

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лернер М. О. Химические регуляторы горения моторных топлив.— М.: Химия, 1979.
2. Fifer R. 17-th Symp. (Intern.) on Combustion. Leeds, England, 1978.
3. Заслонко И. С., Кочергина Т. И., Мукосеев Ю. К. и др. Хим. физика, 1983, 2, 8, 1060.
4. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Драгалова Е. В. и др. Хим. физика, 1983, 2, 6, 838.
5. Слуцкий В. Г. ФГВ, 1985, 21, 2, 11.
6. Ступоченко Е. В., Лосев С. А., Осипов А. И. Релаксационные процессы в ударных волнах.— М.: Наука, 1965.
7. Kiefer J. N., Lutz R. W. J. Chem. Phys., 1963, 42, 17.

Поступила в редакцию 16/V 1986

## РЕЖИМЫ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕФЕНОЛЬНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

В. И. Зинченко, А. С. Якимов

(Томск)

Математическому моделированию термохимического разрушения полимерных материалов на основе углефенольных композитов (УФК) с учетом неравновесных термохимических процессов одновременно внутри и на поверхности конденсированной фазы посвящено ограниченное число работ. Если в [1] найдено, что механическая эрозия являлась причиной уноса большей части всего уносимого поверхностного слоя материала, то расчеты [2] показали, что определение массы теплозащитного пакета в значительной степени зависит от точного предсказания режима течения (замороженного, равновесного, неравновесного) газообразных продуктов разложения связующего в прококсированном слое. Анализ теоретических и экспериментальных работ [3—6], посвященных вопросу взаимодействия высокоэнтальпийного воздуха с графитовой поверхностью, показал, что для правильной оценки величины массового уноса тела необходимо также учитывать ряд гетерогенных химических реакций и сублимацию материала.

В данной работе для описания термохимического разрушения УФК используется модель недеформированного пористого реагирующего тела [3] с учетом многослойности покрытия, неравновесных гетерогенных химических реакций и реакции пиролиза в материале тела.

### Постановка задачи

Считается, что тело выполнено из многослойного УФК на подложке (сталь). Армирующие волокна первого, второго и третьего слоев — графиты В-1, ВП и ГМЗ, связующее — фенолформальдегидная смола — в общем случае разных типов для каждого слоя. Структура УФК такова, что каждый последующий слой от нагреваемой границы имеет меньшую плотность и теплопроводность, но большую толщину.

Физика процесса в к-фазе такова [6]. Под воздействием высокотемпературного потока температура  $T_w$  увеличивается до температуры разложения смолы, затем начинается пиролиз с образованием углеродистого остатка (кокса), который удерживается внутри матрицы армирующих волокон. При  $T_w > 1000$  К углеродистая поверхность разрушается в результате взаимодействия с компонентами диссоциированного воздуха. Газы пиролиза могут фильтроваться к границе раздела сред  $y = 0$ , вдуваться в пограничный слой и вместе с продуктами окисления и сублимации графита снижать поступающий к телу конвективный тепловой поток.

Следует отметить, что использование многокомпонентных материалов приводит в общем случае к необходимости взаимосвязанного решения сопряженных задач тепло- и массопереноса [3].

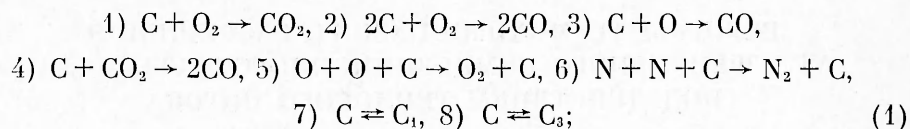
При постановке задачи сделаем следующие допущения:

1) число Рейнольдса в набегающем гиперзвуковом потоке воздуха достаточно велико ( $Re_\infty \gg 1$ ) и в окрестности поверхности тела сформировался пограничный слой;

2) воздух на внешней границе пограничного слоя находится в состоянии термодинамического равновесия и представляет собой пятикомпонентную смесь O, O<sub>2</sub>, N, N<sub>2</sub>, NO;

3) явления переноса в пограничном слое рассматриваются при упрощающих предположениях о равенстве коэффициентов диффузии; число Льюиса  $Le = 1$ ;

4) предполагается, что на внешней поверхности протекают следующие гетерогенные процессы:



5) считается, что анизотропия графитовых наполнителей в каждом слое УФК мала, поэтому процесс термодинамического разрушения можно полагать одномерным;

6) на первом этапе исследования течение внутри и на поверхности пор замороженное, фильтрующийся газ предполагается однородным со значением молекулярной массы, близкой к воздушной смеси;

7) предполагается, что за время процесса волокна углерода не плавятся, а диспергирование кокса, образующегося при пиролизе смолы, отсутствует.

