

Али Калванд, И. В. Казачков

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев***МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЛАВА КОРИУМА В КОНТЕЙНМЕНТЕ  
В ПАССИВНЫХ СИСТЕМАХ ЗАЩИТЫ ОТ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ**

Работа посвящена анализу проблемы взаимодействия расплава кориума с легкоплавкими блоками в пассивных системах защиты от тяжелых аварий на АЭС, которая актуальна для обоснования безопасности АЭС, построения, успешной эксплуатации и оптимизации работы пассивных систем защиты. Рассмотрено несколько вариантов расположения плавящихся блоков в системе охлаждения расплава кориума в подреакторном пространстве и дан анализ происходящих в них теплогидравлических процессов. Обсуждаются пути и методы решения поставленных проблем. Разработанные математические модели и компьютерные программы, а также проведенные в работе вычислительные эксперименты могут быть полезными при конструировании пассивных систем удержания расплава кориума в контейнменте после его выхода из разрушенного корпуса реактора, а также в других подобных физических ситуациях.

*Ключевые слова:* модель, кориум, плавление блоков, отвердевание, охлаждение.

**Введение в проблему и постановка  
задачи исследований**

Данная статья является продолжением предыдущей работы авторов на эту тему [1]. При тяжелой аварии с разрушением корпуса реактора расплав кориума выходит в контейнмент (последний барьер безопасности), где пассивная система защиты (ПСЗ) должна надежно его удерживать в контролируемом охлаждаемом состоянии в течение расчетного времени. Для этого в реакторах 3-го третьего поколения требуется обеспечить наличие пассивной системы защиты от тяжелых аварий с выходом расплава топлива из разрушенного корпуса реактора в контейнмент. Поэтому моделирование сценариев тяжелых аварий и поведения расплава кориума при его охлаждении в контейнменте имеет важное значение при решении проблемы разработки и использования наиболее эффективных вариантов ПСЗ [2 - 25].

Главная проблема любой тяжелой аварии – охлаждение расплава кориума и удержание его в контролируемом состоянии в течение требуемого времени для принятия адекватных мер по управлению аварией. Если она решается в рамках контейнмента, радиоактивные вещества остаются внутри него. Поскольку при аварии точное прогнозирование условий теплосъема невозможно, необходимо моделировать все гипотетические сценарии. Поэтому, несмотря на возможность остановки топлива в нижних помещениях, ПСЗ рассчитывается на наихудшие условия. Моделирование процессов охлаждения растекающегося топлива служит успешному решению данной проблемы, поскольку удержание расплава кориума во время тяжелой аварии внутри контейнмента – главное требование проектирования и эксплуатации ПСЗ любой современной АЭС.

Расплав ядерного топлива в основном является смесью  $UO_2-ZrO_2-Zr$ , фазовая диаграмма которой отличается разницей температур ликвидуса и солидуса 200 - 300 °С. А смесь  $UO_2-ZrO_2$  имеет эту разницу в пределах 50 - 75 °С. Еще сложнее с расплавом кориума, так как неизвестно, сколько и каких дополнительных примесей из конструкций, бетона и т.д. имеет место в каждом конкретном случае. Экспериментальные исследования взаимодействия кориума с бетоном актуальны для прогнозирования последствий тяжелой аварии с плавлением активной зоны и выходом расплава на бетонное основание шахты реактора для действующих АЭС, в проектах которых нет соответствующих защитных мер.

Внутриреакторные интегральные эксперименты позволяют физически моделировать основные процессы при тяжелой аварии, но именно в силу их интегрального характера не дают достаточного представления по локальным процессам, сдерживая разработку соответствующих моделей. Поэтому они должны быть дополнены экспериментами по исследованию локальных процессов, которые могут быть проведены в уменьшенном масштабе во вне реакторных условиях. Из-за технических сложностей работы с высокотемпературными радиоактивными расплавами имеется ограниченное количество экспериментальных данных, особенно в интервале температур расплава выше 2000 °С. К тому же дорогостоящие исследования проводятся в рамках коммерческих программ, поэтому подробные результаты не публикуются.

Защита АЭС от тяжелых аварий подразумевает решение двуединой проблемы:

эффективный теплосъем огромного количества теплоты расплава кориума (постоянно генери-

© Али Калванд, И. В. Казачков, 2012

рующего тепло вследствие радиоактивного распада) в заданный ограниченный интервал времени;

поддержание контролируемого теплового состояния охлажденного кориума до решения проблемы утилизации топливных масс и прекращения аварии.

Устройство локализации расплава (УЛР) разработано для Тяньваньской АЭС в Китае с реактором ВВЭР-1000 и предназначено для повышения безопасности энергоблока в процессе протекания тяжелой аварии, связанной с разрушением активной зоны и выходом расплава за пределы корпуса реактора. УЛР относится к 4-му классу безопасности [6], при тяжелой аварии с разрушением активной зоны и корпуса реактора удерживает расплав и твердые фрагменты разрушенной активной зоны, части корпуса реактора и внутрикорпусные устройства. Локализация и охлаждение расплава осуществляется в пределах подреакторного помещения бетонной шахты неограниченное время. УЛР выполняет:

прием и размещение в своем объеме расплава и твердых фрагментов активной зоны и конструктивных материалов реактора;

устойчивую передачу тепла от расплава к охлаждающей воде;

предотвращение выхода расплава за установленные границы зоны локализации;

обеспечение подкритичности расплава в бетонной шахте;

подачу воды в бетонную шахту и отвод пара из бетонной шахты;

обеспечение минимального выноса радиоактивных веществ в пространство герметичной оболочки и минимального выхода водорода;

непревышение максимально допустимых напряжений в конструкциях, расположенных в подреакторном помещении бетонной шахты при различных статических и механических нагрузках.

УЛР основано на пассивных принципах. Элементы конструкции рассчитаны на работу при нагрузках всех проектных режимов.

С учетом изложенного в данной работе ставится задача моделирования теплогидравлических процессов при охлаждении расплава кориума в подреакторном бассейне-охладителе с применением легкоплавких блоков. Основное внимание уделяется особенностям поведения такой системы и их зависимости от размеров блоков и их расположения в подреакторном бассейне-охладителе типа вышеупомянутого УЛР.

