

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРАТИФИКАЦИИ КОМПОНЕНТ КОРИУМА ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

М.В. Кашеев

ГНЦ РФ- Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Предложена замкнутая модель стратификации, получившая название гомогенно-диффузионной математической модели взаимодействия кориума с корпусом реактора. Разработана гетерогенная математическая модель взаимодействия кориума с корпусом реактора и выполнен анализ возможности ее применения для описания стратификации компонент кориума. В соответствии с результатами расчетов выявлена заметная стратификация смеси. Показано, что полная стратификация, принятая в ряде работ, невозможна. Допущение о полной стратификации является идеализацией, но его можно рассматривать как крайний, предельный случай.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка детального расчетного кода, предназначенного для анализа взаимодействия кориума с внутрикорпусными устройствами и корпусом реактора ВВЭР с учетом его особенностей, связана с решением целого ряда проблем фундаментального характера. В частности, до сих пор не решена проблема стратификации компонент расплава, которая является сложной научной проблемой. Ее решение необходимо для определения распределения энерговыделения и теплофизических свойств смеси по объему расплава, теплоотвода от расплава. Отметим, что термин «стратификация» имеет смысл расслоения, распределения концентрации компонент смеси по ее объему.

В ряде работ, например, [1,2], принимается полная стратификация компонент кориума. Предлагаемая работа посвящена созданию математической модели, описывающей стратификацию компонент кориума. В отличие от строго гомогенной постановки [3] в данной работе рассматривается гомогенная смесь компонент кориума, в которой учитывается диффузия компонент, т.е. гомогенная математическая модель дополняется рассмотрением переноса массы компонент смеси диффузией и конвекцией [4]. Отметим, что основной более легкой компонентой расплава является сталь.

Гетерогенные смеси в общем случае описываются многоскоростной моделью с учетом динамических эффектов из-за несовпадения скоростей фаз. В гетерогенных средах относительное движение фаз определяется не только процессами диффузионного характера, связанного со столкновением и хаотическим движением частиц включений, но и процессами взаимодействия фаз как макроскопических систем, причем они описываются с помощью сил межфазного взаимодействия. Соответственно в предлагаемой работе создана гетерогенная математическая модель и выполнен

анализ возможности ее применения для расчета взаимодействия кориума с корпусом реактора.

ГОМОГЕННО-ДИФFUЗИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Постановка задачи

Исходная система уравнений сохранения массы, импульса и энергии, записанная для смеси компонент кориума в двумерной цилиндрической системе координат, представлена ниже [5].

Уравнение неразрывности для смеси

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0. \quad (1)$$

Уравнения движения для смеси

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = & -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \cdot r \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{V} \right) \right] - \rho g, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = & -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \cdot r \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{V} \right) \right] - \\ & - \frac{\mu}{r} \left[2 \frac{v_r}{r} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{V} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right]. \end{aligned}$$

Распределение концентрации жидкой стали в кориуме описывается уравнением конвективной диффузии

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial c}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial c}{\partial r} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) = & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho D_{rd} \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_{zd} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \\ & + q_{c1,st} + q_{c2,st}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $q_{c1,st}$, $q_{c2,st}$ - источники концентрации стали, обусловленные плавлением стенки корпуса и твердых включений стали.

Уравнение энергии для смеси

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho c_p v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \rho c_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} = & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho (c_{p2} - c_{p1}) \cdot \\ & \cdot \left\{ (T - 273) \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{rd} \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zd} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \right] + D_{rd} \frac{\partial c}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + D_{zd} \frac{\partial c}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right\} + q_v, \end{aligned} \quad (4)$$

где q_v учитывает остаточное тепловыделение и тепло химических реакций.

Для стенки корпуса записывается уравнение нестационарной теплопроводности

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (5)$$

В дальнейшем для величин, относящихся к области смеси, будем использовать индекс 1, а для величин, относящихся к стенке корпуса, - индекс 2.

