

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ-ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ПРИ ПОГРУЖЕНИИ БЛОКОВ В РАСПЛАВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КОРИУМА

Али Калванд, И. В. Казачков

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев

Рассмотрено математическое моделирование процесса охлаждения расплава кориума погруженными в него блоками, с фокусом на методике моделирования. Приведены результаты вычислительных экспериментов процесса на ЭВМ и дан их анализ. Полученные результаты позволили сделать выводы относительно основных закономерностей и динамики протекания процесса охлаждения бассейна расплавленного кориума погруженными в него низкоплавкими блоками, что составляет ключевое звено одной из пассивных систем защиты от тяжелых аварий на АЭС.

Ключевые слова: модель, кориум, плавление блоков, затвердевание, охлаждение.

Об актуальности проблемы

Особенности плавления блоков внутри расплава высокотемпературного кориума относятся к одному из наиболее интересных сценариев систем пассивной защиты от тяжелых аварий на АЭС [1 - 5]. Поэтому физика подобных явлений очень интересна для развития безопасности АЭС и систем защиты от аварий. Данная статья посвящена рассмотрению одного из таких явлений, связанному с проблемой охлаждения расплава кориума после его выхода из разрушенного реактора в пространство, содержащее блоки более низкоплавкого материала (например, окисла алюминия) для интенсивного теплосъема расплава кориума.

Физика процессов плавления-затвердевания

Реальные процессы охлаждения-затвердевания и нагревания-расплавления в многокомпонентной многофазной системе при моделировании тяжелой аварии сложны и с учетом изложенного недоступны для точного описания, поэтому их можно моделировать приближенно. Легкоплавкие блоки нагреваются за счет теплоты кориума, который при этом остывает и начинает застывать в отдельных местах. Затем поступающие новые массы расплава кориума могут повторно расплавить уже застывшие массы, которые отдали теплоту на нагревание и расплавление легкоплавких блоков и на нагревание воды с последующим ее испарением и выносом массы и энергии за пределы ловушки кориума. Не вдаваясь в подробности физики описанных процессов, будем моделировать охлаждение и затвердевание кориума в рамках известных классических упрощенных подходов гидродинамики и теплообмена многофазных систем. Цель – установить основные закономерности охлаждения кориума и его удержания в контролируемом тепловом состоянии, что означает удержание целостности контейнента.

Математическая модель системы

Для составления математической модели исследуемых процессов используется система определяющих уравнений переходного процесса плавления-затвердевания материала - уравнения сохранения массы, импульса и энергии. Для учета сил плавучести можно применять приближение Буссинеска. Уравнения в общем виде представляются как

$$\rho_l \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu_l \Delta \vec{v} + \rho_l \vec{g} \beta_l (T_l - T_0),$$

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (1)$$

$$\rho_l c_{pl} \left(\frac{\partial T_l}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T_l \right) = \nabla \cdot (k_l \nabla T_l),$$

$$\rho_s c_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T_s \right) = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s),$$

где ρ_l, μ_l - плотность и динамический коэффициент вязкости жидкой фазы; \vec{v}, p - ее скорость и давление; \vec{g} - вектор ускорения силы тяжести; β_l - коэффициент теплового расширения; T_l - температура расплава; T_0 - заданная характеристическая температура системы; ρ_l, c_{pl}, k_l - плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности расплава твердой фазы; ρ_s, c_s, k_s - плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности твердой фазы соответственно; T_s - температура твердой фазы.

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 ζ_n - координата положения границы фазового перехода (плавления-затвердевания); n - нормаль к поверхности раздела фаз; λ_{sl} - скрытая теплота плавления. В случае затвердевания на границе в уравнении (2) поменяются местами индексы и знак правой части. Если естественная конвекция в расплаве значительная, то формула (2) следует заменить на

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

где α - коэффициент теплоотдачи на границе фазового перехода и ΔT_n - разница температур жидкой и твердой фаз на границе плавления-затвердевания.