## Математическое моделирование охлаждения расплава кориума в контейнменте

### Модель плавления-застывания материала в контейнменте

Математическая модель исследуемых процессов строится на основе законов сохранения массы, импульса и энергии в системе. При этом определяющие уравнения переходного процесса плавления-затвердевания материала включают уравнения сохранения массы, импульса и энергии жидкой и твердой фаз кориума и используемых для его охлаждения плавящихся блоков. Силы плавучести можно учесть в приближении Буссинеска. Уравнения можно представить в виде

$$\begin{aligned} \rho_l \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) &= -\nabla p + \mu_l \Delta \vec{v} + \rho_l \vec{g} \beta_l (T_l - T_0), \\ \operatorname{div} \vec{v} &= 0, \\ \rho_l c_{pl} \left( \frac{\partial T_l}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T_l \right) &= \nabla \cdot (k_l \nabla T_l) + q, \\ \rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} &= \nabla \cdot (k_s \nabla T_s), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho_l, \mu_l$  - плотность и динамический коэффициент вязкости жидкой фазы;  $\vec{v}, p$  - ее скорость и давление;  $\vec{g}$  - вектор ускорения силы тяжести;  $\beta_l$  - коэффициент теплового расширения;  $T_l$  - температура расплава;  $T_0$  - заданная характеристическая температура системы;  $\rho_l, c_{pl}, k_l$  - плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности расплава, твердой фазы,  $\rho_s, c_s, k_s$  - соответственно, плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности твердой фазы;  $T_s$  - температура твердой фазы,  $q$  - удельное объемное тепловыделение. Теплопередача излучением нами не учитывается, поскольку рассматриваемая среда расплава кориума с погружными легкоплавкими блоками является непрозрачной.

Для системы уравнений (1) ставятся следующие начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad \vec{v} = 0, \quad p = p_0, \quad T_s = T_s^0, \quad T_l = T_l^0; \\ r = 0, \quad \partial \vec{v} / \partial r = 0, \quad \partial p / \partial r = 0, \quad \partial T_s / \partial r = 0, \\ \partial T_l / \partial r = 0; \\ r = R, \quad \vec{v} = 0, \quad \partial T_s / \partial r = 0, \quad \partial T_l / \partial r = 0; \\ z = \pm \Delta, \quad \vec{v} = 0, \quad \partial p / \partial z = 0, \quad \partial T_s / \partial z = 0, \\ \partial T_l / \partial z = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $T_s^0$ ,  $T_l^0$  - заданные начальные температуры жидкой и твердой фаз согласно их распределениям, заданных на рис. 1, 4, 8. На стенках бассейна предполагается отсутствие теплопотерь для упрощения расчетов. На границе фазового перехода количество теплоты, получаемое границей раздела фаз в единицу времени, движет границу фазового перехода в зависимости от удельной теплоты фазового перехода материала. Когда плотности материала в жидком и твердом состоянии равны и конвективный теплоперенос в расплаве пренебрежимо мал, баланс энергии границы фазового перехода (оплавления-затвердевания) можно представить как

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial n} = \rho_s \lambda_{sl} \frac{d\zeta_n}{dt}, \quad \text{или}$$

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} + \alpha \Delta T_n = \rho_s \lambda_{sl} \frac{d\zeta_n}{dt}, \quad (3)$$

где  $\zeta_n$  - координата положения границы фазового перехода (плавления-затвердевания);  $n$  - нормаль к поверхности раздела фаз;  $\lambda_{sl}$  - скрытая теплота плавления. В случае затвердевания на границе в левом уравнении (3) меняются местами индексы и знак правой части. Если естественная конвекция в расплаве значительная, то используется правое уравнение (3), где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи на границе фазового перехода и  $\Delta T_n$  - разница температур жидкой и твердой фаз на границе плавления (затвердевания – в случае охлаждения границы).

Система дифференциальных уравнений в частных производных (1) с краевыми условиями (2) и условиями на границе фазового перехода (3) составляет основу математических моделей процессов плавления-затвердевания. Уравнения нелинейные и при этом необходимо решать сопряженные краевые задачи с подвижной границей, поэтому аналитическое решение возможно лишь для простейших случаев, а численное решение в каждом конкретном случае производится с учетом индивидуальных особенностей системы. Для численного решения задачи часто используются метод энтальпии и метод эффективной теплоемкости [26 - 28]. При этом учитывается, что физические свойства реальных сред зависят от температуры (особенно теплопроводность).

#### Постановка краевой задачи для моделирования процессов плавления - застывания

Рассматривая проблему охлаждения расплава кориума за счет плавления более легкоплавкого

материала, погруженного в бассейн расплава, можно ввести в рассмотрение начальную конфигурацию области с погруженным в нее блоком легкоплавкого материала и далее рассматривать решение задачи с учетом вышеизложенной математической модели. Вычисляя распределение температуры в области и ее эволюцию с учетом движения границы фазового перехода, получим состояние системы в каждый текущий момент. Пренебрегая конвекцией расплава, уравнение теплопроводности жидкой фазы можно записать как

$$\rho_l c_{pl} \frac{\partial T_l}{\partial t} = \nabla \cdot (k_l \nabla T_l) + q. \quad (4)$$

Если имеется приток тепла от более горячей области расплава, то температура будет повышаться, тогда как при погружении в расплав более холодного материала, расплав будет охлаждаться от более холодного материала (блока низкоплавкого металла, например). Скрытая теплота плавления  $Q_m$  - это теплота, выделяющаяся при изменении содержания твердой фазы в области с 1 до 0 (охлаждение-застывание). Можно записать  $\frac{dH}{dS} = Q_m$  при  $\frac{dH}{dS} = \text{const}$ . Тогда источник тепла при застывании расплава будет

$$\frac{dH}{dt} = \left( \frac{dH}{dS} \right) \left( \frac{dS}{dt} \right) = Q_m \left( \frac{dS}{dt} \right). \quad (5)$$

Предположим, что содержание твердой фазы представляется функцией вида

$$S = 0,5 \operatorname{erfc} (T - T_m) / T_0, \quad (6)$$

где  $T_m$  - температура плавления;  $T_0$  - диапазон температур, в котором происходит плавление;  $\operatorname{erfc}$  - функция ошибок. Поскольку уравнение (6) не содержит пространственных производных, можно ввести диффузионный член с малым коэффициентом, действующий как фильтр шума. Вначале рассматривается один блок холодного материала, погруженный в бассейн расплава. Начальные температуры таковы, что расплав вблизи блока вначале резко охлаждается и застывает, а затем теплота расплава перераспределяется по объему бассейна и все расплавляется, достигая равновесной температуры (более низкой, чем вначале). Внешнюю границу области считаем теплоизолированной, т.е. рассматриваем консервативный подход, который дает заниженное значение теплоотвода. На самом деле охлаждение расплава будет интенсивнее, поскольку с границы бассейна идет интенсивное охлаждение

за счет излучения в окружающую среду.

