

УДК 536.422

**МОДЕЛЬ ОЧАГОВОГО ХИМИЧЕСКОГО РЕАГИРОВАНИЯ
ЖИДКОГО АГЛОМЕРАТА КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ
НА ПОВЕРХНОСТИ КОКСУЮЩИХСЯ
ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ***В. А. Бураков**НИИ прикладной математики и механики,
634050 Томск*

Представлена новая математическая модель одностороннего очагового химического реагирования и эволюции жидкого агломерата конденсированной фазы оксидов металлов на поверхности коксующихся теплозащитных материалов многосоставных стенок. В рамках локально-одномерной модели проведено параметрическое численное исследование нестационарного прогресса и уноса массы при одностороннем очаговом химическом реагировании газожидкостного агломерата конденсированной фазы оксида алюминия с резиноподобным теплозащитным материалом в характерных условиях застойных зон высокотемпературной двухфазной среды.

При взаимодействии высокотемпературных двухфазных потоков с разрушающимися (аблирующими) теплозащитными материалами (ТЗМ) инерционно осаждающиеся жидкие частицы конденсированной фазы (к-фазы) оксидов металлов оказывают дополнительное тепловое, химическое и механическое воздействие, приводящее к повышенному уносу массы и в ряде случаев — аномальным режимам работы энергоустановок. Здесь важную роль играют механизмы капельного, очагового и пленочного химического реагирования жидких частиц к-фазы с разрушающимися ТЗМ [1]. В работах [2, 3] исследовался механизм капельного химического реагирования на основе континуальной диффузионно-кинетической модели термохимического разрушения углеграфитовых и углепластиковых ТЗМ в высокотемпературном двухфазном потоке, содержащем активные кислородсодержащие компоненты (H_2O , CO_2 и др.).

Статья посвящена математическому моделированию одностороннего очагового химического реагирования и эволюции жидкого агломерата к-фазы оксидов металлов на поверхности коксующихся ТЗМ многосоставных стенок.

В соответствии с физической моделью [1], очаговое химическое взаимодействие связано с образованием крупных агломератов («слитков») жидкой к-фазы на поверхности коксующихся ТЗМ многосоставных стенок в условиях малых массовых потоков осаждающихся инерционно полидисперсных жидких частиц к-фазы. В местах расположения агломератов появляются локальные углубления (очаги), характерные для застойных зон высокотемпературной двухфазной среды, где определяющим является контактно-радиационный теплоперенос. Возникновение очагов связывается с протеканием эндотермической химической реакции восстановления твердым углеродом обугленного слоя жидких оксидов металлов в статических условиях непрерывного контакта фаз. В жидком агломерате к-фазы, который постепенно увеличивается в размерах, происходит барботаж газообразных продуктов химической реакции восстановления и термодеструкции органического связующего. В этой связи жидкий агломерат к-фазы как объект исследования относится к газожидкостным системам [4].

Рассматривается пузырьковый режим барботажа газообразных продуктов через жидкий агломерат к-фазы оксидов металлов на поверхности

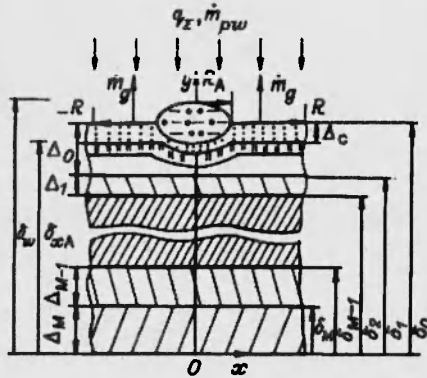


Рис. 1. Физическая схема одностороннего очагового химического реагирования газожидкостного агломерата к-фазы на поверхности коксующихся ТЗМ многосоставных стенок.

обугленного слоя с мелкопористой структурой, характерной для повышенных давлений. При пузырьковом барботаже размеры газовых пузырьков изменяются вследствие их сжатия или расширения в зависимости от распределения давления и температуры по толщине жидкого слоя. В результате конвекции газовые пузырьки охлаждают жидкий агломерат к-фазы. Физическая схема одностороннего очагового химического реагирования показана на рис. 1.