Система дифференциальных уравнений (1) с условиями (2) и (3) на границе фазового перехода представляет математическую модель процесса 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. Физические свойства реальных сред зависят от температуры, особенно сильным может быть влияние зависимости теплопроводности от температуры, что иногда приводит к режимам с обострением [9]. Для течения пара в гранулярной среде режимы локального аномального разогрева получены численно [10, 11].

Краевая задача для моделирования процессов плавления-застывания

В проблеме охлаждения расплава за счет плавления более легкоплавкого материала можно ввести в рассмотрение начальную конфигурацию области с погруженным в нее блоком легкоплавкого материала и решать задачу, используя полученную математическую модель. Вычисляя из решения краевой задачи распределение темпера-

туры в области и ее эволюцию с учетом движения границы фазового перехода, получим состояние системы в каждый момент. В простейшем случае, в пренебрежении конвекцией расплава, уравнение теплопроводности жидкой фазы будет

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

где q - источник тепла. Если имеется приток тепла от более горячей области расплава, то температура будет повышаться, а при погружении в расплав более холодного материала расплав будет охлаждаться от него. Скрытая теплота плавления Q_m выделяется при изменении содержания твердой фазы в области с 1 до 0 (охлаждение-застывание):

$$Q_m = \int_0^1 \frac{dH}{dS} dS, \quad \text{или} \quad \frac{dH}{dS} = Q_m$$

$$\text{при} \quad \frac{dH}{dS} = \text{const.}$$

Тогда источник теплоты при застывании расплава будет описываться уравнением

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

где содержание твердой фазы представляется функцией вида $S = 0,5 \operatorname{erfc}((T - T_m)/T_0)$; T_m - температура плавления; T_0 - диапазон температур, в котором происходит расплавление; erfc - функция ошибок. Поскольку здесь нет пространственных производных, можно ввести диффузионный член с малым коэффициентом, действующий как фильтр шума.

Диск холодного материала, погруженный в бассейн расплава

Начальные температуры таковы, что расплав вблизи диска вначале резко охлаждается и застывает, но впоследствии теплота расплава перераспределяется по объему бассейна и все расплавляется, достигая равновесной температуры (более низкой, чем вначале). Внешняя граница области считается теплоизолированной. Если холодных блоков 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 помещен холодный диск так, что границы диска совмещены с координатными линиями расчетной сетки. Уравнения (4) и (5) в цилиндрической системе координат (r, z) записываются для двумерной осесимметричной конфигурации (рис. 1).

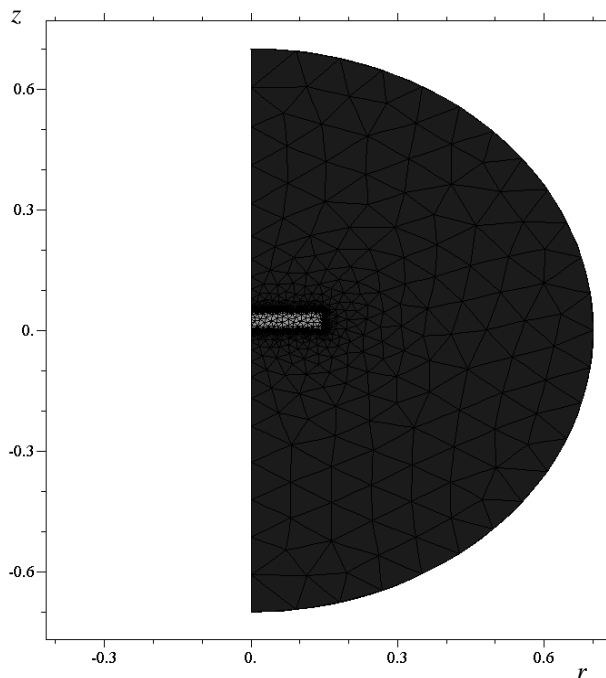


Рис. 1. Диск металла в бассейне высокотемпературного расплава.