Если холодных блоков достаточно много, расплав кориума может застыть во всей области, оставив часть жидкого расплава более легкоплавкого материала. Поскольку начальные условия задают дискретное распределение фаз в области, в одной области поместим холодный блок таким образом, чтобы совместить границы блока с координатными линиями расчетной сетки. Это значительно упростит численное решение краевой задачи. Уравнения (4) - (6) рассматриваются в цилиндрической системе координат  $(r, z)$  двумерной осесимметричной конфигурации (рис. 1).

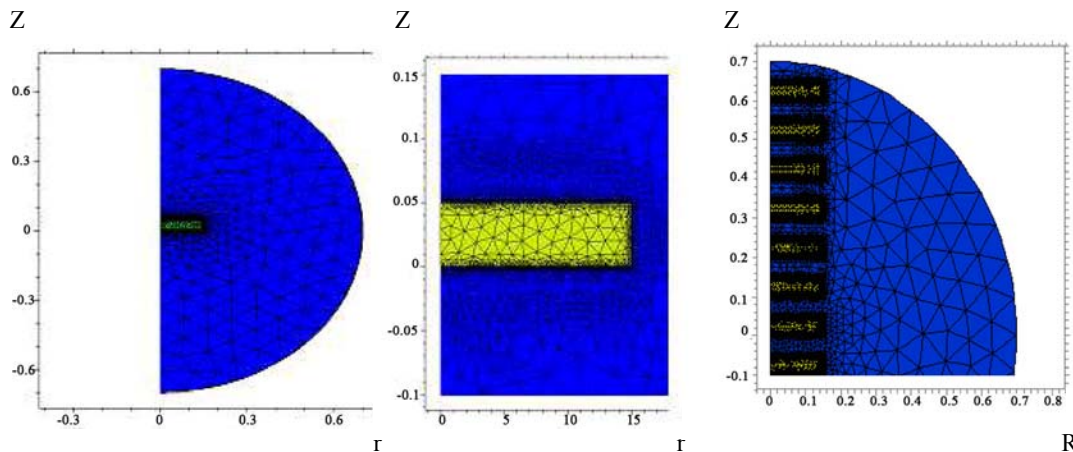


Рис. 1. Один блок в расплаве (слева) и много блоков в бассейне высокотемпературного расплава (справа).

В эвтектических материалах разница температур ликвидуса и солидуса небольшая, а в неэвтектических материалах эта разница значительная. Температурой солидуса называется температура, при которой начинается плавление материала, температурой ликвидуса – температура, при которой оно заканчивается.

Начальные и граничные условия для системы (4) - (6) рассматриваются в следующем виде. В начальный момент времени температура расплава во всей области известна, температура металлического блока также задана. Внешняя граница области теплоизолированная (можно также рассмотреть условие теплоотдачи в окружающую среду). На границе фазового перехода задается условие сохранения потоков тепла вида (2) или, в случае значительной тепловой конвекции, условие (3).

Полученная математическая модель (1) - (6) описывает поведение системы “расплав - плавящиеся блоки” и позволяет рассчитать в любой момент времени содержание жидкой и твердой фаз в области и их распределение в объеме, а также динамику изменения температур фаз. Эти данные необходимы для оценки эффективности системы охлаждения расплава в подреакторном бассейне и исследования особенностей работы

Начальная температура расплава кориума 2000 °С, температура плавления 1850 °С, а исходная температура блока 400 °С. Расплав занимает всю область, за исключением блока заданных размеров, помещенного в центре (или распределения разных блоков по объему). В дальнейшем начальные температуры материалов и размеры блока варьируются для моделирования особенностей эволюции тепловых процессов в рассматриваемой области и движения фронтов раздела жидкой и твердой фаз. Интервал температур плавления принимается равным 20 °С, что означает, что материал является эвтектикой.

системы для оптимизации разработки пассивных систем защиты от тяжелых аварий.

#### Методика расчета двухфазной двухкомпонентной системы

Для расчета вышеописанной двухфазной двухкомпонентной системы используется математическая модель (4) - (6), при этом для твердой фазы применяется уравнение (4) с физическими свойствами твердой фазы. Для проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ удобно использовать программную платформу FlexPDE. Предполагается, что переменные, описывающие модель, непрерывны на границах раздела сред.

#### Вычислительный эксперимент

Адаптивная расчетная сетка автоматически подстраивается в каждой точке области в текущий момент времени по градиентам функций, что позволяет существенно снизить объем вычислений и повысить их точность. Радиус области 5 м, радиус блока в 100 раз меньше. Коэффициент теплопроводности зависит от температуры  $k_T = 30 + 4,5 \cdot 10^{-5} (T - 1350)^2$ , что обуславливает сложное нелинейное поведение системы. Так,

тепловой поток в сторону области с меньшей температурой может быть меньше, чем в сторону области с большей температурой вследствие того, что при более высокой температуре будет выше коэффициент теплопроводности [26 - 28]. Рассчитанная на ЭВМ эволюция поля температур в бассейне расплава с холодным блоком для различных моментов времени от начального состояния до 5 мин, когда практически весь блок расплавлен, показала, что примерно до 1 с картина почти не меняется, хотя на поверхности блока температура практически мгновенно увеличивается с 400 °С до температуры расплава (около 2000 °С).

Затем в течение 10 с температура внутри блока существенно повышается и далее в бассейне расплава медленно падает температура, а в блоке растет. При этом вначале вокруг блока расплав застывает при более высокой температуре, чем начальная температура блока. А в конце процесса весь блок расплавляется, и температура в бассейне выравнивается. Динамика изменения температуры в сечении блока показана на рис. 2, откуда видно, что 0,1 с температура поверхности блока лишь слегка поднимается, а температура приповерхностного слоя расплава слегка падает. Далее до 1 с картина сохраняется, область только слегка расширяется. За 30 с температура внутри блока значительно повышается, так что минимальная температура становится 1200 °С. Детальная картина эволюции температурных фронтов показана на рис. 3 и 4, откуда видна интересная особенность поведения системы. Это можно назвать новым явлением «радужного» расплавления блока в бассейне высокотемпературного расплава с резким завершающим переходом твердого нагретого блока в расплавленное со-

стояние, смешиваясь с бассейном. «Радуга» имеет сначала три отчетливых тонких зоны, охватывающие блок, и четко очерченные границы, охватывающие блок как многослойная оболочка.