Учитывая сложную физическую природу гидродинамических, тепло- и массообменных и физико-химических процессов очагового химического реагирования, вводятся следующие основные допущения:

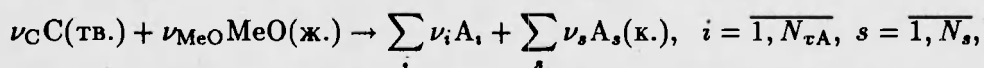
1) выполняются два основных допущения механики многофазных смесей [4]. Жидкий агломерат к-фазы рассматривается в приближении двухфазной, двухскоростной, однотемпературной, $(N_g + N_{xA} + 1)$ -компонентной газожидкостной среды;

2) задача динамики очагового химического реагирования газожидкостного агломерата к-фазы оксидов металлов на поверхности коксующихся ТЗМ многосоставных стенок решается в плоской двумерной постановке для застойной зоны высокотемпературной двухфазной среды, где можно пренебречь трением, конвективным теплопереносом и диффузией;

3) агломерат к-фазы представляет собой сложное тело вращения, состоящее из двух частей, ограниченных свободной поверхностью и поверхностью очага химического реагирования, имеющих общий, переменный во времени радиус экваториальной плоскости. Задача симметрична относительно оси $x = 0$;

4) рассматривается режим эволюции жидкого агломерата к-фазы на поверхности коксующихся ТЗМ при осаждении полидисперсных жидких частиц к-фазы, разбитых предварительно на конечное число фракций с одинаковым размером частиц, когда их массовый секундный приход больше секундного расхода вследствие протекания химической реакции восстановления. Механический унос массы агломерата отсутствует;

5) термохимический унос массы коксующихся ТЗМ происходит по суммарной гетерогенной реакции прямого восстановления в контакте углерод обугленного слоя — расплав, которая описывается эффективной кинетической реакцией и следующим стехиометрическим уравнением:



где MeO , A_i , A_s — условные химические символы оксидов металлов, газообразных и конденсированных продуктов реакции восстановления; ν_C , ν_{MeO} , ν_i , ν_s — стехиометрические коэффициенты; N_{xA} , N_s — число газообразных и конденсированных компонентов реакции восстановления;

6) газовая фаза в жидком агломерате состоит из континуума пузырьков, содержащих смесь газообразных продуктов термодеструкции органического связующего и химической реакции восстановления;

7) поверхностный унос коксующихся ТЗМ в областях, не покрытых жидким агломератом к-фазы, отсутствует;

8) между жидким агломератом к-фазы и коксующимся ТЗМ, а также между слоями плоской многосоставной стенки выполняются условия идеального теплового контакта;

9) процессы тепло- и массопереноса в коксующихся ТЗМ описываются в рамках общих законов сохранения двухфазной, $(N_g + 1)$ -компонентной, однотемпературной, изотропной, недеформируемой, пористой реагирующей среды [5, 6].

Математическое моделирование гидродинамических, тепло- и массообменных и физико-химических процессов очагового химического реагирования газожидкостного агломерата к-фазы оксидов металлов на поверхности коксующихся ТЗМ многосоставных стенок, с учетом условия симметрии задачи, проводится в области $(x, y) \in \Omega$, $t > 0$ (см. рис. 1):

$$\Omega = \Omega_a + \Omega_0 + \sum_m \Omega_m, \quad m = \overline{1, M},$$

$$\Omega_a = \{x \in (0, R_A(t)), y \in (\delta_{xA}(x, t), \delta_w(x, t))\},$$

$$\Omega_0 = \{x \in (0, R), y \in (\delta_1, \delta_{xA}(x, t)), y \in (\delta_1, \delta_0)\},$$

$$\Omega_m = \{x \in (0, R), y \in (\delta_{m+1}, \delta_m)\},$$

где $y = \delta_w(x, t)$ — текущее положение подвижной свободной границы жидкого агломерата к-фазы; $y = \delta_{xA}(x, t)$ — текущая форма очага химического реагирования; $R_A(t)$ — радиус экваториальной плоскости жидкого агломерата к-фазы; R — граница области интегрирования по оси x ; M — число разнородных инертных материалов многосоставной стенки.