Начальная температура расплава кориума принимается равной 2000 °С, температура плавления 1850 °С, а исходная температура диска – 400 °С. В дальнейшем начальные температуры материалов и размеры диска варьируются для моделирования особенностей эволюции тепловых фронтов в области и движения границ раздела жидкой и твердой фаз. Интервал температур плавления принят 20 °С (эвтектика). У эвтектических материалов разница температур ликвидуса и солидуса небольшая, а у неэвтектических – значительная. При температуре солидуса начинается плавление, при температуре ликвидуса заканчивается. Поэтому неэвтектики в широком диапазоне температур (ликвидус-солидус) находятся в неопределенном состоянии (не жидкое и не твердое, кашеобразная масса). В начальный момент времени температура расплава во всей области известна, температура металлического диска 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) и (5), для твердой фазы применяется уравнение (4) с физическими свойствами твердой фазы. Для проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ удобно использовать программную платформу FlexPDE Вольфрамского исследовательского института (США). Она 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. Система исполняет роль вычислительной среды для решения задач, имея набор функций, необходимых для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных:

функция редактирования для подготовки сценариев решения;

генератор сеток конечных элементов в заданной области;

функция подбора конечных элементов при поиске решения задачи;

графическая функция для представления графиков результатов.

Сценарий описания задачи – текстовый файл, содержание которого – ряд разделов, каждый из которых идентифицируется заголовком. Чаще всего используются следующие разделы:

TITLE – заголовок программы;

SELECT – раздел задания параметров задачи;

INITIALVALUES – раздел задания начальных значений для нелинейных задач;

VARIABLES – раздел задания переменных задачи;

DEFINITIONS – раздел задания вспомогательных переменных задачи;

EQUATIONS – раздел задания уравнений;

BOUNDARIES – раздел задания граничных условий;

PLOTS – раздел вывода графических результатов;

END – обозначает конец программы.

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 (см. рис. 2 - 4). Поэтому FlexPDE позволяет решать сложные задачи, даже трехмерные, если возможности компьютера позволяют. На рис. 2, *а* для момента времени примерно 0,9 мкс в расчетной области имеется 11690 узлов и 3314 ячеек. На рис. 2, *б*

для момента времени 30 с в расчетной области уже содержится 14035 узлов и 3981 ячейка, хотя точность вычислений ниже примерно в пять раз (в первом случае максимальная погрешность порядка $3,4 \cdot 10^{-5}$, шаг интегрирования 0,35 мкс, а во втором погрешность $1,74 \cdot 10^{-4}$, шаг интегрирования 4,8 с).

