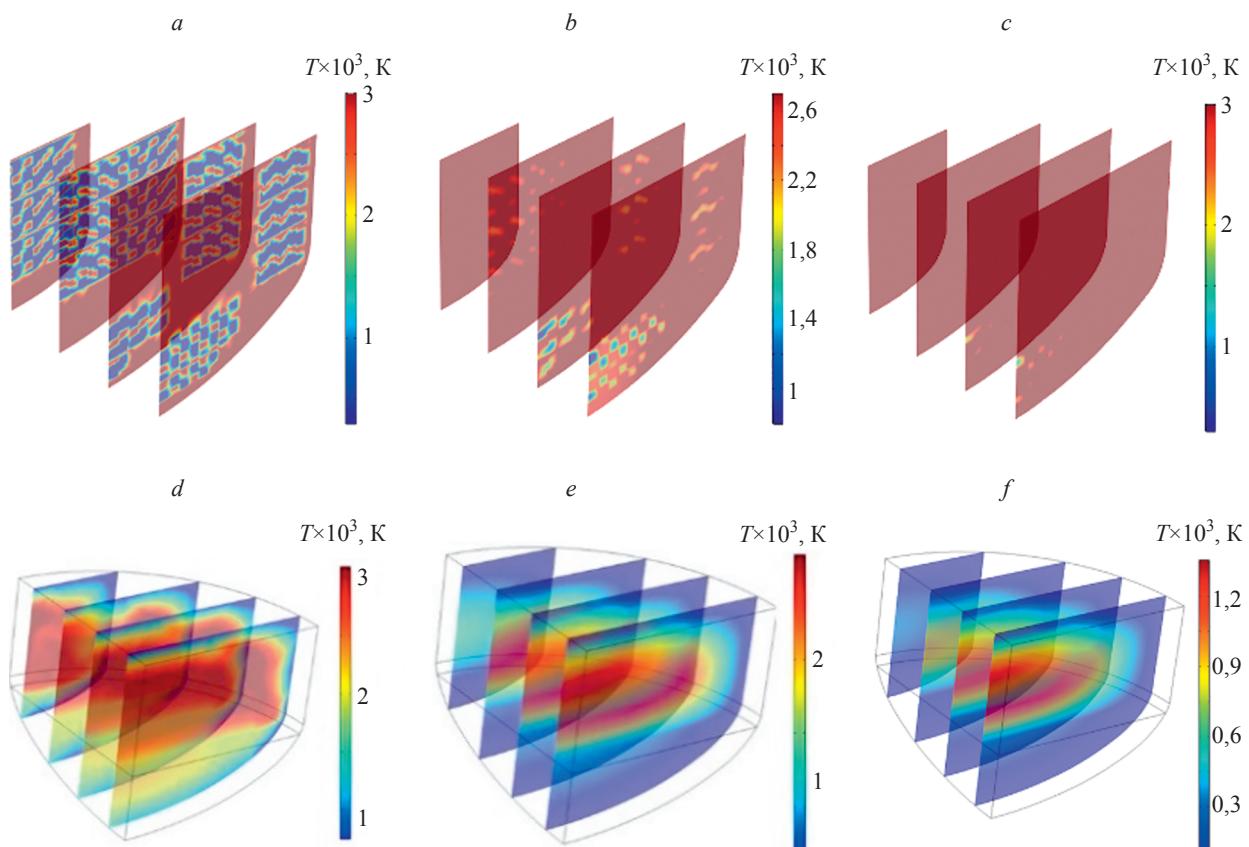


Рис. 3. Температурные поля в сечениях бассейна расплава в течении: 1 мин (a); 20 мин (b); 60 мин (c); 10 ч (d); 100 ч (e); 200 ч (f)

Fig. 3. Temperature fields in cross-sections of the melt pool at durations of: 1 minute (a); 20 minutes (b); 60 minutes (c); 10 hours (d); 100 hours (e); 200 hours (f)

