

Научная статья

УДК 53.072; 53:004

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14405>

## РАСШИРЕННОЕ ТРЕХСТАДИЙНОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТИГЕЛЬНЫХ ЛОВУШКАХ РАСПЛАВА КОРИУМА ПРИ АВАРИЯХ РЕАКТОРОВ НА АЭС

А. Н. Коваленко <sup>1</sup>, А. О. Коптюхов <sup>2</sup> ✉,  
Д. К. Мещеряков <sup>3</sup>, А. П. Щуклинов <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский Институт» – ПИЯФ, г. Гатчина, Россия;

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>4</sup> АО «Атомпроект», Санкт-Петербург, Россия

✉ [t44h@yandex.ru](mailto:t44h@yandex.ru)

**Аннотация.** Работа продолжает цикл статей, посвященных развитию предложенной авторами модели изменений теплового и фазового состояний высокотемпературного расплава активной зоны в охлаждаемой подреакторной ловушке тигельного типа при взаимодействии с жертвенным материалом при тяжелых авариях реакторов на АЭС. На базе обобщенной формулировки задачи Стефана со свободными границами раздела фаз предложена расширенная трехстадийная 3D-модель протекающих процессов, учитывающая влияние на них разнообразных факторов. Модель включает стадию инверсии оксидной и металлической составляющих, изменяющихся в бассейне кориума в ходе термохимических реакций. Апробация предложенной модели проведена путем сравнения полученных результатов с данными полномасштабного эксперимента COPRA по теплообмену в бассейне кориума с внутренним источником теплоты. Расчетные результаты модели с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics подтвердили эффективность предложенной схемы размещения жертвенного материала в ловушке, а также схемы ее охлаждения для обеспечения требуемых целевых функций.

**Ключевые слова:** расплав активной зоны, подреакторная тигельная ловушка, жертвенный материал, тепловое состояние

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-08-01181).

**Для цитирования:** 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 СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 4. С. 69–83. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14405>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14405>

## **THERMOKINETIC PROCESSES IN THE CORIUM TRAPS OF HIGH-TEMPERATURE MELT DURING THE REACTOR ACCIDENTS AT AN A-PLANT: ADVANCED THREE-STAGE 3D SIMULATION**

**A. N. Kovalenko**<sup>1</sup>, **A. O. Koptuykhov**<sup>2</sup> ✉, **D. K. Meshcheryakov**<sup>3</sup>, **A. P. Schuklinov**<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> NRC "Kurchatov Institute" – PNPI, St. Petersburg, Russia;

<sup>3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

<sup>4</sup> JSC "Atomproekt", St. Petersburg, Russia

✉ [t44h@yandex.ru](mailto:t44h@yandex.ru)

**Abstract:** This study continues a series of the works on the development of the model (proposed by us) which describes the changes in the thermal and phase states of a high-temperature core melt in the cooled under-reactor crucible-type trap when the melt interacting with sacrificial material in severe reactor accidents at nuclear power plants. On the basis of the generalized formulation of the Stefan problem with free interfaces, an extended three-stage 3D model of the proceeding processes has been proposed, that takes into account the influence of various factors. The model includes a stage of inversion of oxide and metal components changing in the corium basin during thermochemical reactions. Approbation of the model was carried out by comparison between the obtained results and the data of the full-scale COPRA experiment on the heat transfer by natural convection in a corium basin with an internal heat source. Our calculation results using the COMSOL Multiphysics software package confirmed the efficiency of the proposed scheme for arrangement of the sacrificial material in the trap, as well the scheme for the trap's cooling to provide the required target functions.

**Keywords:** melt active zone, subreactor crucible trap, sacrificial material, thermal state

**Funding:** the work was done with financial support of the Russian Science Foundation within the framework of a science project No. № 19-08-01181.

**For citation:** Kovalenko A. N., Koptuykhov 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. 14 (3) (2021) 69–83. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14405>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## Введение

Обзор проблемы удержания радиоактивных продуктов плавления активной зоны реактора от их распространения в окружающую среду в случае критического нарушения теплообмена при тяжелых авариях на АЭС был представлен в наших предыдущих работах этого цикла [1 – 3]. При этом было проведено обсуждение технических решений данной проблемы, предложенных в мире и относящихся к разработке различных устройств, а также рассмотрены вопросы их расчетно-экспериментального обоснования. В частности, была описана отечественная разработка подреакторной ловушки тигельного типа с жертвенным материалом (ЖМ) [4]. Этот материал на основе оксидов железа и алюминия с добавками, иммобилизующими радионуклиды [5], предназначен для разбавления поступившего в ловушку высокотемпературного расплава кориума, состоящего из смеси оксидов урана, плутония, недоокисленного циркония, осколков деления ядерного топлива, поглощающих материалов, металлов опорных конструкций (железо, никель, хром и др.), снижения его температуры и уменьшения плотности за счет своего плавления и химических реакций с недоокисленными компонентами расплава, а также минимизации выхода водорода и радиоактивных продуктов деления.

С учетом опыта исследований, выполненных в различных организациях на экспериментальных установках с применением специализированных расчетных кодов [6 – 16], а также результатов независимого бенчмарка этих и других кодов [17] были сформулированы подходы к постановке и решению возникающих при этом задач численного моделирования термокинетических процессов, протекающих в такой ловушке.

Цель указанного моделирования состоит в том, чтобы прогнозировать изменения теплового и фазового состояния кориума на различных стадиях его эволюции. Главное внимание при этом было уделено исследованию взаимодействия расплава как с отдельными структурными элементами ЖМ [2, 3], так и с устройством в целом. За основу была взята двухстадийная модель [1], базирующаяся на обобщенной формулировке задачи Стефана со свободными границами раздела фаз [18]. Она включала расчетный анализ тепловых и фазово-химических превращений компонентов ЖМ и расплава на начальном этапе его поступления в ловушку, а также изучение дальнейшего охлаждения и кристаллизации кориума после гравитационной инверсии в бассейне кориума его оксидной и металлической составляющих разной плотности, изменяющихся в ходе термохимических реакций между ЖМ и расплавом.

В данной работе рассматривается расширенная трехстадийная, трехмерная (3D) модель, отражающая общую последовательность физико-химических взаимодействий в многокомпонентной термодинамической системе переменного состава.

Модель включает следующие стадии.

*Прединверсная* (начальная). Происходит гравитационное расслоение более легкого металлического и более тяжелого оксидного компонентов, поступивших в ловушку расплава при снижении его температуры за счет затрат теплоты на нагрев и проплавление ЖМ.

*Инверсия*. Имеет место инверсия оксидных и металлических компонентов расплава с переходом расплавленных оксидов в верхнюю часть бассейна, а расплавленных металлов – в нижнюю его часть, вследствие изменений соотношения их плотностей, которые произошли на начальной стадии.

*Послеинверсная* (заключительная). Происходит охлаждение и кристаллизация расплава, обусловленные естественной конвекцией в расплаве, внешним охлаждением корпуса ловушки и переносом тепла путем излучения над поверхностью ванны.