Граничные условия

- нормальная компонента скорости на верхней поверхности смеси равна нулю

$$v_z = 0; \quad (6)$$

- для касательной компоненты скорости на верхней поверхности смеси имеем условие Марангони

$$\frac{\partial v_r}{\partial z} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{1}{\mu_1} \frac{\partial T_1}{\partial r}, \quad (7)$$

где коэффициент поверхностного натяжения равен

$$\sigma = \sigma_l [1 - b_\sigma (T_1 - T^l)]; \quad (8)$$

- на оси симметрии для скорости v_z выполняется условие симметрии, а скорость v_r равна нулю

$$\frac{\partial v_z}{\partial r} = 0, \quad (9)$$

$$v_r = 0;$$

- на твердых стенках, а также на поверхности фронта плавления накладывается условие прилипания

$$v_z = v_r = 0; \quad (10)$$

- на верхней поверхности смеси

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0; \quad (11)$$

- на твердых стенках

$$c = 0; \quad (12)$$

- теплоотдача от верхней поверхности смеси осуществляется излучением и естественной конвекцией пара

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \alpha_1 (T_1 - T_{out1}) + \varepsilon_{eff1} \sigma_{SB} (T_1^4 - T_{out1}^4); \quad (13)$$

- на наружной поверхности стенки корпуса также ставится граничное условие 3-го рода с учетом излучения

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_2 (T_2 - T_{out2}) + \varepsilon_{eff2} \sigma_{SB} (T_2^4 - T_{out2}^4); \quad (14)$$

- на фронте плавления задается температура плавления стали корпуса и записывается условие для определения положения фронта плавления в любой момент времени

$$T_1 = T_2 = T_{m2}; \quad (15)$$

$$\rho_2 L_{m2} \frac{\partial \xi}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad (16)$$

$$\rho_2 L_{m2} \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}; \quad (17)$$

- на оси симметрии выполняется условие симметрии для температуры

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0. \quad (18)$$

Начальные условия

$$\begin{aligned}
 v_z(0, r, z) &= v_{z0}; \\
 v_r(0, r, z) &= v_{r0}; \\
 p(0, r, z) &= p_0; \\
 c(0, r, z) &= c_0; \\
 T_1(0, r, z) &= T_{10}; \\
 T(0, r^*, z^*) &= T_{m2}; \\
 T_2(0, r, z) &= T_{20}.
 \end{aligned} \tag{19}$$

Замыкающие коэффициенты и функции

Источники концентрации жидкой стали в смеси от плавления стенки по смыслу

$$q_{c1,st} = \frac{\Delta m}{\Delta \tau \Delta V_{mix}} \tag{20}$$

приращение массы жидкой стали Δm за время $\Delta \tau$ в элементарном объеме.

$$q_{c1,st} = \frac{\rho_{st} 2\pi r \Delta \xi \Delta z}{\Delta \tau 2\pi r \Delta r \Delta z} = \frac{\rho_{st} \Delta \xi}{\Delta \tau \Delta r}, \tag{21}$$

где $\Delta \xi$ - приращение ξ за время $\Delta \tau$, ξ - поперечная координата точек фронта плавления, Δr имеет смысл пристенного («прифронтового») шага при конечно-разностной аппроксимации задачи.

Далее

$$q_{c1,st} = \lim_{\substack{\Delta \tau \rightarrow 0 \\ \Delta r \rightarrow 0}} \frac{\rho_{st} \Delta \xi}{\Delta \tau \Delta r} = \rho_{st} \cdot \lim_{\substack{\Delta \tau \rightarrow 0 \\ \Delta r \rightarrow 0}} \frac{\xi(r + \Delta r; \tau + \Delta \tau) - \xi(r, \tau)}{\Delta \tau \Delta r}. \tag{22}$$

Разложим функцию $\xi(r + \Delta r, \tau + \Delta \tau)$ в ряд Тейлора, ограничившись главными членами. Подставив разложение в (22) и проведя преобразования, получим

$$q_{c1,st} = \rho_{st} \frac{\partial^2 \xi(r, \tau)}{\partial r \partial \tau}. \tag{23}$$

В случае кривой стенки

$$q_{c1,st} = \rho_{st} \frac{\partial^2 \xi_N(z, r, \tau)}{\partial N \partial \tau}, \tag{24}$$

где N - нормаль.

