

4. Бондарь А.М. Явление взрывной дегидратации колеманита // Изв. АН Латв.ССР. — 1981. — № 5. — С. 580—592.
5. Туманов В.В., Берлин Ал. Ал., Халтуринский Н.А. Изучение выгорания полимеров // Высокомолекулярные соединения. — 1978. — XX, № 12. — С. 2787—2790.

105043, г. Москва,
МХТУ им. Д.И. Менделеева

Поступила в редакцию 2/IV 1993,
после доработки — 24/IX 1993

УДК 536.46:536.245.022

В.И. Зинченко, Г.Ф. Костин, А.С. Якимов

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ПРИ РАЗРУШЕНИИ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА

В рамках математической модели реагирующей среды дается численный анализ процесса нестационарного тепло- и массообмена в углепластике при действии высокосубзвукового потока. Получены аналитические решения для величины массового уноса с поверхности материала в зависимости от скорости уноса за счет пиролиза углепластика, согласующиеся с результатами численного интегрирования при постоянных и переменных параметрах торможения. Проанализированы возможные случаи упрощения граничных условий и даны рекомендации для проведения серийных расчетов.

В работе [1] при описании термохимического разрушения углефенольного композиционного материала использована модель недеформируемого пористого реагирующего тела [2]. Найдено [1], что температурное поле в материале и массовая скорость уноса зависят от специфики неравновесных физико-химических процессов, протекающих одновременно на поверхности и внутри конденсированной фазы (к-фазы).

Цель данной работы связана с анализом влияния вдува продуктов пиролиза углепластикового материала на величину уноса с поверхности и рассмотрением соотношения указанных долей уноса при различных значениях параметров торможения. Например, при движении по траектории на больших высотах преобладающий вклад в величину полного уноса дает пиролиз материала $(\rho v)_{1w}$, что, в свою очередь, может оказывать существенное влияние на аэродинамические характеристики. Затем унос за счет реакций окисления и сублимации может существенно превышать $(\rho v)_{1w}$, но в целом за счет возрастания числа Рейнольдса и величины $(\alpha/c_p)_0$ параметр вдува $(\rho v)_w/(\alpha/c_p)_0$ существенно уменьшается по сравнению с предыдущим участком движения.

При различных режимах протекания гетерогенных химических реакций получены аналитические решения для уноса с поверхности в зависимости от $(\rho v)_{1w}$ и проанализированы возможные случаи упрощения граничных условий.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вопрос о математическом моделировании термохимического разрушения и горения композиционных материалов (КМ) обсуждался в ряде работ [1—4], в которых приведена подробная библиография. В настоящей статье для описания термохимического разрушения КМ используется математическая модель реагирующей среды [3] с граничными условиями различного типа.

Считается, что к-фаза есть углепластик (УП) на теплоизолированной подложке. Анализ работ [1—3], посвященных вопросу взаимодействия высокосубзвукового потока воздуха с графитовой поверхностью, показал, что для правильной оценки массового уноса необходимо наряду с уносом за счет пиролиза КМ учитывать ряд гетерогенных химических реакций и сублимацию поверхности УП.

© В.И. Зинченко, Г.Ф. Костин, А.С. Якимов, 1994.

Используя ряд общепринятых допущений, приведенных в [1], математически задача сводится к решению уравнений сохранения энергии и химической кинетики [3], выписанных в подвижной системе координат, связанной с фронтом термохимического разрушения:

$$C_{p1} \rho_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} - \omega \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) + C_{pr} G \frac{\partial T_1}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) - Q_n \frac{d\rho_1}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{d\rho_1}{dt} = \frac{\partial \rho_1}{\partial t} - \omega \frac{\partial \rho_1}{\partial y} = \left\{ -K_n \rho_{1n} \left(\frac{\rho_1 - \rho_{1*}}{\rho_{1n}} \right)^n \exp \left(-\frac{E_n}{RT_1} \right), \right. \\ \left. \rho_1 > \rho_{1*}, \quad 0, \quad \rho_1 \leq \rho_{1*}, \right. \quad (2)$$

$$C_{p2} \rho_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} - \omega \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$G = \int_y^{\epsilon_1} \frac{d\rho_1}{dt} dy, \quad \omega = \frac{(\rho v)_{2w} + (\rho v)_{3w}}{\rho_{1w}}.$$