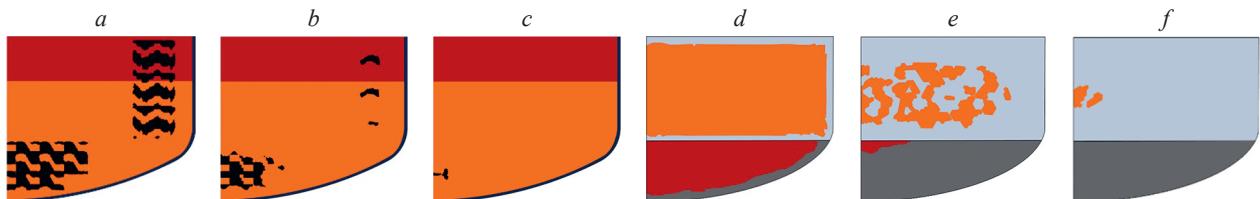


Рис. 4. Фазовый состав системы в течении: 1 мин (a); 20 мин (b); 60 мин (c); 10 ч (d); 30 ч (e); 91 ч (f).

Твердая фаза представлена черной областью, а жидкие фазы — металлической компонентой (красная область) и оксидной компонентой (оранжевая область)

Fig. 4. Phase composition of the system. The solid phase is shown as the black region, while the liquid phases are the metallic component (red region) and the oxide component (orange region)

эффект протекающих химических реакций и теплоотдачу. Параллельно наблюдается возрастание влияния химических реакций на процессы тепло-массообмена и фазовые переходы в системе. По мере дальнейшего прогрева происходит совместное плавление корки и жертвенного материала (рис. 4, e).

Примерно через 60 мин (рис. 4, c) достигается критическая масса расплавленного жертвенного материала в бассейне. Плотность металла становится ниже плотности смеси оксидных компонентов, что инициирует инверсию стратификации. Тепловая стратификация и поток тепла в слоях кориума влияют на их стабильность и турбулентацию. Этот теплоперенос обусловлен термогравитационным механизмом генерации турбулентности. Устойчивое расположение оксидного слоя позволяет безопасно подавать воду на поверхность расплава (рис. 4, f).

В условиях неизотермичности формируется гарнисажная корка, которая затрудняет теплообмен (рис. 5). Анализ графика показывает, что оксидная корка образуется практически мгновенно, и уже через 30 мин после инверсии достигается состояние, близкое к стационарному. Через 60 мин после инверсии температура оксидных компонентов начинает снижаться, что приводит к постепенному затвердеванию кориума. Температура затвердевания оксидной компоненты достигается через 23 ч, после чего интенсивность затвердевания возрастает. Аналогично, интенсивность затвердевания расплавленного металла активной зоны увеличивается через 17 ч. Затвердевание бассейна происходит достаточно быстро: через 44 ч более теплопроводная металлическая компонента полностью затвердевает. Полное затвердевание бассейна завершается через 91 ч (рис. 4, f).

В рамках проведенных исследований установлено, что тепловые потоки от кориума к стенкам ловушки находятся в диапазоне от 0,2 до 0,6 МВт/м². Эти значения существенно ниже критической тепловой нагрузки [15] на внешней охлаждаемой поверхности корпуса устройства, что гарантирует достаточный запас безопасности.

При достижении максимальной тепловой нагрузки оптимальным является расход воды в охлаждающей рубашке ловушки $G = 20$ кг/с. В стационарном режиме, при таком расходе, максимальная температура стенки составляет $t_{ст} = 2330$ К. Гидравлический расчет

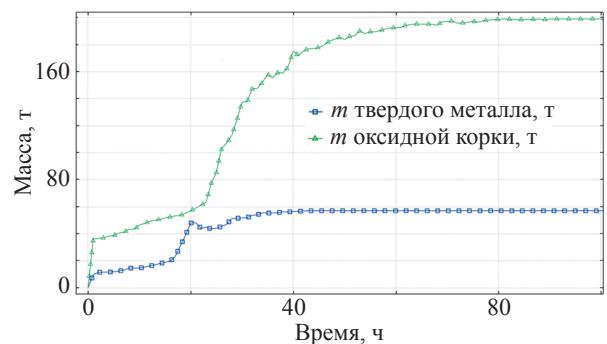


Рис. 5. Масса (m) оксидной корки и затвердевшего металла в бассейне расплава после инверсии

Fig. 5. Mass (m) of the oxide crust and solidified metal in the melt pool after inversion

подтверждает, что для обеспечения данного режима необходимо давление воды на входе 1,25 атм. Важно отметить, что дальнейшее увеличение расхода воды не приводит к существенному снижению температуры стенки.