В рамках перечисленных допущений плоские двумерные нестационарные уравнения Навье — Стокса в газожидкостном агломерате к-фазы имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial x} [(1 - \Phi)\rho_L u_L] + \frac{\partial}{\partial y} [(1 - \Phi)\rho_L v_L] = 0, \quad (1)$$

$$(1 - \Phi)\rho_L \frac{d_1 u_L}{dt} = -(1 - \Phi) \frac{\partial p_L}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - F_x, \quad (2)$$

$$(1 - \Phi)\rho_L \frac{d_1 v_L}{dt} = -(1 - \Phi) \frac{\partial p_L}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_y}{\partial y} + F_y - F_{L,y} - F_{p,y}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Phi \rho_G) + \frac{\partial}{\partial x} (\Phi \rho_G u_G) + \frac{\partial}{\partial y} (\Phi \rho_G v_G) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Phi \rho_G K_{i,G}) + \frac{\partial}{\partial x} (\Phi \rho_G u_G K_{i,G}) + \frac{\partial}{\partial y} (\Phi \rho_G v_G K_{i,G}) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (N u_G) + \frac{\partial}{\partial y} (N v_G) = 0, \quad (6)$$

$$\Phi \rho_G \frac{d_2 u_G}{dt} = -\Phi \frac{\partial p_L}{\partial x} - F_x, \quad (7)$$

$$\Phi \rho_G \frac{d_2 v_G}{dt} = -\Phi \frac{\partial p_L}{\partial y} - F_y - F_{G,y}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} (\rho c)_\Sigma \frac{\partial T}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_\Sigma \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_\Sigma \frac{\partial T}{\partial y} \right) - [(1 - \Phi) \rho_L u_L c_L + \Phi \rho_G u_G c_{pG}] \frac{\partial T}{\partial x} - \\ & - [(1 - \Phi) \rho_L v_L c_L + \Phi \rho_G v_G c_{pG}] \frac{\partial T}{\partial y} + (1 - \Phi) \frac{d_1 p_L}{dt} + \Phi \frac{d_2 p_L}{dt} + \sigma'_x \frac{\partial u_L}{\partial x} + \\ & + \tau_{xy} \left(\frac{\partial u_L}{\partial y} + \frac{\partial v_L}{\partial x} \right) + \sigma'_y \frac{\partial v_L}{\partial y} + F_x (u_L - u_G) + F_y (v_L - v_G), \quad (9) \end{aligned}$$

$$p_G = \rho_G R T \sum_i \frac{K_{i,G}}{m_i}, \quad (10)$$

$$\sum_i K_{i,G} = 1, \quad i = \overline{1, N_g + N_{xA}}, \quad \frac{d_2}{dt} (d_G) = w_R, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (1 - \varphi_1) d_G \frac{d_2}{dt} (w_R) = & 2 \left(\frac{p_G - p_L - 4\sigma_L/d_G}{\rho_L} \right) - 16 \frac{\mu_L w_R}{\rho_L d_G} - \\ & - 3(1 - \varphi_2) w_R^2 + (1 - \varphi_3) \left[\frac{(u_G - u_L)^2 + (v_G - v_L)^2}{2} \right], \quad (12) \\ & (x, y) \in \Omega_a, \quad t > 0. \end{aligned}$$

Здесь u, v, p, ρ — составляющие скорости по осям, давление и истинная плотность; T — температура; $K_{i,G}, m_i$ — массовая концентрация и молекулярная масса i -го газообразного компонента; N — число пузырьков в единице объема; w_R — скорость радиального перемещения жидкости на поверхности пузырька; d_G — диаметр пузырьков газа; $\Phi = (\pi/6) \cdot d_G^3 N$ — объемная доля пузырьков газа; c — удельная теплоемкость; λ — коэффициент теплопроводности; N_g — число газообразных компонентов продуктов термодеструкции. Индексы L и G относятся к жидкой и газовой (пузырьки) фазам, Σ — к эффективным характеристикам.

