

## Моделирование процесса охлаждения расплава кориюма погруженными в него легкоплавкими блоками

Рассматривается проблема, важная для разработки и эксплуатации пассивных систем защиты АЭС от тяжелых аварий при охлаждении расплава кориюма с помощью легкоплавких блоков (например, окисла алюминия). Рассмотрена методика моделирования процесса охлаждения расплава кориюма погруженными в него блоками и приведены результаты вычислительных экспериментов процесса на ЭВМ, позволяющие изучить наиболее важные его особенности. Сделаны выводы относительно основных закономерностей и динамики протекания процесса охлаждения бассейна расплавленного кориюма погруженными в него легкоплавкими блоками.

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

**Алі Калванд, І. В. Казачков**

### Моделювання процесу охолодження розплаву коріюму зануреними в нього легкоплавкими блоками

Розглядається проблема, важлива для конструювання та експлуатації пасивних систем захисту АЕС від тяжких аварій в разі охолодження розплаву коріюму за допомогою легкоплавких блоків (наприклад, окислу алюмінію). Розглянуто методику моделювання процесу охолодження розплаву коріюму зануреними в нього блоками та наведено результати обчислювальних експериментів на ЕОМ, що дають змогу вивчити найважливіші його особливості. Наведено висновки щодо основних закономірностей та динаміки протікання процесу охолодження басейну розплавленого коріюму зануреними в нього легкоплавкими блоками.

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

© Али Калванд, И. В. Казачков, 2012

Реакторы третьего поколения до 2020 г. должны полностью заменить реакторы второго поколения. В них требуется наличие пассивной системы защиты от тяжелых запроектных аварий с плавлением топлива и выходом расплава кориюма за пределы корпуса реактора. В реакторах первых двух поколений такие события относили к маловероятным и мер борьбы с ними не предусматривали. Для реакторов третьего поколения моделирование различных сценариев тяжелых аварий и поведения расплава кориюма при его охлаждении в контейнменте имеет целью прояснить сложные особенности поведения системы. Они важны для успешного развития пассивных систем безопасности. Современный уровень развития позволяет внедрение технологий “Атомная энергетика, свободная от катастроф”. Атомная электростанция, оснащенная такими технологиями в сочетании с конкурентоспособными экономическими характеристиками, — перспективный надежный источник энергии.

Поскольку одно из главных требований к ядерным установкам — низкий уровень риска для населения и окружающей среды, для разработчиков новых безопасных реакторов важны детальные знания особенностей протекания аварийных сценариев [1–10]. Для населения тяжелая авария даже в случае разрушения корпуса реактора с выходом расплава кориюма в контейнмент не является катастрофой, если кориюм удерживается в контролируемом состоянии и не поступает в окружающую среду. Поскольку точное прогнозирование условий охлаждения кориюма невозможно, очень важно моделировать гипотетические сценарии развития аварий, в частности процессы плавления—застывания кориюма и других веществ при поступлении расплава кориюма в подреакторное пространство, заполненное блоками легкоплавкого материала для быстрого и эффективного снятия большого избыточного количества теплоты. Моделирование физических процессов, сопровождающих охлаждение расплава кориюма, — сложная и интересная задача как в теоретическом, так и в прикладном аспектах.

### Математическая модель плавления—застывания материала в контейнменте

**Основные уравнения системы.** Для составления математической модели исследуемых процессов следует проанализировать все законы сохранения, которые в данном случае необходимо использовать. Система определяющих уравнений переходного процесса плавления—затвердевания материала включает уравнения сохранения массы, импульса и энергии. Силы плавучести можно учесть в приближении Буссинеска. Уравнения можно представить в виде

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

где  $\rho_l, \mu_l$  — плотность и динамический коэффициент вязкости жидкой фазы;  $\vec{v}, p$  — ее скорость и давление;  $\vec{g}$  — вектор ускорения свободного падения;  $\beta_l$  — коэффициент теплового расширения;  $T_l$  — температура расплава;

$T_0$  — заданная характерная температура системы;  $\rho_l, c_{pl}, k_l$  — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности расплава;  $\rho_s, c_s, k_s$  — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности твердой фазы, соответственно;  $T_s$  — температура твердой фазы. Теплообмен излучением не учитывается, поскольку среда расплава с погружными блоками непрозрачна.

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 в виде

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial n} = \rho_s \lambda_{sl} \frac{d\zeta_n}{dt}, \quad (2)$$

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 уравнении (2) меняются местами индексы и знак правой части. Если естественная конвекция в расплаве значительная, уравнение (2) следует заменить на такое:

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

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи на границе фазового перехода;  $\Delta T_n$  — разница температур жидкой и твердой фаз на границе оплавления (затвердевания — в случае охлаждения границы).

