

DOI: 10.18721/JPM.13405
 УДК 53.072; 53:004

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТИГЕЛЬНЫХ ЛОВУШКАХ РАСПЛАВА КОРИУМА ПРИ АВАРИЯХ РЕАКТОРОВ НА АЭС

**А.Н. Коваленко^{1,3}, А.О. Коптюхов²,
 Д.К. Мещеряков³, А.П. Щуклинов^{3,4}**

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
 Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² НИЦ «Курчатовский Институт» – ПИЯФ,
 г. Гатчина Ленинградской области, Российская Федерация;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
 Санкт-Петербург, Российская Федерация;

⁴ АО «Атомпроект»,
 Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлена двухстадийная модель изменения теплового и фазового состояний расплава активной зоны в охлаждаемой подреакторной ловушке тигельного типа при взаимодействии с жертвенным материалом и при кристаллизации разбавленного кориума после гравитационной инверсии его оксидной и металлической составляющих. Моделирование базируется на обобщенной формулировке задачи Стефана со свободными границами раздела фаз. Результаты сквозного расчета модели по программному пакету COMSOL Multiphysics свидетельствуют, что рассмотренные термокинетические процессы в целом обеспечивают снижение температуры и плотности кориума, уменьшение тепловых потоков на корпус ловушки, минимизацию выхода водорода и радиоактивных продуктов деления с их удержанием в контролируемом тепловом и фазовом состояниях до полной кристаллизации.

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

Ссылка при цитировании: 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 СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 4. С. 61–76. DOI: 10.18721/JPM.13405

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

THERMOKINETIC PROCESSES IN THE CORIUM TRAPS OF HIGH-TEMPERATURE MELT DURING THE REACTOR ACCIDENTS AT AN A-PLANT: SIMULATION

**A.N. Kovalenko^{1,3}, A.O. Koptuyukhov²,
 D.K. Meshcheryakov³, A.P. Schuklinov^{3,4}**

¹ Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences,
 St. Petersburg, Russian Federation;

² NRC "Kurchatov Institute" – PNPI,
 Gatchina of Leningrad region, Russian Federation;

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
 St. Petersburg, Russian Federation;

⁴ JSC "Atomproekt", St. Petersburg, Russian Federation

The two-stage model of changing the thermal and phase state of the active zone melt in the cooled subreactor crucible trap when interacting with the sacrificial material and when crystallizing the diluted corium after the gravitational inversion of its oxide and metal components is presented. The simulation is based on the generalized formulation of Stefan's task. The results of the end-to-end calculation of the COMSOL Multiphysics package show that the thermokinetic processes examined generally reduce the temperature and density of the corium, reduce heat flows on the trap body, minimize the release of hydrogen and radioactive fission products with their retention in a controlled thermal and phase state until full crystallization.

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

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: simulation, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 13 (4) (2020) 61–76. DOI: 10.18721/JPM.13405

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

Введение

Данные по тяжелым авариям на АЭС свидетельствуют, что физические основы их развития связаны с критическим нарушением теплоотвода от активной зоны реактора. Такое нарушение вызывает перегрев и расплавление элементов реактора [1 – 3]. Технические решения по внутриреакторному удержанию образующегося расплава кориума, состоящего из смеси оксидов урана, плутония, циркония, осколков деления ядерного топлива, поглощающих материалов, металлов опорных конструкций (железо, никель, хром и др.), разработанные на базе наружного охлаждения корпуса для реакторов малой и средней мощности [4], не нашли надежного технико-экономического обоснования по предотвращению проплавления стенок у корпусов реакторов большой мощности. В качестве альтернативы [5], для них была разработана концепция вне реакторных устройств локализации расплава (УЛР) как дополнительного сдерживающего барьера на пути распространения продуктов аварии с их удержанием в контролируемом тепловом и фазовом состояниях до полной кристаллизации.

Для европейских реакторов типа EPR эта концепция реализуется на основе использования бокового бокса растекания расплава, охлаждаемого сверху подачей воды [6]. Для отечественных реакторов типа ВВЭР используется подреакторная ловушка-теплообменник тигельного типа [7] с наполните-

лем из жертвенного материала (ЖМ), охлаждаемая с внешней стороны водой (рис. 1).

Объединение в УЛР функций водоохлаждаемого тигля для локализации расплава и накопителя с ЖМ значительно расширяет круг рассматриваемых задач, особенно с учетом неопределенности состава поступающего расплава и недостаточности изученных

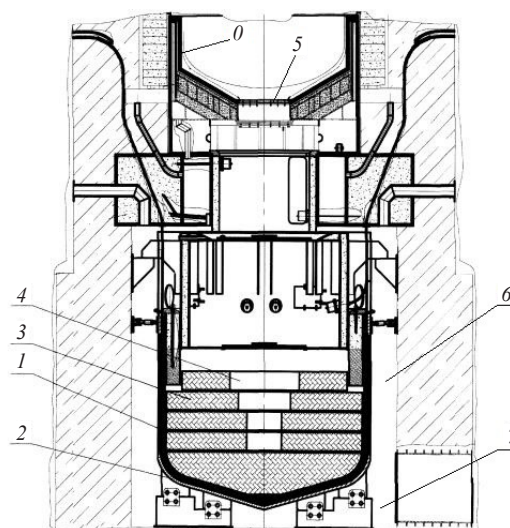


Рис. 1. Схема устройств локализации расплава (УЛР) тигельного типа для российских АЭС с реакторами ВВЭР: 0 – корпус реактора; 1 – охлаждаемый корпус ловушки; 2 – опоры УЛР; 3 – брикеты элементов жертвенного материала (ЖМ); 4 – блоки корзины удержания ЖМ; 5 – выплавляемая заглушка; 6 – боковой теплообменник; 7 – канал подвода охлаждающей воды и нижний теплообменник (по патенту РФ 2514419 [7])

явлений его взаимодействия с жертвенным материалом [8 – 10].

Невозможность натурального изучения этих процессов и ограниченность их экспериментального воспроизведения на стендовых маломасштабных установках выделяют задачу математического моделирования в качестве одной из приоритетных при исследовании физических механизмов удержания расплава кориума, захваченного ловушкой, в контролируемых тепловом и фазовом состояниях, а также обосновании принимаемых технических решений.

