

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИКИ ШЛАКОВАНИЯ
И ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ
УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ**

УДК 629.7.036.5:536.24.001.2

В. А. Бураков, С. Ф. Санду

НИИ прикладной математики и механики, 634050 Томск

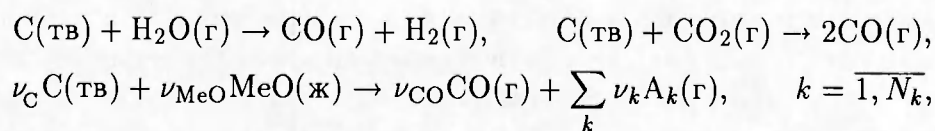
Разработаны новая комплексная физико-математическая модель, численный алгоритм и вычислительная программа для расчета динамики процессов шлакования и термохимического разрушения углепластиковых теплозащитных материалов многосоставных стенок в дозвуковом высокотемпературном двухфазном потоке при инерционном осаждении полидисперсных жидких частиц оксидов металлов в циклах нагрева и охлаждения (последствия). Представлены результаты численного исследования теплового и химического воздействия осаждающихся инерционно жидких частиц оксида алюминия на параметры прогрева и уноса массы типичного терморезистивного прессованного углепластика в одном цикле нагрева и охлаждения двусоставной стенки канала энергетической установки.

Проблема расчета разрушающейся (аблирующей) теплозащиты в высокотемпературном двухфазном потоке при инерционном осаждении жидких частиц конденсированной фазы (к-фазы) оксидов металлов особенно актуальна для перспективных нетрадиционных схем энергоустановок на металлизированных топливах. В регулируемых импульсных установках важен как период работы двигателя (цикл нагрева), так и период теплового последствия (цикл охлаждения). Вследствие перераспределения тепла здесь происходит дополнительное коксование и термодеструкция углепластиковых теплозащитных материалов (ТЗМ). Присутствие жидких частиц к-фазы приводит к интенсификации конвективно-радиационного теплопереноса, появлению контактной составляющей суммарного теплового потока и дополнительному тепловому, химическому и механическому воздействию на углепластиковые ТЗМ. В результате возникают прогары разрушающейся теплозащиты и нарушение теплового режима полимерных композиционных материалов несущей конструкции. Использование априорных оценок и простейших расчетных моделей не представляется возможным, прежде всего, из-за существенной нестационарности процессов.

Задача состояла в разработке комплексной математической модели, позволяющей еще на стадии эскизного проектирования прогнозировать сложные нестационарные физико-химические процессы взаимодействия дозвуковых высокотемпературных двухфазных потоков с углепластиковыми ТЗМ многосоставных стенок каналов энергоустановок в зонах инерционного осаждения полидисперсных жидких частиц к-фазы оксидов металлов со скоростями нормального соударения 30...80 м/с в циклах нагрева и охлаждения.

Ранее были разработаны и апробированы отдельные математические модели динамики процесса шлакования холодной поверхности и термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ при тепловом и химическом воздействии жидких частиц к-фазы [1, 2]. Результаты расчетов по этим моделям согласуются с данными физического эксперимента в диапазоне скоростей набегающего двухфазного потока 30...40 и 70...150 м/с соответственно. Однако их прямое использование не совсем корректно, так как в рассматриваемом диапазоне скоростей нормального соударения частиц к-фазы была возможна суперпозиция механизмов шлакования холодной поверхности и термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ [3] после уноса твердого слоя шлака. Таким образом, имело место «пересечение» областей применимости не противоречивых по упрощающим предположениям отдельных моделей. Отсюда в развитие идей [4] и появилась необходимость в комплексной математической модели динамики процессов шлакования и термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ многосоставных стенок в дозвуковом высокотемпературном двухфазном потоке в циклах нагрева и охлаждения.

Анализ проводится в рамках следующей физической модели процессов. В первый период взаимодействия ($0 < t \leq t_d$, где t_d — время осаждения цикла нагрева $0 < t \leq t_a$) при инерционном осаждении полидисперсных жидких частиц к-фазы оксидов металлов на холодной поверхности углепластикового ТЗМ появляется твердый пористый слой шлака к-фазы. По мере прогрева углепластиковый ТЗМ подвергается химической реакции термодеструкции, приводящей к образованию углеродистого обугленного слоя и газообразных продуктов. На втором этапе взаимодействия ($t_d < t \leq t_l$, где t_l — время «жизни» шлака к-фазы) с достижением температуры плавления оксидов металлов начинается унос твердого шлака вследствие сдувания маловязкой жидкой пленки («однослойная» модель [1]). На третьей стадии ($t_l < t \leq t_a$), уже после плавления и уноса твердого шлака к-фазы, происходит термохимическое разрушение углепластика за счет протекания неравновесных гетерогенных реакций окисления углерода обугленного слоя активными кислородсодержащими компонентами дозвукового двухфазного потока (H_2O , CO_2) и за счет капельного химического реагирования с жидкими частицами оксидов металлов вследствие их восстановления твердым углеродом [2, 4]:



где MeO , A_k — условные химические символы оксидов металлов и газообразных продуктов; ν_C , ν_{MeO} , ν_{CO} , ν_k — стехиометрические коэффициенты; (тв), (ж), (г) соответствуют твердому, жидкому и газообразному состояниям компонентов; N_k — число газообразных компонентов химической реакции восстановления (кроме CO). Четвертый период взаимодействия ($t_a < t \leq t_b$) — цикл охлаждения, когда происходит перераспределение температурных полей, дополнительное коксование и термодеструкция в углепластиковом ТЗМ многосоставной стенки за счет ранее аккумулированного тепла в цикле нагрева ($0 < t \leq t_a$). Далее в регулируемых импульсных режимах циклы нагрева и охлаждения повторяются. Влияние механического воздействия, вызывающего эрозионное разрушение, не принималось во внимание вследствие малых скоростей нормального соударения, лежащих, согласно оценкам, в упругой области динамики взаимодействия частиц к-фазы с преградой [5].

В неподвижной системе координат, начало которой находится на наружной поверх-

ности многосоставной стенки и направлено к границе раздела сред, на основе допущений [1, 2, 4] одномерная математическая модель динамики процессов шлакования холодной поверхности и термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ многосоставных стенок в циклах нагрева и охлаждения имеет вид

$$(\rho c)_{sl} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{sl} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \dot{m}_g c_{pg} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_g}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (\dot{m}_g K_{i,g}) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p_g}{\partial y} + F_{sl} = 0, \quad (4)$$

$$p_g = \rho_g RT \sum_i \frac{K_{i,g}}{m_i}, \quad (5)$$

$$\delta_k < y < \delta_{sl}(t), \quad 0 < t \leq t_l,$$

$$(\rho c)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \dot{m}_g c_{pg} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta H_r, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_g}{\partial y} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad \rho = \rho_v [1 - \xi(1 - K)], \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (\dot{m}_g K_{i,g}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \varphi_i(T), \quad \sum_i \varphi_i = 1, \quad \sum_i K_{i,g} = 1, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = k_r (1 - \xi)^{nr} \exp \left(-\frac{E_r}{RT} \right), \quad (9)$$

$$\frac{\partial p_g}{\partial y} + F_g = 0, \quad (10)$$

$$P_g = \rho_g RT \sum_i \frac{K_{i,g}}{m_i}, \quad i = \overline{1, N_g}, \quad (11)$$

$$\delta_1 < y < (\delta_k, \delta_w(t)), \quad 0 < t \leq t_b,$$

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad m = \overline{1, M}, \quad (12)$$

$$\delta_{m+1} < y < \delta_m, \quad 0 < t \leq t_b,$$

$$\lambda_{sl} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_{sl}-0} + \dot{m}_g h_w = q_\Sigma + \dot{m}_g h_g, \quad 0 < t \leq t_d, \quad (13)$$

$$T_w = T_L^{\circ}, \quad t_d < t \leq t_l,$$

$$\Theta_{sl} \rho_g (v_g + \dot{\Delta}_{sl}) = \rho_w (v_w + \dot{\Delta}_{sl}) = \dot{m}_g, \quad (14)$$

$$\dot{m}_g K_{i,g} = j_{i,w} + \dot{m}_g K_{i,w}, \quad i = \overline{1, N_w}, \quad (15)$$

$$p_{g,w} = p_w = p_e, \quad (16)$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_w-0} + \dot{m}_\Sigma h_w = q_\Sigma + \dot{m}_g h_g + \dot{m}_c h_c + \dot{m}_{cp} h_c + \frac{\nu_{MeO} m_{MeO}}{\nu_C m_C} \dot{m}_{cp} h_p, \quad (17)$$

$$t_l < t \leq t_a,$$

$$\Theta_w \rho_g (v_g - \dot{s}_w) + \rho_s (1 - \Theta_w) \dot{s}_w + \frac{\nu_{MeO} m_{MeO}}{\nu_C m_C} \dot{m}_{cp} = \rho_w (v_w - \dot{s}_w) = \dot{m}_\Sigma, \quad (18)$$

$$\dot{m}_\Sigma = \dot{m}_g + (1 - \Theta_w) \sum_i R_{c,i} + \left(1 + \frac{\nu_{MeO} m_{MeO}}{\nu_C m_C}\right) \dot{m}_{cp},$$

$$\dot{m}_g K_{i,g} + (1 - \Theta_w) R_{c,i} + \left(1 + \frac{\nu_{MeO} m_{MeO}}{\nu_C m_C}\right) \dot{m}_{cp} K_{i,cp} = j_{i,w} + \dot{m}_\Sigma K_{i,w}, \quad (19)$$

$$\sum_i K_{i,cp} = 1, \quad \sum_i K_{i,w} = 1, \quad \sum_i j_{i,w} = 0, \quad i = \overline{1, N_w},$$

$$p_{g,w} = p_w = p_e, \quad (20)$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_w-0} = 0, \quad t_a < t \leq t_b, \quad (21)$$

$$\dot{m}_g \Big|_{\delta_k+0} = \dot{m}_c \Big|_{\delta_k-0} = \dot{m}_{g,k}(t), \quad (22)$$

$$p_g \Big|_{\delta_k+0} = p_g \Big|_{\delta_k-0} = p_{g,k}(t), \quad (23)$$

$$K_{i,g} \Big|_{\delta_k+0} = K_{i,g} \Big|_{\delta_k-0} = K_{i,g,k}(t), \quad (24)$$