Для расчета состава на границе раздела газообразной и к-фаз будем использовать аналогию процессов тепло- и массообмена в предположении о замороженности химических реакций внутри пограничного слоя. При возрастании давления торможения реальным условиям больше соответствует модель химически равновесного пограничного слоя. Однако для поверхностей с высокой каталитической активностью по отношению к компонентам диссоциированного воздуха тепловые потоки в обоих случаях различаются не слишком сильно и, как показали численные расчеты разрушения поверхности [7], такой подход может иметь место для оценки величины массового уноса.

Рассмотрим химическую кинетику гетерогенных процессов, протекающих на поверхности тела. Если порядковый номер компонента соответствует следующему порядку их перечисления: O, O<sub>2</sub>, N, N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>3</sub>, то молярные скорости реакций (1) имеют вид [3]

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{k_1 c_{2w}^0 w}{m_2} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_w}\right), \quad U_2 = \frac{k_2 c_{2w}^0 w}{m_2} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_w}\right), \\ U_3 &= \frac{k_3 c_{1w}^0 w}{m_1} \exp\left(-\frac{E_3}{RT_w}\right), \quad U_4 = \frac{k_4 c_{6w}^0 w}{m_6} \exp\left(-\frac{E_4}{RT_w}\right), \\ U_5 &= \frac{k_5 c_{1w}^0 w}{m_1}, \quad U_6 = \frac{k_6 c_{3w}^0 w}{m_3}, \\ U_i &= \frac{A_{ci} (p_{ci}^* - p_{ci})}{\sqrt{2\pi RT_w m_i}}, \quad p_{ci} = \frac{p_e c_{iw} m_w}{m_i}, \\ p_{ci}^* &= 10^5 \exp\left(D_i - \frac{E_i}{T_w}\right), \quad m_w^{-1} = \sum_{\alpha=1}^8 \frac{c_{w\alpha}}{m_\alpha}, \quad i = 7, 8. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя (2), получим массовые скорости образования (исчезновения) компонентов в результате гетерогенных реакций

$$R_1 = -m_1(U_3 + U_5), \quad R_2 = -m_2\left(U_1 + U_2 - \frac{U_5}{2}\right), \quad R_3 = -m_3 U_6,$$

$$R_4 = \frac{m}{z} U_5, \quad R_5 = m_5(2U_2 + U_3 + 2U_4), \quad R_6 = m_6(U_1 - U_4),$$

$$R_i = A_{ci} m_i (p_{ci}^* - p_{ci}) (2\pi RT_w m_i)^{-0.5}, \quad i = 7, 8,$$

и выражения для массовых скоростей уноса

$$(\rho v)_{2w} = (\varphi_2 \rho)_w \left( \frac{m}{m_1} - 1 \right) c_{1w} B_3 + (\varphi_4 \rho)_w \left[ \left( \frac{m}{m_2} - 1 \right) c_{2w} B_1 + \right. \\ \left. + \left( 2 \frac{m}{m_2} - 1 \right) c_{2w} \bar{B}_2 + \left( \frac{m}{m_1} - 1 \right) c_{1w} \bar{B}_3 + \left( \frac{2m}{m_6} - 1 \right) c_{6w} B_4 \right],$$

$$(\rho v)_{3w} = (\varphi_{2w} + \varphi_{4w}) \sum_{i=7}^8 m_i A_{ci} (p_{ci}^* - p_{ci}) (2\pi RT_w m_i)^{-0.5},$$

$$B_i = k_i \exp \left( - \frac{E_i}{RT_w} \right), \quad (\rho v)_{1w} = - (\rho_3 \varphi_3 v)_w.$$

Математически задача сводится к решению системы уравнений, записанной в подвижной системе координат, связанной с фронтом термодимического разрушения [3]:

$$\rho_1 \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} - \omega \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right) = - k_{\Pi} (\rho_1 \varphi_1)^n \exp \left( - \frac{E_{\Pi}}{RT} \right) = - R_{\Pi}; \quad (3)$$

$$\rho_2 \left( \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} - \omega \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} \right) = g \bar{R}_{\Pi}, \quad g = \frac{v_z m_{\Pi 2}}{v_1 m_{\Pi 1}}; \quad (4)$$

$$\rho_{4j} \left( \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} - \omega \frac{\partial \varphi_4}{\partial y} \right) = 0, \quad \omega = \frac{(\rho v)_{2w} + (\rho v)_{3w}}{(\rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2 + \rho_{4j} \varphi_4)_w}, \quad j = 1, 2, 3; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_3 \varphi_3}{\partial t} - \omega \frac{\partial \rho_3 \varphi_3}{\partial y} + \frac{\partial \rho_3 \varphi_3}{\partial y} = (1 - g) R_{\Pi}; \quad (6)$$