Следует отметить значительные затруднения в решении этих задач с применением известных специализированных программных кодов, разработанных для моделирования различных сценариев тяжелых аварий и их отдельных этапов на внутриреакторной ступени развития. Опыт практического использования некоторых из них (СОКРАТ, ГЕФЕСТ-УЛР, КОРСАР, АСТЕС) в расчетных исследованиях проектировщиков тигельных ловушек [11 – 15], а также бенчмарк этих и других кодов в институте «Объединенный исследовательский центр» (“Joint Research Centre”, JRS) Дирекции по энергетике, транспорту и климату Европейской комиссии JRC (г. Петтен, Нидерланды) [16] показывают заметный разброс данных как между различными кодами, так и при использовании одного кода у разных пользователей. Во многом это может быть связано с различиями не только в подходах к построению физико-математических моделей, но и нодализационных схем, вычислительных алгоритмов и критериев оценки получаемых результатов.

Определенные преимущества в этом отношении имеет подход взаимосвязанного учета термокинетических и фазово-химических факторов с возможностью реализации сквозного счета сопряженных мультифизических механических, тепловых, гидродинамических и химических явлений при моделировании процессов взаимодействия ЖМ с расплавом в тигельной ловушке и последующих изменений его состояния вплоть до полной кристаллизации.

Термокинетические процессы в тигельной ловушке

Процессы взаимодействия между высокотемпературным расплавом кориума и энергопоглощающими компонентами жертвенного материала, плавящимися в кориуме и состоящими из смеси легких оксидов железа Fe_2O_3 и алюминия Al_2O_3 , протекают в водоохлаждаемой тигельной ловушке. Указанные процессы должны отвечать определенным требованиям:

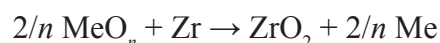
- обеспечивать снижение температуры и плотности кориума, а также уменьшение тепловых потоков на корпус ловушки;

- сохранять подкритичность расплава;

- минимизировать выходы водорода и радиоактивных продуктов деления [9, 10, 17, 18].

Взаимосвязи между массо- и теплопереносом, превращениями вещества и трансформацией различных видов энергии в этих процессах определяются совокупностью сопряженных физических явлений механики, теплофизики, гидродинамики, ядерной физики.

Значительную роль в таких взаимосвязях играют протекающие химические реакции эндотермического восстановления оксидов из состава жертвенного материала и экзотермического окисления недоокисленных элементов расплава, в том числе циркония по окислительно-восстановительной реакции



(Me – металл, n – степень его окисления), способствующей минимизации выделения водорода при пароциркониевом контакте.

Тепловые эффекты этих реакций сопоставимы по мощности с величиной остаточных тепловыделений продуктов деления и их ядерных превращений [9, 10, 19]. Большой практический интерес представляет механизм процесса взаимодействия жертвенного оксидного материала и расплава, содержащего сильные восстановители, в режиме жидкофазного горения с суммарным эндотермическим эффектом в реакционной зоне [20]. Он может реализовываться, если продукты

химического взаимодействия находятся в жидком или диспергированном в жидкости состоянии как с металлизированной, так и с оксидированной составляющими расплава.

Дополнительное разбавление кориума за счет непрореагировавшей части расплавленных оксидов железа и алюминия из состава ЖМ приводит к заметному уменьшению плотности поступивших изначально, более тяжелых оксидных компонентов расплава, по сравнению с металлическими, и последующей гравитационной инверсии их начальной стратификации. Это создает возможность добавочной подачи охлаждающей воды на поверхность расплава без риска парового взрыва [21].

При этом в условиях неизотермичности может наблюдаться образование тугоплавкой гарнисажной корки, препятствующей массо- и теплообмену как на поверхности кориума, так и между его несмешивающимися оксидным и металлическим слоями. Также возникает опасность образования зон кристаллизации отдельных компонентов расплава с появлением вторичных очагов повышенной радиоактивности при локальном скоплении более тяжелых (относительно всего расплава) оксидов радиоактивного вещества. Для сохранения подкритичности в состав ЖМ включают иммобилизующие радионуклиды-добавки из тугоплавких тяжелых элементов, например оксида гадолиния, поглощающих тепловые нейтроны [18]. Локализация тяжелых оксидов с большим остаточным тепловыделением может также приводить к кипению диоксида урана с выходом компонентов в газовую фазу, к его абляционному взаимодействию со стальной стенкой корпуса самой ловушки и ее проплавлению при недостаточном внешнем охлаждении [8].

Корректный анализ протекающих процессов при взаимодействии кориума и жертвенных материалов связан с учетом фазовых превращений компонентов при изменении состава и термодинамических параметров системы, отражаемых на экспериментальных или расчетных диаграммах фазового состояния.

Высокая трудоемкость экспериментального получения полной диаграммы для данной системы и неопределенность пропорций состава кориума, вследствие большого числа параметров возможного механизма его образования в принимаемой нодализационной схеме (согласно оценкам, проведенным в работе [22], количество параметров составляет порядка $10^3 - 10^4$), заменяется построением расчетных диаграмм «состав – условия – свойство» на основе химической термодинамики фаз переменного состава [9].

Постановка задачи

В приближении фазового равновесия многокомпонентных термодинамических систем переменного состава, рассматривается двухстадийная математическая модель термокинетических процессов в ловушке расплава кориума, описывающая совокупность происходящих теплофизических, химических и гидродинамических явлений, а также термодинамических факторов их корреляции, с учетом результатов лабораторных исследований на маломасштабных установках [23].

На первой, «доинверсионной», стадии математическая модель формулируется в виде задачи Стефана для вещественной среды кориумной ловушки при подвижных источниках теплоты эндотермического разложения плавящегося ЖМ, теплоты экзотермических реакций химического взаимодействия с ЖМ недоокисленного циркония, хрома и урана, поступающих в расплаве активной зоны в ловушку, а также теплоты остаточного тепловыделения радиоактивных элементов. При этом изотерма, соответствующая температуре плавления компонентов ЖМ, разделяет расчетную область на подобласти, на границе которых ставится условие непрерывности для температуры и условие для изменения плотности теплового потока на величину, равную произведению энтальпии фазового перехода на нормальную компоненту скорости перемещения границы раздела фаз. В обобщенном виде [24] эта задача сводится к единому во всей области расплава нели-

нейному уравнению теплопроводности и массопереноса, включающему указанные неоднородные условия сопряжения для температуры и теплового потока на заранее неизвестных (свободных) границах раздела фаз непосредственно в само уравнение:

$$c_{eff} \rho \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \mathbf{v} \text{grad } T \right) = \text{div}(\lambda \text{grad } T) + f. \quad (1)$$

Здесь ρ , кг/м³, – плотность компонента среды; T , К – температура; τ , с, – время; \mathbf{v} , м/с, – локальная скорость среды (вектор); λ , Вт/(м·К), – коэффициент теплопроводности; член $(\mathbf{v} \text{grad } T)$ учитывает изменение температуры за счет конвективного переноса среды; f , Вт, определяет мощность внутренних источников теплоты; c_{eff} , Дж/(кг·К), определяет эффективную удельную теплоемкость, учитывающую теплоту фазового перехода на его границе в сосредоточенном виде.