На завершающей стадии, перед расплавлением блока, получается 4 зоны, соответствующих примерно 20, 40, 60 и 80 % твердой фазы. Это явление можно объяснить аномалией физических свойств твердой и жидкой фаз в оболочке плавящегося блока, заключающейся в том, что теплопроводность определяется температурой и поэтому в каждой образующейся оболочке наиболее высокие тепловые потоки вдоль оболочки, а не по нормали к ней, между оболочками. Однако пока непонятно, почему их три, а в конце четыре: то ли это зрительный эффект, связанный с особенностями восприятия цветов, или их действительно три, и эта дискретность связана с особенностями нелинейной теплопроводности в системе и характером застывания расплава вокруг твердого блока. Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Первоначально тонкий «холодный» блок постепенно превращается в эллипсоид, близкий к сфере, причем с торца твердая фаза почти не образуется. Большая разница температур плавящегося блока и расплава в бассейне приводит к тому, что расплав значительно охлаждается вблизи блока и вследствие этого он начинает застывать, образуя слой твердой фазы вокруг блока. Когда дальнейшее застывание расплава становится невозможным, а расплава много и он еще имеет достаточно высокую температуру, то начинается обратный процесс постепенного послойного расплавления твердой фазы. Заканчивается процесс полным расплавлением легкоплавкого блока жертвенного материала.

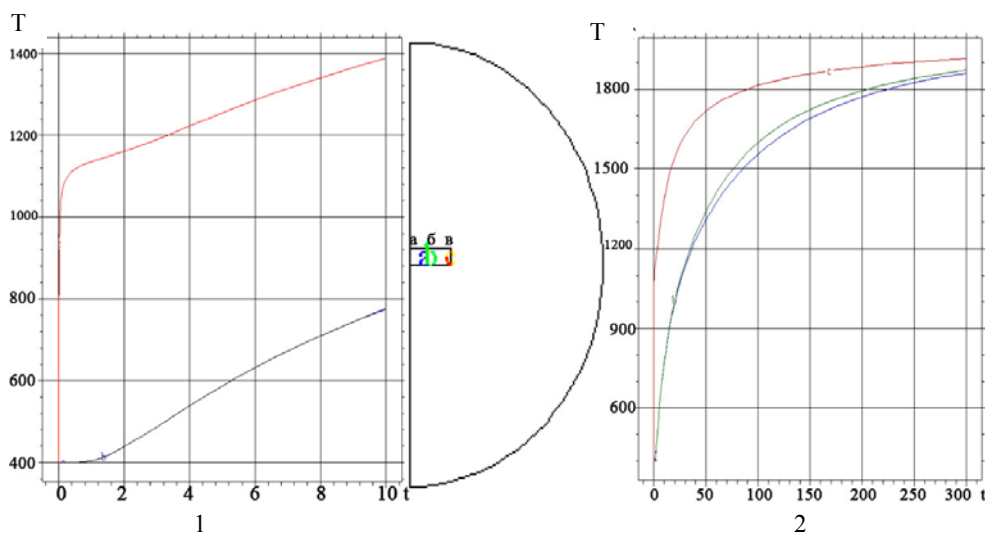


Рис. 2. Изменение температуры блока во времени в трех точках: а, б - в средней части блока, в - на краю блока в контакте с расплавом (три точки показаны на вставке между частями рисунка 1 и 2).

Моделировалась эволюция системы от начала до конца. Вначале общая энергия системы уменьшается, когда часть энергии расплава расходуется на энергию связей твердого тела при его застывании. В точке минимума энергии системы дальнейшее застывание расплава уже невозможно, и тогда начинается постепенное расплавление всего твердого тела (блока вместе с застывшим вокруг него охлажденным расплавом кориума). Энергия связей высвобождается и поэтому общая энергия системы растет вплоть до полного расплавления всей твердой фазы. Когда вся твердая фаза расплавилась, энергия системы не меняется. На рис. 2 показано два характерных интервала (1 – 10 с и 2 – 300 с) развития системы в трех точках внутри блока. Точки *a*, *b* находятся примерно в средней части блока, а точка *в* – на его торце, в непосредственном контакте с расплавом кориума.

Из рис. 2 четко видно, что внутри блока в точках *a*, *b* вдаль от торца температура практически не меняется в течение 1 с, тогда как на торце она скачком достигает температуры окружающего расплава. Далее примерно в течение 10 с температура нарастает линейно, после чего идет нелинейный рост температуры вплоть до выхода системы на равновесный режим.

В точках *a*, *b* внутри блока температура значительно ниже, чем на торце блока в точке *в*, только в конце интервала (примерно через 5 мин) температуры в точках *a*, *b*, *в* становятся близкими, когда система выходит в равновесное состояние. Изменение содержания твердой фазы в трех вышеуказанных точках блока показало, что в точках *a*, *b* твердая фаза постепенно расплавляется только в конце процесса, когда температура во всей области выравнивается. А вот в точке *в* на торце блока вначале до трети материала в по-

граничном слое расплавляется и вскоре снова застывает. А затем во всех точках равномерно происходит расплавление блока.

### Моделирование системы при разном количестве и расположении блоков

#### Конфигурация из 13 охлаждающих плавящихся блоков

Для конфигурации из 13 стальных блоков изучался процесс плавления блоков в среде со свойствами, приближенными к расплаву кориума в реакторе типа ВВЭР. Вначале отслеживали процесс плавления блоков в расплаве и определяли эволюцию поля температур и содержания твердой фазы с течением времени. Затем аналогичным образом исследовали другую физическую ситуацию, с добавлением к системе 13 блоков двух дополнительных блоков большего размера. Для первой исследуемой конфигурации блоков с начальной температурой 400 °С, погруженных в расплав кориума с температурой 2000 °С, распределение температуры в сечении, показанном на рис. 3 цифрами 1-2 (сечение проходит со сдвигом от середины блоков в сторону области расплава), свидетельствует, что на момент времени  $t = 4,4 \cdot 10^{-3}$  с температура в зазорах между блоками равна температуре расплава 2000 °С (слева). Картина практически не меняется до  $t = 10^{-2}$  с (на рисунке справа). Вся картина распределения температур в системе блоков, погруженных в расплав кориума, и жидких-твердых фаз в расчетной области для этого момента времени показана на рис. 4 и 5, откуда видно, что пока процесс оплавления не начался. В этот момент времени еще идет нагревание блоков от расплава кориума, имеющего значительно более высокую температуру.