$$c_{pj} \left( \frac{\partial T_j}{\partial t} - \omega \frac{\partial T_j}{\partial y} \right) + c_{p3} \rho_3 \varphi_3 v \frac{\partial T_j}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial y} \right) - Q_{\Pi} R_{\Pi}, \quad j = 1, 2, 3; \quad (7)$$

$$v = - \frac{z}{\mu_j} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad p = \frac{\rho_3 RT}{m_{13}}, \quad \sum_{i=1}^4 \varphi_i = 1, \quad z = \frac{z_* \varphi_3^2}{(1 - \varphi_3)^2}, \quad \mu_j = \mu_* \sqrt{\frac{T_j}{T_*}}; \quad (8)$$

$$c_{pj} = \sum_{i=1}^4 c_{pj} \rho_{ij} \varphi_i, \quad \lambda_j = \sum_{i=1}^4 \lambda_{ij} \varphi_i, \quad \lambda_{3j} = \lambda_{3*} \sqrt{\frac{T_j}{T_*}}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (9)$$

$$c_p \rho \left( \frac{\partial T_4}{\partial t} - \omega \frac{\partial T_4}{\partial y} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2}.$$

Систему уравнений (3)–(9) необходимо решать с учетом следующих начальных и граничных условий:

$$T_j|_{t=0} = T_{\Pi}, \quad \rho_3|_{t=0} = \rho_{3\Pi}, \quad \varphi_i|_{t=0} = \varphi_{i\Pi}, \quad j = \overline{1, 4}, \quad i = 1, 2, 4; \quad (10)$$

$$q_w + \sum_{\alpha=1}^8 J_{\alpha w} h_{\alpha w} + \varphi_{4w} \sum_{\substack{\alpha=2 \\ \alpha \neq 4}}^8 Q_{\alpha} U_{\alpha} + \varphi_{2w} Q_s U_s - \varepsilon_j \sigma T_w^4 = - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=+0-x(t)}; \quad (11)$$

$$J_{\alpha w} + (\rho v)_w c_{\alpha w} = \varphi_{4w} R_{\alpha} + \varphi_{2w} R_{\alpha s} + (\rho v)_{1w} c_{\alpha 1w}, \quad \alpha = \overline{1, 8}, \quad (12)$$

$$J_{\alpha w} = \beta_{\alpha} (c_{\alpha w} - c_{\alpha e}), \quad \beta_{\alpha} = \beta = [\alpha_T - \eta_1 (\rho v)_w] \frac{H_r - h_{rn}}{h_{e0} - h_w};$$

$$p_e = p_w|_{y=+0-x(t)}; \quad (13)$$

$$v|_{y=l} = 0, \quad l = \sum_{j=1}^3 L_j - x(t); \quad (14)$$

$$\varphi_i|_{y=l} = \varphi_{i\Pi}, \quad i = 1, 2, 4; \quad (15)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=l_1-0} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=l_1+0}, \quad T_1|_{y=l_1-0} = T_2|_{y=l_1+0}; \quad (16)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=l_1+l_2-0} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=l_1+l_2+0}, \quad T_2|_{y=l_1+l_2-0} = T_3|_{y=l_1+l_2+0}; \quad (17)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=l-0} = \lambda \frac{\partial T_4}{\partial y} \Big|_{y=l+0}, \quad T_3|_{y=l-0} = T_4|_{y=l+0}; \quad (18)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_4}{\partial y} \Big|_{y=l+L_4} = \delta (T_4|_{y=l+L_4} - T_n); \quad (19)$$

$$l_1 = L_1 - x(t), \quad l_1 + l_2 = L_1 + L_2 - x(t).$$

Здесь

$$x(t) = \int_0^t \omega d\tau; \quad q_w = \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=l} - \sum_{\alpha=1}^8 J_{\alpha w} h_{\alpha w} = \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial H}{\partial y} \Big|_{y=l} =$$

$$= [\alpha_\tau - \eta_1 (\rho v)_w] (H_\tau - h_w); \quad \alpha_\tau = 2,2 \left( \frac{p_e}{p_{e0}} \right) \left( \frac{u_e}{u_\infty} \right) \frac{\alpha_*}{\xi^{0,4} (r/r_w)^{0,2}};$$

$$(\rho v)_w = \sum_{i=1}^3 (\rho v)_{iw}; \quad H_\tau = h_e + 0,5 \sqrt[3]{Pr} u_e^2;$$

$$\alpha_* = \frac{16,4 U_\infty^{1,25} \rho_\infty^{0,8}}{r_w^{0,2} (1 + h_w/h_{e0})^{2/3}}; \quad \eta_1 = 0,2 (m_e/m_w)^{0,35};$$