Субстанциональные производные, связанные с движением жидкой (d_1/dt) и газовой (d_2/dt) фаз, компоненты тензора вязких напряжений $\sigma'_x, \tau_{xy}, \sigma'_y$, записанные через среднеобъемные скорости течения смеси, соответствуют [4]. Составляющие среднеобъемной силы сопротивления F_x, F_y , возникающей при движении континуума пузырьков в слое жидкости, среднеобъемная массовая сила, действующая на жидкую фазу, и континуум пузырьков в нормальном направлении $F_{L,y}$ и $F_{G,y}$, а также подъемная сила $F_{p,y}$, обусловленная переменной плотностью жидкой фазы, могут рассматриваться по зависимостям [4], как и поправочные коэффициенты $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, учитывающие конечное объемное содержание и множественность пузырьков в смеси.

В рамках принятых допущений двумерная нелинейная система нестационарных уравнений тепло- и массопереноса в коксующихся ТЗМ многокомпонентных стенок под жидким агломератом к-фазы и в прилегающей к нему области $(x, y) \in \Omega_0$ и $(x, y) \in \Omega_m, t > 0$, записываются известным образом на основе [5, 6].

Для единственности решения системы уравнений (1)–(12) выставляются граничные условия сохранения потоков массы, импульса и энергии на подвижной свободной поверхности при осаждении полидисперсных

жидких частиц к-фазы и во фронте очагового химического реагирования:

$$y = \delta_w(x, t), \quad 0 < x < R_A(t) :$$

$$(1 - \Phi_w) \rho_{L,w} \left(\frac{\partial \delta_w}{\partial t} - v_{L,n} \right) = \sum_j \dot{m}_{pw,j}, \quad j = \overline{1, N_{pw}},$$

$$p_{L,w} + (1 - \Phi_w) \rho_{L,w} \left(\frac{\partial \delta_w}{\partial t} - v_{L,n} \right) v_{L,n} + \sigma'_y (\cos^2 \beta_w - \sin^2 \beta_w) - \\ - 2\tau_{xy} \sin \beta_w \cos \beta_w = p_w + \sum_j \dot{m}_{pw,j} V_{pw,j} + p_\sigma,$$

$$(1 - \Phi_w) \rho_{L,w} \left(\frac{\partial \delta_w}{\partial t} - v_{L,n} \right) u_{L,\tau} + \tau_{xy} (\cos^2 \beta_w - \sin^2 \beta_w) - \\ - 2\delta'_x \sin \beta_w \cos \beta_w = \sum_j \dot{m}_{pw,j} \ddot{U}_{pw,i}, \quad (13)$$

$$(1 - \Phi_w) \rho_{L,w} \left(\frac{\partial \delta_w}{\partial t} - v_{L,n} \right) \left(h_{L,w} + \frac{u_{L,w}^2 + v_{L,w}^2}{2} \right) + (\tau_{xy} \cos \beta_w - \sigma'_x \sin \beta_w) u_{L,\tau} + \\ + (\sigma'_y \cos \beta_w - \tau_{xy} \sin \beta_w) v_{L,n} + \lambda_\Sigma \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\delta_w=0} + \dot{m}_G \left(h_w + \frac{u_w^2 + v_w^2}{2} \right) = \\ = \sum_j \dot{m}_{pw,j} \left(h_{pw,j} + \frac{U_{pw,j}^2 + V_{pw,j}^2}{2} \right) + \dot{m}_G \left(h_G + \frac{u_G^2 + v_G^2}{2} \right) + q_r,$$

$$\Phi_w \rho_{G,w} \left(\frac{\partial \delta_w}{\partial t} + v_{G,n} \right) = \dot{m}_G;$$

$$y = \delta_{xA}(x, t), \quad 0 < x < R_A(t) :$$

$$(1 - \Phi_k) \rho_{L,k} \left(\frac{\partial \delta_{xA}}{\partial t} - v_{L,n} \right) = \left(\frac{\nu_{MeO} m_{MeO}}{\nu_C m_C} \right) \dot{m}_{xA},$$