$$\lambda_{sl} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_k+0} = \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_k-0}, \quad T \Big|_{\delta_k+0} = T \Big|_{\delta_k-0} = T_k(t), \quad (25)$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_1+0} = \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_1-0}, \quad T \Big|_{\delta_1+0} = T \Big|_{\xi_1-0} = T_{k,1}(t), \quad (26)$$

$$\dot{m}_c \Big|_{\delta_1+0} = 0, \quad K_{i,g} \Big|_{\delta_1+0} = 0, \quad (27)$$

$$\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_{m+1}+0} = \lambda_{m+1} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_{m+1}-0}, \quad T \Big|_{\delta_{m+1}+0} = T \Big|_{\delta_{m+1}-0} = T_{k,m+1}(t), \quad (28)$$

$$\lambda_M \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{+0} = q_M, \quad 0 < t \leq t_b, \quad (29)$$

$$T(y, 0) = T_{in}, \quad \xi(y, 0) = 0, \quad \rho(y, 0) = \rho_v, \quad (30)$$

$$\dot{s}_w(t_l) = 0. \quad (31)$$

Здесь T — температура; t — время; ρ , c , λ — плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности; ξ — степень термодеструкции $[0; 1]$; k_r , E_r , h_r , ΔH_r — предэкспоненциальный множитель, энергия активации, порядок и удельный тепловой эффект химической реакции термодеструкции; \dot{m}_g , c_{pg} — массовая скорость и удельная теплоемкость газообразных продуктов термодеструкции; K — коксовое число; R — универсальная газовая постоянная; \dot{m} — массовая скорость уноса (вдува массы); $R_{c,i}$ — массовая скорость образования (исчезновения) i -го газообразного компонента; K_i , j_i — массовая концентрация и диффузионный поток i -го газообразного компонента при термодеструкции; p — давление; F — сила сопротивления при движении газа в пористой среде; m — молекулярная

масса; M — число разнородных инертных материалов многосоставной стенки; N_g — число компонентов газообразных продуктов термодеструкции; h — удельная энтальпия; T_{in} — начальная температура стенки; δ_m — положение m -го слоя материала; $\delta_w(t)$ — текущее положение поверхности раздела сред; N_w — число газообразных компонентов смеси на поверхности; v — скорость движения газа; Θ — пористость; $\dot{s}_w(t)$ — линейная скорость уноса материала; q_M — суммарный тепловой поток на наружной поверхности многосоставной стенки; индексы относятся: sl — к характеристикам шлака к-фазы, w — к условиям на поверхности (границе раздела сред), c — к обугленному слою и термохимическому разрушению за счет неравновесных гетерогенных реакций окисления, cp — к термохимическому разрушению за счет капельного химического реагирования с жидкими частицами к-фазы оксидов металлов, k — к условиям в контактах, s — к твердой фазе обугленного слоя и зоны термодеструкции, p — к частицам к-фазы, g — к газообразным продуктам термодеструкции, v — к исходному материалу, Σ — к суммарным характеристикам, C — к углероду, MeO — к оксидам металлов, e — к условиям на внешней границе двухфазного пограничного слоя, i — к газообразным компонентам.

Задача решалась в плоской одномерной постановке, так как выполнялись известные ограничения [6, 7]: $\Delta_\Sigma/L \ll 1$, $\Delta_\Sigma/r \ll 1$, $\Delta_\Sigma/r_c \ll 1$, где Δ_Σ — суммарная толщина стенки, L — характерный продольный размер, r — расстояние до оси симметрии, r_c — местный радиус кривизны. В случае рассматриваемых малотеплопроводных материалов стенки вопрос об использовании одномерной постановки задачи возникает только в случае большой локальной кривизны, когда $\Delta_\Sigma \sim r_c$.

Уравнение энергии в углепластиковых ТЗМ (6) представляет собой баланс между скоростью изменения энергии, аккумулированной теплоемкостью, и суммарным подводом (отводом) тепла за счет теплопроводности, фильтрации и химической реакции термодеструкции. Уравнения неразрывности смеси газов (7) и отдельных компонентов (8) выражают закон сохранения массы (без учета накопления газа в порах), который записывается как равенство между скоростью увеличения локального потока массы и скоростью образования газообразных продуктов термодеструкции. Уравнение кинетики одностадийной химической реакции термодеструкции (9) является соотношением, связывающим скорость изменения во времени степени термодеструкции с ее значением и температурой в форме закона Аррениуса. Для описания движения газа в пористой среде вместо полного уравнения количества движения, как это делается в теории фильтрации, используется эмпирическое выражение (10). Система замыкается уравнением состояния смеси газообразных продуктов термодеструкции (11). Физический смысл членов уравнений сохранения в твердом шлаке к-фазы (1)–(5) и в многосоставной стенке (12) понятен из сказанного выше.