Общая модель учитывает остаточное радиоактивное тепловыделение кориума, тепловые эффекты плавления ЖМ и химических реакций восстановления его оксидов при окислении недоокисленных элементов расплава, теплоперенос через естественную конвекцию в расплаве, теплопередачу охлаждающей воде через стенки корпуса, а также тепловое излучение во внутреннем пространстве как следствие их взаимодействия.

Адекватность расширенной численной модели оценивалась путем ее тестирования на примерах аналитического решения задачи Стефана [18, 19] и данных полномасштабного эксперимента COPRA [7] по исследованию теплообмена через естественную конвекцию в бассейне кориума с внутренними источниками тепла.

### Постановка задачи и методы решения

Созданная трехмерная (3D) модель тепловых и фазово-химических взаимодействий кориума с ЖМ учитывает конструктивные особенности размещения структурных элементов ЖМ треугольного типа в корзине устройства локализации расплава в виде многоярусных шестигранных сборок внутри ловушки (рис. 1). В каждом их ярусе отсутствуют два элемента, причем на соседних рядах отсутствующие элементы повернуты относительно предыдущего ряда на  $60^\circ$ . Такая укладка обеспечивает спиральную циркуляцию кориума в ловушке с равномерным распределением по всем брикетам в удерживающих блоках корзины ЖМ.

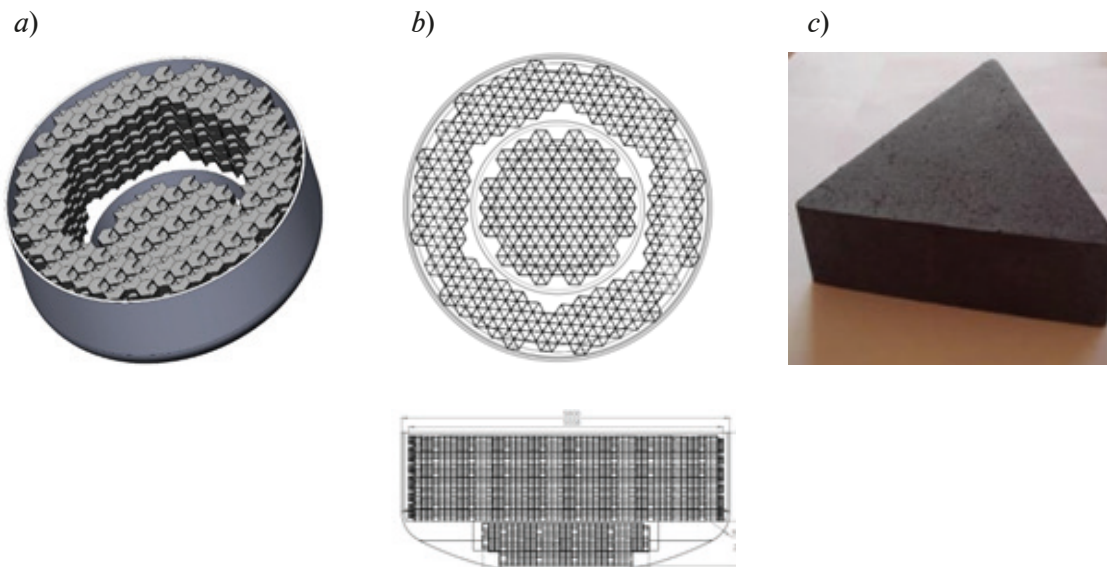


Рис. 1. Трехмерное изображение корзины ловушки, расположенной в устройстве локализации расплава тигельного типа [4] (a) и двухмерные проекции этой корзины (b), а также натуральный образец структурного элемента ЖМ указанного устройства (c)

Математическая модель протекающих в ловушке процессов тепловых и фазовых превращений в охлаждаемом расплаве высокотемпературного кориума базируется на обобщенной формулировке задачи Стефана со свободными границами раздела фаз [18]. Естественная конвекция в расплаве описывается осредненными по Рейнольдсу нестационарными уравнениями Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости совместно с уравнением неразрывности. Влияние флуктуаций скорости мы учитывали через турбулентную кинетическую энергию пульсаций и ее диссипацию за счет внутреннего трения, замыкание которых производится по стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности [20]. Для температурной задачи на боковых и нижней гранях ванны расплава, контактирующих с внешне охлаждаемыми стенками корпуса ловушки, налагали граничные условия теплообмена третьего рода с заданными значениями температуры охлаждающей воды и коэффициента теплоотдачи [21]. Учет переноса тепла через излучение осуществляли дополнением к условию на свободной поверхности ванны, граничащей с выделяющимися аэрозолями. Для уравнений гидродинамики задавали обычные условия прилипания на границе контакта с корпусом и условие скольжения на оси симметрии и верхней свободной границе (равенство нулю нормальных компонент скоростей). Для случая образования затвердевающей гарнисажной корки также задавали условие прилипания на верхней границе.

Для описания процесса инверсии оксидных и металлических компонентов расплава при тейлоровской неустойчивости [22], который состоял в переходе расплавленных менее плотных оксидов в верхнюю часть бассейна, а более тяжелых расплавленных металлов – в нижнюю (см. выше), использовали модель изменения уровня двух несмешивающихся жидкостей. Описанное моделирование связывает термодинамические процессы, протекающие в пред- и послеинверсном бассейнах.

Постановка задачи о термокинетике фазовых превращений на послеинверсионной стадии отличается от таковой для прединверсионной стадии отсутствием учета теплоты плавления и химического взаимодействия ЖМ с расплавом, а также наличием учета возможности образования пространственных зон кристаллизации (в том числе с непостоянной температурой фазового перехода), обусловленного расположением линий солидуса и ликвидуса на фазовой диаграмме кориумной среды. Для построения таких линий применяются методы термодинамического анализа на основе условной минимизации свободной энергии Гиббса с использованием набора различных моделей растворов [23], а также термодинамических факторов их корреляции по результатам лабораторных исследований на маломасштабных установках [24].

Для решения сформулированных задач использовали численные методы программного пакета COMSOL Multiphysics [25]; его применение позволило унифицировать дискретизацию расчетной области и автоматизировать условия сопряжения тепловых, гидродинамических и химических компонентов модели, обеспечить их сквозной счет для снижения общей неопределенности моделирования и детализации термокинетических характеристик процессов при разработке ловушек. Как и ранее (см. нашу работу [1]), дискретизацию расчетных областей для разрешения пограничного слоя проводили с использованием анизотропной сетки, шаг которой уменьшали на их границах с учетом влияния минимальных размеров структурных элементов сетки на сходимость решений (в соответствии с предварительными пробными расчетами).

Исходные геометрические параметры ловушки, масса, состав и свойства различных сред и компонентов расплава кориума, значения мощности остаточного тепловыделения, характеристики ЖМ и кинетики химических реакций принимали на основе данных, полученных от проектировщиков устройства локализации расплава (УЛР) для водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) мощностью 1,0 – 1,2 ГВт.

Сгенерированные сетки расчетной области для рассматриваемых задач на различных стадиях моделирования представлены на рис. 2.