При плавлении производная функция для эффективной теплоемкости выглядит следующим образом:

$$c_{eff} = c_{p,sol} \cdot (1 - \varphi(T)) + c_{p,liq} \cdot \varphi(T) + \delta(T - T_{mel}) L \frac{d\varphi}{dT}, \quad (2)$$

где $c_{p,sol}$, $c_{p,liq}$, Дж/(кг·К), – величины теплоемкости твердой и жидкой фаз соответственно; $\varphi(T)$ – долевая функция фазового перехода, определяемая по равновесной фазовой диаграмме системы; L , Дж/кг, – удельная теплота фазового перехода; $\delta(T)$ – дельта-функция; T_{mel} , К, – температура фазового перехода.

В модели учитываются тепловые потоки не только в реакционном слое на подвижных границах фазовых переходов, но также в объеме взаимодействующих материалов, в том числе обусловленные остаточным тепловыделением продуктов ядерных превращений и теплообменом расплава кориума с ЖМ. Интенсивность теплообмена зависит как от ки-

нетики протекающих химических реакций, зависящей в свою очередь от температурных условий активации (прежде всего, начальной температуры поступившего расплава), так и от скорости перемешивания продуктов реакций с расплавом кориума, которая полагается мгновенной.

Учет теплопереноса при естественной конвекции в расплаве базируется на осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнениях Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости, определяющих влияние флуктуаций скорости конвекции в виде турбулентной кинетической энергии пульсаций и ее диссипации за счет внутреннего трения:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \tau} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \nabla[-p \mathbf{I} + (\mu + \mu_m)(\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T)] - \left[-\frac{2}{3}(\mu + \mu_m)(\nabla \mathbf{v}) \mathbf{I} - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I} \right] + \rho \mathbf{g}. \quad (3)$$

Здесь ρ , кг/м³, – объемная плотность; \mathbf{v} , м/с, – скорость течения (вектор); p , Па, – давление; μ , Па·с, – динамическая вязкость; μ_m , Па·с, – турбулентная вязкость; \mathbf{g} , м²/с, – ускорение свободного падения (вектор); k , Дж, – кинетическая энергия турбулентности (турбулентных пульсаций, $k = \sum_i (V_i'^2) / 2$); верхний индекс T обозначает транспонированный тензор; ∇ – оператор Гамильтона; \mathbf{I} – единичный тензор.

Замыкание уравнения для турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε , вследствие вязкого трения

$$\mu_m = \rho c_\mu k^2 / \varepsilon,$$

производится по стандартной (k - ε)-модели турбулентности [25].

В рассматриваемых условиях, когда интенсивность турбулентного теплопереноса обусловлена термогравитационным механизмом генерации энергии турбулентности, ее величина зависит от реализующегося режима тепловой стратификации оксидного

и металлического слоев кориума. Устойчивость тепловой стратификации определяется направлением подвода и отвода тепла через границы слоя относительно вектора силы тяжести.

Уравнение (3) решается совместно с уравнением неразрывности:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (4)$$

Для уравнений гидродинамики задаются обычные условия прилипания на границе контакта с корпусом и условие скольжения на оси симметрии и верхней свободной границе (равенство нулю нормальных компонент скоростей). В случае образования корки, на верхней границе также задается условие прилипания.

Для температурной задачи на боковых и нижней гранях ванны расплава, контактирующих с охлаждаемыми стенками корпуса ловушки, назначаются граничные условия теплообмена третьего рода при заданных температуре охлаждающей воды T_{cool} и коэффициенте теплоотдачи α :

$$q_{cool} = -\lambda(\partial T / \partial h) = \alpha(T - T_{cool}), \quad (5)$$

где h — нормаль к поверхности, расчет коэффициента теплоотдачи α проводился для развитого стационарного течения в кольцевом канале рубашки водяного охлаждения наружных стенок корпуса ловушки по рекомендациям [26].

Начальное тепловое состояние заполненной ловушки соответствует температуре оксидных и металлических компонентов расплава 3000 К и температуре жертвенного материала 400 К.

На второй, «постинверсионной», стадии поведения ванны расплава при $L = 0$ и $\varphi(T) = 1$ моделируются процессы охлаждения компонентов расплава после гравитационной инверсии его оксидной и металлической составляющих с учетом естественной конвекции, внешнего охлаждения корпуса ловушки и

переноса тепла излучением над поверхностью ванны. Оксидная и металлическая компоненты инверсированных слоев расплава полагаются гомогенными по структуре. Сохраняются заданные граничные условия теплообмена третьего рода на боковых и нижней поверхностях ванны расплава, контактирующих с охлаждаемыми стенками корпуса ловушки.

Условия на свободной поверхности ванны, граничащей с выделяющимися аэрозолями, дополняются учетом переноса теплоты излучением

$$\lambda(\partial T / \partial h) + \alpha(T - T_{cool}) + \epsilon \sigma(T^4 - T_{med}^4) = 0, \quad (6)$$

где ϵ — коэффициент излучения (степень черноты) поверхности расплава; σ , Вт·м⁻²·К⁻⁴, — постоянная Стефана — Больцмана; T_{med} , К, — температура среды над зеркалом кориума.

Коэффициент теплообмена α учитывался по данным [21] при добавочной подаче охлаждающей воды на поверхность оксидного расплава с использованием зависимости для пленочного кипения воды на твердой обращенной вверх поверхности согласно рекомендациям [26].

Начальные условия для этой стадии моделирования назначаются по результатам расчетов предыдущего модельного этапа.