Система дифференциальных уравнений в частных производных (1) с условиями на границе фазового перехода (2), (3) составляет основу математических моделей процессов плавления—затвердевания. Поскольку уравнения нелинейные и при этом необходимо решать сопряженные краевые задачи с подвижной границей, аналитическое решение возможно лишь для простейших случаев, а численное решение в каждом конкретном случае зависит от индивидуальных особенностей системы. Для численного решения задачи наиболее часто используются метод энталпии и метод эффективной теплоемкости [11—13].

На физические свойства реальных сред, особенно на теплопроводность, влияет температура, что при определенных условиях может привести к режимам аномального локального разогрева (локализация диссипативных процессов), как показано в [14] на многочисленных примерах аналитических решений нелинейного уравнения одномерной нестационарной теплопроводности. Для случая течения пара в гранулярной среде режимы локального аномального разогрева получены численно методом дробных шагов [15, 16].

**Постановка краевой задачи для моделирования процессов плавления—застывания.** Исследуя проблему охлаждения расплава кориума за счет плавления более легкоплавкого материала, погруженного в бассейн расплава, можно ввести в рассмотрение начальную конфигурацию области расплава с погруженным в него блоком легкоплавкого материала и далее решать задачу с учетом вышеизложенной математической модели. Вычисляя из решения краевой задачи распределение температуры в области, занятой расплавом с погружными блоками 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 так:

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

где  $q$  — интенсивность внутренних удельных объемных тепловыделений. Скрытая теплота плавления  $Q_m$  — это теплота, выделяющаяся при изменении содержания твердой фазы в области с 1 до 0 (охлаждение—застывание):

$$Q_m = \int_0^1 \frac{dH}{dS} dS, \text{ или } \frac{dH}{dS} = Q_m \text{ при } \frac{dH}{dS} = \text{const.}$$

Тогда при застывании расплава (или расплавлении твердой фазы)

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

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 расплавление;  $\operatorname{erfc}$  — функция ошибок.

Поскольку уравнение (6) не содержит пространственных производных, можно ввести диффузионный член с малым коэффициентом, действующий как фильтр шума.

Рассмотрим вначале блок холодного материала, погруженный в бассейн расплава. Начальные температуры таковы, что расплав вблизи блока вначале резко охлаждается и застывает, но впоследствии теплота расплава перераспределяется по объему бассейна и вся расплавляется, достигая равновесной температуры (более низкой, чем вначале). Внешнюю границу области будем считать теплоизолированной. Если холодных блоков достаточно много, расплав кориума может застыть во всей области, останется часть расплава более легкоплавкого материала. Поскольку начальные условия задают блокретное распределение фаз в области, в одной области поместим холодный блок таким образом, чтобы совместить границы блока с координатными линиями расчетной сетки (рис. 1).

Уравнения (4)—(6) рассматриваются в двумерной осесимметричной цилиндрической системе координат  $(R, z)$ . Вначале температура расплава кориума принимается

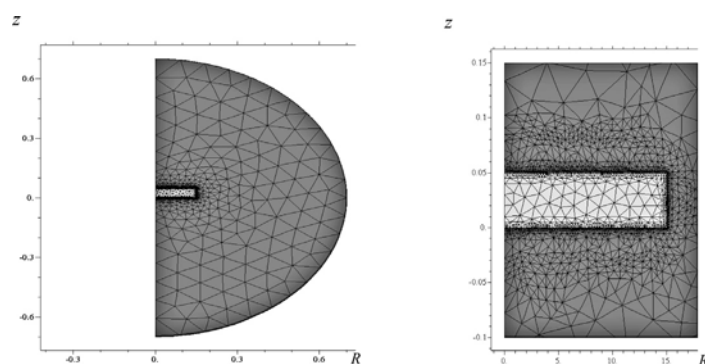


Рис. 1. Блок металла в бассейне высокотемпературного расплава кориума в цилиндрических координатах  $(R, z)$ ; справа — фрагмент в увеличенном масштабе

равной 2000 °С, температура плавления — 1850, исходная температура блока — 400 °С. 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. В эвтектических материалах разница температур ликвидуса и солидуса\* небольшая, а в неэвтектических — значительная. Таким образом, неэвтектические материалы имеют сложное поведение, поскольку в широком диапазоне температур между ликвидусом и солидусом они находятся в промежуточном состоянии (не жидкость и не твердое тело, кашеобразная вязкая масса с неопределенными свойствами).

Математическая модель (4)—(6) решается при следующих граничных и начальных условиях. 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).

**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 (США). Эта вычислительная система предназначена для построения сценарных моделей решения дифференциальных уравнений методом конечных элементов. По сценарию, написанному пользователем, FlexPDE производит операции, необходимые для того, чтобы преобразовать описание системы дифференциальных уравнений в частных производных в модель для расчета методом конечных элементов, найти решение для этой системы и представить результаты в графической форме. FlexPDE исполняет роль вычислительной среды для решения задач, имея полный набор функций, необходимых для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных:

функцию редактирования для подготовки сценариев решения;

функцию генерации сеток конечных элементов в заданной области;

функцию подбора конечных элементов при поиске решения задачи;

графическую функцию для представления графиков результатов.