$$Q_w = q_w + \sum_{\alpha=1}^8 h_{\alpha w} J_{\alpha w} + \varphi_{4w} \sum_{\substack{\alpha=2 \\ \alpha \neq 4}}^8 Q_\alpha U_\alpha + \varphi_{2w} Q_s U_s - \varepsilon_j \sigma T_w^4;$$

$$h_e = h_{e0} \left( \frac{p_e}{p_{e0}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad u_e^2 = 2h_{e0} \left[ 1 - \left( \frac{p_e}{p_{e0}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right], \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v};$$

$$h_w = \begin{cases} c_{pw} T_w, & T_w < 700 \text{ K}, \\ \sum_{\alpha=1}^8 c_{\alpha w} h_{\alpha w}, & T_w \geq 700 \text{ K}; \end{cases}$$

$$\xi = 0,026 [1 - 0,005 (\bar{H} - 30)] 10^{1,9 M_\infty^{-0,46}};$$

$$h_{e0} = c_{p\infty} T_\infty + U_\infty^2/2; \quad \varepsilon_j = \varepsilon_{1j} \varphi_{4w} + \varepsilon_{2j} \varphi_{2w}, \quad j = 1, 2, 3;$$

$$r/r_w = \cos \theta + \left( \frac{s}{r_w} - \frac{\pi}{2} + \theta \right) \sin \theta;$$

$$U_s = \frac{k_3 c_{1w} \rho_w}{m_1} \exp(-E_3/RT_w); \quad R_{1s} = -m_1 U_s; \quad R_{5s} = m_5 U_s;$$

$$R_{is} = 0, \quad i = 2, 3, 4, 6; \quad R_{7s} = R_7, \quad R_{8s} = R_8;$$

$t$  — время;  $y$  — поперечная координата;  $\bar{s} = s/r_w$  — безразмерная длина дуги вдоль образующей обтекаемого тела;  $T$  — температура;  $p$  — давление газа в порах;  $\omega$  — линейная скорость перемещения поверхности разрушения;  $(\rho v)_{1w}$ ,  $(\rho v)_{2w}$  и  $(\rho v)_{3w}$  — массовые скорости уноса за счет пиролиза смолы, гетерогенных процессов окисления и сублимации поверхности УФК соответственно;  $\rho$  — истинная плотность;  $v$  — скорость газообразных продуктов реакции разложения связующего;  $m$  — молекулярная масса;  $c_p$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $z$  и  $\delta$  — коэффициенты теплоемкости, теплопроводности, динамической вязкости, проницаемости и теплоотдачи соответственно;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $x(t)$  — граница раздела между газом и к-фазой;  $\varepsilon_j$  — излучательная способность поверхности ( $\varepsilon_{1j}$  — графита,  $\varepsilon_{2j}$  — кокса);  $E$ ,  $k$ ,  $Q$  и  $n$  — энергия активации, предэкспонент, тепловой эффект и порядок реакции соответственно;  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  —

стехиометрические коэффициенты;  $c_{\alpha w}$  — массовые концентрации компонентов на границе раздела газовой и к-фаз;  $q_w$  — тепловой поток из газовой фазы;  $Q_w$  — суммарный тепловой поток, поступающий в к-фазу;  $r_w$  — радиус закругления;  $M_\infty$  — число Маха;  $\theta$  — угол конусности;  $\alpha_T$  — обобщенный коэффициент теплоотдачи;  $u_\infty$  — скорость набегающего потока;  $h$  — энтальпия;  $Pr$  — число Прандтля;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $p_c^*$  — давление насыщенных паров;  $p_c$  — парциальное давление паров;  $A_c$  — коэффициент аккомодации графита;  $L_j$  — начальная толщина слоев УФК;  $\varphi_{ij}$  — объемные доли.

В граничном условии (11) суммирование производится по независимым химическим реакциям в соответствии с принятой кинетической схемой (1) и обозначениями (2).  $U_s$  в (11) отвечает эффективной реакции окисления кокса. Индексы \* и  $w$  приписываются характерным величинам и термодинамическим параметрам на границе раздела газообразной и к-фаз,  $\infty$ ,  $e$  и  $e0$  — величинам набегающего газового потока на бесконечности, на внешней границе пограничного слоя и в точке торможения соответственно,  $n$  и  $s$  — величинам, связанным с пиролизом и гетерогенной реакцией окисления кокса,  $i$  — начальным значениям,  $\alpha w$  — порядковому номеру концентрации компонентов на границе раздела газообразной и к-фаз,  $i = 1 \div 4$  отвечают физическим характеристикам связующего, кокса, газа и наполнителя соответственно,  $j$  соответствует номеру слоя УФК,  $t$  — турбулентному течению в пограничном слое.