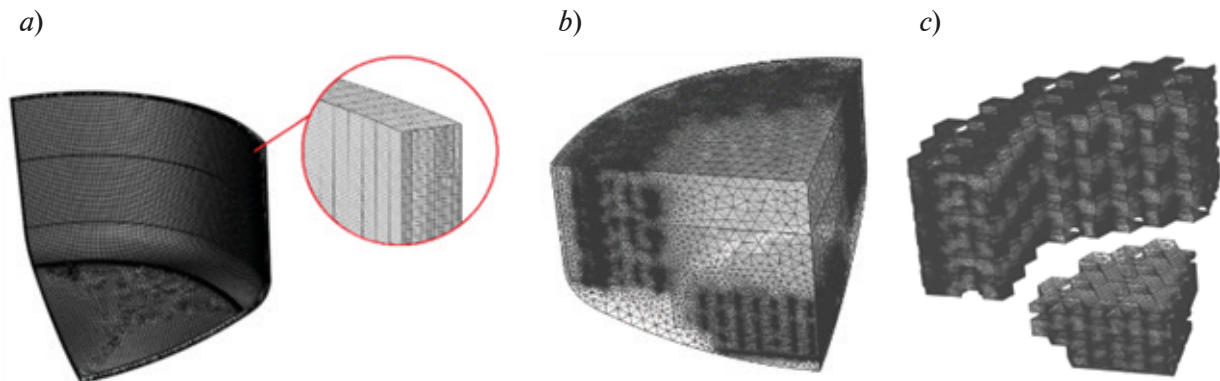


Рис. 2. Расчетные сетки конечных элементов для различных расчетных областей ловушки: *a* – стенка ее корпуса с обечайкой (на вставке); *b* – ее корзина с заполненным жертвенным материалом (ЖМ); *c* – ее содержимое с ярусной укладкой брикетов ЖМ

### Результаты модельных расчетов и их обсуждение

Выполненное рассмотрение трех стадий термокинетических процессов в ловушке позволило детализировать не только представленные ранее в двухмерном приближении пред- и послеинверсионные стадии изменения теплового и фазового состояний компонентов расплава при его взаимодействии с ЖМ, но и ключевую, разделяющую их стадию гравитационной инверсии оксидной и металлической составляющих расплава (ранее эта стадия не рассматривалась). Как указывалось выше, стадия инверсии вызвана произошедшим изменением соотношения плотностей компонентов расплава, и состоит в переходе расплавленных оксидов в верхнюю часть бассейна расплава, а расплавленных металлов – в нижнюю. Полученные результаты численного 3D-моделирования процес-

сов изменения фазового состояния и температуры бассейна расплава кориума на трех стадиях проиллюстрированы рисунками 3 – 5 для центрального сечения бассейна и рисунком 6 – для его периферийных зон.

Следует отметить, что реализующееся после инверсии устойчивое расположение оксидного слоя над металлическим относительно выделенной горизонтальной границы раздела создает возможность добавочной подачи охлаждающей воды на поверхность расплава без риска парового взрыва [26].

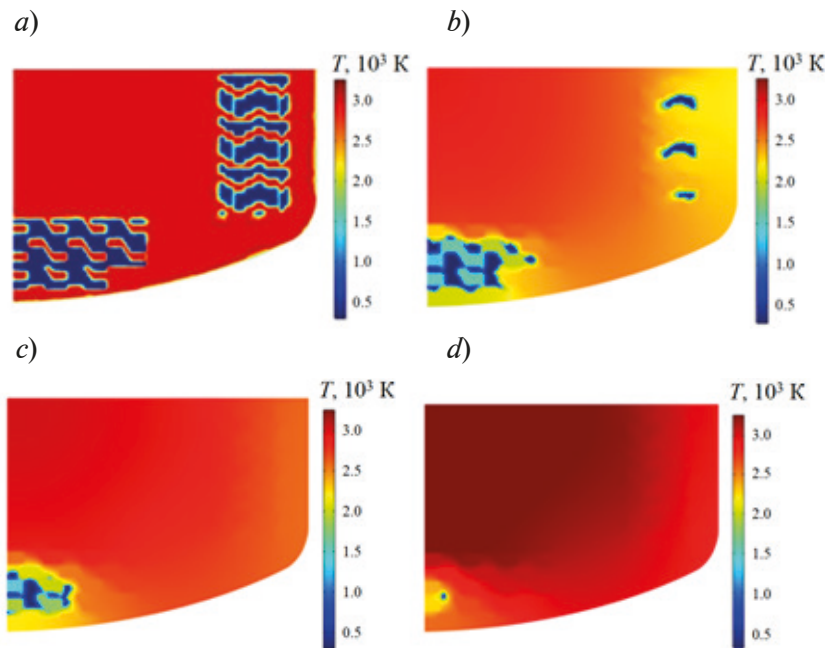


Рис. 3. Распределения температуры  $T$  (К) и соотношения областей твердой и жидкой фаз (темный и светлый фон) расплава кориума и ЖМ по центральному сечению бассейна на прединверсионной стадии в различные моменты времени, мин: через 1 (*a*), 20 (*b*), 40 (*c*), 60 (*d*)

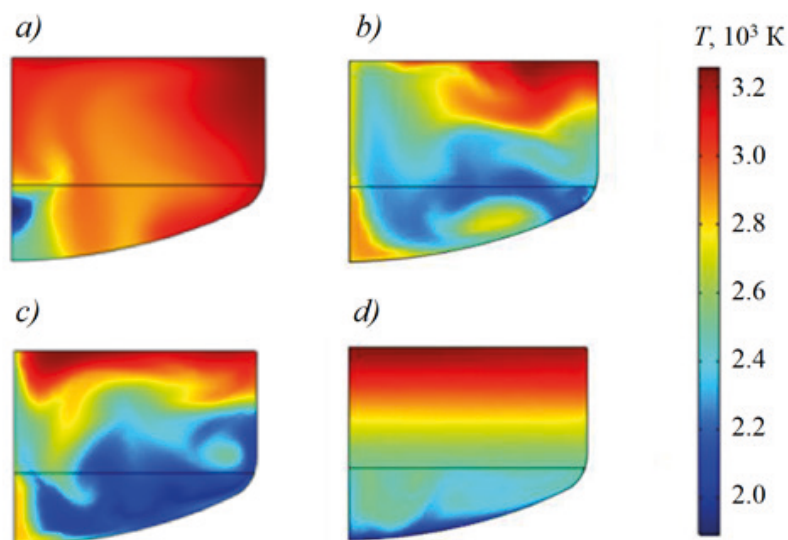


Рис. 4. Температурные поля расплава кориума в центральном сечении бассейна на стадии инверсии его оксидного и металлического компонентов (темные и светлые области) в различные моменты времени, с: через 1 (*a*), 20 (*b*), 40 (*c*), 60 (*d*)