Источники концентрации жидкой стали в смеси при плавлении твердых включений стали в жидком кориуме определяются следующим образом.

Рассмотрим ячейку диаметром d_p в которой содержится «крупинка» стали диаметром d_p и смесь объемом ΔV_{mix} с температурой t_{mix} . Выразим объем смеси ΔV_{mix} под-

веденное к «крупинке» стали тепло Q , величину $\Delta m = \frac{Q}{L}$ и воспользуемся соотношением (20). Для $q_{c2,st}$ получим

$$q_{c2,st} = \frac{6d_p^2 \alpha (t_{mix} - t_{m,st}) d_p^3}{L d_p^3 \left(1 - \left(\frac{d_p}{d_c} \right)^3 \right) d_c^3} = \frac{6\alpha (t_{mix} - t_{m,st})}{L d_p} \frac{\varepsilon_c}{1 - \varepsilon_c}, \tag{25}$$

где объемная доля твердой стали $\varepsilon_c = \left(\frac{d_p}{d_c}\right)^3$.

Введем число Нуссельта $Nu = \frac{\alpha d_p}{\lambda_{mix}}$. Выражение для $q_{c2,st}$ примет вид

$$q_{c2,st} = \frac{6Nu\lambda_{mix}(t_{mix} - t_{m,st})}{Ld_p^2} \frac{\varepsilon_c}{1 - \varepsilon_c}. \quad (26)$$

Неопределенными являются Nu , d_p , ε_c .

Если скорости смеси около «крупинки» стали малы (что выполняется), то $Nu=2$ [6].

Текущий размер (изменение во времени) «крупинки» определяется в результате решения задачи Стефана для шара методом Лейбензона. Для затвердевания шара она решена С.С. Ковнером [7]. При плавлении стали время расплавления («крупинки») находится как

$$\tau = \frac{L\rho_{st}(\eta - r_0)^2(2\eta + r_0)}{6\lambda_{mix}(t_{mix} - t_{m,st})r_0}, \quad (27)$$

где r_0 - радиус «крупинки».

Отсюда можно найти $\eta(\tau)$, воспользовавшись методом Вегстейна [8]. Текущая объемная доля стали равна

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 \left(\frac{\eta}{r_0}\right)^3, \quad (28)$$

где $\varepsilon_0 = \varepsilon_c(0)$.

Задав ε_0 и $d=2r_0$, можно получить источник концентрации жидкой стали в смеси при плавлении твердых включений стали в жидком корииуме:

$$q_{c2,st} = \frac{3Nu\lambda_{mix}(t_{mix} - t_{m,st})}{2L\eta^2} \frac{\varepsilon_c}{1 - \varepsilon_c}. \quad (29)$$

Поскольку ε_c пропорциональна η^3 , то $\lim_{\eta \rightarrow 0} q_{c2,st} = 0$.

Коэффициенты диффузии жидкой стали в смеси в задаче о стратификации жидкой стали в корииуме находятся как

$$\begin{aligned} D_{zd} &= 0,056 |v_z| R_0 \text{Re}_z^{-\frac{1}{4}}; \\ D_{rd} &= 0,056 |v_r| R_0 \text{Re}_r^{-\frac{1}{4}}, \end{aligned} \quad (30)$$

где

$$\text{Re}_z = \frac{|v_z| R_0}{\nu_{mix}}, \quad \text{Re}_r = \frac{|v_r| R_0}{\nu_{mix}}.$$

Распределения остаточного энерговыделения, плотности, теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и вязкости, обусловленные стратификацией, по радиусу

и высоте смеси выражаются формулами, полученными и приведенными в [9].

Область решения задачи-половина симметричного сечения цилиндра с эллиптическим днищем.

Для решения задачи используется неявный метод решения уравнений Навье-Стокса в естественных переменных (метод В.К. Артемьева - Н.И. Булеева), разработанный в ГНЦ РФ-ФЭИ [10].

ГЕТЕРОГЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В общем случае проблема многофазного движения в рамках многоскоростной (многожидкостной) модели сводится к заданию условий совместного движения фаз и определению величин, описывающих внутрифазные и межфазные взаимодействия.