FlexPDE не ограничивает пользователя заранее заданным списком прикладных задач или видов уравнений. Выбор вида дифференциальных уравнений в частных производных полностью зависит от пользователя. Язык сценария позволяет пользователю описывать математический аппарат его системы дифференциальных уравнений в частных производных и структуру области решений в целом в естественном формате. Например, в сценарии имеется раздел EQUATIONS (УРАВНЕНИЯ), в котором уравнение Лапласа

можно представить как  $\text{Div}(\text{grad}(u)) = 0$ . Аналогично, в сценарии имеется раздел BOUNDARIES (ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ), в котором описываются геометрические границы области задачи. При помощи FlexPDE в рамках одной задачи могут быть рассмотрены стационарные и нестационарные уравнения одновременно. Число уравнений в системе определяется мощностью компьютера, на котором установлен математический пакет. Уравнения могут быть линейными или нелинейными. Математический пакет решает нелинейные системы методом Ньютона—Рафсона. Может быть задано любое количество геометрических областей для решения с различными свойствами материала. 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. Поэтому вычислительная платформа FlexPDE позволяет решать многие довольно сложные краевые задачи, в том числе нестационарные трехмерные, если возможности компьютера позволяют это сделать.

Радиус области 5 м, радиус блока в 100 раз меньше. Коэффициент теплопроводности зависит от температуры:  $k_l = 30 + 4,5 \cdot 10^{-5} (T - 1350)^2$ , 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 [14—16]. Рассчитанная на ЭВМ по представленной модели 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). Это хорошо видно также из детальной картины процесса, представленной на рис. 2, 3.

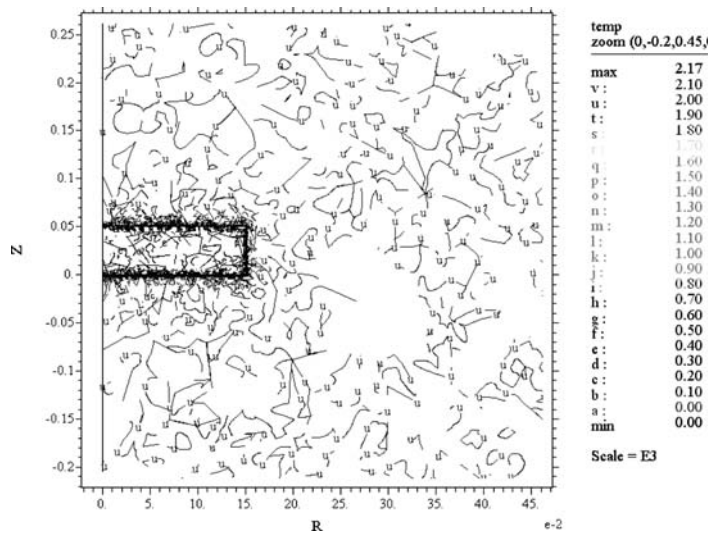


Рис. 2. Начальное распределение поля температур в бассейне расплава в цилиндрической системе координат (R, z)

\* Температурой солидуса называется температура, при которой начинается плавление материала, температурой ликвидуса — температура, при которой оно заканчивается.