$$u_{L,\tau} \Big|_{\delta_{xA}+0} = 0,$$

$$\lambda_\Sigma \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\delta_{xA}+0} = \lambda_{\Phi} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\delta_{xA}-0} + \dot{m}_{xA} \Delta H_{xA},$$

$$T \Big|_{\delta_{xA}+0} = T \Big|_{\delta_{xA}-0} = T_k(x, t),$$

$$\Phi_k \rho_{G,k} \left(\frac{\partial \delta_{xA}}{\partial t} + v_{G,n} \right) = \Theta_k \rho_{g,k} \left(\frac{\partial \delta_{xA}}{\partial t} + v_{g,n} \right) + \\ + \left(1 + \frac{\nu_{MeO} m_{MeO}}{\nu_C m_C} - \sum_s \frac{\nu_s m_{As}}{\nu_C m_C} \right) \dot{m}_{xA}, \quad (14)$$

$$u_G \Big|_{\delta_{xA}+0} = u_{G,k}, \quad v_G \Big|_{\delta_{xA}+0} = v_{G,k},$$

$$p_G \Big|_{\delta_{xA}+0} = p_{L,k} + 4\sigma_L/d_{G,k},$$

$$\begin{aligned}
 K_{i,G} \Big|_{\delta_{xA+0}} &= K_{i,g} \Big|_{\varepsilon_{xA-0}}, & i &= \overline{1, N_g}, \\
 K_{i,G} \Big|_{\delta_{xA+0}} &= K_{i,xA}, & i &= \overline{1, N_{xA}}, \\
 N \Big|_{\delta_{xA+0}} &= N_k, \\
 d_G \Big|_{\delta_{xA+0}} &= d_{G,k}, & w_R \Big|_{\varepsilon_{xA+0}} &= w_{R,k},
 \end{aligned}$$

где $u_{L,\tau}$, $v_{L,n}$ — касательная и нормальная составляющие скорости жидкой фазы на свободной поверхности; $\dot{m}_{pw,j}$, $U_{pw,j}$, $V_{pw,j}$, $h_{pw,j}$ — массовый поток, касательная и нормальная составляющие, энтальпия жидких частиц к-фазы j -й фракции при инерционном осаждении на свободную поверхность; h — энтальпия; $p_{L,k}$, p_σ — гидростатическое и капиллярное давления; σ_L — коэффициент поверхностного натяжения; q_r — радиационный поток тепла; \dot{m}_{xA} , ΔH_{xA} — массовая скорость и удельный тепловой эффект очагового химического реагирования; m — молекулярная масса; N_{pw} — число фракций осаждающихся инерционно полидисперсных частиц к-фазы; индексы w , xA , k относятся к условиям на свободной поверхности, во фронте очагового химического реагирования и контактах соответственно.

Кроме того, выставляются граничные условия на поверхности ТЗМ, не занятой агломератом ($y = \delta_0$, $R_A(t) < x < R$), в контактах между материалами ($0 < y \leq \delta_1$, $0 \leq x \leq R$) и на наружной поверхности ($y = 0$, $0 \leq x \leq R$), а также на оси симметрии ($\delta_{xA} < y < \delta_w$, $\delta_1 < y < \delta_{xA}$, $0 < y < \delta_1$, $x = 0$) и границе области интегрирования по оси x (см. рис. 1). Решение системы уравнений (1)–(12) проводится при соответствующих начальных условиях.

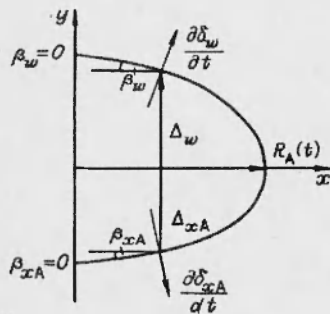


Рис. 2. Схема агломерата к-фазы в разрезе.