Систему уравнений (1)–(3) необходимо решать с учетом следующих начальных и граничных условий [1, 2, 5]:

$$T_i |_{t=0} = T_{in}, \quad i = 1, 2, \quad \rho_1 |_{t=0} = \rho_{1n}; \quad (4)$$

$$q_w = \sum_{i=2}^3 (\rho v)_{iw} (h_w - h_c) - (\rho v)_w (h_w - h_w^{(1)}) - \varphi \epsilon \sigma T_{1w}^4 = \\ = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0-s(t)}, \quad (5)$$

$$q_w = \frac{\alpha}{c_p} (h_{cw} - h_w), \quad \frac{\alpha}{c_p} = \left(\frac{\alpha}{c_p} \right)_0 - \gamma_i (\rho v)_w, \quad i = 1, 2, \\ J_{jw} + (\rho v)_w c_{jw} = \varphi R_{jw} + (\rho v)_{1w} c_{jw}^{(1)}, \quad j = \overline{1, 8}, \quad (6)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=\epsilon_1-0} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=\epsilon_1+0}, \quad T_1 \Big|_{y=\epsilon_1-0} = T_2 \Big|_{y=\epsilon_1+0}, \quad \rho_1 \Big|_{y=\epsilon_1} = \rho_{1n}, \quad (7)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=\epsilon_2} = \delta (T_2 \Big|_{y=\epsilon_2} - T_n), \quad (8)$$

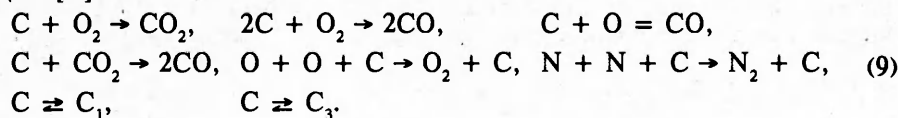
$$l_1 = L_1 - s(t), \quad l_2 = L_2 + l_1, \quad s(t) = \int_0^t \omega dt, \quad \bar{c}_{jw} = \bar{c}_j (c_{jw} - c_{je}),$$

$$\beta = \beta_j = \frac{\alpha}{c_p}, \quad \gamma_1 = 0,6(m_e/m_w)^{0,29}, \quad \gamma_2 = 0,2(m_e/m_w)^{0,35}, \quad (\rho v)_{1w} = G_w,$$

$$Q_w = q_w - \sum_{i=2}^3 (\rho v)_{iw} (h_w - h_c) - (\rho v)_{1w} (h_w - h_w^{(1)}) - \varphi \epsilon \sigma T_{1w}^4,$$

$$(\rho v)_w = \sum_{i=1}^3 (\rho v)_{iw}, \quad h_w = \sum_{j=1}^8 c_{jw}, \quad m_w^{-1} = \sum_{j=1}^8 c_j / m_j.$$

При определении c_{jw} из условий (6) предполагалось, что на поверхности углеродного наполнителя имеют место следующие гетерогенные химические реакции [1]:



Молярные и массовые скорости протекания этих реакций подробно выписаны в [1]. Запишем выражения для массовых скоростей уноса

$$\begin{aligned}
 (\rho v)_{2w} &= (\varphi \rho)_{2w} \left[\left(\frac{m_0}{m_2} - 1 \right) c_{2w} B_2 + \left(2 \frac{m_5}{m_2} - 1 \right) c_{2w} B_2 + \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{m_5}{m_1} - 1 \right) c_{1w} B_3 + \left(\frac{2m_5}{m_0} - 1 \right) c_{6w} B_4 \right], \\
 (\rho v)_{3w} &= \varphi \sum_{i=7}^{\infty} m_i A_{ci} (p_{ci}^* - p_{ci}) (2\pi RT_{1w} m_i)^{-0.5}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

В (10) порядковый номер компонента соответствует следующему порядку их перечисления: O, O₂, N, N₂, CO, CO₂, C₁, C₃,

$$B_i = k_i \exp \left(- \frac{E_i}{RT_{1w}} \right), \quad p_{ci}^* = 10^5 \exp (D_i - E_i/T_{1w}), \quad \rho_w = \frac{p_e m_e}{RT_{1w}}.$$