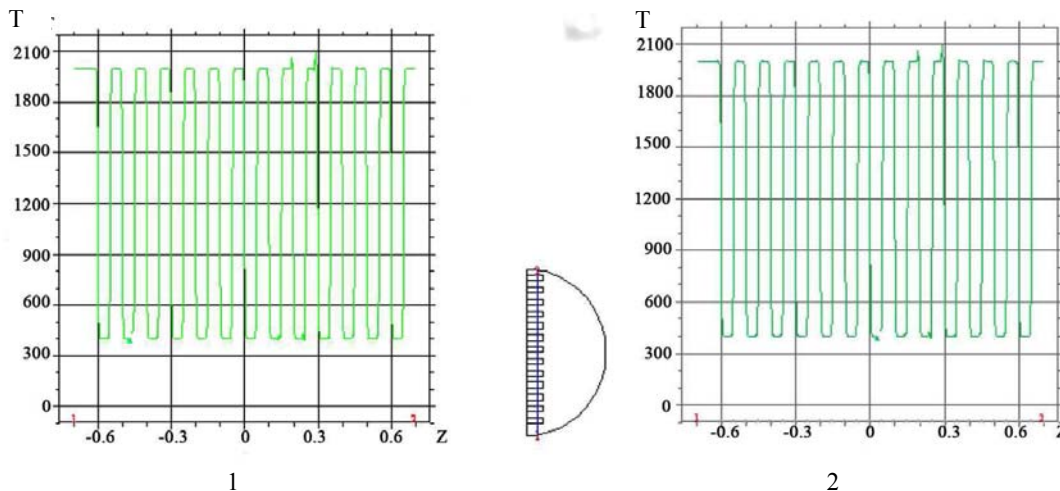


Рис. 3. Распределение температур в сечении блоков (сечение 1-2 показано на вставке между частями рисунка 1 и 2) в области расплава по координате Z от начального момента времени до  $t = 10^{-2}$  с (на рисунке справа).



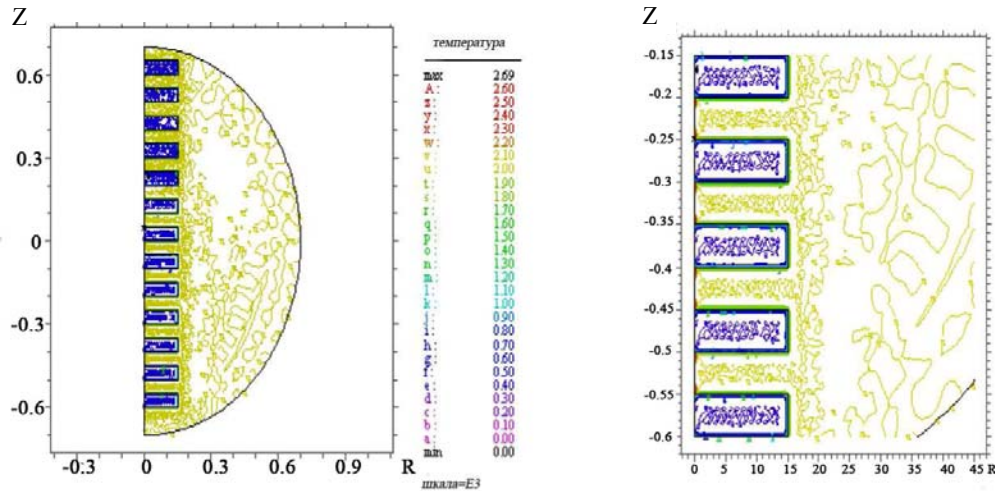


Рис. 4. Распределение температур в области расплава и системе блоков, погруженных в расплав корнума, в координатах (R, Z). Слева представлена вся область, справа – увеличенный фрагмент.

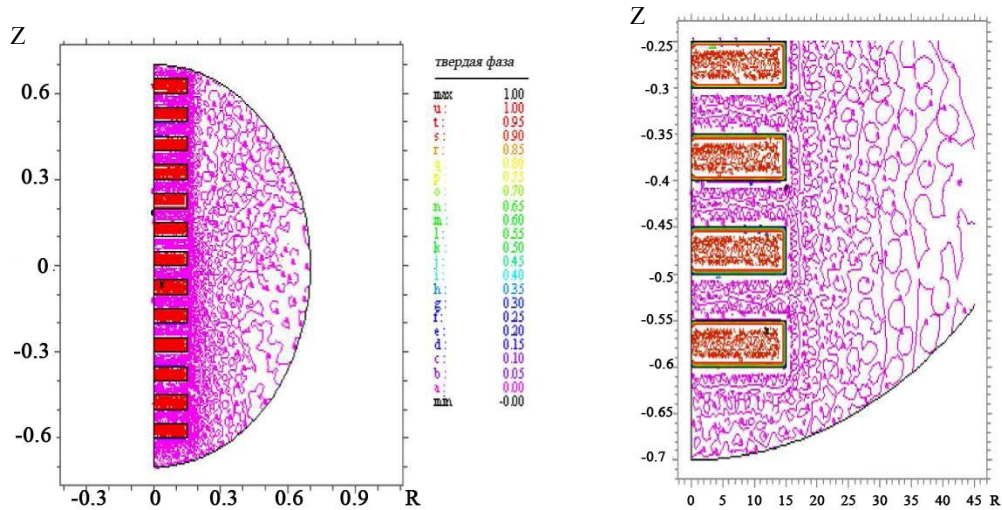


Рис. 5. Распределение объемного содержания жидкой и твердой фаз в области с погруженными блоками в расплаве в координатах (R, Z). Слева представлена вся область; справа – увеличенный фрагмент.