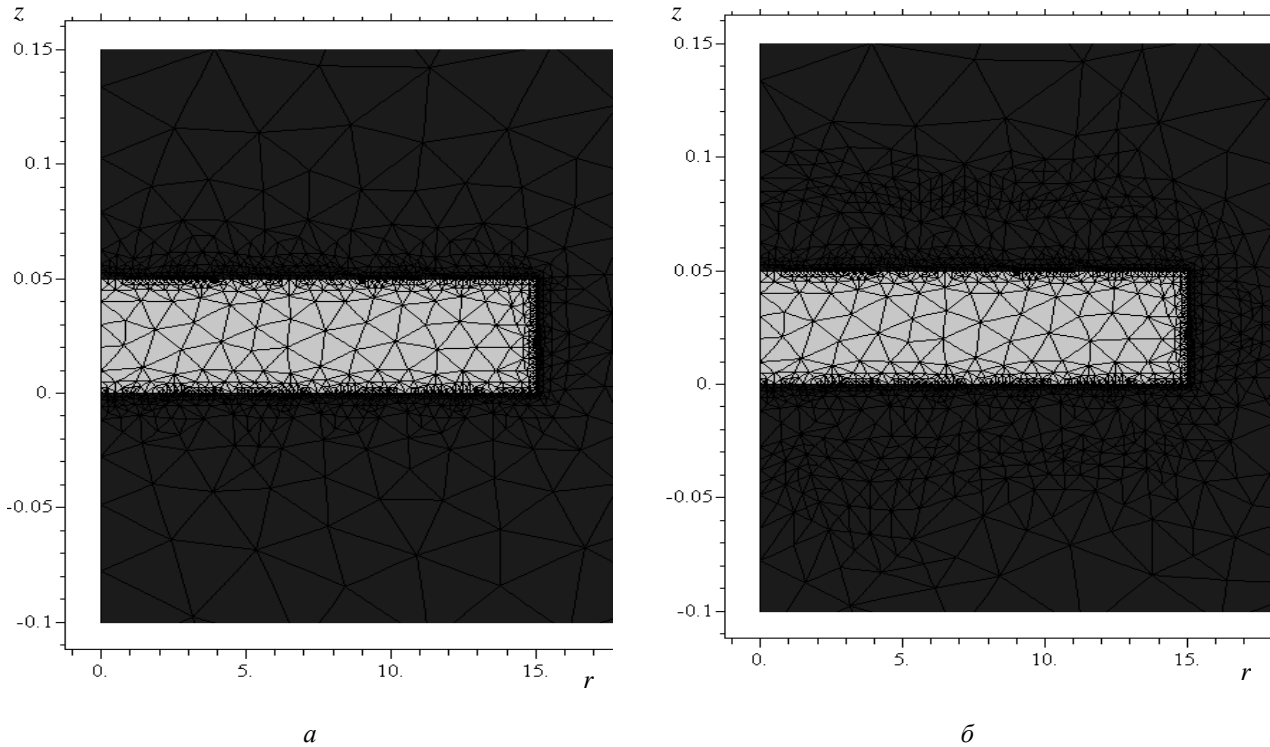


Рис. 2. Адаптивная расчетная сетка: *а* – для момента времени 0,9 мкс; *б* – 30 с.

Радиус области 5 м, диска - в 100 раз меньше. Коэффициент теплопроводности зависит от температуры $k_T = 30 + 4,5 \cdot 10^{-5} (T - 1350)^2$, что вызывает сложное поведение системы. Так, тепловой поток в сторону области с меньшей температурой может быть меньше, чем в сторону области с большей температурой, так как при более высокой температуре выше коэффициент теплопроводности [9 - 11].

На рис. 3 и 4 представлена эволюция поля температур в бассейне расплава с холодным диском для различных моментов времени от начального состояния до 5 мин, когда практически весь диск расплавлен. Примерно до 1 с картина не меняется, хотя на поверхности диска температура практически мгновенно увеличивается с 400 °С до температуры расплава (около 2000 °С). Затем в течение 10 с температура внутри диска существенно повышается и далее в бассейне расплава температура медленно падает, а в диске растет. Вначале вокруг диска расплав застывает при температуре выше начальной температуры

диска. В конце диск расплавляется, и температура в бассейне выравнивается.

Динамика изменения температуры в сечении диска показала, что за 0,1 с температура поверхности диска лишь слегка поднимается, а температура приповерхностного слоя расплава слегка падает. До 1 с картина сохраняется, область лишь слегка расширяется. За 30 с температура внутри диска повышается, минимальная становится 1200 °С.

Особенности поведения системы

Детальная картина эволюции температурных фронтов показана на рис. 5, откуда видна интересная особенность поведения системы. Это можно назвать новым явлением радужного расплавления диска в бассейне высокотемпературного расплава с резким завершающим переходом твердого нагретого диска в расплавленное состояние, смешиваясь с бассейном. Радуга имеет с самого начала отчетливых три тонких зоны, охватывающие диск и четко очерченные границы,