Граничные условия (13)–(20) в цикле нагрева суть законы сохранения энергии, полного потока массы, массы i -х газообразных компонентов и количества движения газовой фазы в случае относительно малых скоростей фильтрации и вдува на поверхности раздела сред, записанные в инерциальной системе координат. В цикле охлаждения условие (21) означает, что процесс полностью определяется энергией, накопленной стенкой в период нагрева. Контактные граничные условия представлены соотношениями (21)–(28). Выбор граничного условия (29) в циклах нагрева и охлаждения зависит от специфики решения конкретной задачи и выражает разнообразные физически реальные условия: теплоизоляцию, конвективный нагрев (охлаждение) и переизлучение [4]. Начальные условия при $t = 0$ имеют вид (30), (31).

Эффективный коэффициент теплопроводности твердого пористого шлака к-фазы λ_{sl}

определяется соотношениями, зависящими от структуры, моделей гетерогенных пористых систем, или же другими соотношениями, как было принято в [4].

Эффективный коэффициент теплопроводности углепластиковых ТЗМ находится в рамках комбинированной модели канально-сфероидальных пор:

$$\begin{aligned}\lambda_{eff} &= \lambda_s[(1 - \Phi_{sp})F_{ch} + \Phi_{sp}F_{sp}] + \lambda_R, \\ F_{ch} &= 1 + \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_s} - 1\right)\Theta, \\ F_{sp} &= \left[\frac{3\lambda_g}{\lambda_s} + 2(1 - \Theta)\left(\frac{\lambda_g}{\lambda_s} - 1\right)\right] \left[3 + (1 - \Theta)\left(\frac{\lambda_g}{\lambda_s} - 1\right)\right]^{-1}, \\ \Theta &= 1 - \frac{\rho_v}{\rho_s} [1 - \xi(1 - K)],\end{aligned}\quad (32)$$

где Φ_{sp} — объемная доля сфероидальных форм. В предельных случаях (при $\Phi_{sp} = 0$ и $\Phi_{sp} = 1$) получаются известные выражения для эффективного коэффициента теплопроводности по цилиндрической и сфероидальным моделям пор. Коэффициент лучистой теплопроводности λ_R в первом приближении определяется зависимостью типа [8] для оптически толстых сред.

Сила сопротивления при движении газа в пористой среде зоны термодеструкции и обугленного слоя углепластиковых ТЗМ F_g зависит от числа Рейнольдса $Re = \Theta\rho_g v_g d / \mu_g$ и описывается законами Дарси ($Re < 1$) и Форхгайма ($Re > 1$) [9]:

$$F_g = \begin{cases} \mu_g \Theta v_g / k_f, & Re < 1, \\ \mu_g \Theta v_g / k_f + d \Theta^2 \rho_g v_g^2 / k_f, & Re > 1, \end{cases}\quad (33)$$

где d — характерный размер пористой среды, μ_g — коэффициент динамической вязкости газообразных продуктов термодеструкции, k_f — газопроницаемость пористой среды. Сила сопротивления при движении газа в пористой среде твердого шлака к-фазы F_{sl} находится по зависимости, аналогичной (33).

Суммарный тепловой поток со стороны дозвукового высокотемпературного двухфазного пограничного слоя при инерционном осаждении жидких частиц к-фазы оксидов металлов в цикле нагрева включает в себя три составляющих:

$$q_\Sigma = q_w + q_r + q_p, \quad (34)$$

где q_w — конвективная, q_r — радиационная [10], q_p — контактная составляющая [4].

Динамика процесса массопереноса при шлаковании холодной поверхности углепластиковых ТЗМ полидисперсными жидкими частицами к-фазы в первый и второй периоды взаимодействия цикла нагрева определяется по зависимостям ($|\dot{\Delta}_{sl}| \ll V_{pw,j}$) [4]:

$$\begin{aligned}\dot{\Delta}_{sl} &= \sum_j \dot{m}_{pw,j} / \rho_{sl}, \quad j = \overline{1, N_{p,sl}}, \quad 0 < t \leq t_d, \\ \Delta_{sl}(0) &= 0, \\ \dot{\Delta}_{sl} &= [q_{cond} - q_\Sigma(T_L^0)] / \rho_{sl} \Delta H_L^0, \quad t_d < t \leq t_l, \\ \Delta_{sl}(t_d) &= \Delta_{sl}^0,\end{aligned}\quad (35)$$

где $\Delta_{sl}(t)$ — текущая толщина твердого слоя шлака к-фазы; q_{cond} — текущий кондуктивный тепловой поток; T_L^0 , ΔH_L^0 — температура и удельный тепловой эффект плавления

(кристаллизации) оксидов металлов; $N_{p,sl}$ — число фракций жидких частиц к-фазы, участвующих в образовании твердого слоя шлака.

Время осаждения и «жизни» шлака к-фазы на холодной поверхности углепластиковых ТЗМ находится из условий [4]

$$T_w(t_d) = T_L^0, \quad (36)$$

$$\Delta_{sl}(t_l) = 0 \quad \text{или} \quad T_k(t_l) = T_L^0. \quad (37)$$

Безразмерная массовая скорость поверхностного термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ за счет капельного химического реагирования с осаждающимися инерционно полидисперсными жидкими частицами к-фазы оксидов металлов B'_{cp} определяется по континуальной диффузионно-кинетической модели [2, 4]:

$$B'_{cp,j} = \frac{\nu_C m_C}{\nu_{MeO} m_{MeO}} \frac{\dot{m}_{pw,j} - \dot{m}_{pg,j}}{\rho_e u_e St} (1 + \Omega_{cp,j})^{-1},$$

$$\Omega_{cp,j} = \frac{V_{pw,j} T_w^{\omega_1} \nu_C m_C}{(1 - \Theta_w) k_{cp} p_w^{\omega_2} \nu_{MeO} m_{MeO}} \exp \frac{E_{cp}}{RT_w}, \quad B'_{cp} = \sum_j B'_{cp,j}, \quad j = \overline{1, N_{p,cr}}, \quad (38)$$