Понижение температуры компонентов расплава при охлаждении до температуры их кристаллизации на данной модельной стадии снова приводит к задаче Стефана. Ее постановка отличается от представленной выше отсутствием учета теплоты химического взаимодействия расплава с ЖМ, а также учетом возможности образования пространственных зон кристаллизации, в том числе с непостоянной температурой фазового перехода, в зависимости от расположения линий солидуса и ликвидуса на фазовой диаграмме кориумной среды. Для их построения применяются методы термодинамического анализа на основе условной минимизации свободной энергии Гиббса с использованием набора различных моделей растворов [9].

Вычислительные аспекты

Расчет вычислительной модели проводился численными методами с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics, разработанного для моделирования связанных мультифизических механических, тепловых, электромагнитных, химических и гидродинамических явлений и систем [27]. Это позволило осуществить сквозной расчет термокинетических процессов с фазовыми превращениями в охлаждаемом расплаве высокотемпературного кориума при его взаимодействии с жертвенным материалом как на уровне отдельного структурного элемента [28], так и рассматриваемой здесь корзины ЖМ в целом. Совместимость пакета с языками программирования систем Matlab/Simulink, AutoCAD, SolidWorks, Exel позволяет включать дополнительные модели по расчету краевых условий, назначению свойств материалов и др.

Имеющийся в программе набор специальных модулей автоматически обеспечивает для заданной математической модели (1) – (6) подходящую численную дискретизацию и конфигурацию решателя. В данном случае набор реализован на основе метода конечных элементов с использованием метода сквозного счета со сглаживанием коэффициентов без явного выделения свободных границ раздела фаз в задаче Стефана. После нахождения решения эти границы иденти-

фицировались как изотермы, соответствующие температурам рассматриваемых фазовых переходов.

Исходные геометрические параметры ловушки, масса, состав и свойства различных сред и компонентов расплава кориума, значения мощности остаточного тепловыделения, характеристики жертвенного материала и кинетики химических реакций принимались на основании данных проектировщиков УЛР для реакторов ВВЭР мощностью 1000 – 1200 МВт.

Геометрия решаемой задачи полагалась двумерной осесимметричной. Сгенерированные сетки расчетной области для рассматриваемых задач на различных этапах моделирования представлены на рис. 2.

Разрешение пограничного слоя проводилось с использованием анизотропной сетки, шаг которой уменьшался на границах расчетной области. Минимальный размер структурного элемента сетки составлял 0,003 м, максимальный – 0,119 м при общем количестве 4 076 212 элементов и размерах расчетной области $2,74 \times 2,85$ м. Проведенные расчеты сопоставлялись с результатами, полученными на другом минимальном шаге дискретизации – 0,016 м, при этом практическая сходимость решения оставалась на прежнем уровне.

Расчетное построение привлеченных фазовых диаграмм [9] для компонентов в си-

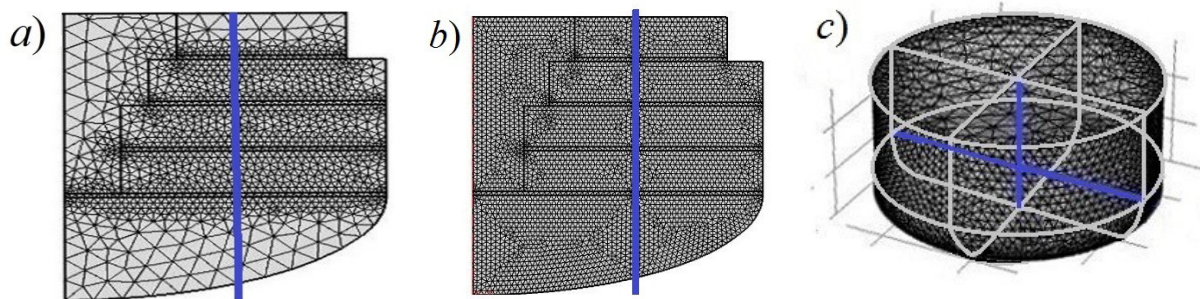


Рис. 2. Сгенерированные сетки конечных элементов для расчетных областей ловушки с выделенными контрольными сечениями (синие линии) на разных модельных этапах: на «доинверсионном», с учетом начального расположения брикетов ЖМ (а) и их плавления (b), а также на «постинверсионном», с учетом расположения более легкого оксидного слоя над более тяжелым металлическим, в ванне расплава кориума относительно выделенной горизонтальной границы раздела (с)

стеме взаимодействия расплава кориума и жертвенного материала базировалось на использовании компьютерной программы термодинамического анализа TernAPI, имеющейся в открытом доступе на сайте химфака МГУ [29], с помощью предложенного там алгоритма выпуклых оболочек.

Результаты расчетов и их обсуждение

Результаты расчетов изменения теплового и фазового состояний расплава кориума, поступившего в ловушку при его взаимодействии с плавящимся жертвенным материалом на первой, «доинверсионной», стадии моделирования, представлены на рис. 3 и 4.