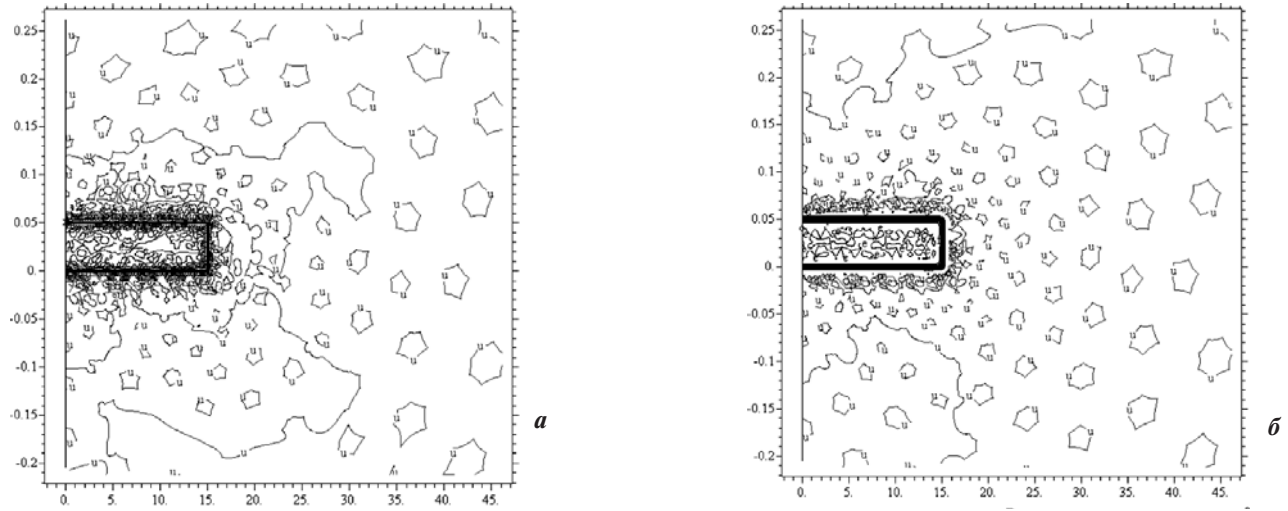


Рис. 3. Детальная картина эволюции поля температур в бассейне в цилиндрической системе координат  $(R, z)$ :  
*a* — по истечении 0,1 с; *б* — по истечении 1 с (шкала та же, что на рис. 2)

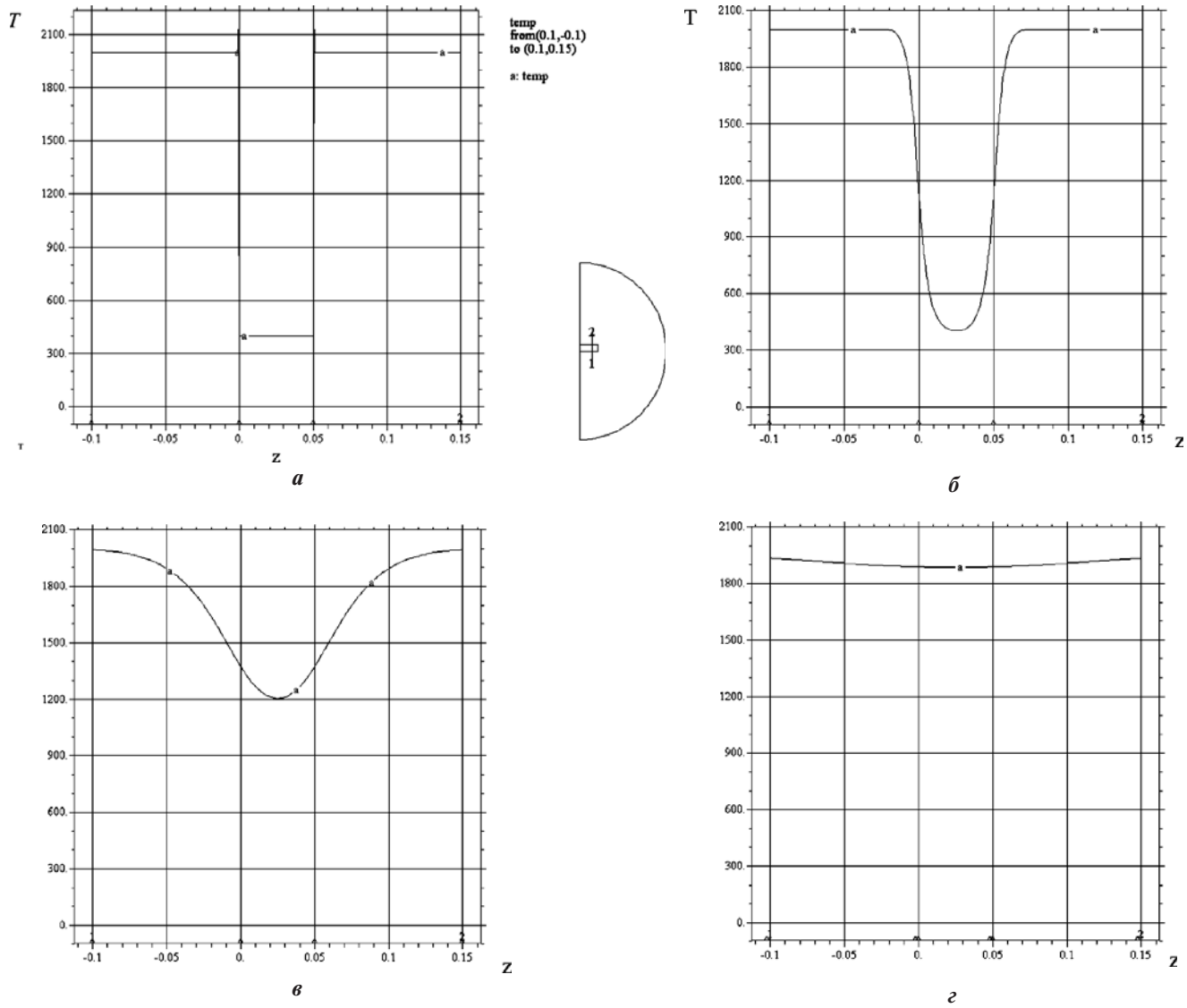


Рис. 4. Изменение температуры  $T$  (линии *a*) в сечении блока (по координате  $z$ ), показанном на сегменте между рисунками *a* и *б*, обозначенном 1–2, в моменты времени:  
*a* — 0,1 с; *б* — 30 с; *в* — 90 с; *г* — 300 с

Затем в течение 10 с температура внутри блока существенно повышается и далее в бассейне расплава медленно падает, а в блоке растет. При этом вначале вокруг блока расплав застывает при более высокой температуре, чем начальная температура блока.