где $\dot{m}_{pw,j}$, $V_{pw,j}$ — массовый поток и нормальная составляющая скорости осаждающихся инерционно на стенку частиц j -й фракции; $\dot{m}_{pg,j}$ — массовый поток частиц j -й фракции, проникающих в поры обугленного слоя; k_{cp} , E_{cp} — эффективные термокинетические параметры капельного химического реагирования; $N_{p,cr}$ — число фракций жидких частиц, вступающих в химическое реагирование; St — число Стантона; ω_1, ω_2 — константы.

Текущая массовая концентрация i -го газообразного компонента на термохимически разрушающейся поверхности углепластиковых ТЗМ, входящая в уравнение баланса массы (19), с учетом выражения диффузионного потока в виде $j_{i,w} = \rho_e u_e St (K_{i,w} - K_{i,e})$ равна

$$K_{i,w} = \frac{1}{1 + B_\Sigma} [B_g K_{i,g} + (1 - \Theta_w) \sum_i R_{c,i} / \rho_e u_e St + B_{cp} K_{i,cp} + K_{i,e}], \quad i = \overline{1, N_w}. \quad (39)$$

Здесь B — параметр вдува. Для определения $R_{c,i}$ в (39) воспользуемся дополнительным уравнением химической кинетики первого порядка реакций окисления углерода обугленного слоя активными кислородсодержащими компонентами (H_2O , CO_2) с эффективными значениями термокинетических параметров в форме, представленной в [11], и распишем баланс энергии (17) через удельные тепловые эффекты реакций. В результате получим в замкнутом виде математическую модель поверхностного термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ [2]:

$$B_\Sigma = B_g + B_c + B_{cp},$$

$$B_c = \frac{\beta_{m,e} + B_g \beta_{m,g}}{1 + (1 + B_\Sigma) \Omega_c} \quad (40)$$

$$\Omega_c = \rho_e u_e St \frac{T_w^{\omega_3} m_C}{(1 - \Theta_w) k_{cp} m_w} \exp \frac{E_c}{RT_w},$$

$$m_w = (1 + B_\Sigma) \left(\frac{B_g}{m_g} + \frac{B_c}{m_C} + \frac{B_{cp}}{m_{cp}} + \frac{1}{m_e} \right)^{-1}, \quad (41)$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_w=0} = \rho_e u_e St \left[\sum_i K_{i,e} (h_{i,e} - h_{i,w}) - B_c \Delta H_c - B'_{cp} \Delta H_{cp} \right] + q_r + q_p, \quad i = \overline{1, N_w},$$

$$B_{\Sigma} = \frac{\dot{m}_{\Sigma}}{\rho_e u_e St}, \quad B_g = \frac{\dot{m}_g}{\rho_e u_e St}, \quad B_c = \frac{\dot{m}_c}{\rho_e u_e St}, \quad (42)$$

$$B_{cp} = \left(1 + \frac{\nu_{MeO} m_{MeO}}{\nu_C m_C}\right) \frac{\dot{m}_{cp}}{\rho_e u_e St}, \quad B'_{cp} = \frac{\dot{m}_{cp}}{\rho_e u_e St},$$

где k_c , E_c — эффективные термокинетические параметры неравновесных гетерогенных реакций окисления; β_m — окислительный потенциал; ΔH — удельный тепловой эффект реакций; B_c — безразмерная массовая скорость поверхностного термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ за счет неравновесных гетерогенных реакций окисления; ω_3 — константа.

Модель (40)–(42) дает возможность найти текущие значения B_c , m_w , T_w на термохимически разрушающейся поверхности углепластиковых ТЗМ с учетом капельного химического реагирования (38).

Текущая скорость и толщина унесенного слоя углепластиковых ТЗМ на третьем этапе цикла нагрева определяются из соотношений

$$\dot{s}_w(t) = \frac{\rho_e u_e St (B_c + B'_{cp})}{K \rho_v}, \quad s_w(t) = \int_{t_1}^t \dot{s}_w(t) dt. \quad (43)$$

Численная реализация модели (1)–(43) осуществлялась методом конечных разностей по четырехточечной, полностью неявной, двухслойной по времени, одношаговой итерационной схеме на неравномерной пространственной и временной сетке с применением метода выпрямления фронта [12], чтобы учесть движение знакопеременных подвижных границ шлака к-фазы ($\dot{\Delta}_{sl} \leq 0$) и фронта термохимического разрушения ($\dot{s}_w > 0$). Система разностных уравнений на каждом временном слое решалась методом скалярной прогонки [13] до сходимости итераций по температурному профилю с заданной точностью $10^{-4} \dots 10^{-5}$. На основе [14] разработана версия вычислительной программы АСМТРФ.