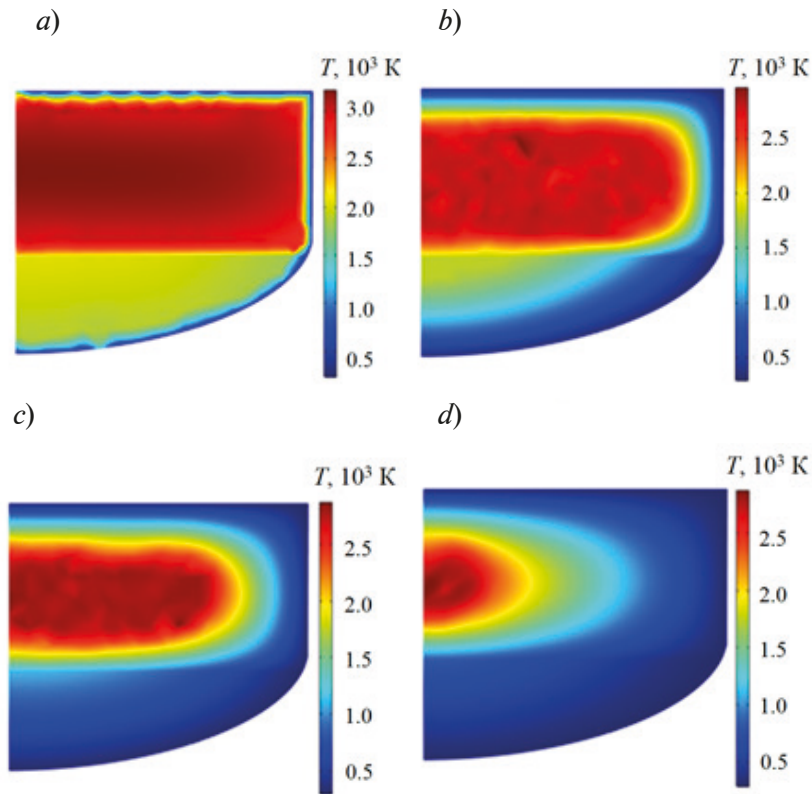


Рис. 5. Распределения температуры  $T$  (К) расплава кориума, состоящего из оксидного и металлического компонентов (не смешиваются между собой), по центральному сечению бассейна на послеинверсионной стадии в различные моменты времени, ч: через 10 (a), 50 (b), 100 (c), 210 (d)

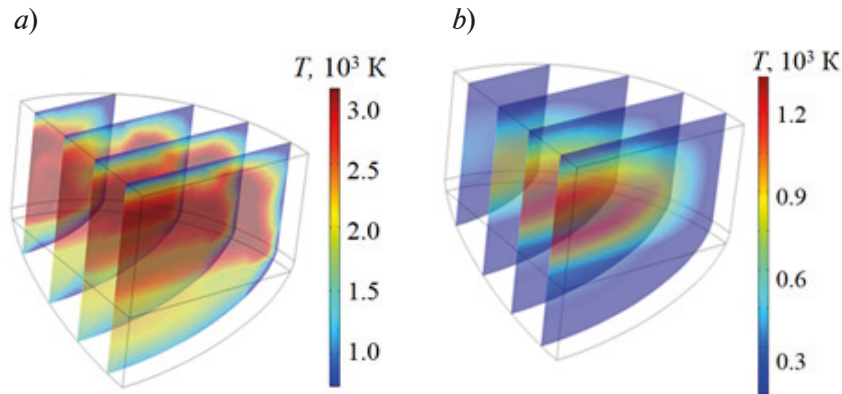


Рис. 6. Распределения температуры  $T$  (К) расплава кориума (см. рис. 5) по четырем периферийным сечениям бассейна на послеинверсионной стадии, в различные моменты времени: через 10 ч (a) и 210 ч (b)

Сопоставление расчетных результатов общей динамики распределения температуры в ходе всех трех стадий рассмотренных процессов (от плавления жертвенного материала до затвердевания кориума), полученных по различным моделям, представлено на рис. 7. Видно, что расчеты по 3D-модели, учитывающей пространственные особенности естественной конвекции компонентов расплава кориума, показывают некоторое сокращение продолжительности пред- и послеинверсионной стадий рассматриваемых процессов, по сравнению с соответствующими результатами по 2D-модели. Полученный расчетный факт позволяет сделать практически важный вывод: он допускает более раннюю организацию дополнительной подачи охлаждающей воды на поверхность инверсированного оксидного слоя кориума без риска парового взрыва.

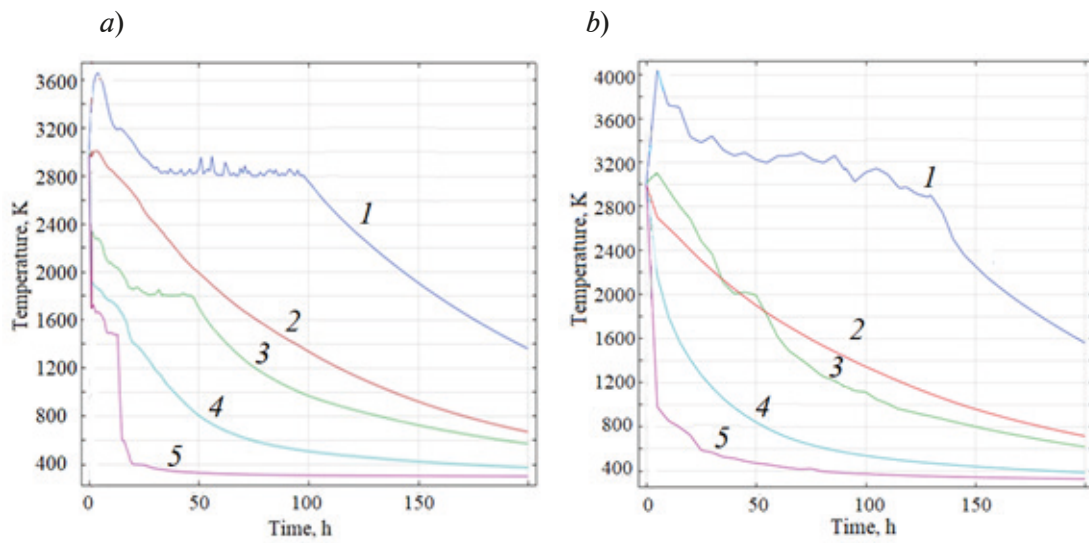


Рис. 7. Общая динамика распределения температуры и фазовых областей расплава кориума в ходе всех стадий протекания термокинетических процессов в ловушке, рассчитанная по 3D- (a) и 2D- (b) моделям.

Представлены результаты по максимальным (1, 2) и средним (3, 4) значениям температуры металлических (1, 3) и оксидных (2, 4) компонентов, а также по максимальным значениям температуры корпуса ловушки (5)

Результаты расчетов потоков тепловой энергии от кориума к стенкам ловушки на всем протяжении рассмотренного сценария процессов свидетельствуют, что их значения лежат в диапазоне от 0,2 до 0,6 МВт/м<sup>2</sup>; такие значения не превышают (с достаточным запасом) критическую тепловую нагрузку [21, 27] на внешней поверхности корпуса тигля, охлаждаемой водой (рис. 8).