Результаты анализа демонстрируют, что при расходе воды более 20 кг/с достигается заметное улучшение равномерности температурного поля по сравнению с режимами, использующими меньший расход (рис. 6).

В результате воздействия тепловых потоков наблюдалось подплавление корпуса устройства локализации (рис. 7). Процесс плавления начался через 60 мин после аварии. Благодаря образованию корки затвердевшего кориума на относительно холодной поверхности корпуса, мгновенного нагрева не произошло. Нагрев корпуса происходил неравномерно, что привело к тому, что плавление изначально затронуло днище и верхнюю часть стенки.

По мере снижения тепловыделений, количество расплавляющегося металла уменьшалось. Через 49 мин после начала нагрева стенки максимальная температура корпуса не превысила температуры плавления ($T = 1688$ К), что привело к полной остановке процесса плавления.

Максимальный тепловой поток при нагреве стенки составлял 640 кВт/м², а после нагрева снизился до 400 кВт/м². В течение 30 ч тепловой поток упал до 80 кВт/м².

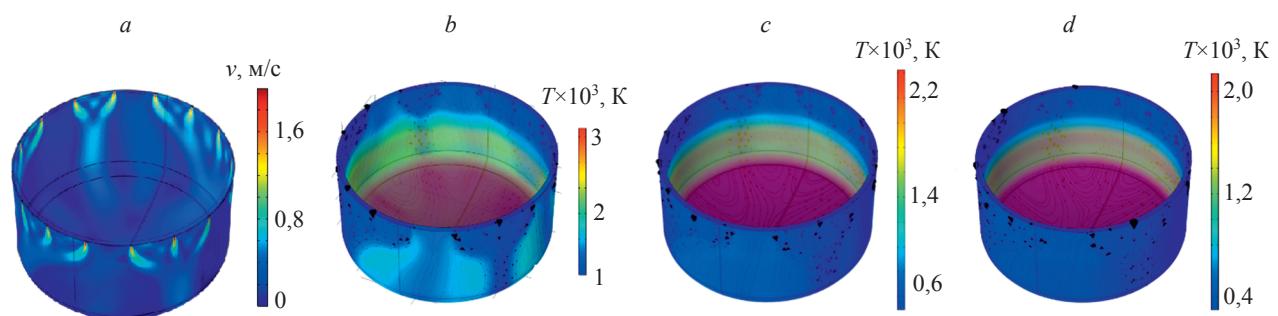


Рис. 6. Поле скоростей при массовом расходе воды 20 кг/с (a), температурные поля и линии тока при массовом расходе воды: 5 кг/с (b); 20 кг/с (c); 60 кг/с (d)

Fig. 6. Velocity field at a water mass flow rate of 20 kg/s (a); temperature fields and streamlines at water mass flow rates: 5 kg/s; 20 kg/s (c); 60 kg/s (d)

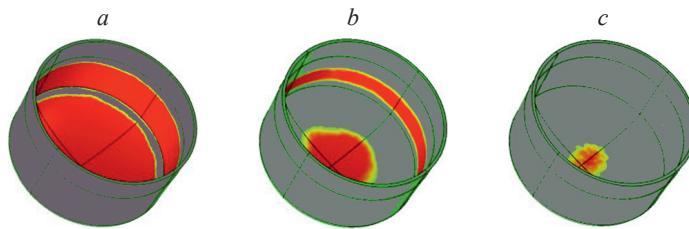


Рис. 7. Процесс проплавления корпуса устройства локализации: 60 мин (a); 1 ч 20 мин (b); 1 ч 40 мин (c).
Процесс плавления (красная область)

Fig. 7. Melt-through of the core-catcher vessel: 60 min (a); 1 h 20 min (b); 1 h 40 min (c). Melting process (red area)

Вывод

Для моделирования тепловых процессов в устройстве локализации расплава разработана модель, основанная на обобщенной формулировке задачи Стефана. Модель включает уравнения теплопроводности и движений, учитывая тепловыделение кориума, реакции с жертвенным материалом, теплоперенос конвекцией и охлаждение водой. Использован пакет COMSOL Multiphysics для дискретизации, автоматизации условий и расчетов. Это снижает общую неопределенность моделирования и повышает детализацию термокинетических характеристик процессов при разработке устройств локализации расплава.