Интегро-дифференциальное уравнение макроскопического баланса массы увеличивающегося в размерах газожидкостного агломерата к-фазы с учетом того, что полный поток жидкости в любом сечении равен нулю, имеет вид (рис. 2)

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho_{L,w}(1 - \bar{x}_w)}{\cos \beta_w} \frac{\partial \delta_w}{\partial t} &= \frac{\rho_{L,k}(1 - \Phi_k)}{\cos \beta_{xA}} \frac{\partial \delta_{xA}}{\partial t} + \\
 &+ \frac{\sum_j \dot{m}_{pw,j}}{\cos \beta_w} - \frac{\left(\frac{\nu_{MeO} m_{MeO}}{\nu_C m_C} \right) \dot{m}_{xA}}{\cos \beta_{xA}}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

Для практических целей уравнение (15) удобно расщепить на два с граничными и начальными условиями: уравнение фронта очагового химического реагирования (разгара лунки) и уравнение свободной поверхности, которые и определяют эволюцию газожидкостного агломерата к-фазы на поверхности коксующихся ТЗМ (см. рис. 2):

$$\frac{\partial \Delta_{xA}}{\partial t} = \frac{\dot{m}_{xA}}{\rho_s(1 - \Theta_k)} \left[1 + \left(\frac{\partial \Delta_{xA}}{\partial x} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad 0 < x < R_A(t),$$

$$\frac{\partial \Delta_{xA}}{\partial x}(0, t) = 0, \quad (16)$$

$$\Delta_{xA}(x, 0) = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_w}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{L,w}(1-\Phi_w)} \left\{ \left[1 + \left(\frac{\partial \Delta_w}{\partial x} \right)^2 \right]^{0,5} \sum_j \dot{m}_{pw,j} - \right. \\ \left. - \dot{m}_{xA} \left[1 + \left(\frac{\partial \Delta_{xA}}{\partial x} \right)^2 \right]^{0,5} \left[\frac{\rho_{L,x}(1-\Phi_x)}{\rho_s(1-\Theta_s)} + \frac{\nu_{MeO} m_{MeO}}{\nu_C m_C} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$0 < x < R_A(t),$$

$$\frac{\partial \Delta_w}{\partial x}(0, t) = 0,$$

$$\Delta_w(x, 0) = 0.$$

Здесь Θ_x, ρ_s — пористость и истинная плотность обугленного слоя.

Массовая скорость очагового химического реагирования в статических условиях непрерывного фазового контакта углерода обугленного слоя с расплавом оксида металла определяется кинетическим уравнением химической реакции нулевого порядка в форме закона Аррениуса

$$\dot{m}_{xA} = k_{xA} p_K^{\omega_1} T_x^{-\omega_2} \exp \left(- \frac{E_{xA}}{RT_K} \right), \quad (18)$$

где k_{xA}, E_{xA} — эффективные термокинетические константы, которые находятся из согласования с экспериментом; R — универсальная газовая постоянная; ω_1, ω_2 — константы.

Таким образом, разработанная новая математическая модель (1)–(18) динамики процесса одностороннего очагового химического реагирования газожидкостного агломерата к-фазы оксидов металлов на поверхности коксующихся ТЗМ многосоставных стенок в высокотемпературной двухфазной среде застойных зон позволяет найти неизвестные величины: $u_L, v_L, p_L, u_G, v_G, T, p_G, K_{i,G}, N, \rho_G, d_G, w_R, \Phi$, а также определить текущее положение подвижной свободной поверхности $y = \delta_w(x, t)$ и форму очага химического реагирования $y = \delta_{xA}(x, t)$.

Сложность постановки (1)–(18) и отсутствие информации по ряду входных характеристик, вызывает необходимость введения дальнейших упрощений:

1) анализ проводится в локально-одномерном приближении в газожидкостном агломерате к-фазы и коксующемся ТЗМ многосоставной стенки для сечения $x = 0$;

2) жидкая фаза принимается несжимаемой и считается эффективно заторможенной;

3) при очаговом химическом реагировании в качестве газообразного и конденсированного рассматривается один компонент ($N_{xA} = N_s = 1$).