Здесь и ниже использовались следующие обозначения: t — время; y — пространственная координата; T — температура; ρ — плотность; h — энтальпия; G — массовый расход газообразных продуктов разложения связующего; $(\rho v)_{iw}$, $i = 1, 2, 3$, — массовые скорости уноса за счет пиролиза смолы, гетерогенных процессов окисления и сублимации УП соответственно; c_p , λ , δ — коэффициенты теплоемкости, теплопроводности и теплоотдачи; $(\alpha/c_p)_0$ — коэффициент теплообмена в отсутствие выдува; β — коэффициент массообмена; φ — доля поверхности УП, где идут гетерогенные процессы окисления и сублимации; ω — линейная скорость перемещения поверхности разрушения; $s(t)$ — граница раздела между газом и к-фазой; c_{jw} — массовые концентрации компонентов на границе раздела газовой и к-фаз; E , k , Q , ν — энергия активации, предэкспонент, тепловой эффект и порядок реакции соответственно; q_w — конвективный тепловой поток из газовой фазы; Q_w — суммарный тепловой поток из газовой в к-фазу; R — универсальная газовая постоянная; ϵ — излучательная способность поверхности УП; σ — постоянная Стефана — Больцмана; L_1 — начальная толщина первого слоя КМ; γ_1 и γ_2 — коэффициенты ослабления в формуле для q_w , отвечающие ламинарному и турбулентному режимам течения в пограничном слое; m' — молекулярная масса; p — давление.

Индекс w приписывается термодинамическим параметрам на границе раздела газообразной и к-фаз; p отвечает величинам, связанным с пиролизом связующего; n — начальным величинам; γ — параметрам воздушной среды; (1) — характеристикам вдуваемого газа со стороны УП; 1, 2 приписывается характеристикам первого и второго слоев композиционного материала; e и $e0$ — величинам на внешней границе пограничного слоя и в точке торможения соответственно.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В процессе реализации алгоритма численного решения краевой задачи (1) — (8) (использовались неявные, абсолютно устойчивые разностные схемы, полученные на основе итерационно-интерполяционного метода [6]) выполняются следующие процедуры: 1) при заданных условиях в набегающем потоке с помощью таблиц [7] определялись параметры торможения, 2) далее для местных значений T_e и p_e на внешней границе пограничного слоя проводился расчет концентраций диссоциированного воздуха c_e , $j = \overline{1,5}$, по методике работ [8], 3) при заданной температуре поверхности из условий (6) при использовании аналогии тепло- и массообмена отыскивался состав c_{jw} , $j = \overline{1,8}$, энтальпия $h_w = \sum_{j=1}^8 c_{jw} h_j$ и скорости массового уноса $(\rho v)_{iw}$, $i = 2, 3$.

Затем проводился расчет исходной системы уравнений, определялось поле температур и плотностей КМ и в следующий момент времени при движении по траектории отыскивались новые параметры торможения и т.д. Из-за отсутствия информации о составе газа, вдуваемого со стороны материала, значения $c_{jw}^{(1)}$, как и в [1], отождествлялись со вдувом азота. Кинетические константы гетерогенных химических реакций (9) брались из [2], для энтальпии углеродного материала в конденсированном состоянии использовалась формула работы [9], для энтальпии воздушной смеси использовались результаты работ [10, 11]. Теплофизические характеристики разлагающегося первого слоя брались с учетом общепринятых выражений [3, 12] в виде аппроксимационных зависимостей либо табличных величин; термокинетические постоянные для фенольного связующего близки к данным [13].

Приводимые ниже результаты получены при $T_w = 300$ К, $i = 1, 2$, $\rho_{1*} = 1350$ кг/м³, $\rho_{1*} = 10^3$ кг/м³, $\rho_2 = 1120$ кг/м³, $c_{p2} = 1530$ Дж/(кг·К), $\lambda_2 = 2,34$ Вт/(м·К), $R = 8,31$ Дж/(моль·К), $E_p = 83699$ Дж/моль, $k_p = 7,1 \cdot 10^4$ с⁻¹, $Q_p = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг, $\delta = 0$, $\nu = 1$, $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴), $L_1 = 10^{-2}$ м, $L_2 = 10^{-3}$ м, $\varphi = 0,65$, $\varepsilon = 0,9$, $c_{jw}^{(1)} = 0$, $j \neq 4$, $c_{2w}^{(1)} = 1$ для различных значений $(\alpha/c_p)_0$, энтальпии торможения h_{e0} и давления p_e .