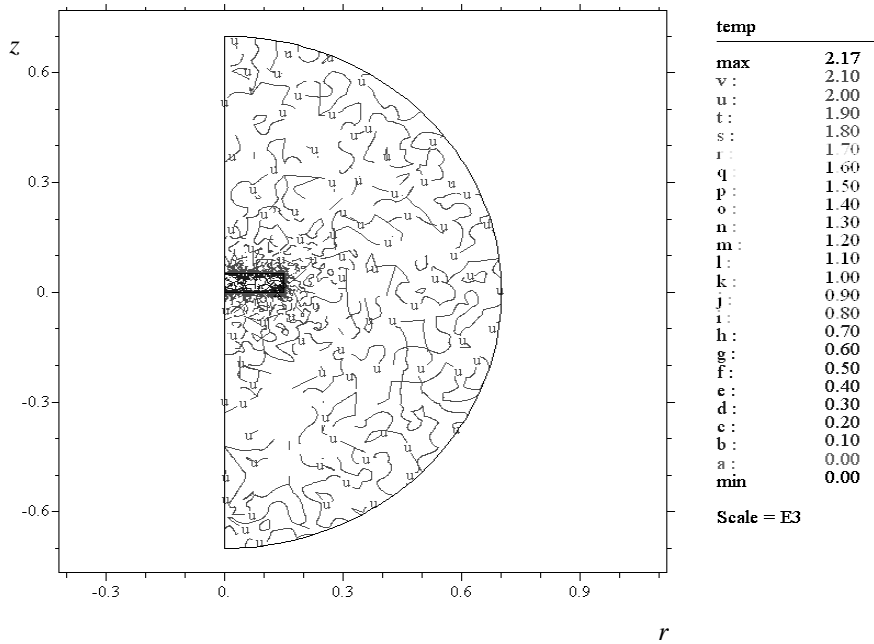


Рис. 3. Начальные температуры в бассейне расплава с холодным диском.