Выражения (3) — (7) есть уравнения сохранения массы полимерного связующего, кокса, наполнителя, газообразного продукта реакции пиролиза и энергии двухфазной многослойной реагирующей среды соответственно. Первое уравнение (8) — закон сохранения количества движения (закон Дарси), второе и третье — термическое уравнение состояния газообразных продуктов фильтрации и алгебраический интеграл, вытекающий из определения объемных долей компонентов [3]. Проницаемость УФК определяется известной формулой Козени — Кармана [3]. В отличие от [8] уравнения сохранения в УФК записаны в подвижной системе координат. Как следует из постановки задачи, плотности связующего и кокса выбирались одинаковыми для всех трех слоев многослойного УФК ((9) — уравнение теплопроводности четвертого слоя (подложки)).

Условия (11) и (12) — законы сохранения энергии и массы компонентов на границе раздела газообразной и к-фаз. Тепловой поток на боковой поверхности  $q_w$  находился по формуле из [9]. Отношения величин  $p_c/p_{c0}$  пересчитывались из табличных данных [10]. При записи законов сохранения для компонентов на границе раздела сред использовалась аналогия процессов тепло- и массообмена. Выражение (13) — условие равенства давления в порах и во внешней среде на нагреваемой стороне первого слоя УФК, а (14) — непротекания газовой фазы на «холодной» границе третьего слоя УФК; соотношения (16) — (18) представляют собой баланс энергии, равенства температур на границах, разделяющих первый — второй, второй — третий, третий — четвертый слои УФК, (19) — теплообмен по закону Ньютона.

#### Методика расчета, тестовые проверки и исходные данные

В процессе реализации алгоритма численного решения поставленной краевой задачи (3) — (19) (использовались неявные, абсолютно устойчивые монотонные разностные схемы, полученные на основе итерационно-интерполяционного метода [11]) выполняются следующие вычислительные модули:

1) расчет параметров обтекания за ударной волной [12] и  $\gamma$ ; 2) определение параметров равновесного состава воздуха и параметров в точке торможения [12]; 3) вычисление энтальпий и теплоемкостей компонентов

химических реакций и воздуха; 4) нахождение параметров на внешней границе пограничного слоя; 5) расчет коэффициентов теплообмена, теплового потока из газовой фазы; 6) поиск концентрации компонентов на поверхности тела и объемных долей при пиролизе УФК; 7) определение массовых скоростей уноса  $(\rho v)_{iw}$   $i = 1, 2, 3$ , линейной скорости перемещения поверхности разрушения и границы раздела между газообразной и ж-фазой.

Во всех вариантах задача решалась с переменным шагом по времени, который выбирался из условия заданной точности. При уменьшении толщины материала в ходе выгорания поверхности уменьшался шаг разностной сетки по пространству, и в случае выгорания слоя часть узлов разностной сетки отбрасывалась.

Для прочих равных входных данных повторены результаты работ [3, 5] по сравнению скорости массового уноса в режиме окисления [3] и сублимации графита [5] при заданной температуре тела от 1000 до 4000 К.

Термокинетические постоянные для реакций (1) взяты из табл. 5 работ [3—6]. Тепловые эффекты реакций (1) определяются общепринятым образом [13]. Стандартная энтальпия образования компонентов брались из справочника [13]. Значение  $c_{pw}$  как функция температуры рассчитывалась по интерполяционной формуле из [13]. Теплофизические параметры графитов ( $\lambda_{ij}$ ,  $c_{p_{ij}}$ ) В-1, ВПН и ГМЗ в зависимости от температуры взяты из справочника [14], а термокинетические постоянные смолы — из [4].

Реакция окисления кокса, который образуется в ходе реакции пиролиза, в кинетическо-диффузионном режиме моделировалась одной реакцией с эффективными термокинетическими постоянными  $k_3$ ,  $E_3$ . Значения излучательной способности угля, поликристаллического графита, кокса, армированного угольными волокнами фенольной смолы, выбирались в соответствии с [15].