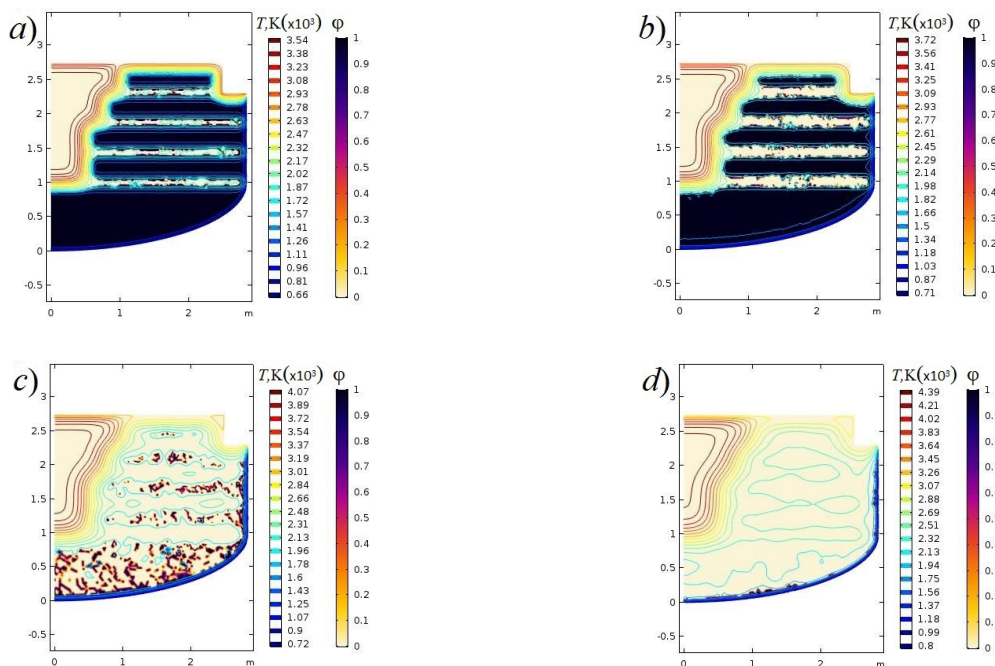


Рис. 3. Динамика изменения полей температуры (T , К) и соотношений ϕ твердой и жидкой фаз (темная и светлая области соответственно) по расплаву кориума и ЖМ после его поступления в ловушку и до инверсии оксидной и металлической составляющих в разные моменты времени, мин: через 10 (а) 30 (b), 60 (c), 90 (d). Соотношение твердой и жидкой фаз ϕ отражено насыщенностью окраски в пределах от 1 до 0

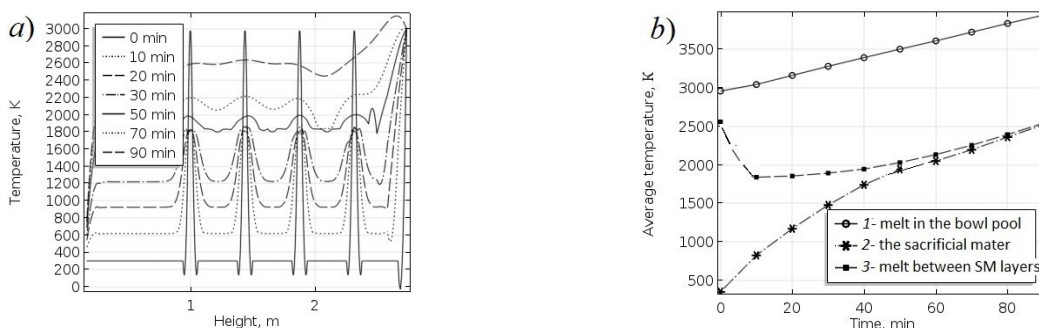


Рис. 4. Профили распределения температуры в контрольном сечении ловушки (см. рис. 2, b) для разных моментов времени (a) и средние значения температуры по расплаву кориума (1) и ЖМ (2) на этапах после поступления в ловушку и до инверсии оксидной и металлической составляющих (b). Отражены этапы: 1 – расплав в чаше ванны, 2 – ЖМ, 3 – расплав между брикетными ярусами ЖМ

Как видно, в начальный период это взаимодействие сопровождается снижением температуры кориума, несмотря на остаточное тепловыделение, за счет затрат теплоты на нагрев и проплавление жертвенного материала. Термокинетические процессы характеризуются достаточно резким охлаждением высокотемпературного расплава между блоками наполнителя, вплоть до его кратковременного затвердевания, сменяющегося общим плавлением вместе со структурными элементами ЖМ при протекании между ними окислительно-восстановительных химических реакций.

Затем наблюдается подъем температуры расплава под действием остаточного энерговыделения радиоактивных элементов. Совместно с дополнительным разбавлением кориума за счет непрореагировавшей части расплавленных оксидов железа и алюминия из состава ЖМ это приводит к заметному уменьшению плотности поступивших изначально, более тяжелых оксидных ком-

понентов расплава, по сравнению с металлическими, и их быстрой обратной гравитационной инверсии. С учетом оценки высокой скорости всплытия оксидированной составляющей и перемещения на дно ловушки металлизированной составляющей [23], продолжительность этих процессов ориентировочно составляет около 20 – 25 мин в стадии начального захлаживания кориума и около 90 – 120 мин до окончательного расплавления ЖМ с инверсией начальной стратификации металлического и оксидного слоев расплава.

Результаты расчетов изменения теплового и фазового состояний расплава кориума после этапа химического реакционного взаимодействия с ЖМ и инверсии несмешивающихся между собой оксидной и металлической составляющих разной плотности, с переходом в верхнюю часть бассейна расплава расплавленных оксидов, а в нижнюю – расплавленных металлов, представлены на рис. 5 и 6.

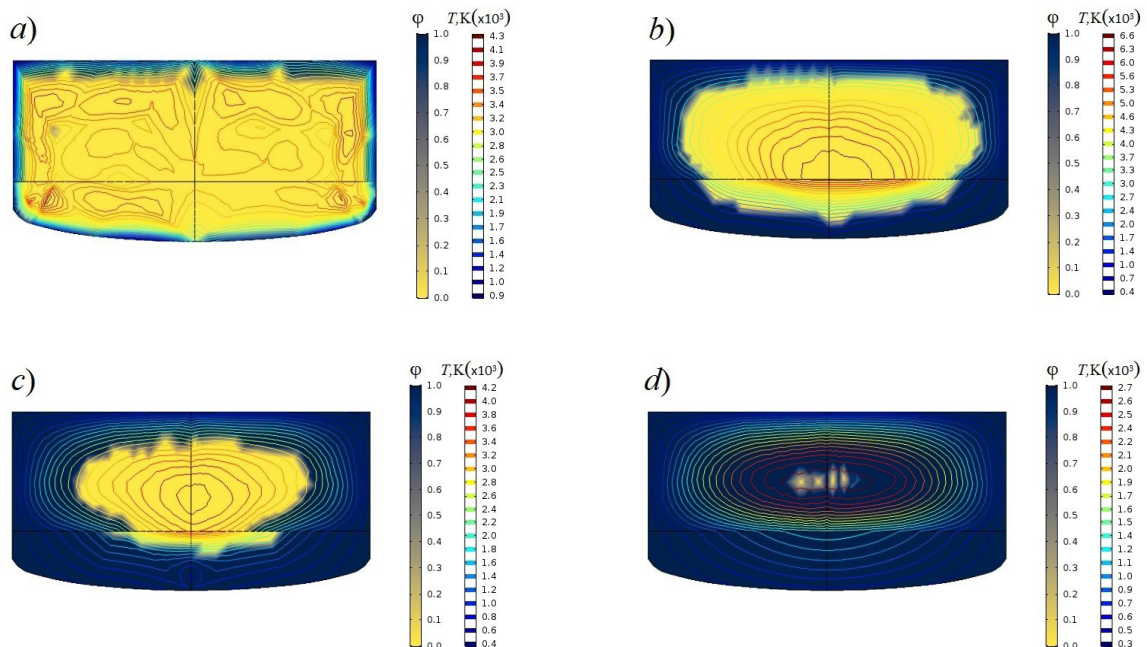


Рис. 5. Динамика изменения полей температуры (T , К) и соотношений ϕ твердой и жидкой фаз (темная и светлая области соответственно) расплава кориума после его взаимодействия с ЖМ и инверсии оксидной и металлической составляющих в разные моменты времени, ч: через 5 (a) 40 (b), 65 (c), 78 (d)