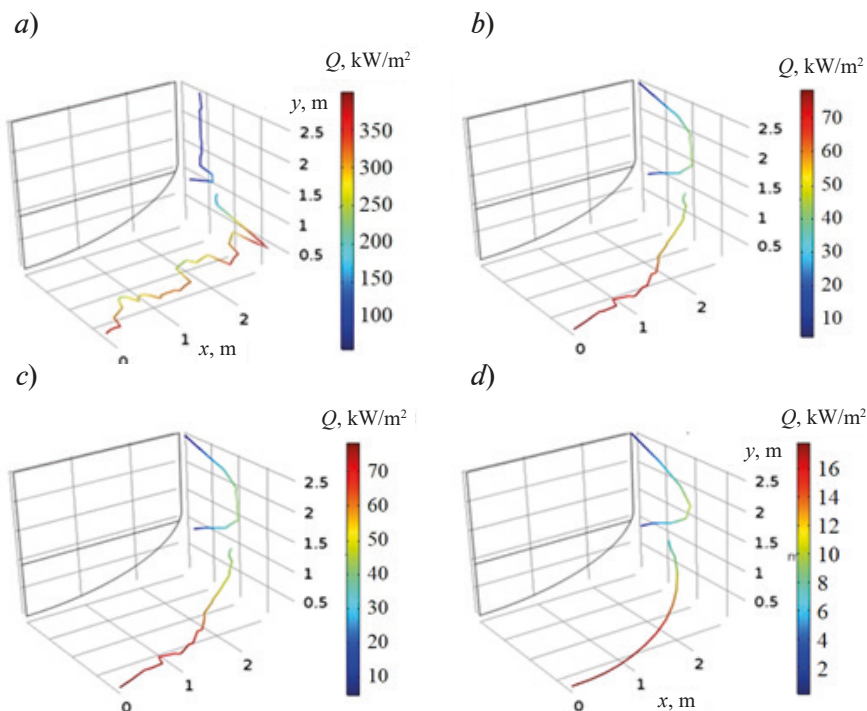


Рис. 8. 3D-изображения значений нормальных компонент плотности тепловых потоков вдоль стенок корпуса ловушки на всем протяжении рассмотренного сценария процессов в разные моменты времени, ч: через 10 (a), 30 (b), 60 (c), 100 (d)



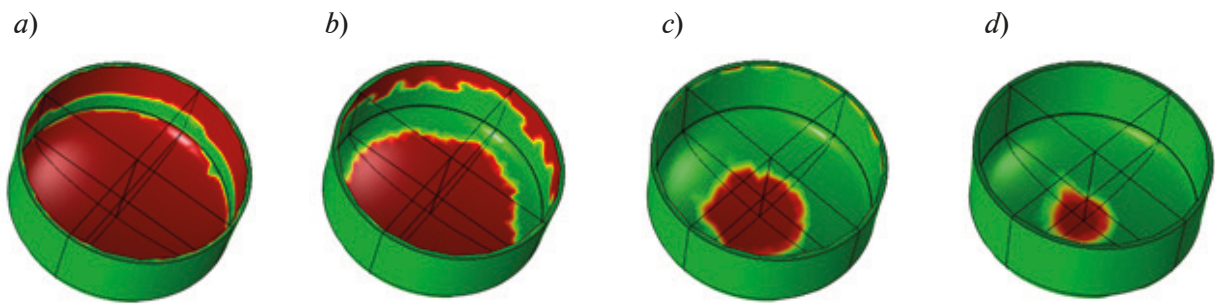


Рис. 9. Локализация и характер подплавления внутренних стенок корпуса ловушки в течение первых двух часов после поступления расплава кориума. Визуализированы результаты для разных моментов времени, мин: через 60 (a), 80 (b), 100 (c), 120 (d). Зоны подплавления выделены коричневым цветом, остальные – зеленым

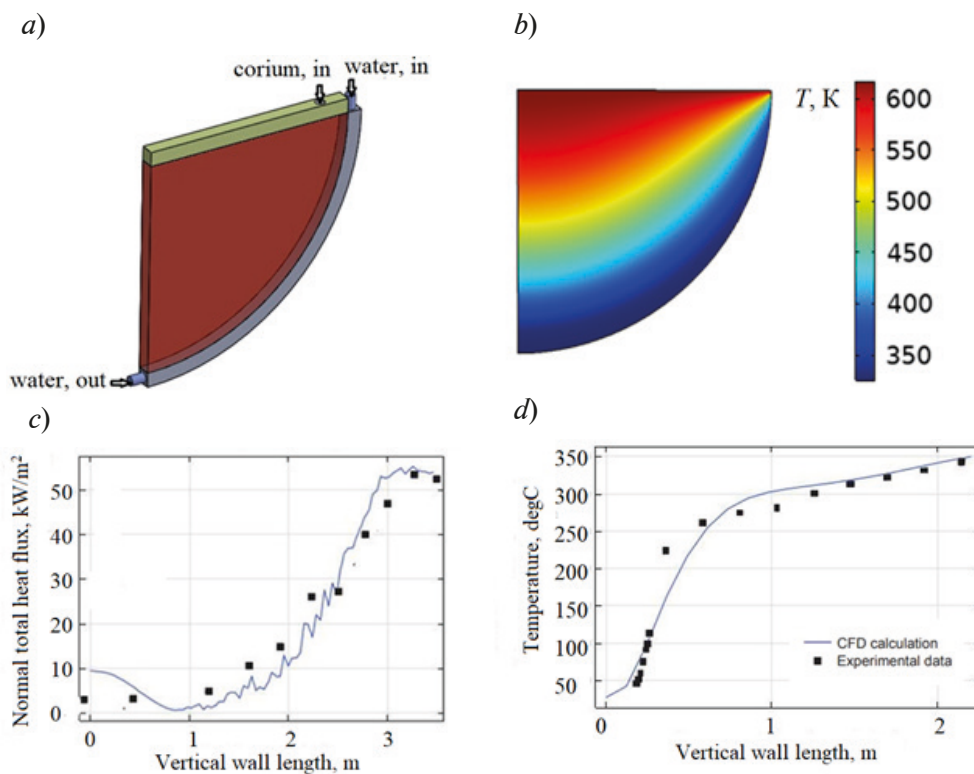


Рис. 10. Сопоставление наших результатов моделирования температурного поля (b) с опытными и расчетными данными полномасштабного физического эксперимента на установке COPRA [7] (a, c, d); представлен испытательный сосуд с имитационным расплавом кориума (a), а также плотность теплового потока (c) и распределение температуры (d) вдоль вертикальной границы

Вместе с тем необходимо отметить значительную неравномерность распределения тепловых потоков по внутренней стороне стенок корпуса ловушки, особенно в первые часы поступления туда высокотемпературного расплава кориума с начальной температурой, существенно превышающей температуру плавления металла стенки. Согласно результатам модельных расчетов, в течение первого часа после поступления расплава наблюдается частичное подплавление стенок корпуса с внутренней стороны глубиной до 1,5 – 2,0 мм в областях дна ловушки и обечайки на границе ее заполнения поступившим расплавом; такое подплавление прекращается после понижения температуры кориума в течение второго часа (рис. 9).

Несмотря на незначительную глубину такого подплавления стенок корпуса (не более 1,5 – 2,0 % от их толщины), в принципе можно несколько уменьшить обуславливающую ее неравномерность температурного поля по стенке корпуса, например за счет увеличения расхода охлаждающей воды на внешней стороне корпуса. Гидравлический расчет схемы охлаждения ловушки показывает, что при максимальной тепловой нагрузке температура стенки может поддерживаться на уровне 2330 К при расходе воды в охлаждающей рубашке 20 кг/с, причем дальнейшее увеличение расхода не дает ощутимого снижения температуры стенки.