РЕЖИМЫ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрим вначале обтекание КМ при инертном прогреве по глубине тела. В этом случае из уравнения (1) вытекает уравнение теплопроводности, записанное в подвижной системе координат, а условие баланса энергии (5) примет вид

$$\frac{\alpha}{c_p} (h_{e0} - h_w) - (\rho v)_w (h_w - h_c) - \varepsilon \sigma T_{1w}^4 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0-s(t)}. \quad (11)$$

Учитывая выражение для α/c_p через значение коэффициента теплоотдачи в отсутствие разрушения поверхности, запишем (11) в виде

$$(\alpha/c_p)_0 (h_{e0} - h_w) - \gamma (\rho v)_w (h_{e0} - h_w) - (\rho v)_w (h_c - h_w) - \varepsilon \sigma T_{1w}^4 = -\lambda_1 (\partial T_1 / \partial y) \Big|_{y=0-s(t)}. \quad (12)$$

Для кинетического и диффузионного режимов протекания гетерогенных химических реакций $(\rho v)_w = (\rho v)_{2w}$ на углеродистой поверхности анализ слагаемых в левой части (12) показывает [3], что второй и третий члены примерно равны по величине и имеют равные знаки, откуда вытекает упрощенное условие

$$(\alpha/c_p)_0 (h_{e0} - h_w) - \varepsilon \sigma T_{1w}^4 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0-s(t)}. \quad (13)$$

При значительном перепаде энтальпий $h_{e0} - h_w$ будем заменять истинное значение h_w величиной, отыскиваемой для воздушной среды, $h_w = h_r$.

Для проверки сделанных предположений проведены расчеты с постоянными параметрами торможения и ламинарном режиме течения в пограничном слое ($\gamma = \gamma_1$) при $(\alpha/c_p)_0 = 0,2$ кг/(м²С), $h_{e0} = 2,47 \cdot 10^7$ Дж/кг, $p_e = 1,013 \cdot 10^5$ Н/м².

На рис. 1 приведены зависимости от времени температуры поверхности T_{1w} , суммарного теплового потока в к-фазу Q_w и массового уноса $(\rho v)_{2w}$ за счет окисления углеродной поверхности КМ (штриховые кривые). Видно, что T_{1w} и Q_w , полученные при использовании (12) и (13), практически совпадают (кривые 1, 2), что позволяет значительно упрощать исходную постановку задачи. Отметим, что найденные с помощью точной постановки значения

$(\rho v)_{2w}$ из (10) согласуются с результатами работы [14] и приведенным ниже аналитическим решением.

Для комбинированного режима разрушения, включающего пиролиз КМ и окисление поверхности УП, балансовые условия сохранения энергии имеют вид

$$[(\alpha/c_p)_0 - \gamma(\rho v)_w](h_{e0} - h_w) - (\rho v)_{2w}(h_w - h_c) - (\rho v)_{1w}(h_w - h_w^{(1)}) - \varphi \varepsilon \sigma T_{1w}^4 = -\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial y} \right|_{y=0-s(t)}, \quad (14)$$

$$(\rho v)_w = (\rho v)_{1w} + (\rho v)_{2w}.$$

Учитывая предыдущие результаты, связанные с упрощением постановки задачи на углеродной поверхности, условие (14) может быть записано в виде

$$[(\alpha/c_p)_0 - \gamma(\rho v)_{1w}](h_{e0} - h_w) - (\rho v)_{1w}(h_w - h_w^{(1)}) - \varphi \varepsilon \sigma T_{1w}^4 = -\lambda_1 \left. (\partial T_1 / \partial y) \right|_{y=0-s(t)}. \quad (15)$$

При $h_{e0} \gg h_w$ и сделанном допущении относительно $h_w^{(1)}$, используя для определения h_w его значение для воздуха h_p , можно окончательно записать (15) в виде

$$[(\alpha/c_p)_0 - \gamma(\rho v)_{1w}](h_{e0} - h_p) - \varphi \varepsilon \sigma T_{1w}^4 = -\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial y} \right|_{y=0-s(t)}. \quad (16)$$