В течение времени  $t = 0 - 0,01$  с температура между блоками во внутренней части сохраняется неизменной, в то время как на границе блоков с расплавом она скачком устанавливается на уровне  $1120\text{ }^{\circ}\text{C}$  и тоже на этом интервале времени не меняется. Конечная стадия эволюции системы первой конфигурации после 10 мин времени показана на рис. 6, из которого видно, что температура практически выровнялась во всей области, поскольку твердой фазы почти не осталось в области. Как видно из рис. 7 слева, в основной части в области блоков температура равна примерно  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в остальной области –  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Это видно также из общего распределения температур в области на рис. 9 справа.

Из представленных расчетных данных видно, что такое понижение температуры в подреакторном бассейне достигнуто в области, занятой пла-

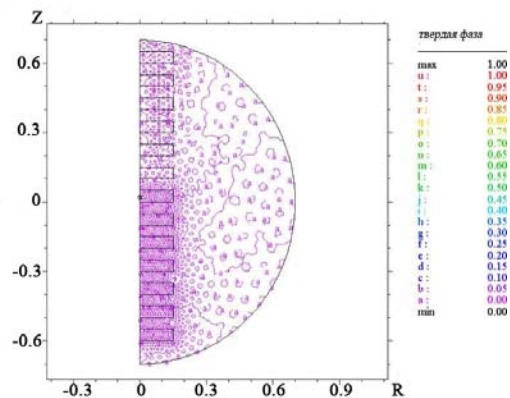


Рис. 6. Конечная стадия эволюции системы первой конфигурации: Распределение объемного содержания жидкой и твердой фаз в области с погруженными блоками в расплаве в координатах (R, Z). Справа представлена шкала от 1 (вся область занята твердой фазой) до 0 (вся область занята жидкой фазой).

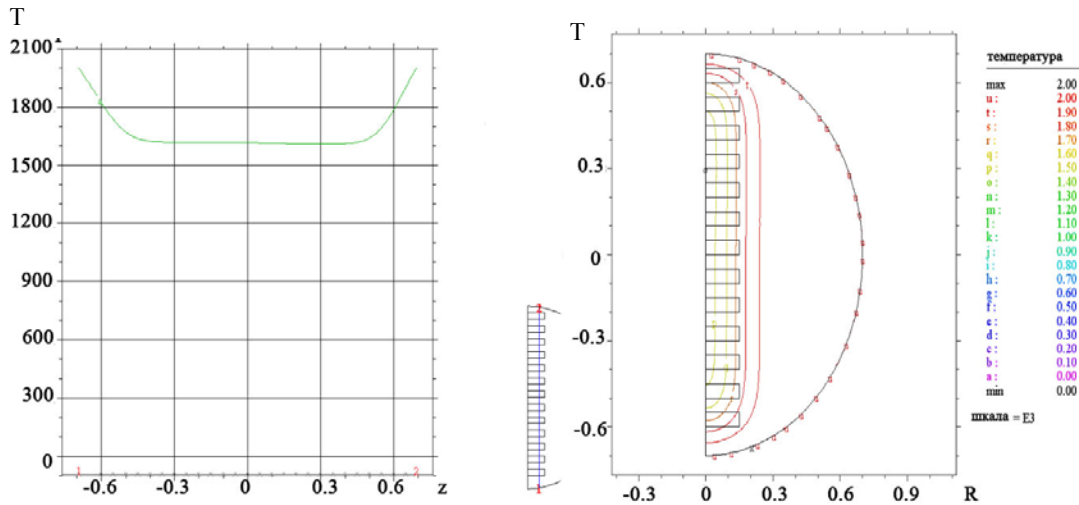


Рис. 7. Распределение температур в сечении 1-2, показанном на вставке между левым и правым рисунками, по координате Z (рисунок слева) и всей области (справа) в координатах (R, Z) для  $t = 600$  с.

вращающимися блоками, которые занимают меньшую часть всей области, занятой расплавом. Снижение температуры примерно на 20 % от первоначального ее значения. Эволюция температурных полей показала, что температура на поверхности блоков растет значительно интенсивнее, чем внутри блоков.

### Конфигурация с добавлением двух больших блоков

Более плотная конфигурация с добавлением двух больших блоков представлена на рис. 8.

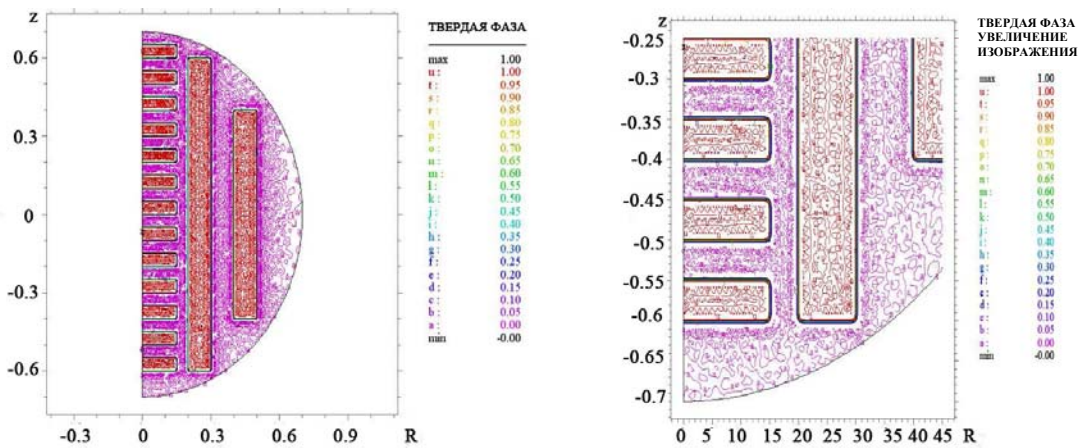


Рис. 8. Вторая (плотная) конфигурация блоков для охлаждения кориума в подреакторном бассейне,  $t = 1$ с: распределение объемного содержания жидкой и твердой фаз в области с погруженными блоками в расплаве в координатах (R, Z). Справа представлен фрагмент области в увеличенном масштабе.

увеличивать удельную межфазную поверхность в объеме охлаждаемого расплава, т.е. загружать в охлаждающий бассейн мелкие блоки.

Созданные модели и программы для ЭВМ позволяют исследовать процесс охлаждения рас-

Как видно из рис. 9, несмотря на то, что блоки разных размеров и расположены по-разному, общая тенденция сохраняется и все так же распределение температуры в блоках сохраняется на протяжении их плавления и выравнивания температур в области бассейна охлаждения кориума. Похожим образом формируется также их многослойная температурная граница.