В рамках принятых дополнительных допущений локально-одномерная математическая модель одностороннего очагового химического реагирования и эволюции жидкого агломерата к-фазы на поверхности коксующихся ТЗМ многосоставных стенок имеет следующий вид:

$$(1 - \Phi) \rho_L c_L \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial y} \left(\lambda_\Sigma \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \dot{m}_G c_{pG} \frac{\partial T}{\partial y}; \quad (19)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_G}{\partial y} = 0; \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (\dot{m}_G K_{i,G}) = 0; \quad (21)$$

$$\delta_{xA}(t) < y < \delta_w(t), \quad t > 0:$$

$$(\rho c)_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \dot{m}_g c_{pg} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta H_r; \quad (22)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_g}{\partial y} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad \rho = \rho_v [1 - \xi(1 - K)]; \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (\dot{m}_g K_{i,g}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \varphi_i(T), \quad \sum_i \varphi_i = 1, \quad \sum_i K_{i,g} = 1; \quad (24)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = k_r (1 - \xi)^{n_r} \exp \left(-\frac{E_r}{RT} \right); \quad (25)$$

$$\delta_1 < y < \delta_{xA}(t), \quad t > 0:$$

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad m = \overline{1, M}; \quad (26)$$

$$\delta_{m+1} < y < \delta_m, \quad t > 0:$$

$$\frac{d\Delta_{xA}}{dt} = \frac{\dot{m}_{xA}}{\rho_s(1 - \Phi_k)}, \quad \Delta_{xA} = 0; \quad (27)$$

$$\frac{d\Delta_w}{dt} = \frac{1}{\rho_L(1 - \Phi_w)} \left\{ \sum_j \dot{m}_{pw,j} - \dot{m}_{xA} \left[\frac{\rho_L(1 - \Phi_k)}{\rho_s(1 - \Phi_s)} + \frac{\nu_{\text{MeO}} m_{\text{MeO}}}{\nu_{\text{C}} m_{\text{C}}} \right] \right\}, \quad \Delta_w(0) = 0, \quad (28)$$

где \dot{m} — массовая скорость; ξ — степень термодеструкции [0;1]; k_r , E_r , n_r , ΔH_r — предэкспоненциальный множитель, энергия активации, порядок и удельный тепловой эффект одностадийной химической реакции термодеструкции; K — коксовое число; φ_i — относительная доля i -го газообразного компонента, образующегося при термодеструкции; δ_m — положение m -го слоя материала; v соответствует исходному состоянию коксующегося материала, эф — эффективным теплофизическим характеристикам; g — газообразным продуктам термодеструкции.

Локально-одномерная модель одностороннего очагового химического реагирования (19)–(28) с соответствующими граничными и начальными условиями является ограниченной, однако позволяет определять в первом приближении практически важную величину — максимальную глубину очагового химического реагирования (разгара лунки).

По разработанной на основе [7] вычислительной программе АСМАГ проводилось параметрическое численное исследование основных законо-

мерностей нестационарного прогрева и уноса массы при одностороннем очаговом химическом реагировании газожидкостного агломерата к-фазы оксида алюминия с резиноподобным ТЗМ в характерных условиях застойных зон высокотемпературной двухфазной среды ($\dot{m}_{pw} = 0,3, 0,4$ и $0,5$ кг/(м²·с); $T_e = T_{pe} = T_{pw} = 3050, 3250, 3450$ и 3650 К; T_e, T_{pe}, T_{pw} — температура газа в ядре и частиц к-фазы в ядре и при инерционном осаждении на свободную поверхность). Объемная доля газовых пузырьков в жидком агломерате к-фазы варьировалась в физически реальном диапазоне ($\Phi = 0,05, 0,1, \text{ и } 0,15$), соответствующем режиму пузырькового барботажа. Такой подход идеализирован, так как объемная доля пузырьков связана с их диаметрами и представляет собой искомую функцию.

Получено, что зависимость от времени массовой скорости очагового химического реагирования имеет немонотонный характер (рис. 3). Такое обстоятельство объясняется конкуренцией процессов тепло- и массопереноса в статических условиях при инерционном осаждении жидких частиц к-фазы. В начальные моменты времени, когда размеры агломерата незначительны и его тепловое сопротивление мало, имеем $(d\dot{m}_{xA}/dt) > 0$, т. е. процессы теплопереноса к зоне химической реакции восстановления доминируют над массопереносом. После момента времени $t \approx 1,5$ с при увеличении размера агломерата его тепловое сопротивление возрастает и уже не компенсируется подводом тепла из высокотемпературной двухфазной среды, поэтому $(d\dot{m}_{xA}/dt) < 0$, и процессы массопереноса доминируют над теплопереносом к фронту очагового химического реагирования.