Данный режим прогрева с прежними входными данными представлен на рис. 1 для постановок задач с точным (14) и приближенным условием (16) (штрихпунктирные кривые). Как видно, T_{1w} и Q_w для принятых условий очень близки, что позволяет использовать граничное условие (16) для получения тепловых характеристик. Величины массовой скорости вдува продуктов фильтрации $(\rho v)_{1w}$ и окисления поверхности УП $(\rho v)_{2w}$ показаны на рис. 1, б, в. Отметим, что в отличие от первого случая прогрева УП массовый унос за счет гетерогенных реакций окисления сильно снижается, что обусловлено для кинетического режима окисления уменьшением температуры поверхности, а для диффузионного — влиянием вдува продуктов пиролиза на характеристики пограничного слоя, в частности на величину коэффициента теплообмена (α/c_p) .

Для этих же условий $(\alpha/c_p)_0$, h_{e0} , p_c сплошными кривыми на рис. 1 показаны зависимости характеристики теплообмена от времени протекания процесса при турбулентном течении в пограничном слое. Как и выше, кривые 1, 2 рис. 1, а отвечают балансовым условиям сохранения энергии (14) и (16) соответственно и наблюдается хорошее согласование по T_{1w} и Q_w для точной и приближенной постановок граничных условий. Здесь большую роль играет режим течения, что приводит к сущест-

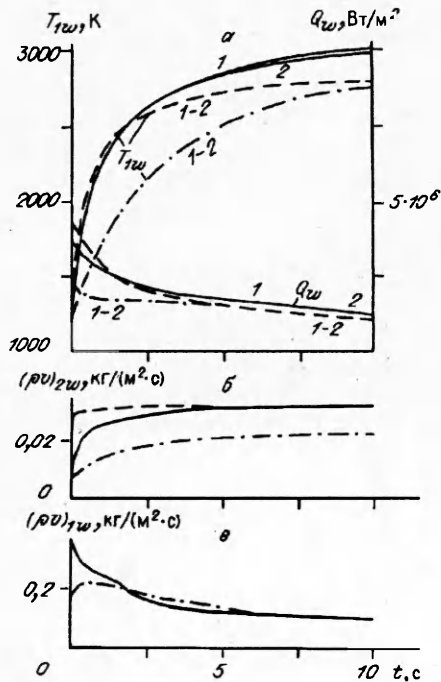


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности и суммарного теплового потока в к-фазу (а), массового уноса за счет реакций (9) (б) и массового уноса за счет пиролиза УП (в) от времени. 1 — точное граничное условие (5); 2 — упрощенное граничное условие (13), (14), (16).

венному возрастанию T_{1w} , Q_w при турбулентном характере течения в пограничном слое за счет меньшего ослабления подводимого конвективного потока. Как следует из рис. 1, массовый унос за счет гетерогенных химических реакций $(\rho v)_{2w}$ для данных условий на порядок меньше уноса за счет пиролиза $(\rho v)_{1w}$, вследствие чего прогар УП за время процесса незначителен: $s = 2,6 \cdot 10^{-4}$ м. Вследствие больших тепловых нагрузок при коэффициенте теплопроводности материала $\lambda_1 = 0,55$ для начальной температуры тела темпы роста dT_w/dt достигают $0,5 \cdot 10^5$ К/с, т.е. реализуется случай теплового удара и пик $(\rho v)_{1w}$ при турбулентном течении приходится на моменты времени, близкие к начальному. Для ламинарного течения этот процесс по времени более затянут (см. рис. 1).

Для оценки влияния вдува продуктов пиролиза на величину уноса за счет реакций окисления и сублимации $(\rho v)_{2w}$, $(\rho v)_{3w}$ рассмотрим частный случай кинетической схемы (9), когда в качестве определяющих использовались реакции $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ и $C \rightleftharpoons C_3$. Используя закон Фика, из (6), (10) получим