Верификация представленной расширенной модели проведена путем сравнения результатов численного моделирования с аналитическими решениями задачи Стефана по фазовым превращениям при плавлении/затвердевании [14, 15], а также с данными полномасштабного физического эксперимента на установке COPRA [16]. На этой установке имеется сосуд в виде плоского сектора с внешним каналом охлаждения, где имитируется локализация расплава кориума в камере китайского реактора PWR. Вместо кориума использовались расплавы солей (нитраты натрия и калия  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{KNO}_3$ ), предварительно нагретый до 350 °С, а внутреннее тепловыделение имитировались электрическими стержнями с суммарной мощностью нагрева 30 кВт. Сопоставление представленных в статье [7] результатов экспериментальных измерений температурного поля и теплового потока на боковой границе, а также приведенных там же результатов вычислений по численной CFD-модели с результатами расчетов по нашей модели показывает их хорошее согласие (рис. 10).

### Заключение

Развитые методики и полученные на их основе результаты расширяют возможности моделирования и расчетных исследований термокинетических процессов тепловых и фазовых превращений в многокомпонентной термодинамической системе высокотемпературного расплава активной зоны в тигельной подреакторной ловушке при его взаимодействии с жертвенным материалом (ЖМ) при тяжелых авариях реакторов на АЭС.

Разработка базируется на обобщенной формулировке задачи Стефана со свободными границами раздела фаз, учитывающей остаточное радиоактивное тепловыделение кориума, тепловые эффекты плавления ЖМ и химических реакций восстановления его оксидов при окислении недоокисленных элементов расплава, теплоперенос через естественную конвекцию в расплаве, теплопередачу охлаждающей воде через стенки корпуса и тепловое излучение во внутреннем пространстве. Для решения задачи Стефана в указанной формулировке используются численные методы программного пакета COMSOL Multiphysics, который позволил унифицировать дискретизацию расчетной области и автоматизировать условия сопряжения тепловых, гидродинамических и химических компонентов модели, обеспечить их сквозной счет для снижения общей неопределенности моделирования и детализации термокинетических характеристик процессов при разработке ловушек.

Созданная нами трехмерная (3D), трехстадийная модель тепловых и фазово-химических взаимодействий включает, по сравнению с предшествующей двухстадийной моделью, ключевую стадию (ранее не рассматривалась) гравитационной инверсии оксидной и металлической составляющих разной плотности, изменяющейся в бассейне кориума в ходе термохимических реакций между ЖМ и расплавом при его начальном поступлении в ловушку.

Это новшество позволило уточнить исходные значения параметров термодинамических процессов на стадии последующего охлаждения и кристаллизации расплава. Кроме того, в модели учитывается влияние на протекающие процессы конструктивных особенностей пространственного размещения ЖМ в ловушке, пространственных условий турбулентного теплопереноса в расплаве, теплоотвода к охлаждающей водяной рубашке с внешней стороны корпуса ловушки. При этом уточнены характеристики тепловых и фазово-химических взаимодействий расплава с ЖМ и закономерности последующего охлаждения до температуры кристаллизации, заложенные проектировщиками ловушек (эти закономерности рассматривались ранее в 2D-приближении).



В частности, учет в 3D-модели пространственных особенностей естественной конвекции компонентов расплава кориума показывает сокращение общей продолжительности пред- и послеинверсной стадий рассматриваемых процессов, по сравнению с расчетами по 2D-модели. Полученный расчетный факт позволяет сделать практически важный вывод, который состоит в возможности более ранней организации дополнительной подачи охлаждающей воды на поверхность инверсированного оксидного слоя кориума без риска парового взрыва.

Расчеты по 3D-модели выявили также эффекты незначительного локального подплавления корпуса ловушки поступившим расплавом стенок корпуса с внутренней стороны в областях днища ловушки и обечайки на границе ее заполнения; такое подплавление прекращается после понижения температуры кориума. На практике их можно частично ослабить за счет некоторого увеличения расхода охлаждающей воды в контуре наружного охлаждения ловушки.

Верификация теплофизической части расширенной модели, проведенная на результатах полномасштабного эксперимента COPRA по исследованию теплообмена естественной конвекцией в бассейне кориума с внутренним источником теплоты, в дополнение к сопоставлению с известными аналитическими решениями задачи Стефана по фазовым превращениям плавление/кристаллизация, показывает хорошее согласие с расчетными результатами.

В целом результаты расчетов по предложенной модели с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics подтверждают эффективность применяемой схемы размещения ЖМ в ловушке, а также схемы ее охлаждения для обеспечения требуемых целевых функций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко А. Н., Коптюхов А. О., Мещеряков Д. К., Шуклинов А. П. Моделирование термокинетических процессов в тигельных ловушках расплава кориума при авариях реакторов на АЭС // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 4. С. 61–76.
2. Коваленко А. Н., Коптюхов А. О., Мещеряков Д. К., Шуклинов А. П. Численное моделирование термокинетических процессов взаимодействия жертвенного материала и расплава кориума при тяжелых авариях реакторов на АЭС // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2020. № 3 (21). С. 76–85.
3. Golovacheva V. G., Kovalenko A. N., Meshcheryakov D. K., Schuklinov A. P., Koptuyukhov A. O. Correlation between heat-mass transfer, chemical reactions and phase transformations in corium melt localization devices during severe nuclear power plant accidents // Diversity in Nuclear: International Youth Nuclear Congress (NIYNC2020), 8 – 13 March 2020, Sydney, Australia. Conference Proceedings. Sydney, Australia, 2020. Pp. 176–179.
4. Безлепкин В. В., Сидоров В. Г., Кухтевич В. О., Курчевский А. И., Астафьева В. О., Хабенский В. Б., Грановский В. С., Бешта С. В., Гусаров В. В. Устройство локализации и охлаждения кориума ядерного реактора. Пат. № 25-14419. Российская Федерация. МПК G21C9/016; заявитель и патентообладатель – СПб. ОАО «Головной институт "ВНИПИЭТ"». № 2012124161; заявл. 20.02.14; опубл. 27.04.14. Бюлл. № 23 (II ч.). 11 с.
5. Гусаров В. В., Альмяшев В. И., Хабенский В. Б., Бешта С. В., Грановский В. С. Новый класс функциональных материалов для устройства локализации расплава активной зоны ядерного реактора // Российский химический журнал. 2005. Т. XLIX. № 4. С. 42–53.
6. Sehgal B. R., Bui V. A., Dinh T. N., Green J. A., Kolb G. SIMECO experiments on in-vessel melt pool formation and heat transfer with and without a metallic layer // Proceedings of the Workshop on in-vessel core debris retention and coolability. Garching, Germany, 3 – 6 March 1998; Report No. NEA-CSNI-R--1998-18. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA). 1999. Vol. 44. No. 9. P. 44026298.
7. Zhang L., Zhang Y., Zhao B., et al. COPRA: a large scale experiment on natural convection heat transfer in corium pools with internal heating // Progress in Nuclear Energy. 2016. Vol. 86. January. Pp. 132–140.
8. Bonnet J. M., Rouge S., Seiler J. M. Large scale experiments for core melt retention: BALI:

corium pool thermal hydraulics, SULTAN: boiling under natural convection // Proceedings of the Workshop on large molten pool heat transfer. Grenoble, France, 9 – 11 March 1994; Report No. NEA-CSNI-R--94-11. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA). 1994. Vol. 26. No. 10. P. 26037875.