Последние данные показывают, что крупные блоки менее эффективны, так как во время их плавления температура внутри значительной области остается постоянно низкой и охлаждение расплава кориума идет лишь от границы поверхности блоков. Поэтому необходимо стремиться

плава кориума плавящимися блоками различных размеров и физических свойств (плотность, удельная теплота плавления, теплоемкость, вязкость и т.д.). Это изменяет особенности процесса охлаждения кориума и получаемого в результате



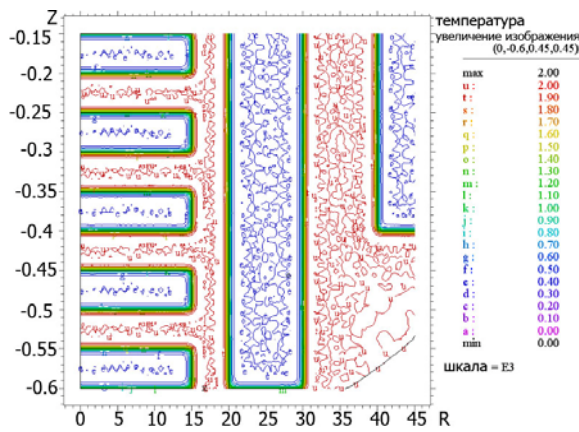


Рис. 9. Распределение температур при  $t = 1$  с в области расплава с погруженными блоками в координатах  $(R, Z)$ .

охлаждения расплава, а затем при дальнейшем охлаждении – и затвердевшего материала, сплава ядерного топлива с примесями. Такие данные необходимы для конструирования и оптимального использования систем пассивной защиты АЭС от тяжелых аварий.

### Выводы

На основе разработанной математической модели и программы для ее реализации проведены вычислительные эксперименты и выполнен анализ проблемы охлаждения расплава кориума в подреакторном бассейне с помощью плавящихся блоков. Были исследованы и определены:

1. Особенности и характерные закономерности плавления блоков в среде высокотемпературного расплава кориума.
2. Характер протекания теплогидравлических процессов при взаимодействии расплава кориума с охладителем для разного количества и распределения в объеме бассейна охладителя расплавляемых блоков.
3. Влияние изменения физических свойств кориума на поведение системы.

4. Закономерности взаимовлияния различных свойств кориума на его поведение в системе пассивной защиты от тяжелых аварий.

На основе проведенного анализа поставлены и обоснованы задачи моделирования теплогидравлических процессов при охлаждении и застывании топлива, а также его управляемом подержании в контролируемом состоянии в течение требуемого времени. Установлены закономерности процессов плавления-затвердевания в бассейне высокотемпературного расплава, содержащего блоки из более легкоплавкого материала. Хотя данный случай модельный и не отвечает в точности масштабам ловушки кориума в пассивной системе защиты от тяжелых аварий, однако локально подобные процессы происходят и в ПСЗ.

Установлены характерные времена застывания и расплавления металла и явление радужного застывания-расплавления блока в бассейне вследствие нелинейности коэффициента теплопроводности. Это новое явление требует углубленного исследования. Полученные результаты полезны при решении задачи охлаждения бассейна кориума в пассивных системах защиты от тяжелых аварий на АЭС. Изучено несколько разных видов расположения плавящихся блоков разных размеров.

Создано математическое обеспечение, позволяющее проводить вычислительные эксперименты на ЭВМ с целью изучения особенностей протекания процессов охлаждения расплава кориума, плавления блоков и застывания кориума. Показано, что для повышения эффективности охлаждения расплава необходимо использовать мелкие блоки. Расположение блоков и их сочетание по размерам особого значения не имеют. Полученные данные необходимы для проектирования и оптимизации систем пассивной защиты АЭС от тяжелых аварий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калванд Али, Казачков И. В. Особенности процессов плавления-затвердевания при погружении блоков в расплав высокотемпературного кориума // Ядерная физика та енергетика. - 2009. - Т. 10, № 2. - С. 178 - 184.
2. Sehgal B.R. Accomplishments and challenges of the severe accident research // Nuclear Engineering and Design. - 2001. - Vol. 210. - P. 79 - 94.
3. Казачков И.В. Современное состояние и некоторые проблемы моделирования тяжелых аварий на зарубежных АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. - 2003. - № 1. - С. 25 - 34.
4. Hasan Moghaddam Ali, Kazachkov I.V. Modelling of the corium melt interaction with water and vapor during severe accidents at NPP/ 3<sup>rd</sup> WSEAS Int. Conf. (Univ. of Cambridge, February, 23 - 25, 2008). - P. 71 - 76.
5. Казачков И.В., Хасан Могаддам Али. Моделирование теплогидравлических процессов при тяжелых авариях на АЭС: Монография. – К.: НТУУ «КПИ», 2008. - 172 с.
6. LYG-X-PD86-29-52260000-TR-0026-E. Оценка классификации устройства локализации расплава активной зоны. – СПб: АтомЭнергоПроект, 2000.