Рассмотрим некоторые результаты численных исследований динамики процессов шлакования и термохимического разрушения термореактивного прессованного углепластикового ТЗМ на фенольно-формальдегидном связующем двусоставной стенки канала энергоустановки в дозвуковом двухфазном потоке при инерционном осаждении монодисперсных жидких частиц к-фазы оксида алюминия в одном цикле нагрева и охлаждения, используя в выбранном сечении по длине следующие входные параметры: $p_e = 8,0$ МПа; $T_e = 3000$ К; $\rho_e u_e St_0 = 2,7$ кг/(м² · с); $m_e = 21,08 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $\beta_{m,e} = 0,138$; $\dot{m}_{pw} = 2$ кг/(м² · с); $T_{pe} = T_{pw} = 3000$ К; $k_c = 6,16 \cdot 10^6$ кг · К/(м² · с · 10⁵ Па); $E_c = 1,81 \cdot 10^5$ Дж/моль; $\nu_{Al_2O_3} m_{Al_2O_3} / \nu_C m_C = 2,83$; $m_{cp} = 27,7 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $\omega_1 = \omega_3 = 1$; $\omega_2 = 0$; $\Delta_0 = 7 \cdot 10^{-3}$ м; $\Delta_1 = 10^{-3}$ м; $\Delta_2 = 13 \cdot 10^{-3}$ м; $T_{in} = 300$ К; $q_M = 0$; $t_a = 3,5$ с; $t_b = 60$ с. Здесь Δ_0 — толщина углепластикового ТЗМ; Δ_1 , Δ_2 — толщины материалов двусоставной стенки с характеристиками $\rho_1 = 1060$ кг/м³, $c_1 = 1600$ Дж/(кг · К), $\lambda_1 = 0,2$ Вт/(м · К), $\rho_2 = 1980$ кг/м³; $c_2 = 1660$ Дж/(кг · К), $\lambda_2 = 0,44$ Вт/(м · К). Значения функции $\varphi_i(T)$ ($i = H_2, CH_4, CO$) для фенольно-формальдегидного связующего брали из экспериментальных данных [15].

На первом этапе исследований из всего многообразия принимаемых во внимание параметров для анализа выбран важнейший из них — фактор двухфазности, связанный с оценкой влияния дополнительного теплового и химического воздействия жидких частиц к-фазы оксида алюминия, информация по которому в литературе отсутствовала.

На рис. 1 представлены типичные данные численного расчета динамики процесса шлакования холодной поверхности углепластикового ТЗМ двусоставной стенки в цикле

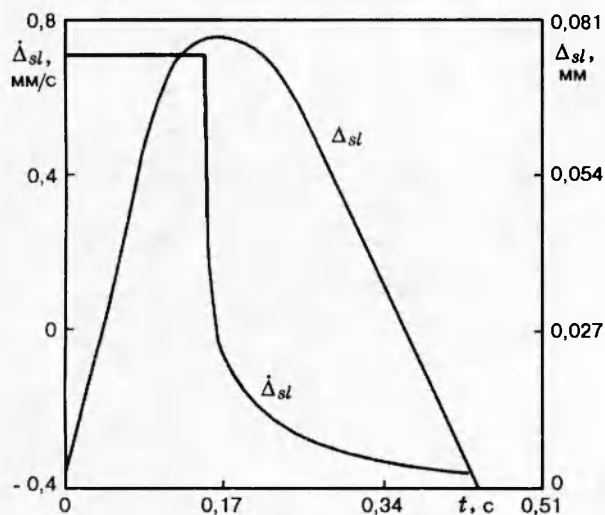


Рис. 1

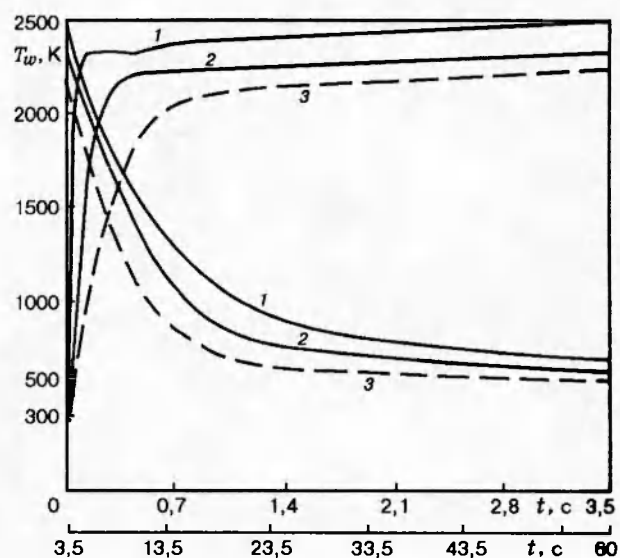


Рис. 2

Рис. 1. Динамика процесса шлакования холодной поверхности углеродистого ТЗМ жидкими частицами к-фазы оксида алюминия в цикле нагрева

Рис. 2. Изменение температуры поверхности углеродистого ТЗМ в цикле нагрева и последствия:

1 — комплексная модель; 2 — упрощенная модель, принимающая во внимание контактный нагрев жидкими частицами к-фазы, но без учета шлакования и капельного химического реагирования; 3 — упрощенная модель без учета теплового и химического воздействия к-фазы