В конце процесса весь блок расплавляется и температура в бассейне выравнивается. Динамика изменения температуры в сечении блока показана на рис. 4, откуда видно, что с 0,1 с температура поверхности блока лишь слегка поднимается, а температура приповерхностного слоя расплава немного падает. И до момента времени 1 с картина сохраняется, область только слегка расширяется.

За 30 с температура внутри блока значительно повышается, минимальная температура достигает 1200 °С. Детальная картина эволюции температурных фронтов показана на рис. 5 и 6, откуда видна интересная особенность поведения системы. Это можно назвать новым явлением радужного расплавления блока в бассейне высокотемпературного расплава с резким завершающим переходом от твердой фазы нагретого блока в расплав.

«Радуга» имеет сначала три отчетливые тонкие зоны, охватывающие блок, и четко обозначенные границы, сви-

детельствующие о том, что эти зоны охватывают блок как многослойная оболочка. А на завершающей стадии, перед расплавлением блока, получаются четыре зоны, соответствующие содержанию твердой фазы примерно 20, 40, 60 и 80 %. Это явление можно объяснить аномалией физических свойств фаз (в частности, коэффициент теплопроводности зависит от температуры), поэтому в каждой образующейся оболочке наивысшие тепловые потоки получаются вдоль оболочки, а не по нормали к ней, между оболочками. Однако пока непонятно, почему их сначала три, а в конце четыре. 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 блока и расплава в бассейне приводит к тому, что расплав значительно охлаждается вблизи блока, вследствие чего начинает застывать, образуя слой твердой фазы вокруг блока. Когда дальнейшее застывание расплава становится невозможным, а расплава много и он еще имеет высокую температуру, начинается обратный процесс расплавления твердой фазы.