9. **Kymäläinen O., Tuomisto H., Hongisto O., Theofanou T. G.** Heat flux distribution from a volumetrically heated pool with high Rayleigh number // Nuclear Engineering and Design. 1994. Vol. 149. No. 1–3. Pp. 401–408.

10. **Xi Zh., Hu Yu., Gong H., Zhang L., Ma Z., Sun W., Bu Sh., Pan L.** Numerical study on the corium pool heat transfer with OpenFOAM // Frontiers in Energy Research. 2020. Vol. 8. May 28. P. 080.

11. **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. November. P. 110816.

12. Разработка и применение интегральных кодов для анализа безопасности АЭС. Под общ. ред. чл.-корр. РАН Большова Л. А. Труды ИБРАЭ РАН (Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН). Вып. 12. М.: Наука, 2011. 304 с.

13. **Литышев А. В., Пантюшин С. И., Аулова О. В., Гаспаров Д. Л., Букин Н. В., Быков М. А.** Опыт выполнения анализов тяжелых запроектных аварий для РУ ВВЭР с использованием РК СОКРАТ // Материалы 9-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Секция 1. г. Подольск, Россия, 19–22 мая 2015. Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2015. С. 1–22.

14. **Звонарев Ю. А., Мельников И. А., Шмельков Ю. Б.** Моделирование бассейна расплава на днище корпуса ВВЭР-1000 в условиях тяжелой аварии с плавлением топлива // Материалы 10-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»; г. Подольск, Россия, 16–19 мая 2017. Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2017. С. 1–11.

15. **Фиськов А. А., Безлепкин В. В., Семашко С. Е., Сидоров В. Г., Астафьева В. О.** Опыт обоснования устройства локализации расплава ЛАЭС-2 // Материалы Отраслевой научно-практической конференции молодых специалистов и аспирантов «Молодежь ЯТЦ: наука, производство, экологическая безопасность». СПб.: ОАО «Атомэнергопроект», 2010. С. 5.

16. **Василенко В. А., Мигров Ю. А., Драгунов Ю. Г., Быков М. А.** Теплогидравлический расчетный код КОРСАР. Состояние разработки и опыт применения. // Сборник трудов 3-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с РУ ВВЭР»; г. Подольск, Россия, 26–30 мая 2003. Подольск: ОКБ «Гидропресс». 2003. Т. 5. Ч. 3. С. 204–212.

17. **Sangiorgi M., Grah A., Pascal G., et al.** In-vessel melt retention (IVMR) analysis of a VVER-1000 NPP // JRC Technical Reports EUR 27951. JRC Science Hub, European Union, 2016. 250 p.

18. **Самарский А. А., Вабишевич П. Н.** Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

19. **Пехович А. И., Жидких В. М.** Расчеты теплового режима твердых тел. Ленинград: Энергия, 1976. 116 с.

20. **Снегирёв А. Ю.** Численное моделирование турбулентных течений. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 143 с.

21. **Кутателадзе С. С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

22. **Ферми Э., Нейман фон Д.** Тейлоровская неустойчивость на границе двух несжимаемых жидкостей // Э. Ферми. Научные труды. В 2 тт. Т. 2. 1939 – 1954. США. М.: Наука, 1972. С. 498–505.

23. **Гусаров В. В., Альмяшев В. И., Хабенский В. Б., Бешта С. В., Грановский В. С.** Физико-химическое моделирование и анализ процессов взаимодействия расплава активной зоны ядерного реактора с жертвенным материалом // Физика и химия стекла. 2005. Т. 31. № 1. С. 71–90.

24. **Альмяшев В. И., Грановский В. С., Хабенский В. Б., Крушинов Е. В., Сулацкий А. А., Витоль С. А., Гусаров В. В., Бешта С. В.** Экспериментальное исследование процессов окисления расплава кориаума в корпусе реактора // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2017. № 4 (10). С. 59–85.

25. COMSOL Multiphysics. Программные продукты COMSOL. Burlington, MA. Режим доступа: <https://www.comsol.ru/> (Дата обращения: 07.07.2020).

26. **Лопух Д. Б., Логинов И. А., Грановский В. С., Бешта С. В., Хабенский В. Б., Марты-**



нов А. П., Крушинов Е. В., Витоль С. А., Кулагин И. В., Печенков А. Ю. Экспериментальное исследование процессов, возникающих при подаче воды на расплав стали // Теплоэнергетика. 2001. № 9. С. 25–31.

27. Кириллов П. Л., Богословская Г. П. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат, 2000. 456 с.

## REFERENCES

1. Kovalenko A. N., Koptuykhov A. O., Meshcheryakov D. K., Shchuklinov A. P., Thermokinetic processes in the corium traps of high-temperature melt during the reactor accidents at an A-plant: simulation, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 13 (4) (2020) 61–76.

2. Kovalenko A. N., Koptuykhov A. O., Meshcheryakov D. K., Shchuklinov A. P., Numerical simulation of thermokinetics during interaction of sacrificial material and corium melt during severe reactor accidents at nuclear power plants, Nuclear Propulsion Reactor Plants. Life Cycle Management Technologies. (3 (21)) (2020) 76–85 (in Russian).

3. Golovacheva V. G., Kovalenko A. N., Meshcheryakov D. K., et al., Correlation between heat-mass transfer, chemical reactions and phase transformations in corium melt localization devices during severe nuclear power plant accidents, Diversity in Nuclear: International Youth Nuclear Congress (NIYNC2020), 8–13 March 2020, Sydney, Australia (2020) 176–179.

4. Bezlepkin V. V., Sidorov V. G., Kukhtevich V. O., et al., Ustroystvo lokalizatsii i okhlazhdeniya koriuma yadernogo reaktora [An arrangement to localize and cool down the nuclear reactor's corium], Pat. No. 2514419, Russian Federation, MPK G21C 9/016.; SPb., OAO "Golovnoy Institut "VNIPIET" is a declarant and a patentee, No. 2012124161; declar. 20.02.14; publ. 27.04.2014, Bull. No. 23 (II Ch.). 11 p.

5. Gusarov V. V., Almyashev V. I., Khabenskiy V. B., et al., Novyy klass funktsionalnykh materialov dlya ustroystva lokalizatsii rasplava aktivnoy zony yadernogo reaktora [A new class of functional materials for making the arrangement for localization the melt's core region], Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal. XLIX (4) (2005) 42–53 (in Russian).

6. Sehgal B. R., Bui V. A., Dinh T. N., Green J. A., Kolb G., SIMECO experiments on in-vessel melt pool formation and heat transfer with and without a metallic layer, In: Proceedings of the Workshop on in-vessel core debris retention and coolability, Garching, Germany, 3–6 March 1998; Report No. NEA-CSNI-R--1998-18. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA). 1999. Vol. 44 (9) (1999) 44026298.