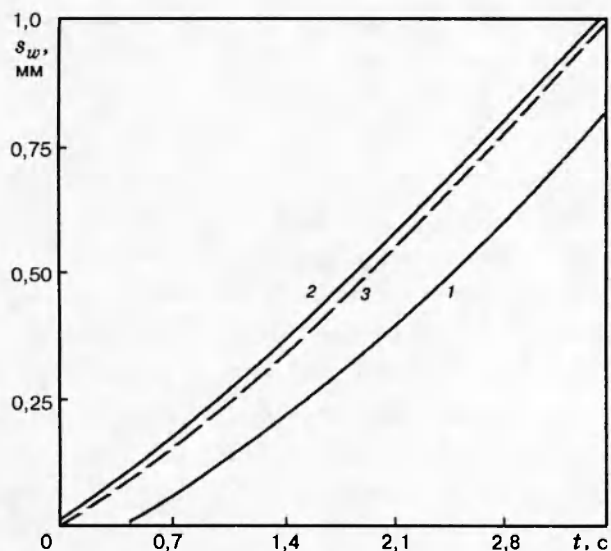


Рис. 3

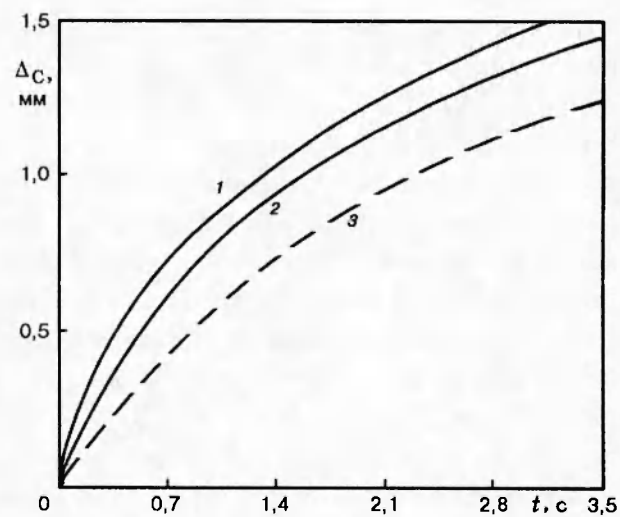


Рис. 4

Рис. 3. Толщина унесенного слоя углеродистого ТЗМ в цикле нагрева (обозначения соответствуют рис. 2)

Рис. 4. Толщина обугленного слоя углеродистого ТЗМ в цикле нагрева (обозначения соответствуют рис. 2)

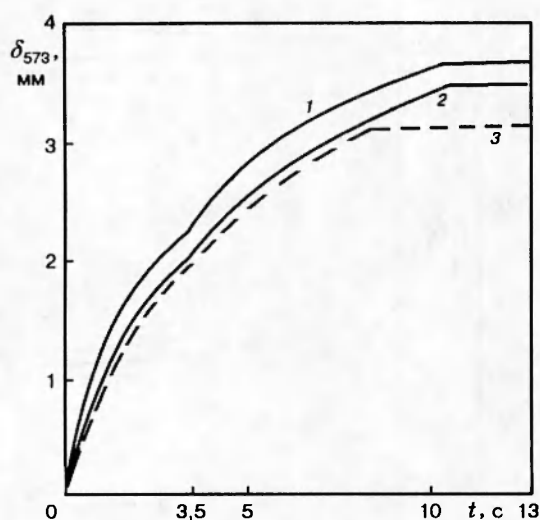


Рис. 5. Глубина зоны термодеструкции в углепластиковом ТЗМ в цикле нагрева и последействия (обозначения соответствуют рис. 2)

нагрева ($0 < t \leq 3,5$ с). Расчетное время «жизни» шлага к-фазы оксида алюминия составило 0,44 с. Уменьшение массового потока частиц к-фазы до значений $\dot{m}_{pw} = 1,0$ и $0,5$ кг/(м² · с) в других сечениях по длине приводило к возрастанию t_l до 0,55 и 0,61 с соответственно. Накопление к-фазы в твердом состоянии отсутствовало ($t_l < t_a$).

На рис. 2 представлены результаты численных расчетов по изменению текущей температуры границы раздела сред при шлаковании и термохимическом разрушении углепластикового ТЗМ в цикле нагрева (верхняя группа кривых) и охлаждения ($3,5 < t \leq 60$ с) (нижняя группа кривых) в случае использования различных математических моделей.