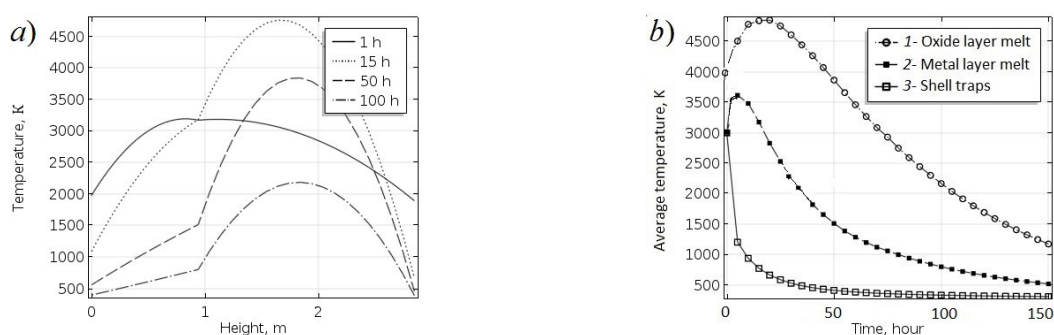


Рис. 6. Профили распределения температуры в контрольном сечении ловушки (см. рис. 2,с) для разных моментов времени (а) и средние значения температуры по расплаву кориума после инверсии оксидной и металлической составляющих (б). Показаны данные для оксидного (1) и металлического (2) слоев расплава, а также для оболочки ловушки (3)

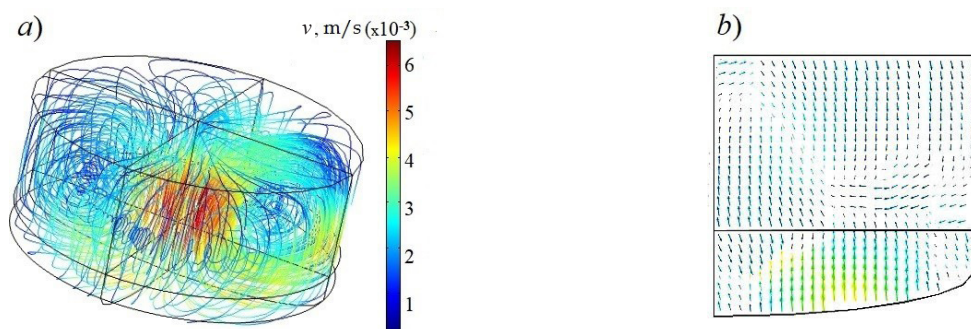


Рис. 7. Линии тока в бассейне расплава (а) и поле скоростей в его вертикальном сечении (б)

Результаты расчетов по уравнениям движения при естественной конвекции компонентов расплава кориума приведены на рис. 7.

Видно, что при реализующихся направлениях подвода и отвода тепла через границы верхнего оксидного слоя расплава относительно вектора силы тяжести, возникает подъемное движение в его центральной области и опускное на периферии вблизи охлаждаемых стенок тигля. Движение потоков в нижнем металлическом слое носит противоположный характер с неустойчивой тепловой стратификацией под границей раздела с оксидным слоем расплава. Согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [30], турбулизация течений металлических и оксидных расплавов в свободной термогравитационной конвекции проявляется при величине произведения критериев

Грасгофа и Прандтля более 47 000. Для параметров рассматриваемой задачи это условие выполняется с большим запасом. Аналогичные явления будут наблюдаться и вблизи поверхности раздела затвердевающих фаз, так как расплав всегда перегрет относительно температуры кристаллизации.

После инверсии компонентов расплава температура его оксидного слоя, где преимущественно сосредоточены источники остаточного тепловыделения, некоторое время продолжает расти и после достижения максимума начинает постепенно снижаться под влиянием внешнего охлаждения боковых стенок корпуса ловушки и подачи воды на верхнюю поверхность оксидного слоя расплава без риска парового взрыва [21].

Температура металлического слоя изменяется почти синхронно за счет теплообмена в его поверхностной области, примыкающей



к оксидному слою, оставаясь при этом ниже температуры последнего за счет внешнего охлаждения донной части корпуса ловушки. Стабилизация тепловых процессов происходит спустя 10 – 20 ч, с дальнейшим переходом в квазирегулярный режим охлаждения расплава. Несколько больший темп остывания металлического слоя и более легкоплавкие составляющие обуславливают его опережающее затвердевание, по сравнению с тугоплавкими компонентами оксидного слоя. Там в течение достаточно длительного времени (40 – 65 ч) остается довольно большое расплавленное ядро, и даже к 80 часам в закристаллизовавшихся зонах сохраняются отдельные очаги жидкой фазы. На всем протяжении рассмотренных процессов тепловые потоки от кориума к стенкам ловушки находятся в диапазоне величин от 0,2 до 0,6 МВт/м², которые с достаточным запасом не превышают критическую тепловую нагрузку [14] на внешней охлаждаемой водой поверхности корпуса тигля.

Заключение

Представленная двухстадийная модель термокинетических процессов и результаты сквозного расчета изменений теплового и фазового состояний расплава кориума активной зоны, поступившего в ловушку, при тяжелых авариях реакторов на АЭС детализируют характеристики его взаимодействия с жертвенным материалом (ЖМ) и закономерности последующего охлаждения до температуры кристаллизации, заложенные проектировщиками ловушек.