В условиях рассматриваемой задачи вследствие слабой нестационарности течения сила Бассэ [11] мала и ее можно не учитывать. Поскольку градиенты скорости несущей среды малы, то сила Магнуса [4] также мала. С учетом того, что плотности несущей среды и жидкости в капле близки, присоединенной массой можно пренебречь [12]. Какие-либо другие эффекты и силы, рассматриваемые в теории, в данном случае тем более заведомо малы или отсутствуют. Таким образом, путем анализа выявлены основные силы, действующие на каплю жидкости и требующие обязательного учета в гетерогенной модели стратификации.

Рассмотрим движение смеси, которое описывается системой уравнений (1-4), и относительное движение более легких компонент (например, жидкой стали). Далее приведем вывод соотношений для определения скоростей рассматриваемой компоненты. Будем рассматривать неподвижную систему координат, ось OZ которой направлена вертикально вверх. Используем 2 закон Ньютона для Δm_{st} . В дальнейшем под Δm_{st} будем понимать $\Delta m_{st} = \rho_{st} \Delta V_{st}$, где $\Delta V_{st} = 4/3 \pi a^3$ - объем капли стали, имеющей форму шара с радиусом a . На основании 2 закона Ньютона

$$\Delta m_{st} \frac{dw_z}{d\tau} = \sum_i F_i, \quad (31)$$

где $\sum_i F_i$ - сумма всех сил, действующих на каплю.

В рассматриваемом случае

$$\sum_i F_i = F_A - F_g - F_\mu, \quad (32)$$

где F_A , F_g , F_μ являются силами Архимеда, тяжести и сопротивления соответственно.

Сила Архимеда выражается как

$$F_A = g \rho_{mix} \Delta V_{st}; \quad (33)$$

сила тяжести

$$F_g = g C \Delta V_{mix}, \quad (34)$$

а сила сопротивления

$$F_\mu = C_\mu \pi a^2 \frac{\rho_{st} w_{st}}{2} \frac{C}{\rho_{st}} \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right). \quad (35)$$

Отметим, что коэффициент сопротивления C_μ определяется в соответствии с [4] следующим образом:

$$C_{\mu} = \begin{cases} \frac{24}{Re_d}, & \text{если } Re_d < 10 \\ 48 \cdot \left(1 - \frac{2.2}{\sqrt{Re_d}}\right) \cdot \frac{1}{Re_d}, & \text{если } Re_d \geq 10, \end{cases} \quad (36)$$

где $Re_d = \frac{2a|w_z|}{v_m}$ - число Рейнольдса капли стали.

Подставляя выражения (34) (35) в уравнение 2 закона Ньютона, принимая во внимание (36) и учитывая, что

$$\frac{\Delta V_{st}}{\Delta V_{mix}} = \frac{C}{\rho_{st}},$$

получим

$$w_z \frac{dw_z}{dz} = g \left(\frac{\rho_{cor}}{\rho_{st}} - 1 \right) \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right) - \frac{3}{8} C_{\mu} \frac{w_z^2}{a} \frac{C}{\rho_{st}} \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right). \quad (37)$$

Перепишем (37) в безразмерном виде:

$$\frac{dW_z^2}{dZ} = \left(\frac{\rho_{cor}}{\rho_{st}} - 1 \right) \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right) - \frac{3}{4} C_{\mu} \frac{R_o W_z^2}{a} \times \frac{C}{\rho_{st}} \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right). \quad (38)$$

Уравнение (38) можно записать следующим образом:

$$\frac{dW_z^2}{dZ} + P_z(C) W_z^2 = Q_z(C), \quad (39)$$

где

$$P_z(C) = \frac{3}{4} C_{\mu} \frac{R_o}{a} \frac{C}{\rho_{st}} \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right), \quad Q_z(C) = \left(\frac{\rho_{cor}}{\rho_{st}} - 1 \right) \left(1 - \frac{C}{\rho_{st}} \right).$$