Результаты трехмерного моделирования, учитывавшего пространственные особенности естественной конвекции компонентов расплава кориума, показали сокращение продолжительности до-инверсной и пост-инверсной стадий по сравнению с двумерной моделью. Анализ трехмерных расчетов тепловых потоков, температурных полей, термических и гидростатических напряжений корпуса ловушки выявил возможность частичного подплавления стенок с внутренней стороны в районе днища и обечайки корпуса устройства локализации на границе заполнения расплавом. Глубина подплавления составляет 1,5–2 мм и прекращается в течение первого часа после поступления расплава в ловушку, когда температура расплава снижается на этапе взаимодействия с жертвенным материалом до инверсии оксидной и металлической составляющих.

Более быстрый темп остывания металлического слоя и более легкоплавкие составляющие приводят к его опережающему затвердеванию по сравнению с тугоплавкими компонентами оксидного слоя. В оксидном слое в течение длительного времени сохраняется расплавленное ядро, и даже через 200 ч в закристаллизовавшихся зонах остаются отдельные очаги жидкой фазы, где возможно скопление оксидов повышенной радиоактивности.

Численный эксперимент продемонстрировал, что удержание кориума в материальной ловушке способно минимизировать последствия аварии с расплавлением активной зоны на АЭС. Использование предложенного решения по размещению жертвенного материала может продлить период борьбы с тяжелой аварией.

Обсуждение

Результаты численного моделирования показывают, что трехмерный анализ турбулентной конвекции и фазовых превращений значительно повышает точность предсказаний тепловых режимов системы. Такой подход позволяет выявить критические зоны подплавления, понять механизмы образования и динамики корки, что невозможно при двухмерных моделях.

Особенностью трехмерной модели является учет локальных эффектов турбулентных вихрей и асимметрий распределения тепла, особенно вблизи днища и верхней обечайки корпуса устройства локализации. Это важно для оценки надежности защитных конструкций и выявления слабых мест системы.

Анализ показал, что конфигурация из треугольных пирамид жертвенного материала обеспечивает равномерное распределение теплового потока, способствуя своевременному формированию стабильной корки и снижая риск превышения температуры корпуса. Модель также позволила определить оптимальные параметры охлаждения, включая расход воды и временные интервалы.

При использовании предложенной конструкции и расхода воды около 20 кг/с температуры стенок и тепловые потоки остаются в пределах нормативных требований. Однако в реальных условиях возможны значительные вариации параметров из-за изменений тепловыделения, тепловых потерь или форм и материалов конструкции. Поэтому необходимо расширять исследования диапазоном аварийных сценариев.

Важно также учитывать образование пористых структур и трещин в корке, что может привести к не-предсказуемому тепловому режиму и разрушению защитных слоев. Необходимо развивать модели миграции радиоактивных веществ и их влияние на теплообмен, так как радиоактивные компоненты могут существенно менять тепловые свойства системы.

Перспективы включают развитие моделей с учетом ядерных реакций, миграции радиоактивных веществ, а также внедрение искусственного интеллекта для автоматической интерпретации данных и принятия решений. Кроме того, целесообразно расширять моделирование для различных типов реакторов и использовать мультифизические подходы, объединяющие теплофизику, гидродинамику, химию и радиационную безопасность.

Заключение

В работе создана и успешно реализована трехмерная математическая модель теплофизических процессов, протекающих в системе локализации расплава кориума на примере атомной электростанции. Модель с учетом фазовых превращений, турбулентных течений и взаимодействия с жертвенным материалом позволила получить детальное представление о динамике распределения температур, формировании и развитии корки, а также о временных характеристиках плавления и затвердевания различных компонентов расплава.

Полученные данные подтверждают, что предложенная конструкция системы и оптимальные параметры

охлаждения обеспечивают стабильное удержание кориума без выхода за пределы критических значений тепловых нагрузок на корпус. Использование трехмерного моделирования выявило ключевые зоны риска, связанные с локальным подплавлением и образованием трещин, что важно учитывать при создании резервных и защитных систем.

Полученные результаты подтвердили возможность прогнозирования поведения системы в условиях аварийных сценариев, что существенно повышает уровень безопасности при эксплуатации атомной электростанции и снижает вероятность экологических последствий.