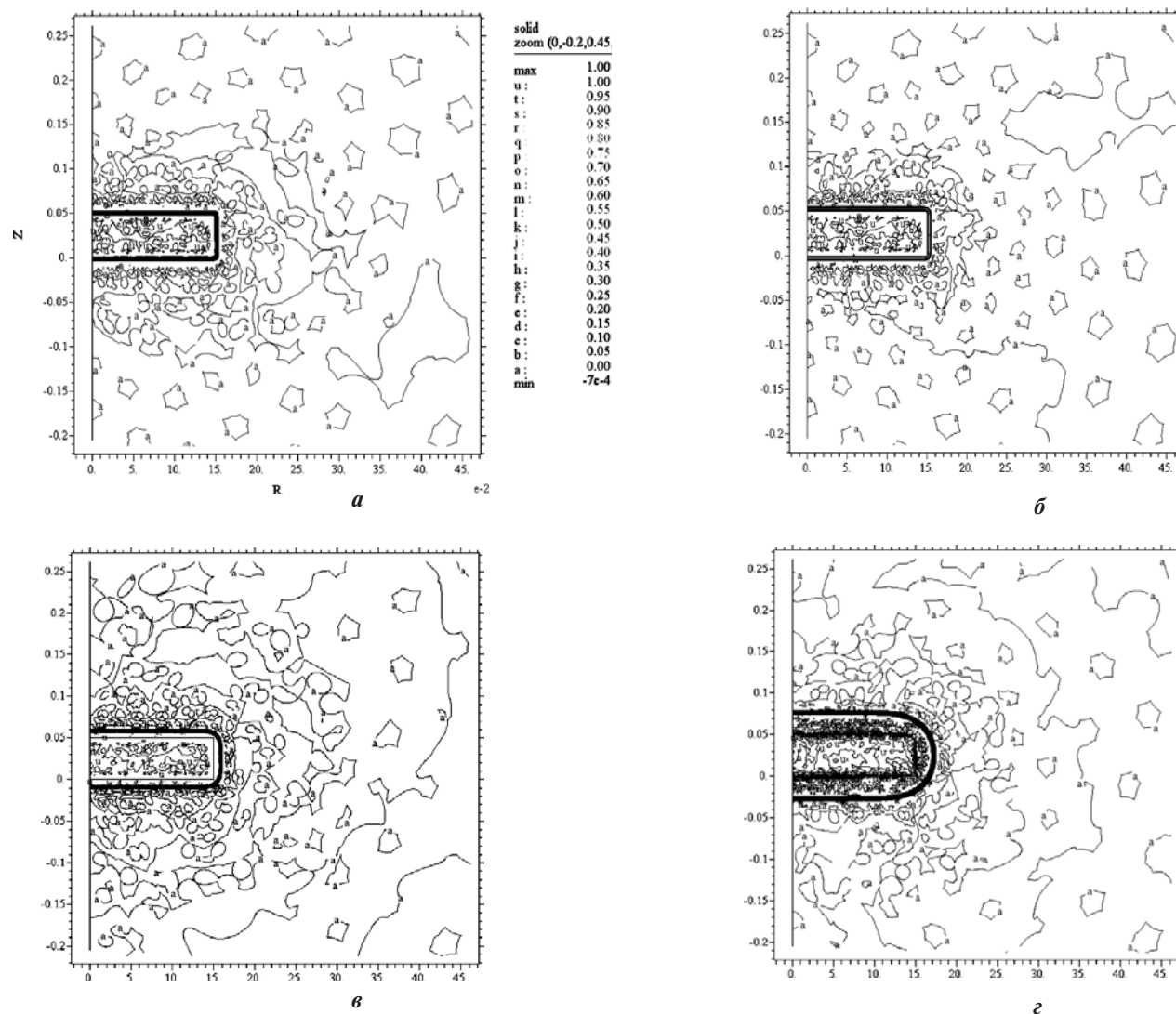


Рис. 5. Распределение содержания твердой фазы и положение границы «твердое тело — расплав» в моменты времени, соответствующие вышеприведенным распределениям температуры в области  $(R, z)$ :  
 $a - 10^{-4}$  с;  $б - 0,1$  с;  $в - 1$  с,  $г - 10$  с

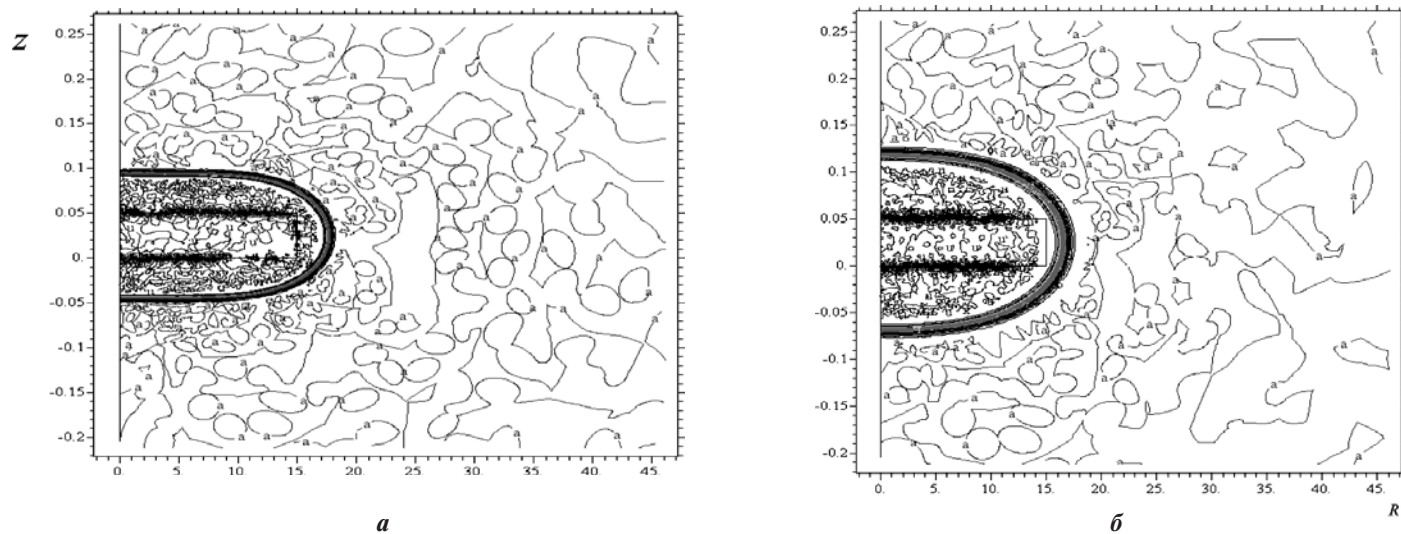


Рис. 6. Эволюция границы фазового перехода. Распределение содержания твердой фазы и положение границы «твердое тело — расплав» в моменты времени:  $a$  — 30 с;  $b$  — 90 с, в координатах  $(R, z)$ , шкала та же, что на рис. 5