Уравнение (39) представляет собой линейное дифференциальное уравнение первого порядка относительно W_z^2 . Его решение с учетом того, что $W_z(Z_0)=0$, имеет вид

$$W_z = \sqrt{e^{-\int_{Z_0}^Z P_z dZ'} \left[\int_{Z_0}^Z Q_z e^{\int_{Z_0}^{Z'} P_z dZ'} dZ' \right]}. \quad (40)$$

Абсолютная скорость V_z находится как

$$V_z = W_z + V_{z,mix}. \quad (41)$$

Для определения скорости V_r используем уравнение неразрывности

$$\frac{\partial C}{\partial H_0} + \frac{\partial(CV_z)}{\partial Z} + \frac{\partial(CV_r)}{\partial R} + \frac{CV_r}{R} = 0. \quad (42)$$

Представим (42) в виде

$$\frac{\partial(CV_r)}{\partial R} + P(R)(CV_r) = Q(R,Z), \quad (43)$$

где

$$P(R)=\frac{1}{R}, \quad Q(R,Z)=-\frac{\partial(CV_z)}{\partial Z}-\frac{\partial C}{\partial Ho}.$$

Уравнение (43) аналогично уравнению (39). Его решение

$$V_r=\frac{1}{CR}\int_0^R Q_R R dR. \tag{44}$$

Таким образом, скорости V_z , V_r более легкой компоненты определяются по формулам (40), (41) и (44).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изложенная выше гетерогенная математическая модель взаимодействия кориума с корпусом реактора реализована в виде кода PPRKRS [13] (программа прогнозирования разрушения корпуса реактора с учетом стратификации компонент кориума), разработанного на базе кода ВРКР [5].

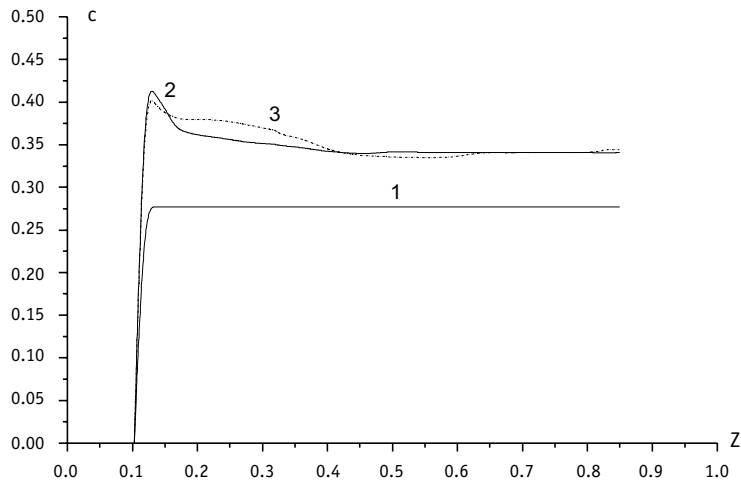


Рис.1. Распределение концентрации по координате Z при R=0,27 в различные моменты времени: 1 - $\tau = 0$; 2 - $\tau = 600$ с; 3 - $\tau = 1200$ с

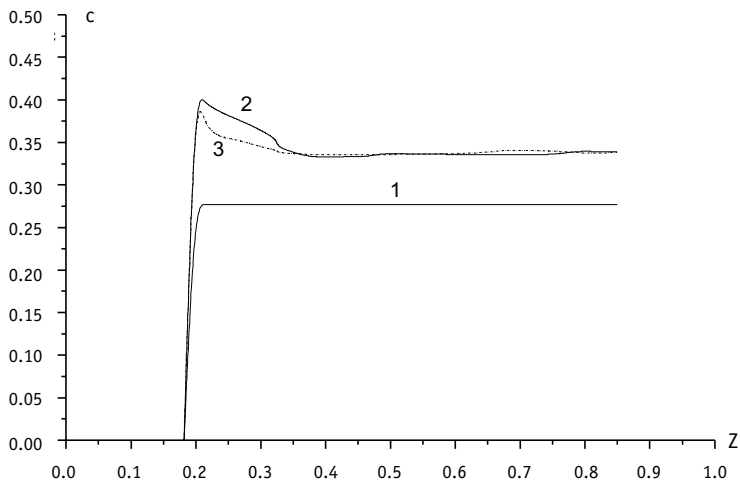


Рис. 2. Распределение концентрации по координате Z при R=0,58 в различные моменты времени: 1 - $\tau = 0$; 2 - $\tau = 600$ с; 3 - $\tau = 1200$ с