Физическим обоснованием выделенных модельных стадий являются фазовые переходы агрегатного состояния компонентов системы, включающие плавление жертвенного материала на основе оксидов железа и алюминия в высокотемпературном расплаве кориума в начальный период их взаимодействия и последующую кристаллизацию продуктов этого взаимодействия в период интенсивного внешнего охлаждения корпуса ловушки. Их математическое моделирование базируется на обобщенной формулировке за-

дачи 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 естественной конвекцией в расплаве, теплопередачу охлаждающей воде через стенки корпуса и тепловое излучение во внутреннем пространстве.

Естественным разграничением модельных стадий служит явление быстрой гравитационной инверсии несмешивающихся между собой оксидной и металлической составляющих разной плотности с переходом расплавленных оксидов в верхнюю часть бассейна расплава, а расплавленных металлов – в нижнюю. Такое изменение структуры бассейна проявляется из-за существенного уменьшения плотности поступивших изначально более тяжелых оксидных компонентов расплава, по сравнению с металлическими, после химического реакционного взаимодействия расплава с ЖМ.

Использованный в расчетах программный пакет COMSOL Multiphysics не создает затруднений в решении рассмотренных задач при сквозном расчете и анализе термокинетических процессов во внекорпусных устройствах локализации расплава тигельного типа, которые отмечены при применении известных специализированных программных кодов, разработанных для моделирования различных сценариев тяжелых аварий и их отдельных этапов на внутриреакторной ступени развития.

Полученные результаты свидетельствуют, что рассмотренные термокинетические процессы в целом обеспечивают снижение температуры и плотности кориума, уменьшение тепловых потоков на корпус ловушки, минимизацию выхода водорода и радиоактивных продуктов деления. Вместе с тем, разброс в оценке режимов и времени охлаждения расплава кориума с неопределенностью его состава требует углубленного рассмотрения термокинетики процессов кристаллизации, крайне важных из-за опасности появления вторичных очагов повышенной радиоак-

тивности при локальном скоплении более тяжелого (относительно всего расплава) радиоактивного вещества, а также выходом компонентов в газовую фазу. Их изучение на следующих этапах проекта связывается с доработкой пространственно-кинетической специфики вычислительной модели в

3D-постановке, ее верификацией и валидацией применимости, в том числе с учетом задач оценки теплового и термонапряженного состояния корпуса ловушки.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Walker S.J.** Three-mile island: A nuclear crisis in historical perspective. Berkeley: University of California Press, 2004. 317 p.
2. **Абагян А.А., Аршавский И.М., Дмитриев В.М., Крошилин А.Е., Кравешкин А.В., Халимойчук В.А.** Расчетный анализ начальной стадии аварии на Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. 1991. Т. 71. Вып. 4. С. 275–287.
3. **Gonzalez A.J., Akashi M., Voice J.D., Chino M., Homma T., Ishigure N., Kai M., Kusumi S., Lee J.K.** Radiological protection issues arising during and after the Fukushima nuclear reactor accident // Journal of Radiological Protection. 2013. Vol. 33. No. 3. Pp. 497–571.
4. **Theofanous T.G., Lin C., Addition S., Angelini S., Kymaelaeninen O., Salmassi T.** In-vessel coolability and retention of a core melt // Nuclear Engineering and Design. 1997. Vol. 169. No. 1–3. Pp. 1–48.
5. **Kim H.Y., Bechta S., Foit J., Hong S.W.** In-vessel and ex-vessel corium stabilization in light water reactor // Science and Technology of Nuclear Installations. 2018. Vol. 2018. Article ID 3918150 (3 p.).
6. **Fischer M.** Main features of the EPR melt retention concept (Report FZKA-6475) // Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Technik und Umwelt (Germany). 2000. Vol. 32. No. 14. Pp. 508–517. Proceedings of the OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability. Alsmeyer H. (Ed.). Karlsruhe, Germany, 15–18 November 1999.
7. **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 G21C 9/016.; заявитель и патентообладатель – СПб.
8. **Столяревский А.Я.** Спасает ли ловушка? // Атомная стратегия. 2014. № 4 (89). С. 16–18.
9. **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.
10. **Асмолов В.Г., Сулацкий А.А., Бешта С.В., Грановский В.С., Хабенский В.Б., Крушинов Е.В., Витоль С.А., Альмяшев В.И., Гусаров В.В., Стрижов В.Ф.** Взаимодействие расплава активной зоны ядерного реактора с оксидным жертвенным материалом устройства локализации для АЭС с ВВЭР // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45. № 1. С. 28–37.
11. 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.
12. **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.
13. **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 безо-

пасности АЭС с ВВЭР»; г. Подольск, Россия, 16–19 мая 2017. Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2017. С. 1–11.

14. **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.

15. **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. Часть 3. С. 204 – 212.

16. **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.

17. **Удалов Ю.П., Федоров Н.Ф., Соловейчик Э.Я., Павлова Е.А.** Новые функциональные оксидные материалы для ядерного реакторостроения // Химическая промышленность. 2003. Т. 80. № 12. С. 3–10.

18. **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.

19. **Стивенс Дж.** Послеаварийный отвод тепла от обломков разрушенной активной зоны // Атомная техника за рубежом. 1984. № 12. С. 14–22.

20. **Гусаров В.В., Альмяшев В.И., Хабенский В.Б., Бешта С.В., Грановский В.С.** Физико-химическое моделирование горения материалов с суммарным эндотермическим эффектом // Физика и химия стекла. 2007. Т. 33. № 5. С. 678–685.

21. **Лопух Д.Б., Логинов И.А., Грановский В.С., Бешта С.В., Хабенский В.Б., Мартынов 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.

22. **Лагуненко А.С., Краснов В.А., Довыдьков С.А.** Топливо в помещении 305/2. Возможный сценарий образования ядерно-опасных зон // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. 2015. Вип. 24. С. 51–59.

23. **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 корнума в корпусе реактора // Научно-технический сборник «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок». г. Сосновый Бор: НИТИ им. А.П. Александрова. 2017. № 4 (10). С. 59–85.

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

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

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

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

28. **Golovacheva V.G., Kovalenko A.N., Meshcheryakov D.K., Schuklinov A.P., Koryukhov 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.

29. **Voskov A.L., Dzuban A.V., Maksimov A.V.** TernAPI program for ternary phase diagrams with isolated miscibility gaps calculation by the convex hull method // Fluid Phase Equilibria. 2015. Vol. 388. 25 February. Pp. 50–58.