Литература

1. Xi Z., Hu Y., Gong H., Zhang L., Ma Z., Sun W., et al. Numerical study on the corium pool heat transfer with OpenFOAM // *Frontiers in Energy Research*. 2020. V. 8. P. 80. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00080>
2. Кухтевич И.В., Безлепкин В.В., Грановский В.С. [и др.]. Концепция локализации расплава кориума на внекорпусной стадии запроектной аварии АЭС с ВВЭР-1000 // Теплоэнергетика. 2001. № 9. С. 2–7.
3. Гусаров В.В., Альмяшев В.И., Хабенский В.Б., Бешта С.В., Грановский В.С. Взаимодействие материала на основе оксидов алюминия и железа с расплавом металлов // Журнал прикладной химии. 2007. Т. 80. № 4. С. 541–548.
4. Asmolov V.G., Zagryazkin V.N., Tsurikov D.F. The thermodynamics of U-Zr-Fe-O melts // *High Temperature*. 2007. V. 45. N 3. P. 305–312. <https://doi.org/10.1134/s0018151x07030042>
5. Viot L., Le Tellier R., Peybernes M. Modeling of the corium crust of a stratified corium pool during severe accidents in light water reactors // *Nuclear Engineering and Design*. 2020. V. 368. P. 110816. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110816>
6. Gaus-Liu X., Miassoedov A., Gabriel S. Review of experimental studies on the heat transfer behaviour of volumetrically-heated pool with different boundary conditions and the influence of crust formation // Proc. of the 24th International Conference on Nuclear Engineering. 2016. V. 2. P. UNSP V002T07A007. <https://doi.org/10.1115/icone24-60268>
7. Zhang L., Luo S., Zhang Y., Tian W., Su G., Qiu S. Large eddy simulation on turbulent heat transfer in reactor vessel lower head corium pools // *Annals of Nuclear Energy*. 2018. V. 111. P. 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.08.055>
8. Динь Ч.Н., Нигматулин Б.И., Нургалиев Р.Р., Рассокин Н.Г. Оценка тепловой нагрузки на стадии взаимодействия расплавленного кориума с корпусом ВВЭР при тяжелой аварии // Теплоэнергетика. 1996. № 3. С. 9–17.
9. Fukasawa M., Hayakawa S., Saito M. Thermal-hydraulic analysis for inversely stratified molten corium in lower vessel // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2008. V. 45. N 9. P. 873–888. <https://doi.org/10.1080/18811248.2008.9711489>
10. Tran C.T., Kudinov P. The effective convectivity model for simulation of molten metal layer heat transfer in a boiling water reactor lower head // *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2013. V. 2013. P. 231501. <https://doi.org/10.1155/2013/231501>
11. Коваленко А.Н., Коптюхов А.О., Мещеряков Д.К., Щуклинов А.П. Моделирование термокинетических процессов в тигельных ловушках расплава кориума при авариях реакторов на АЭС // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 4. С. 61–76. <https://doi.org/10.18721/JPM.13405>
12. Коваленко А.Н., Коптюхов А.О., Мещеряков Д.К., Щуклинов А.П. Расширенное трехстадийное 3D-моделирование термокинетических процессов в тигельных ловушках расплава кориума при авариях реакторов на АЭС // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического уни-