7. *Asmolv V.V.* Latest findings of RASPLAV Project // Proc. OECD/CSNI workshop on in-vessel core debris retention and coolability. - 1998. - P. 34.
8. *Bolshov L.A. et al.* Numerical models of molten core spreading processes in nuclear reactor safety problems / Proc. of the 4<sup>th</sup> Int. Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics. Operations and Safety (Taipei, Taiwan, April, 1994). - P. 7.
9. *Kolev N.I.* Verification of IVA5 computer code for melt-water interaction analysis // Proc. NURETH-9. - 1999. - P. 90 - 99.
10. *Carboneau M.L., Berta V.T., Modro M.S.* Experiment analysis and summary report for OECD LOFT Project Fission Product Experiment LP-FP-2 / OECD LOFT-T-3806. - 1989. - P. 57 - 60.
11. *Reactor risk reference document / USNRC Report NUREG-1150.* - U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1987. - 67 p.
12. *Kazachkov I.V., Paladino D., Sehgal B.R.* Ex-vessel coolability of a molten pool by coolant injection from submerged nozzles // 9-th Int. Conf. Nucl. Energy Devel (Nice, France, April 8 - 12, 2001). - P. 43 - 49.
13. *Bechta S.V., Vitol S.A., Krushinov E.V. et al.* Water boiling on the corium melt surface under VVER severe accident conditions // Nuclear Engineering and Design. - 2000. - Vol. 195. - P. 45 - 56.
14. *Kazachkov I.V., Konovalikhin M.J.* A Model of a Steam Flow through the Volumetrically Heated Particle Bed // Int. J. of Thermal Sciences. - 2002. - Vol. 1. - P. 1077 - 1087.
15. *Kazachkov I.V., Konovalikhin M.J., Sehgal B.R.* Dryout Location in a Low-porosity Volumetrically Heated Particle Bed // J. of Enhanced Heat Transfer. - 2001. - Vol. 8. - No. 6. - P. 397 - 410.
16. *Konovalikhin M.J., Kazachkov I.V., Sehgal B.R.* A model of the steam flow through the volumetrically heated saturated particle bed // ICMF 2001: Fourth Int. Conf. on Multiphase Flow (U.S.A., New Orleans, Louisiana, May 27 - June 1, 2001). - P. 37 - 43.
17. *Paladino D., Theerthan A., Sehgal B.R.* Experimental Investigation on Debris Coolability by Bottom Injection, ANS: Annual Meeting. - Boston, USA, 1999. - A.88.
18. *Kazachkov I.V., Paladino D., Sehgal B.R.* Ex-vessel coolability of a molten pool by coolant injection from submerged nozzles // 9-th Int. Conf. Nucl. Energy Devel (Nice, France, April 8 - 12, 2001). - P. 67 - 75.
19. *Kazachkov I.V., Konovalikhin M.J., Sehgal B.R.* Coolability of melt pools and debris beds with bottom injection // 2-nd Japanese-European Two-Phase Flow Group Meeting (Tsukuba, Japan, 2000). - P. 90 - 96.
20. *Haraldsson H.O., Kazachkov I.V., Dinh T.N., Sehgal B.R.* Analysis of thin jet breakup length in immiscible fluids // Abstr. 3-rd Int. Conf. Adv. in Fluid Mechanics (Montreal, Canada, 24 - 26 May, 2000). - P. 43 - 47.
21. *Park H.S., Kazachkov I.V., Sehgal B.R. et al.* Analysis of plunging jet penetration into liquid pool with various densities // Ibid. - P. 56 - 59.
22. *Kazachkov I.V., Dinh T.N., Haraldsson H.O., Sehgal B.R.* Non-linear mathematical model of a thick jet penetration into liquid pool // Report NPS Div. - Stockholm: Royal Inst. of Technol., 1999. - 23 p.
23. *Okkonen T.* Melt-Water Interactions in a reactor containment: from integrated assessment to phenomenological studies: Ph. D. thesis. - Stockholm: RIT/NPS, 1998. - 85p.
24. *Асмолов В.Г.* Концепция управления тяжелыми авариями на АЭС с ВВЭР // Сб. тр. научно-практического семинара "Вопросы безопасности АЭС с ВВЭР. Исследования процессов при запроектных авариях с разрушением активной зоны" (С.-Петербург, 12 - 14 сентября 2000 г.). - 2000. - Т. 1. - С. 1 - 21.
25. *Асмолов В.Г., Кухтевич И.В., Безлепкин В.В. и др.* Концепция локализации расплава кориюма на внекорпусной стадии запроектной аварии АЭС с ВВЭР-1000. - Там же. - С. 23 - 35.
26. *Alexiades V, Solomon A.D.* Mathematical modeling of melting and freezing processes. - USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1993. - 275 p.
27. *Bonacina C, Comini G, Fasano A, Primicerio M.* Numerical solution of phase-change problems // Int. J. of Heat and Mass Transfer. - 1983. - Vol. 16. - P. 1825 - 1832.
28. *Crank J.* Free and moving boundary problems. - Oxford: University Press, 1984. - 423 p.

**Алі Калванд, І. В. Казачков**

### **МОДЕЛЮВАННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ РОЗПЛАВУ КОРИУМУ В КОНТЕЙНМЕНТІ В ПАСИВНИХ СИСТЕМАХ ЗАХИСТУ ВІД ТЯЖКИХ АВАРІЙ**

Робота присвячена розробці математичної моделі взаємодії расплаву кориюму з легкоплавкими блоками в пасивних системах захисту від тяжких аварій на АЕС, актуальної для обґрунтування безпеки АЕС, побудовання та успішної експлуатації пасивних систем захисту. У реакторах третього покоління наявність пасивних систем захисту від тяжких аварій – обов'язкова вимога, тому робота має важливе значення для ядерної безпеки. Розглянуто декілька конфігурацій розміщення охолоджуючих блоків і надано аналіз процесів плавлення блоків та охолодження кориюму в підреакторному басейні, що могло б допомогти вдосконаленню існуючих систем або створенню нових, більш ефективних. Обговорено шляхи та методи успішного рішення поставлених проблем.

Розроблені математичні моделі та проведені у роботі аналіз можуть бути корисними при конструюванні пасивних систем утримання розплаву коріуму в контейнменті після його виходу із зруйнованого корпусу реактора.

*Ключові слова:* модель, коріум, плавлення блоків, затвердіння, охолодження.

**Ali Kalvand, I. V. Kazachkov**

**PROBLEM OF CORIUM MELT COOLABILITY IN PASSIVE PROTECTION SYSTEMS  
AGAINST SEVERE ACCIDENTS IN THE CONTAINMENT**

Paper is devoted to the development of the mathematical model and analysis of the problem of corium melt interaction with low-temperature melting blocks in the passive protection systems against severe accidents at the NPP, which is of high importance for substantiation of the nuclear power safety, for building and successful operating of passive protection systems. In the third-generation reactors passive protection systems against severe accidents at the NPP are mandatory, therefore this paper is of importance for the nuclear power safety. A few configurations for the cooling blocks' distribution have been considered and an analysis of the blocks' melting and corium's cooling in the pool under reactor vessel have been done, which can serve more effective for further improvement of the safety current systems and for the development of new ones. The ways for solution of the problems and the methods for their successful elaboration were discussed. The developed mathematical models and the analysis performed in the paper might be helpful for the design of passive protection systems of the corium melt retention inside the containment after corium melt eruption from the broken reactor vessel.

*Keywords:* model, corium, melting blocks, solidification, coolability.

Поступила в редакцію 31.01.2012.