На рис. 3, 4 показаны соответствующие данные численных расчетов толщин унесенного s_w и обугленного Δ_c слоев углепластикового ТЗМ в цикле нагрева. Изменение глубины зоны термодеструкции δ_{573} , определяемой по положению изотермы $T = 573$ К, в циклах нагрева и охлаждения представлены на рис. 5. Как видно, в цикле нагрева упрощенные модели завышают значения $s_w(t_a)$ на 20 и 21 %, занижают значения $\Delta_c(t_a)$ на 8 и 22 % и $\delta_{573}(t_a)$ на 10 и 15 % соответственно относительно результатов, полученных по комплексной модели. Анализ показывает, что основным механизмом термохимического разрушения углерода обугленного слоя углепластикового ТЗМ в данных условиях обтекания высокотемпературным двухфазным потоком являются неравновесные гетерогенные реакции окисления активными кислородсодержащими компонентами. Механизм капельного химического реагирования здесь несуществен из-за относительно невысокого уровня рабочих температур поверхности. Кроме того, даже малые времена задержки абляционного разрушения углепластикового ТЗМ, обусловленные процессом шлакования холодной поверхности и соизмеримые с циклом нагрева, оказывают заметное влияние на практически важную величину $s_w(t_a)$. В представленном примере расчета шлаг к-фазы оксида алюминия, с одной стороны, играет положительную роль, обеспечивая задержку абляционного разрушения ТЗМ (см. рис. 3), а с другой — отрицательную, интенсифицируя внутренний тепло- и массоперенос в углепластиковом ТЗМ (см. рис. 4). В этой связи для данных условий процесс шлакования холодной поверхности ТЗМ развивается по механизму «горячей пластины», в отличие от возможного механизма «теплового экрана» [1].

Результаты численных расчетов также показывают, что дополнительное коксование в период последействия не происходит из-за наличия тонких обугленных слоев, однако име-

ет место заметный эффект дополнительной термодеструкции углепластикового ТЗМ, проявляющийся в увеличении глубины зоны термодеструкции: $\delta_{573}(t) > \delta_{573}(t_a)$, $t_a < t \leq t_r$. Подобное увеличение составляет: по комплексной модели — 63%, по упрощенным моделям — 73 и 63% при временах $t_r = 10,54; 10,73; 8,56$ с соответственно (см. рис. 5). Кроме того, из представленных результатов численных расчетов следует, что начальная толщина углепластикового ТЗМ выбрана с большим запасом, и поэтому нарушения теплового режима полимерного композиционного материала несущей конструкции не происходит.

Основным результатом работы является получение новой количественной информации по сложным нестационарным физико-химическим процессам в углепластиковых ТЗМ в условиях теплового и химического воздействия жидких частиц к-фазы оксида алюминия.

Установлено, что существуют, в отличие от [1, 2], режимы «слабого» взаимодействия с дозвуковым высокотемпературным двухфазным потоком (типа рассмотренного выше), когда в пределах погрешности физического эксперимента 21...22% можно использовать упрощенные математические модели. Последние позволяют вести многовариантный анализ разрушающейся теплозащиты каналов энергоустановок в циклах нагрева и охлаждения без больших затрат машинного времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бураков В. А., Санду С. Ф. Тепломассоперенос при шлаковании поверхности углепластиковых теплозащитных материалов в высокотемпературном двухфазном потоке // Сиб. физ.-техн. журн. 1993. Вып. 2. С. 98–103.
2. 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.
3. Бураков В. А. Классификация механизмов и физические модели взаимодействия частиц конденсированной фазы с разрушающимися теплозащитными материалами // Теплофизика высоких температур. 1992. Т. 30, № 3. С. 533–542.
4. Бураков В. А., Обухов Н. А., Файзулин Р. К. и др. Комплексное математическое моделирование взаимодействия высокотемпературных двухфазных потоков с углеграфитовыми теплозащитными материалами // Теплофизика высоких температур. 1992. Т. 30, № 5. С. 992–1001.
5. Полежаев Ю. В., Романченков В. П., Чирков И. В., Шебеко В. Н. Расчетная модель процесса эрозионного разрушения композиционных материалов // Инж.-физ. журн. 1979. Т. 37, № 3. С. 395–404.
6. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
7. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. М.: Машиностроение, 1975.
8. Страхов В. Л., Чубаков Н. Г. Расчет нестационарного прогрета и уноса массы вспучивающихся покрытий в горячих газовых потоках // Инж.-физ. журн. 1988. Т. 55, № 4. С. 571–581.
9. Гордеев Ю. И., Колобашкин В. М., Кудряшов Н. А. Численное исследование влияния инерционных членов в уравнении движения на фильтрацию газа // Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа. 1985. № 1. С. 183–186.
10. Hunter S. C., Cherry S. S., Kliegel J. R. Gas-particle nozzle flows with reaction and particle size change // AIAA Pap. 1981. N 3.

11. **Бояринцев В. И., Звягин Ю. В.** Исследование разрушения углеграфитовых материалов при высоких температурах // Теплофизика высоких температур. 1975. Т. 13, № 5. С. 1045–1051.
12. **Будак Б. М., Гольдман Н. Л., Успенский А. Б.** Разностные схемы с выпрямлением фронтов для многофронтных задач типа Стефана // Докл. АН СССР. 1966. Т. 167, № 4. С. 735–738.
13. **Самарский А. А.** Теория разностных схем. М.: Наука, 1982.
14. **Бураков В. А., Санду С. Ф.** Численное решение задач нестационарной теплопроводности и уноса теплозащитных материалов при осаждении конденсированной фазы // Всесоюз. выставка программных комплексов по численному решению задач термомеханики: Тез. докл. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1990. С. 10.
15. **Журавлева Т. А., Лапина Н. А., Максимова Н. А. и др.** Термический анализ фенольно-формальдегидной смолы // Конструкционные материалы на основе графита. 1972. Вып. 7. С. 116–121.

*Поступила в редакцию 20/III 1996 г.,
в окончательном варианте — 30/IX 1996 г.*