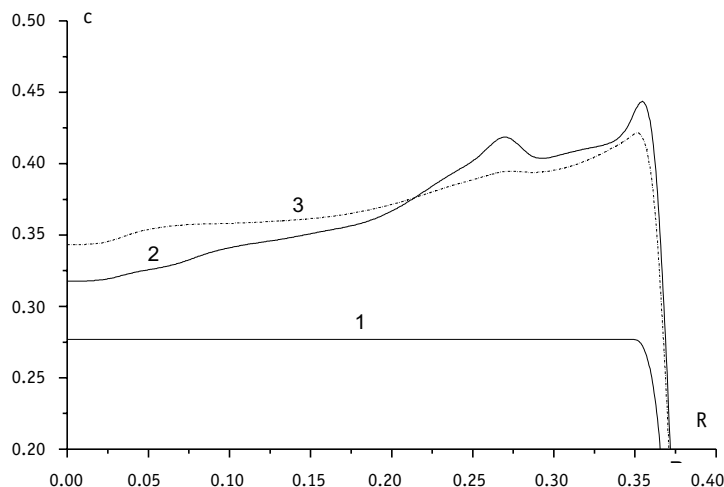


Рис. 3. Распределение концентрации по координате R при $Z=0,18$ в различные моменты времени: 1 - $\tau = 0$; 2 - $\tau = 600$ c; 3 - $\tau = 1200$ c

На рис.1, 2 представлено распределение концентрации жидкой стали по координате Z при $R=0,27$ (рис. 1) и $R=0,58$ (рис. 2) в различные моменты времени. Расчет выполнен для реактора ВВЭР-1000. Из рис.1, 2 следует, что наиболее резкое изменение концентрации имеет место вблизи стенки корпуса, где концентрация изменяется от нуля до максимального значения, которое уменьшается с ростом R и возрастанием времени.

На рис. 3, 4 показано распределение концентрации жидкой стали по координате R при $Z=0,18$ (рис. 3) и $Z=0,85$ (рис. 4, зеркало смеси) в различные моменты времени. При $Z=0,18$ концентрация заметно изменяется с координатой R .

Начальное резкое изменение концентрации во времени обусловлено плавлением включений твердой стали в смеси. После расплавления включений твердой стали прирост концентрации, обусловленный плавлением стенки корпуса, заметен у стенки и незначителен в ядре смеси вследствие конвекции и диффузии.

В целом в соответствии с результатами расчетов наблюдается заметная стратификация смеси. Поскольку согласно формулам [9] q_v свойства смеси зависят от концентрации, то наблюдаемая заметная стратификация окажет существенное влияние

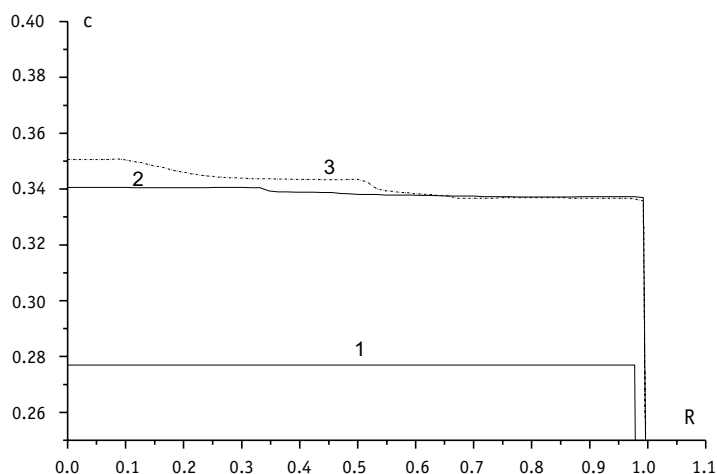


Рис. 4. Распределение концентрации по координате R при $Z=0,85$ в различные моменты времени: 1 - $\tau = 0$; 2 - $\tau = 600$ c; 3 - $\tau = 1200$ c

на температурное поле в смеси и стенке корпуса и, в конечном счете, на проплавление корпуса реактора.