Наличие газовых пузырьков оказывает существенное влияние на протекание очагового химического реагирования вследствие изменения физических свойств и охлаждения агломерата к-фазы в результате конвекции. При росте объемной доли газовых пузырьков с $\Phi = 0$ до $0,15$ максимальная глубина очагового химического реагирования Δ_{xA} (60 с) уменьшается на 37%. Кроме того, в других равных условиях размер газосодержащего агломерата к-фазы $\delta_A = \Delta_{xA} + \Delta_w$ будет всегда больше. Величина Δ_{xA} (60 с) оказывается обратно пропорциональной массовому потоку осаждающихся инерционно частиц к-фазы. Так, повышение массового потока \dot{m}_{pw} от $0,3$ до $0,5$ кг/(м²·с) вызывает уменьшение максимальной глубины очагового химического реагирования на 32%. Отсюда следует, что агломераты к-фазы меньшего размера будут интенсивнее реагировать с резиноподобным ТЗМ при их большей утолщенности в материале. Понижение температуры с $T_{pw} = 3650$ до 3050 К приводит к уменьшению Δ_{xA} (60 с) от $2,3 \cdot 10^{-3}$ до $0,64 \cdot 10^{-3}$, т. е. в 3,6 раза.

Таким образом показано, что максимальная глубина очагового химического реагирования (разгара лунки) в резиноподобном ТЗМ существенным образом зависит от наличия и конвекции газовых пузырьков в жидком агломерате оксида алюминия, величины массового потока и температуры осаждающихся инерционно частиц к-фазы.

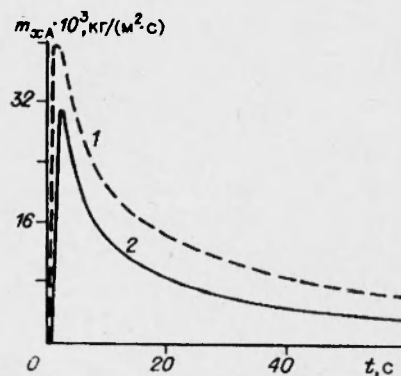


Рис. 3. Зависимость от времени массовой скорости очагового химического реагирования:

1 — без учета влияния газовых пузырьков; 2 — опорный расчет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бураков В. А. Классификация механизмов и физические модели взаимодействия частиц конденсированной фазы с разрушающимися теплозащитными материалами // Теплофиз. высоких температур. 1992. Т. 30, № 3. С. 533–542.
2. Бураков В. А., Обухов Н. А., Файзуллин Р. К. и др. Комплексное математическое моделирование взаимодействия высокотемпературных двухфазных потоков с углеродными теплозащитными материалами // Теплофиз. высоких температур. 1992. Т. 30, № 5. С. 992–1001.
3. Бураков В. А., Санду С. Ф. Термохимическое разрушение углепластиковых теплозащитных материалов в высокотемпературном двухфазном потоке // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 6. С. 51–60.
4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1.
5. Никитин А. Т., Юревич Ф. Б. Теоретическое исследование нестационарного нагрева и уноса коксующихся полимерных материалов // Тепло- и массоперенос. Минск: Изд-во ИТМО АН БССР. 1972. Т. 2, ч. 2. С. 295–308.
6. Гришин А. М. Математическое моделирование некоторых нестационарных аэротермохимических явлений. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1973.
7. Бураков В. А., Санду С. Ф. Численное решение задач нестационарной теплопроводности и уноса теплозащитных материалов при осаждении частиц конденсированной фазы // Всесоюз. выставка программ. комплексов по числ. решению задач термомеханики: Тез. докл. М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Э. Баумана, 1990. С. 10.

*Поступила в редакцию 19/VI 1994 г.,
в окончательном варианте — 31/X 1994 г.*