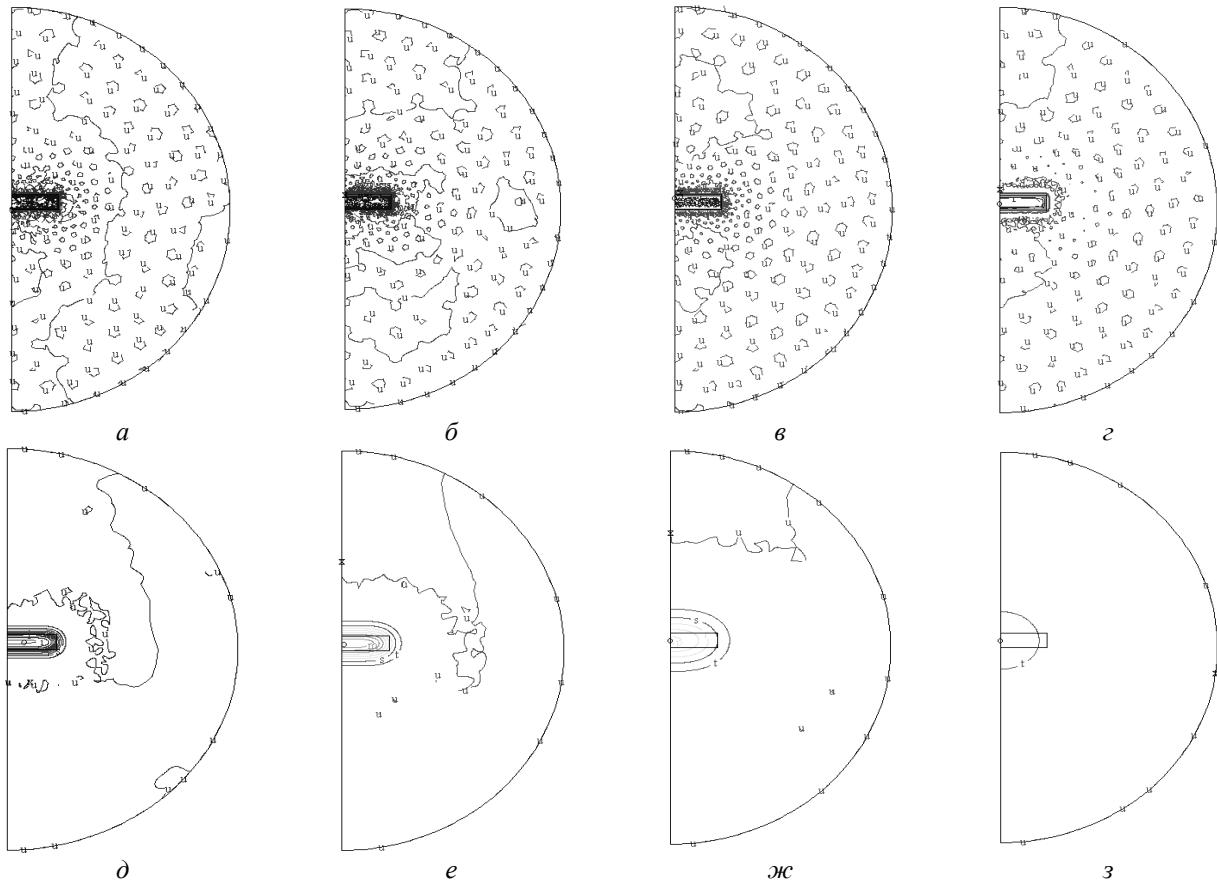


Рис. 4. Эволюция поля температур: а – 10^{-4} с; б – 10^{-2} с; в – 0,1 с; г – 1 с; д – 10 с; е – 30 с; ж – 90 с; з – 300 с.

свидетельствующие о том, что эти зоны охватывают диск как многослойная оболочка. А на завершающей стадии, перед расплавлением диска, получается четыре зоны, соответствующие визуально примерно 20, 40, 60 и 80 % твердой фазы. Это явление можно объяснить аномалией физи-

ческих свойств твердой и жидкой фаз в оболочке диска, заключающейся в том, что теплопроводность определяется температурой и поэтому в каждой образующей оболочке наивысшие тепловые потоки вдоль оболочки, а не по нормали к ней, между оболочками.

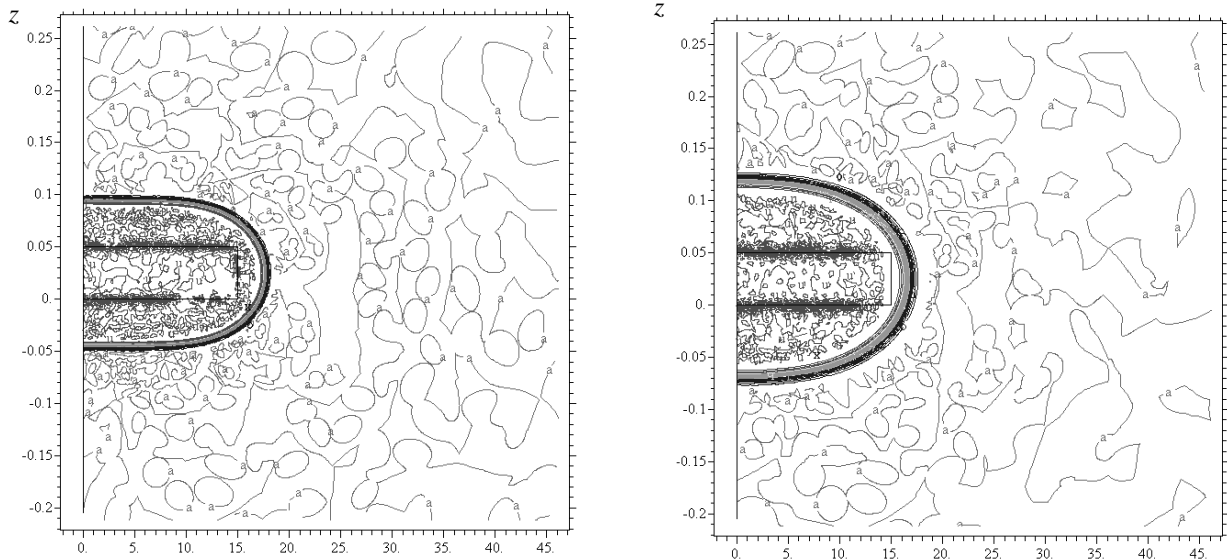


Рис. 5. Эволюция границы фазового перехода в моменты времени 30 с (слева) и 90 с.

Не ясно пока, почему их три, а в конце четыре: это чисто зрительный эффект, связанный с особенностями цветосприятия, или их действительно три и эта дискретность связана с особенностями нелинейной теплопроводности в системе и характером застывания расплава вокруг твердого диска. Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

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

Выводы

Проведенные исследования позволили изучить особенности процессов плавления-затвердевания в бассейне высокотемпературного расплава с блоком низкотемпературного материала.