Выполнены расчеты относительной скорости W и поля концентраций жидкой стали при различных радиусах жидкой капли в различные моменты времени. Проведенные расчеты показали, что относительная скорость легкой фазы для приемлемых размеров частицы незначительна по сравнению со скоростью смеси. Изменения от размера частицы заметны, а во времени являются слабыми.

Следовательно, для расчета взаимодействия кориума с корпусом реактора можно использовать гомогенно-диффузионную модель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана гомогенно-диффузионная математическая модель взаимодействия кориума с корпусом реактора при тяжелой аварии.

2. Результаты расчета показали заметную стратификацию смеси, что повлияет на температурное состояние смеси и корпуса реактора.

3. Разработана гетерогенная математическая модель взаимодействия кориума с корпусом реактора.

4. Проведенные расчеты показали, что относительная скорость легкой фазы для приемлемых размеров частицы незначительна по сравнению со скоростью смеси. Следовательно, для расчета взаимодействия кориума с корпусом реактора можно использовать гомогенно-диффузионную модель.

5. В данной работе показано, что полная стратификация, принятая в ряде работ, невозможна. Допущение о полной стратификации является идеализацией, но его можно рассматривать как крайний, предельный случай.

Обозначения:

a - радиус, м; b_σ - параметр; C - концентрация, кг/м³; c - относительная концентрация, $c = C/\rho$; C_μ - коэффициент сопротивления; c_p - изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); c_{p1} - изобарная теплоемкость кориума, Дж/(кг·К); c_{p2} - изобарная теплоемкость стали, Дж/(кг·К); D - коэффициент диффузии, м²/с; d - диаметр, м; F - сила, Н; g - ускорение свободного падения, м/с²; Ho - число гомохронности; L - теплота плавления, Дж/кг; m - масса, кг; N - нормаль; p - давление, Па; q_v - плотность объемного тепловыделения, Вт/м³; R - безразмерная поперечная координата; R_o - внутренний радиус цилиндрической части корпуса, м; r - поперечная координата, м; радиус, м; T - температура, К; T^L - температура ликвидуса, К; V - безразмерная абсолютная скорость; объем, м³; V_z, V_r - безразмерные продольная и поперечная компоненты абсолютной скорости; v - скорость, м/с; $|v|$ - модуль скорости, м/с; v_z, v_r - продольная и поперечная компоненты скорости, м/с; W - безразмерная относительная скорость; W_z - безразмерная продольная компонента относительной скорости; w - относительная скорость, м/с; w_z - продольная компонента относительной скорости, м/с; Z - безразмерная продольная координата; z - продольная координата, м; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); ε_{eff} - приведенная степень черноты; ε - пористость; η - продольная координата точек фронта плавления, м и координата точек фронта плавления «крупинки», м; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); μ - коэффициент динамической вязкости, Па·с; ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с; ξ - поперечная координата точек фронта плавления, м; ρ - плотность, кг/м³; σ - коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; σ_L - коэффициент поверхностного натяжения при температуре ликвидуса, Н/м; τ - время, с.

Индексы: A - Архимеда; c - ячейка; cor - кориум; d - размерный; m - плавление; eff - эффективный; mix - смесь; out - внешний; SB - Стефана-Больцмана; st - сталь; o - начальный.