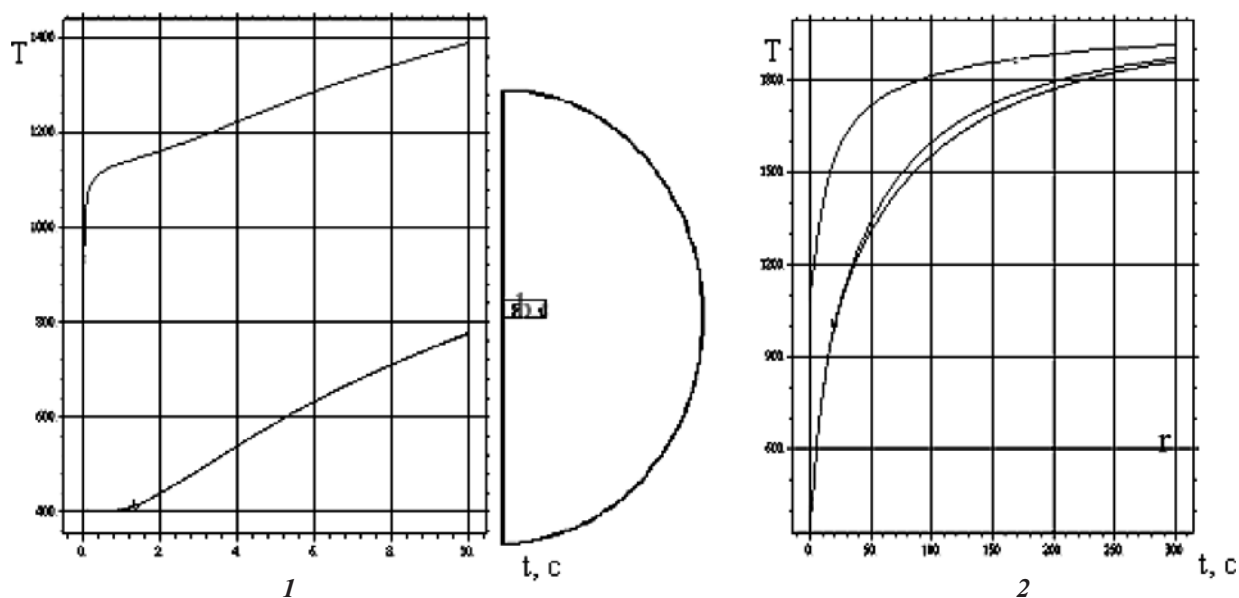


Рис. 7. Изменение температуры блока во времени в трех точках блока, показанных на сегменте, изображенном между рисунками

Моделировалась эволюция системы от начала до полного выравнивания температуры в области. Вначале общая энергия системы уменьшается — 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). Энергия связей высвобождается и общая энергия системы растет вплоть до полного расплавления всей твердой фазы. Когда вся твердая фаза расплавилась, энергия системы не меняется.

На рис. 7 показаны 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  $c$  — на торце блока, в непосредственном контакте с расплавом бассейна.

Из рис. 7 четко видно, что внутри блока в точках  $a, b$  вдали от торца температура практически не меняется в течение секунды, 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  $c$ , только в конце интервала (примерно через 5 мин) температуры в точках  $a, b, c$  становятся близкими, когда система выходит в равновесное состояние.

Изменение содержания твердой фазы в трех указанных точках блока показано на рис. 8, из которого видно, что в точках  $a, b$  твердая фаза постепенно расплавляется только в конце процесса, когда температура во всей области выравнивается. А вот в точке  $c$  на торце блока вначале

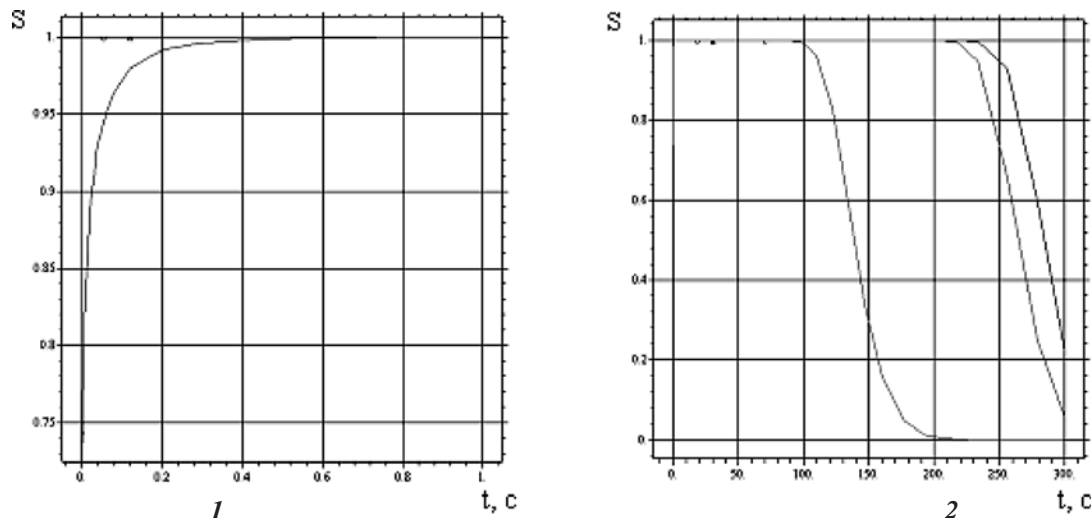


Рис. 8. Изменение содержания твердой фазы во времени в тех же трех точках блока *a, b, c*, обозначенных на сегменте на предыдущем рисунке