7. Zhang L., Zhang Y., Zhao B., et al., COPRA: a large scale experiment on natural convection heat transfer in corium pools with internal heating, Progress in Nuclear Energy. 86 (January) (2016) 132–140.

8. Bonnet J. M., Rouge S., Seiler J. M. Large scale experiments for core melt retention: BALI: corium pool thermal hydraulics, SULTAN: boiling under natural convection, In: Proceedings of the Workshop on large molten pool heat transfer. Grenoble, France, 9–11 March 1994; Report No. NEA-CSNI-R--94-11. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA). 26 (10) (1994) 26037875.

9. Kymäläinen O., Tuomisto H., Hongisto O., Theofanou T. G., Heat flux distribution from a volumetrically heated pool with high Rayleigh number, Nucl. Eng. Design. 149 (1–3) (1994) 401–408.

10. Xi Zh., Hu Yu., Gong H., et al., Numerical study on the corium pool heat transfer with OpenFOAM, Front. Energy Res. 8 (May 28) (2020) 080.

11. Viot L., Le Tellier R., Peybernes M., Modeling of the corium crust of a stratified corium pool during severe accidents in light water reactors, Nucl. Eng. Design. 368 (November) (2020) 110816.

12. Integral codes development and application for NPP safety analysis, Proceedings of IBRAE RAS, Ed. by L. A. Bolshov; Nuclear Safety Institute (IBRAE) RAS, Nauka, Moscow, 2011, Iss. 12 (in Russian).

13. Lityshev A. V., Pantyushin S. I., Aulova O. V., et al., Experience in carrying out calculations of severe beyond design basis accidents for VVER RP using code SOKRAT, Proceedings of the 9th International Scientific and Technical Conference "Safety Assurance of NPP with VVER", Podolsk, Russia, May 19–22, SCB "Gidropress", Podolsk (2015) 1–22.

14. Zvonarev Yu. A., Melnikov I. A., Shmelkov Yu. B., Simulation of corium pool behavior on RPV bottom under severe accident for VVER-1000, Proceedings of the 10th International Scientific and

Technical Conference “Safety Assurance of NPP with VVER”, Podolsk, Russia, May 16–19, SCB “Gidropress”, Podolsk (2017) 1–11.

15. **Fiskov A. A., Bezlepkin V. V., Semashko S. E., et al.**, Opyt obosnovaniya ustroystva lokalizatsii rasplava LAES-2 [An experience on foundation for the arrangement of the melt localization at Leningrad NPP-2], Proceedings of the Industry Research-to-Practice Conference “The Youth NFC: Science, Production, Ecological Safety”, St. Petersburg, “Atomenergoprojekt”, 2010. P. 5.

16. **Vasilenko V. A., Migrov Yu. A., Dragunov Yu. G., Bykov M. A.**, Heat-hydraulic design code KORSAR: Development status and experience, Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference “Safety Assurance of NPP with VVER”, Podolsk, Russia, May 26–30 2003, SCB “Gidropress”, Podolsk. 5 (3) (2003) 204–212.

17. **Sangiorgi M., Grah A., Pascal G., et al.**, In-vessel melt retention (IVMR) analysis of a VVER-1000 NPP, JRC Technical Reports EUR 27951, JRC Science Hub, European Union, 2016.

18. **Samarskiy A. A., Vabishchevich P. N.**, Vychislitelnaya teploperedacha [Computational heat transfer], Editorial URSS, Moscow, 2003 (in Russian).

19. **Pekhovich A. I., Zhidkikh V. M.**, Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel. [Calculations of solids’ thermal conditions], Energiya, Leningrad, 1976 (in Russian).

20. **Snegiryov A. Yu.**, Chislennoye modelirovaniye turbulentykh techeniy [Numerical simulation of turbulent flows], Polytechnical Institute Publishing, St. Petersburg, 2009.

21. **Kutateladze S. S., Leontiev A. I.**, Heat transfer, mass transfer, and friction in turbulent boundary layers, Hemisphere, New York, 1990.

22. **Fermi E., Neyman fon D.**, Teylorovskaya neustoychivost na granitse dvukh neszhimayemykh zhidkostey [Rayleigh-Taylor instability at the interface between two incompressible liquids], In the book: E. Fermi. Nauchnyye Trudy v 2 tt., T. 2. [Fermi E. Transactions in 2 Vols., Vol. 2. 1939 – 1954, USA], “Nauka”, Moscow (1972) 498–505 (in Russian).

23. **Gusarov V. V., Almjashev V. I., Khabensky V. B., et al.**, Physicochemical modeling and analysis of the interaction between a core melt of the nuclear reactor and a sacrificial material, Glass Physics and Chemistry. 31 (1) (2005) 53–66.

24. **Almjashev V. I., Granovsky V. S., Khabensky V. B., et al.**, Experimental study of corium melt oxidation processes in the reactor vessel, Nuclear Propulsion Reactor Plants. Life Cycle Management Technologies. (4 (10)) (2020) 59–85 (in Russian).

25. COMSOL Multiphysics, Software products COMSOL, Burlington, MA. URL: <https://www.comsol.ru>.

26. **Lopukh D. B., Loginov I. A., Granovskii V. S., et al.**, Experimental investigation of processes arising when flooding a steel melt, Thermal Engineering. 48 (9) (2001) 725–731.

27. **Kirillov P. L., Bogoslovskaya G. P.**, Teplomassoobmen v yadernykh energeticheskikh ustanovkakh [Heat and mass transfer in nuclear power installations], Energoatomizdat, Moscow, 2000 (in Russian).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КОВАЛЕНКО Анатолий Николаевич** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Центра физики наногетероструктур Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26  
ras-kan@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9178-1129

**КОПТЮХОВ Артём Олегович** – инженер-технолог НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, г. Гатчина Ленинградской области, Россия.

188300, Россия, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, 1  
t44h@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-9660-3601

**МЕЩЕРЯКОВ Дмитрий Константинович** – ассистент Высшей школы атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

fess\_i@bk.ru  
ORCID: 0000-0002-1215-861X

**ЩУКЛИНОВ Алексей Павлович** – кандидат технических наук, ведущий инженер АО «Атом-проект», Санкт-Петербург, Россия.

197183, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Савушкина, 82а  
mupol@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-5599-4573

## THE AUTHORS

**KOVALENKO Anatoly N.**

*Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences*  
26, Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia  
ras-kan@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-9178-1129

**KOPTYUKHOV Artem O.**

*NRC “Kurchatov Institute” – PNPI*  
1, Mkr. Orlova Roshcha, Gatchina of Leningrad region, 188300, Russia  
t44h@yandex.ru  
ORCID: 0000-0002-9660-3601

**MESHCHERYAKOV Dmitry K.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
fess\_i@bk.ru  
ORCID: 0000-0002-1215-861X

**SCHUKLINOV Alexey P.**

*JSC “Atomproekt”*  
82A Savushkin St., St. Petersburg, 197183, Russia  
mupol@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-5599-4573

*Статья поступила в редакцию 28.09.2021. Одобрена после рецензирования 12.10.2021.  
Принята 12.10.2021.*

*Received 28.09.2021. Approved after reviewing 12.10.2021. Accepted 12.10.2021.*