Литература

1. Kymäläinen O., Tuomisto H., Theofanous T.G. In-vessel retention of corium at the Loviisa plant // Nuclear Engineering and Design. - 1997. - V. 169. - № 1-3. - P. 109-130.
2. Грановский В.С. и др. Удержание расплава кориума в корпусе ВВЭР при тяжелой аварии с разрушением активной зоны // Труды международной конференции "Теплофизика-95". Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР (г. Обнинск, 21-24 ноября 1995 г.) Т. 3. - Обнинск. - С. 191-200.
3. Кащеев М.В., Муранов Ю.В. Математическое моделирование теплообменных процессов при взаимодействии кориума с корпусом реактора: Препринт ФЭИ-2367. - Обнинск, 1994. - 28 с.
4. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1. - М.: Наука, 1987.
5. Долгов В.В., Кащеев М.В., Муранов Ю.В. Моделирование теплового разрушения корпуса реактора при тяжелой аварии на АЭС с реакторами типа ВВЭР // ТВТ. - 1996. - Т. 34. - №5. - С. 770-779.
6. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. - М.: Атомиздат, 1979.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967.
8. Wegstein J.H. Accelerating convergence of iterative processes. Comm. Assoc. Comput. Mach. - 1958. - V. 1. - № 6, 9.
9. Кащеев М.В. Гомогенно-диффузионная математическая модель взаимодействия кориума с корпусом реактора: Препринт ФЭИ-2779. - Обнинск, 1999. - 18 с.
10. Артемьев В.К. Вариант неявного метода для решения системы уравнений Навье-Стокса в естественных переменных: Препринт ФЭИ-1962. - Обнинск, 1989. - 22 с.
11. Bosset A.B. On the motion of a sphere in a viscous liquid // Phil. Trans. Roy. Soc. London. - 1888. - V. 179A. - P. 43-63.
12. Субботин В.И. и др. Решение задач реакторной теплофизики на ЭВМ. - М.: Атомиздат, 1979.
13. Кащеев М.В. Аннотация программы PPRKRS // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2001. - № 2. - С. 84-88.

Поступила в редакцию 16.05.2002

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.586

Modeling of Corium Components Stratification at Severe Accident \ M.V. Kachtcheev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 11 pages, 4 illustrations. – References, 13 titles.

The closed model of the stratification named a homogeneous and diffusion mathematical model of corium interaction with reactor vessel has been proposed. Heterogeneous mathematical model of corium interaction with reactor vessel under severe accident has been developed. The analysis of a possibility of its application for description of the corium components stratification has been made. According to the results of calculations a notable stratification of the mixture is observed. It is shown that the complete stratification, accepted in a number of publications, is impossible. Assumption of complete stratification is idealization, but it can be considered as an extreme, limiting occurrence.

УДК 621.039.54

Simulation of Thermomechanical Behaviour of Fuel Assemblies in the WWER-1000 Reactor Core \ V.M. Troyanov, Y.U. Likhachev, V.I. Folomeev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 5 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.

A description is given for calculating the thermomechanical behaviour of fuel assemblies in the WWER-1000 reactor core. Input data is acquired both by measurement of the in-core FSA bowing during planned refueling as well as by neutronics and thermohydraulic calculations. Approximations, implemented to acquire complete input data needed, and calculation findings are presented. Typical results of the thermomechanics of the core are offered to depict in-core FSAs set bowing taking into account inter-FSAs interaction during their bending due to operation load impact.

УДК 621.039.54

Computational Simulation of Thermomechanical Behaviour of the WWER-1000 Reactor Core under Loss-of-Coolant Accidents \ V.M. Troyanov, Y.U. Likhachev, V.I. Folomeev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 7 pages, 3 illustrations. – References, 4 titles.

Computation philosophy and components for calculating the thermomechanical behaviour of fuel assemblies (FSAs) in the WWER-1000 reactor core under loss-of-coolant accidents (LOCA), accompanied by structure temperature rise, are outlined. Situations with applied external loads (loading by a spring unit and by inter-FSAs interaction forces) are reviewed for elastic and viscous/plastic structure straining, induced softening under elevated temperature and accelerated thermal creep. The problem is featured by non-isothermal loading mode, therefore dedicated computation procedures should be implemented. The FSAs straining is analyzed within a set contributing to the reactor core; inter-FSAs interaction is taken into consideration [1, 2, 3].

УДК 621.039.54

The Procedure for Calculating Seismic Impact on THE WWER-1000 Reactor Core \ V.M. Troyanov, Y.U. Likhachev, V.I. Folomeev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 8 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 6 titles.

Simulating calculation procedure and findings for straining the WWER-1000 reactor core under horizontal seismic impact are presented. Major statements, based on a linear-spectral method, are outlined. 3-D calculation of straining the in-core FSAs set has been carried out by implementing the RENDEZVOUS-S code.