Приводимые ниже результаты получены при  $T_n = 300$  К,  $T_p = 1500$  К,  $\mu_* = 5,6 \cdot 10^{-5}$  кг/(м·с),  $z_* = 5 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>,  $\rho_1 = 1220$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 1300$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{3n} = 2 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{4,1} = 1900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{4,2} = 1800$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{4,3} = 1660$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_{p1} = 1700$  Дж/(кг·К),  $c_{p2} = 670$  Дж/(кг·К),  $c_{p3} = 1260$  Дж/(кг·К),  $\lambda_1 = 0,2$  Вт/(м·К),  $\lambda_2 = 0,041$  Вт/(м·К),  $\lambda_{3*} = 0,08$  Вт/(м·К),  $R = 8,31$  Дж/(моль·К),  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>),  $m_{n3} = 28$  кг/кмоль,  $E_n = 7,54 \cdot 10^4$  Дж/моль,  $k_n \rho_1^{n-1} = 3,15 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup>,  $n = 5$ ,  $Q_n = 1,257 \cdot 10^6$  Дж/кг,  $c_p = 487$  Дж/(кг·К),  $\lambda = 46,2$  Вт/(м·К),  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $L_1 = 4 \cdot 10^{-3}$  м,  $L_2 = 8 \cdot 10^{-3}$  м,  $L_3 = 2 \cdot 10^{-2}$  м,  $L_4 = 0,1$  м,  $\delta = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $r_w = 0,2$  м,  $\theta = 10^\circ$ ,  $E_8 = 93227$  К,  $E_7 = 85715$  К,  $D_8 = 23,93$ ,  $D_7 = 18,69$ ,  $A_{c8} = 0,09$ ,  $A_{c7} = 0,3$ ,  $g = 0,4$ ,  $Pr = 0,72$ ,  $s/r_w = 4$ ,  $p_c/p_{c0} = (0,0338 - 0,0408)$ ,  $\varphi_{1n} = 0,32$ ,  $\varphi_{2n} = 10^{-3}$ ,  $\varphi_{4n} = 0,65$ ,  $\varepsilon_{1j} = \varepsilon_{2j} = 0,85$ ,  $j = 1, 2, 3$ ,  $c_{a1w} = 0$ ,  $\alpha = 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8$ ,  $c_{41w} = 1$ .

### Результаты численного решения и их анализ

Рассмотрим обтекание многослойного УФК в режиме пиролиза с учетом только гетерогенных реакций рекомбинации 5 и 6 из кинетической схемы (1) при параметрах торможения, показанных на рис. 1, а [3]. На рис. 1, б даны штриховыми линиями зависимости  $T_w$ ,  $q_w$  и  $Q_w$  от времени в фиксированном сечении  $\bar{s} = 4$  на боковой поверхности УФК. Из анализа результатов численного решения задачи следует, что по мере роста значения  $q_w$  возрастает  $T_w$ . При уменьшении давления и энтальпии торможения конвективный поток начинает падать, а поток за счет излучения поверхности возрастает, общий суммарный поток в ж-фазу  $Q_w$  уменьшается и снижается  $T_w$ .

На рис. 2 изображены поля температур и давления газа в порах УФК в моменты времени  $t$ , с: 1 — 20,2; 2 — 25,6; 3 — 30,2; 4 — 36,06 (штриховые кривые отвечают многослойному инертному сплошному телу

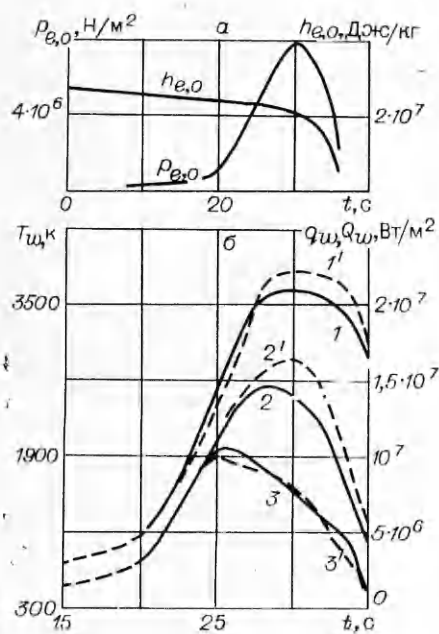


Рис. 1. Параметры торможения (а) и зависимость температуры поверхности (1), конвективного теплового потока (2) и суммарного теплового потока в к-фазу (3) от времени (б).  
 — режим комбинированного разрушения; — режим пиролиза фенолформальдегидной смолы.

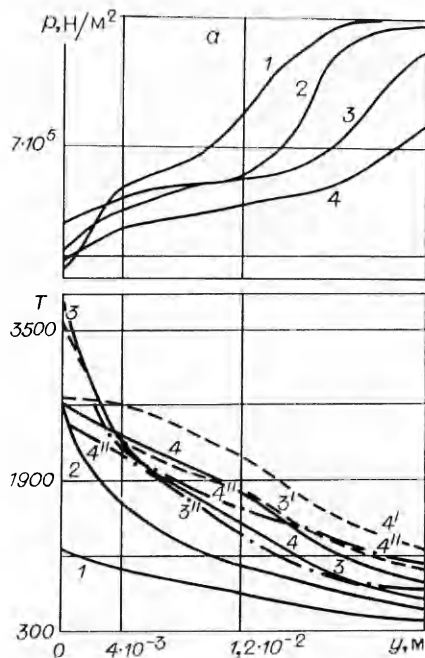


Рис. 2. Давление газа в порах УФК в режиме пиролиза к-фазы (а) и распределение температуры УФК по пространству в различные моменты времени (б).  
 — температура инертного прогрева многослойного сплошного тела; — режим пиролиза двухслойного; — режим пиролиза многослойного УФК.