30. **Конаков П.К., Веревошкин Г.Е., Горен-**

ков Л.А., Зарувинская Л.А., Кудрявцев В.В., Третьяков Г.А. Тепло- и массообмен при по- лучении монокристаллов. М.: Металлургия, 1971. 238 с.

Статья поступила в редакцию 20.07.2020, принята к публикации 27.08.2020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОВАЛЕНКО Анатолий Николаевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Центра физики наногетероструктур Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор Высшей школы атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

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

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

188300 Российская Федерация, Ленинградская область, г. Гатчина мкр. Орлова роща, д. 1
t44h@yandex.ru

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

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
fess_i@bk.ru

ЩУКЛИНОВ Алексей Павлович – кандидат технических наук, ведущий инженер АО «АТОМПРО-ЕКТ», доцент Высшей школы атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

197183, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Савушкина, 82а
mupol@mail.ru

REFERENCES

1. **Walker S.J.**, Three-mile island: A nuclear crisis in historical perspective, University of California Press, Berkeley, 2004.
2. **Abagyan A.A., Arshavskii I.M., Dmitriev V.M., et al.**, Computational analysis of the initial stage of the accident at the Chernobyl' atomic power plant, Atomic Energy. 71 (4) (1991) 785–795.
3. **Gonzalez A.J., Akashi M., Boice J.D., et al.**, Radiological protection issues arising during and after the Fukushima nuclear reactor accident, Journal of Radiological Protection. 33 (3) (2013) 497–571.
4. **Theofanous T.G., Lin C., Addition S., et al.**, In-vessel coolability and retention of a core melt, Nuclear Engineering and Design. 169 (1–3) (1997) 1–48.
5. **Kim H.Y., Bechta S., Foit J., Hong S.W.**, In-vessel and ex-vessel corium stabilization in light water reactor, Science and Technology of Nuclear Installations. 2018 (2018) ID 3918150 (3 p).
6. **Fischer M.**, Main features of the EPR melt retention concept (Rep. FZKA-6475), Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Technik und Umwelt (Germany). 32 (14) (2000) 508–517; Proceedings of the OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Alsmeyer H. (Ed.), Karlsruhe, Germany, 15–18 November, 1999.
7. **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.
8. **Stolyarevskiy A.Ya.**, Spasayet li lovushka? [Does a trap rescue?], Atomnaya Strategiya. (4(89)) (2014) 16–18 (in Russian).
9. **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.
10. **Asmolov V.G., Sulatskii A.A., Beshta S.V., et al.**, The interaction of nuclear reactor core melt with oxide sacrificial material of localization device for a nuclear power plant with water-moderated water-cooled power reactor, High Temperature. 2007. T. 45(1) (2007) 22–31.
11. 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).
12. **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.
13. **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) 1–22.
14. **Fiskov A.A., Bezlepkina 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.
15. **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.
16. **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.
17. **Udalov Yu.P., Fedorov N.F., Soloveychik Ya., Pavlova E.A.**, Novyye funktsionalnyye oksidnyye materialy dlya yadernogo reaktorostroyeniya [New functional materials for nuclear rocket production], Industry & Chemistry. 80 (12) (2003) 3–10 (in Russian).
18. **Gusarov V.V., Almjashev 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 Khimicheskii Zhurnal. XLIX (4) (2005) 42–53 (in Russian).
19. **Stivens J.**, Poslevariynnyy otvod tepla ot oblomkov razrushennoy aktivnoy zony [Post-accident heat removal from the wreckage of the destroyed core], Atomnaya Tekhnika za Rubezhom (12) (1984) 14–22 (in Russian).
20. **Gusarov V.V., Almjashev V.I., Khabenskiy V.B., et al.**, Physicochemical simulation of the combustion of materials with the total endothermal effect, Glass Physics and Chemistry. 33 (5) (2007) 492–497.
21. **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.
22. **Lagunenkov O.S., Krasnov V.O., Dovydkov S.A.**, Fuel in room 305/2. Probable formation scenario for nuclear-dangerous zones, Problemi bezpeki atomnikh yelektrostantsiy i Chornobilya [Safety Problems of Nuclear Power Plants and Chernobyl]. (24) (2015) 51–59 (in Russian).

23. **Almyashev V.I., Granovskiy V.S., Khabenskiy V.B., et al.**, Experimental study of corium melt oxidation processes in the reactor vessel, “Tekhnologii Obespecheniya Zhiznennogo Tsikla Yadernykh Energeticheskikh Ustanovok” [Maintenance Technology of the Life Cycle of Nuclear Power Installations]. (4 (10)) (2017) 59–84 (in Russian).
24. **Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N.**, Vy-chislitel'naya teploperedacha [Computational heat transfer], Editorial URSS, Moscow, 2003 (in Russian).
25. **Snegiryov A.Yu.**, Chislennoye modelirovaniye turbulentykh techeniy [Numerical simulation of turbulent flows], Polytechnical Institute Publishing, St. Petersburg, 2009.
26. **Kutateladze S.S., Leontiev A.I.**, Heat transfer, mass transfer, and friction in turbulent boundary layers, Hemisphere, New York, 1990.
27. COMSOL Multiphysics, Software products COMSOL, Burlington, MA. URL: <https://www.comsol.ru>.
28. **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.
29. **Voskov A.L., Dzuban A.V., Maksimov A.V.**, TernAPI program for ternary phase diagrams with isolated miscibility gaps calculation by the convex hull method, Fluid Phase Equilibria. 2015. Vol. 388 (25 February) (2015) 50–58.
30. **Konakov P.K., Vervovochkin G.E., Gorenkov L.A., et al.**, Teplo- i massoobmen pri poluchenii monokristallov [Heat and mass exchange when manufacturing monocrystals], Metallurgy Publishing, Moscow, 1971 (in Russian).

Received 20.07.2020, accepted 27.08.2020.

THE AUTHORS

KOVALENKO Anatoliy N.

*Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
ras-kan@mail.ru

KOPTYUKHOV Artem O.

NRC «Kurchatov Institute» – PNPI
Mcr. Orlova Roshcha, Gatchina 1, Leningradskaya oblast, 188300, Russian Federation
t44h@yandex.ru

MESHCHERYAKOV Dmitry K.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
fess_i@bk.ru

SCHUKLINOV Alexey P.

JSC “Atomproekt”;
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
82A Savushkina St., St. Petersburg, 197183, Russian Federation
mupol@mail.ru