References

1. Xi Z., Hu Y., Gong H., Zhang L., Ma Z., Sun W., et al. Numerical study on the corium pool heat transfer with OpenFOAM. *Frontiers in Energy Research*, 2020, vol. 8, pp. 80. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00080>
2. Kukhovich I.V., Bezlepkin V.V., Granovskii V.S., et al. The concept of localization of the corium melt in the ex-vessel stage of a severe accident at a nuclear power station with a VVER-1000 reactor. *Thermal Engineering*, 2001, vol. 48, no. 9, pp. 699–706.
3. Gusanov V.V., Al'myashev V.I., Khabenskii V.B., Beshta S.V., Granovskii V.S. Interaction of a material based on aluminum and iron oxides with a metal melt. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2007, vol. 80, no. 4, pp. 528–535. <https://doi.org/10.1134/S1070427207040027>
4. Asmolov V.G., Zagryazkin V.N., Tsurikov D.F. The thermodynamics of U-Zr-Fe-O melts. *High Temperature*, 2007, vol. 45, no. 3, pp. 305–312. <https://doi.org/10.1134/s0018151x07030042>
5. Viot L., Le Tellier R., Peybernes M. Modeling of the corium crust of a stratified corium pool during severe accidents in light water reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 2020, vol. 368, pp. 110816. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110816>
6. Gaus-Liu X., Miassoedov A., Gabriel S. Review of experimental studies on the heat transfer behaviour of volumetrically-heated pool with different boundary conditions and the influence of crust formation. *Proc. of the 24th International Conference on Nuclear Engineering*, 2016, vol. 2, pp. V002T07A007. <https://doi.org/10.1115/icone24-60268>
7. Zhang L., Luo S., Zhang Y., Tian W., Su G., Qiu S. Large eddy simulation on turbulent heat transfer in reactor vessel lower head corium pools. *Annals of Nuclear Energy*, 2018, vol. 111, pp. 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.08.055>
8. Dinh T.N., Nigmatulin B.I., Nurgaliev R.R., Rassokhin N.G. Assessment of the thermal load when molten debris interact with a VVER reactor vessel during a severe accident. *Thermal Engineering*, 1996, vol. 43, no. 3, pp. 189–197.
9. Fukasawa M., Hayakawa S., Saito M. Thermal-hydraulic analysis for inversely stratified molten corium in lower vessel. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2008, vol. 45, no. 9, pp. 873–888. <https://doi.org/10.1080/18811248.2008.9711489>
10. Tran C.T., Kudinov P. The effective convectivity model for simulation of molten metal layer heat transfer in a boiling water reactor lower head. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2013, vol. 2013, pp. 231501. <https://doi.org/10.1155/2013/231501>
11. Kovalenko A.N., Koptyukhov A.O., Meshcheryakov D.K., Schuklinov A.P. Thermokinetic processes in the corium traps of high-temperature melt during the reactor accidents at an A-plant: simulation. *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 61–76. (in Russian). <https://doi.org/10.18721/JPM.13405>
12. Kovalenko A. N., Koptyukhov A. O., Meshcheryakov D. K., Schuklinov A. P., Thermokinetic processes in the corium traps of high-temperature melt during the reactor accidents at an A-plant: advanced three-stage 3D simulation. *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*, 2021,

- верситета. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 4. С. 69–83. <https://doi.org/10.18721/JPM.14405>
- 13. Boettinger W.J., Warren J.A., Beckermann C., Karma A. Phase-field simulation of solidification // *Annual Review of Materials Research*. 2002. V. 32. P. 163–194. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.32.101901.155803>
 - 14. Wang Q., Yu Q., Du W., Fang Z., Li K., Wang Q. Fluid distribution in a two-phase space accumulator predicted by a coupled multi-scale model based on single-domain approach // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025. V. 162. P. 108567. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108567>
 - 15. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат, 2000. 456 с.
- vol. 14, no. 3, pp. 69–83. (in Russian). <https://doi.org/10.18721/JPM.14405>
- 13. Boettinger W.J., Warren J.A., Beckermann C., Karma A. Phase-field simulation of solidification. *Annual Review of Materials Research*, 2002, vol. 32, pp. 163–194. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.32.101901.155803>
 - 14. Wang Q., Yu Q., Du W., Fang Z., Li K., Wang Q. Fluid distribution in a two-phase space accumulator predicted by a coupled multi-scale model based on single-domain approach. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, vol. 162, pp. 108567. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108567>
 - 15. Kirillov P.L., Bogoslovskaya G.P. *Heat and Mass Transfer in Nuclear Power Plants*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000, 456 p. (in Russian)

Авторы

Пилипенко Николай Васильевич — доктор технических наук, профессор, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-9328-3166>, pilipenko38@mail.ru

Коптиухов Артём Олегович — кандидат технических наук, научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Гатчина, 188300, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-9660-3601>, koptyukhov_ao@pnpi.nrcki.ru

Authors

Nikolay V. Pilipenko — D.Sc., Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9328-3166>, pilipenko38@mail.ru

Artem O. Koptyukhov — PhD, Scientific Researcher, NRC “Kurchatov Institute” — PNPI, Gatchina, 188300, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9660-3601>, koptyukhov_ao@pnpi.nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 07.07.2025
Одобрена после рецензирования 15.10.2025
Принята к печати 17.11.2025

Received 07.07.2025
Approved after reviewing 15.10.2025
Accepted 17.11.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»