в моменты времени 30,2 (3') и 36,06 с (4'). Здесь поля приведены на глубине первого, второго и части третьего слоев УФК. Эффективность пиролиза как теплового барьера выражается в более низкой температуре на стыке УФК с подложкой. Последнее объясняется поглощением тепла внутри УФК из-за эндотермической реакции разложения смолы. Различие в поле температур обусловлено также различием эффективных теплофизических характеристик, так как для сплошного тела принималось  $\varphi_4 = 1$ .

Массовая скорость вдува  $(\rho v)_{1w}$  (см. штриховую кривую 3' на рис. 3) за счет пиролиза к-фазы увеличивается по мере роста  $Q_w$  и принимает максимальное значение. Затем  $(\rho v)_{1w}$  уменьшается вследствие снижения  $Q_w$ , увеличения гидродинамического сопротивления при возрастании толщины прококсованного слоя УФК и падения градиента давления газа в порах (см. рис. 2, а). Снижение начальной проницаемости в 10 раз и порядка реакции пиролиза смолы до  $n = 3$  приводит к изменению  $(\rho v)_{1w}$  не более чем на 5%. Однако при прочих одинаковых входных данных массовый унос изменяется на 40% при уменьшении предэкспоненциального множителя на два порядка, что говорит о важности достоверного знания кинетических констант.

На рис. 2, б линиями 3'' и 4'' показаны профили температур в режиме пиролиза для УФК, в трех слоях которого теплофизические постоянные наполнители соответствуют графиту В-1, подложка — сталь. Так как теплопроводность В-1 существенно выше графитов ВПШ и ГМЗ [14], то при прочих равных условиях прогрев такого двухслойного композиционного материала вблизи подложки в те же самые моменты времени значительно выше. Поэтому и массовый унос за счет пиролиза смолы в нем может быть на 30% выше (см. кривую 3'' на рис. 3), чем у многослойного УФК.



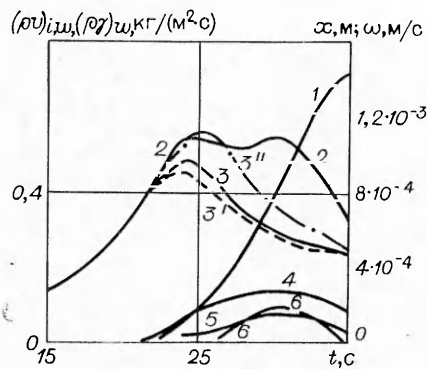


Рис. 3. Зависимость массовой скорости уноса за счет пиролиза смолы (3), окисления (4), сублимации поверхности УФК (6), полного массового уноса (2), глубины выгорания тела (1) и линейной скорости перемещения поверхности разрушения (5) от времени в режиме комбинированного разрушения УФК. — — —  $(\rho v)_{1w}$  в режиме пиролиза многослойного УФК; - - - - в режиме пиролиза двухслойного УФК.

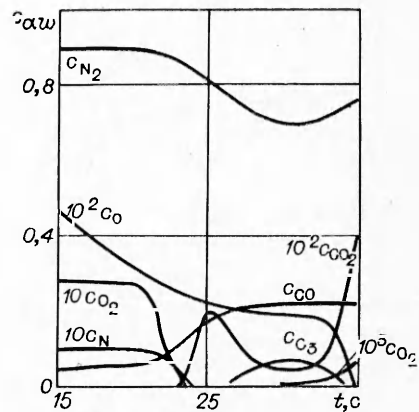


Рис. 4. Массовые концентрации компонентов на поверхности УФК в режиме комбинированного разрушения.

Рассмотрим обтекание многослойного УФК в режиме комбинированного термохимического разрушения: пиролиза к-фазы, окисления и сублимации

поверхности материала при тех же параметрах торможения (сплошные кривые рис. 1, б и 3).

Из анализа рис. 1, б следует, что при  $t > 22$  с суммарный тепловой поток в к-фазу за время процесса в режиме комбинированного разрушения поверхности УФК больше, чем в режиме пиролиза. Это связано с дополнительным выделением тепла от экзотермических реакций горения (1) поверхности УФК. Однако  $T_w$  в данном случае сначала выше, а затем ( $t > 27,5$  с) ниже значения  $T_w$  при пиролизе. Дело в том, что при  $T_w > 3300$  К вступает в силу режим сублимации углеродного материала, поэтому начинает дополнительно возрастать линейная скорость перемещения фронта термохимического разрушения  $\phi$  (см. рис. 3, 5). В результате появляется дополнительный сток тепла на поверхности и внутри УФК, при котором температура поверхности в случае комбинированного разрушения ниже, чем значение  $T_w$  в режиме пиролиза. С момента  $t > 26$  с конвективный тепловой поток при пиролизе выше значения  $q_w$  в режиме комбинированного разрушения тела. Это обусловлено меньшей экранизацией теплового потока из газовой фазы за счет выдува только продуктов разложения смолы при пиролизе (см. штриховую кривую 3' на рис. 3) по сравнению со случаем комбинированного разрушения (см. кривую 2 для полного массового уноса  $(\rho v)_w$ ).