Хотя рассмотренный случай модельный и не соответствует масштабам ловушки кориума в пассивной системе защиты (ПСЗ) от тяжелых аварий АЭС, однако локально подобные процессы происходят и в ПСЗ, поэтому работа может помочь в понимании важных явлений.

Установлены характерные времена застывания и расплавления металла и явление радужного застывания-расплавления диска в бассейне вследствие нелинейности коэффициента теплопроводности. Суть явления состоит в том, что застывание и расплавление диска происходит равномерно послойно в три слоя. Четкой границы между слоями, по-видимому, не существует, но они определяют равномерное расплавление и застывание по слоям ввиду преимущественного распространения тепла вдоль слоев, а не нормально к их поверхности раздела. Это новое явление требует углубленного исследования.

Полученные закономерности плавления и затвердевания металла и отработанная методика решения краевых задач распространения тепла при охлаждении бассейна расплава за счет погруженных в него «холодных» блоков послужат при решении задачи охлаждения бассейна погружными блоками, снимающими теплоту за счет расплавления и нагрева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казачков И. В., Могаттам А. Х. Моделирование теплогидравлических процессов при тяжелых авариях на АЭС. - К.: НТУУ «КПИ». - 2008. - 172 с.
2. Могаттам А. Х., Казачков И. В. Удержание кориума в контейнменте в тяжелых авариях на АЭС // Энергетика: економіка, технології, екологія. - 2007. - № 2. - С. 13 - 21.
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. Moghaddam A. H., Kazachkov I. V. Modelling of the

- corium melt interaction with water and vapour during severe accidents at NPP/ 3rd WSEAS Int. Conf. (February, 23 - 25, 2008).- Univ. of Cambridge, 2008. - P. 71 - 76.
5. *Asmolov V. V.* Latest findings of RASPLAV Project // Proc. OECD/CSNI workshop on in-vessel core debris retention and coolability. - 1998. - P. 34.
 6. *Срывалин И. Т., Есин О. А., Ватолин Н. А. и др.* К термодинамике жидких металлических сплавов // Физическая химия металлургических процессов: Тр. ИМ УФ АН СССР. - Свердловск, 1969. - Вып. 18. - С. 3 - 44.
 7. *Шуляев Н. К.* Дис. ... д-ра хим. наук / ИМ УрО РАН. - Екатеринбург, 1997. - 337 с.
 8. *Павлов В. В.* О "кризисе" кинетической теории жидкости и затвердевания. - Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1977. - 392 с.
 9. *Самарский А. А., Галактионов В. А., Курдюмов С. П., Михайлов А. П.* Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. - М.: Наука. - 1987. - 480 с.
 10. *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. 41. - P. 1077 - 1087.
 11. *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.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ ПЛАВЛЕННЯ-ЗАТВЕРДІННЯ ПРИ ЗАНУРЕННІ БЛОКІВ У РОЗПЛАВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КОРИУМУ

Алі Калванд, І. В. Казачков

Розглянуто математичне моделювання процесу охолодження розплаву коріуму зануреними в нього блоками, фокусуючись на методиці моделювання. Наведено результати обчислювальних експериментів процесу на ЕОМ та проведено їхній аналіз. Одержані результати дали змогу зробити висновки відносно основних закономірностей та динаміки перебігу процесу охолодження басейну розплавленого коріуму зануреними в нього низькоплавкими блоками, що складають ключову ланку однієї з пасивних систем захисту від тяжких аварій на АЕС.

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

PECULIARITIES OF THE MELTING-SOLIDIFICATION PROCESSES BY SINKING OF THE MELTING BLOCKS INTO HIGH-TEMPERATURE CORIUM MELT

Ali Kalvand, I. V. Kazachkov

Mathematical modeling of the corium melt coolability with the low-temperature melting blocks is a subject of the paper, focusing on the methodology of modeling. The results of a computer simulation and conclusions concerning the features of the process studied are presented. Obtained results allowed making some conclusions concerning the main features and dynamics of the process of corium melt pool cooling with sinking of low-melting temperature blocks into high-temperature pool, which present the key part of the passive protection system against severe accidents at NPP.

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

Поступила в редакцію 07.04.09,
после доработки – 07.07.09.