до трети материала в пограничном слое расплавляется и вскоре снова застывает. Затем во всех точках равномерно происходит расплавление блока.

#### Выводы

Установлены закономерности процессов плавления—затвердевания в бассейне высокотемпературного расплава, содержащего блок легкоплавкого материала. Хотя данный случай модельный и не соответствует масштабам ловушки кориума в пассивной системе защиты (ПСЗ) от тяжелых аварий, 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. Суть явления состоит в том, что застывание и расплавление блока происходит равномерно, послойно, в три слоя, ввиду преимущественного распространения тепла вдоль слоев, а не нормально к их поверхности раздела. Это новое явление требует углубленного исследования. Полученные результаты будут полезны при решении задачи охлаждения бассейна кориума в пассивных системах защиты от тяжелых аварий на АЭС.

#### Список использованной литературы

1. Али Хасан Могаддам. Моделирование удержания топлива внутри контейнента во время тяжелых аварий на АЭС / Али Хасан Могаддам, И. В. Казачков // Ядерная и радиационная безопасность. — К., 2006. — № 4. — С. 45—60.
2. Али Хасан Могаддам. Модели внедрения расплава кориума в подреакторное пространство с водой / Али Хасан Могаддам, И. В. Казачков // Ядерная и радиационная безопасность. — К., 2007. — № 4. — С. 48—61.
3. Казачков И. В. Моделирование теплогидравлических процессов при тяжелых авариях на АЭС: Монография / И. В. Казачков, Али Хасан Могаддам. — К.: НТУУ «КПИ», 2008. — 172 с.
4. Sehgal B. R. Accomplishments and challenges of the severe accident research / Sehgal B. R. / Nuclear Engineering and Design. — 2001. — Vol. 210. — P. 79—94.

5. Казачков И. В. Современное состояние и некоторые проблемы моделирования тяжелых паварий на зарубежных АЭС / И. В. Казачков // Ядерная и радиационная безопасность. — К., 2003. — № 1. — С. 25—34.
6. Hasan Moghaddam Ali. Modelling of the corium melt interaction with water and vapour during severe accidents at NPP/ Hasan Moghaddam Ali, Kazachkov I. V. // 3<sup>rd</sup> WSEAS Intern. Conferences, Univ. of Cambridge, February, 23–25. — 2008. — P. 71—76.
7. Water boiling on the corium melt surface under VVER severe accident conditions / Bechta S. V., Vitol S. A., Krushinov E. V., Granovsky V. S. et al. // Nuclear Engineering and Design. — 2000. — V. 195. — P. 45—56.
8. Fischer M. The severe accident mitigation concept and the design measures for core melt retention of the European Pressurized Reactor (EPR) / Fischer M. // Nuclear Engineering and Design. — 2004. — V. 230. — P. 169—180.
9. Technical Guidelines for Future Pressurized Water Reactors / IPSN/GRS. — November, 2000. — 65 pp.
10. LYG-X-PD86-29-52260000-TR-0026-E. Оценка классификации устройства локализации расплава активной зоны. — СПб: АЭП, 2000.
11. Alexiades V. Mathematical modelling of melting and freezing processes / Alexiades V., Solomon A. D. — Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1993. — 275 pp.
12. Numerical solution of phase-change problems / Bonacina C., Comini G., Fasano A., Primicerio M. // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 1983. — Vol. 16. — P. 1825—1832.
13. Crank J. Free and moving boundary problems / Crank J. — Oxford University Press, 1984. — 423 pp.
14. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений / Самарский А. А., Галактионов В. А., Курдюмов С. П., Михайлов А. П. — М.: Наука, 1987. — 480 с.
15. Kazachkov I. V. A Model of a Steam Flow through the Volumetrically Heated Particle Bed / Kazachkov I. V. and Konovalikhin M. J. // Int. J. of Thermal Sciences. — 2002. — Vol. 41. — P. 1077—1087.
16. Kazachkov I. V. Dryout Location in a Low-porosity Volumetrically Heated Particle Bed / Kazachkov I. V., Konovalikhin M. J. and Sehgal B. R. // J. of Enhanced Heat Transfer. — 2001. — Vol. 8, no. 6. — P. 397—410.

Получено 19.03.2012.