На рис. 4 приведены концентрации компонентов на границе раздела газообразной и к-фаз. При  $T_w > 3300$  К начинается перестройка химического взаимодействия из-за сублимации  $C_3$ . Наблюдается падение концентрации  $O$  и возрастание концентрации  $C_3$ , в результате чего появляется сублимационная составляющая массового уноса  $(\rho v)_{3w}$ . Отметим, что  $O_2$  практически исчезает в кинетическом режиме горения поверхности УФК, а при  $t > 30$  с  $c_{2w}$  вновь возрастает вследствие увеличения концентрации  $c_{2e}$  и последующей диффузии к поверхности. Кривая  $C_{CO}$  иллюстрирует появление  $CO$  в кинетическом режиме, а затем выход на постоянное значение  $CO$  в диффузионном режиме окисления тела, что обуславливает появление массового уноса. Поведение  $C_{N_2}$  определяется дополнительным подводом данного инертного компонента со стороны пористой среды.

Наибольший вклад в полный массовый унос за время процесса дает пиролиз смолы, а глубина выгорания УФК  $x(t)$  в основном начинает расти в диффузионном режиме окисления и сублимации поверхности



графита. Необходимо добавить, что для композиционных материалов с более низкой теплопроводностью вклад каждой из составляющих  $(\rho v)_{iw}$  в полный массовый унос может быть иной, чем у УФК в представленном случае. При меньших значениях теплопроводности наполнителей  $\lambda_{i,j}$  в каждом слое тело за время протекания процесса прогревается на меньшую глубину, и вклад за счет пиролиза  $(\rho v)_{iw}$  в полный массовый унос уменьшается. В области наибольших значений конвективных тепловых потоков в этом случае максимальный вклад в  $(\rho v)_{iw}$  может достигаться за счет сублимации материала. По этой причине для выбора необходимой толщины УФК важное значение имеет достоверность знания теплофизических характеристик композиционного материала.

Вследствие падения конвективного теплового потока по мере удаления от носка в фиксированные моменты времени по обводу тела могут иметь место различные режимы термохимического разрушения УФК. В частности, при больших значениях времени протекания процесса вблизи лобовой части тела полный массовый унос определяется процессами пиролиза, окисления и отчасти сублимации поверхности УФК. При движении по обводу тела для выбранных исходных данных значение  $(\rho v)_{iw}$  в сечениях  $\bar{s} = 5$  и 6 определяется преимущественно массовым уносом за счет пиролиза смолы.

Таким образом, в широком диапазоне изменения конвективных тепловых потоков в общем случае реализуется режим комбинированного термохимического разрушения композиционного материала, причем вклад составляющих  $(\rho v)_{iw}$  в общий массовый унос меняется с течением времени и в значительной степени зависит от точности используемых теплофизических и термокинетических характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шнайдер, Долтон, Рид. РТК, 1968, 6, 1, 76.
2. Эприл, Пайк, Валле. РТК, 1971, 9, 6, 148.
3. Гришин А. М., Фомин В. М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред.— Новосибирск: Наука, 1984.
4. Гордеев А. Н., Колесников А. Ф., Якушин М. И. Изв. АН СССР. МЖГ, 1985, 3, 166.
5. Гофман А. Г., Гришин А. М. ПМТФ, 1984, 4, 107.
6. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками.— М.: Машиностроение, 1976.
7. Никитин П. В., Овсянников В. М., Холодков И. В. ИФЖ, 1986, L, 3, 367.
8. Гришин А. М., Якимов А. С., Миков В. Л. ФГВ, 1981, 17, 2, 13.
9. Землянский Б. А., Степанов Г. Н. Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, 5, 173.
10. Лунев В. В., Магомедов К. М., Павлов В. Г. Гиперзвуковое обтекание притупленных конусов с учетом равновесных физико-химических превращений.— М.: ВЦ АН СССР, 1968.
11. Гришин А. М., Берцун В. П., Зипченко В. И. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения.— Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
12. Ланин Ю. В. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа.— М.: Наука, 1982.
13. Карапетьянц М. Х., Карапетьянц М. М. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ.— М.: Химия, 1968.
14. Соседов В. П. Свойства конструкционных материалов на основе углерода. Справочник.— М.: Металлургия, 1975.
15. Уилсон, Спитцер. РТК, 1968, 6, 4, 108.

Поступила в редакцию 6/VIII 1986,  
после доработки — 6/IV 1987