$$\begin{aligned} -\rho_w D \frac{\partial c_2}{\partial y} \Big|_w + (\rho v)_w c_{2w} &= -\varphi k_2 c_{2w} \rho_w \exp \left(-\frac{E_2}{RT_w} \right), \\ -\rho_w D \frac{\partial c_4}{\partial y} \Big|_w + (\rho v)_w c_{4w} &= (\rho v)_{1w} c_{4w}^{(1)}, C_{41}^{(2)} = 1, \\ -\rho_w D \frac{\partial c_5}{\partial y} \Big|_w + (\rho v)_w c_{5w} &= \frac{2\varphi k_2 c_{2w} \rho_w m_5}{m_2} \exp \left(-\frac{E_2}{RT_w} \right), \\ -\rho_w D \frac{\partial c_8}{\partial y} \Big|_w + (\rho v)_w c_{8w} &= \varphi A \left(p^* - \frac{p m_w}{m_8} C_{8w} \right) \left(\frac{m_8}{2\pi RT_w} \right)^{0,5}, \\ (\rho v)_{2w} &= \varphi k_2 c_{2w} \rho_w \exp \left(-\frac{E_2}{RT_w} \right) \left(\frac{2m_5}{m_2} - 1 \right), (\rho v)_w = \sum_{i=1}^3 (\rho v)_{iw}, \\ (\rho v)_3 &= \left(p^* - \frac{p m_w}{m_8} C_{8w} \right) \varphi A (m_8 / 2\pi RT_w)^{0,5}. \end{aligned} \quad (17)$$

По аналогии с процессами теплообмена можно записать

$$c_{2w} = \frac{c_{2e}(\alpha/c_p) - (\rho v)_{2w} m_1/m_7}{\alpha/c_p + (\rho v)_w}, \quad c_{8w} = \frac{(\rho v)_{3w}}{(\rho v)_w + \alpha/c_p}, \quad (18)$$

тогда имеем выражения для определения величины уноса

$$\begin{aligned} \left[\frac{(\rho v)_{2w}}{(\alpha/c_p)_0} \right]^2 (1 - \gamma) + \frac{(\rho v)_{2w}}{(\alpha/c_p)_0} \left[1 + \frac{(\rho v)_{1w} + (\rho v)_{3w}}{(\alpha/c_p)_0} (1 - \gamma) + \exp \left(-\frac{E_2}{RT_w} \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{\varphi k_2 \rho_w m_7}{m_1 (\alpha/c_p)_0} \left(c_{2e} \gamma + \frac{m_1}{m_7} \right) \right] = \\ = \frac{m_7 \varphi k_2 \rho_w c_{2e} \exp \left(-\frac{E_2}{RT_w} \right)}{m_1 (\alpha/c_p)_0} \left[1 - \gamma \frac{(\rho v)_{1w} + (\rho v)_{3w}}{(\alpha/c_p)_0} \right], \quad (19) \\ \left[\frac{(\rho v)_{3w}}{(\alpha/c_p)_0} \right]^2 (1 - \gamma) + \frac{(\rho v)_{3w}}{(\alpha/c_p)_0} \left[1 + \frac{(\rho v)_{1w} + (\rho v)_{2w}}{(\alpha/c_p)_0} (1 - \gamma) + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\varphi A}{(\alpha/c_p)_0} \left(\frac{m_c}{2\pi RT_w} \right)^{0.5} \left[p \frac{m_w}{m_8} - p^*(\gamma - 1) \right] \Bigg\} = \\
& = \frac{\varphi A p^*}{(\alpha/c_p)_0} \left(\frac{m_8}{2\pi RT_w} \right)^{0.5} \left[1 + (1 - \gamma) \frac{(\rho\nu)_{1w} + (\rho\nu)_{2w}}{(\alpha/c_p)_0} \right]. \quad (20)
\end{aligned}$$

Для диффузионного режима протекания реакции окисления $\left(k, \exp \left(-\frac{E_2}{RT_w} \right) \rightarrow \infty \right)$ из (19) вытекает

$$\frac{(\rho\nu)_{2w}}{(\alpha/c_p)_0} = \frac{m_7}{m_1} c_{2e} \left[1 - \gamma \frac{(\rho\nu)_{1w} + (\rho\nu)_{3w}}{(\alpha/c_p)_0} \right] \left[1 + \gamma \frac{m_7}{m_1} c_{2e} \right]^{-1}. \quad (21)$$

При $T < 3500$ К уносом за счет сублимации можно пренебречь, тогда (19), (21) дают решение для $(\rho\nu)_{2w}$ в зависимости от массовой скорости вдува продуктов пиролиза. Ниже приведено значение безразмерной скорости уноса за счет гетерогенных реакций от величины $(\rho\nu)_{1w}/(\alpha/c_p)_0$ при диффузионном режиме протекания поверхностных реакций:

$(\rho\nu)_{1w}/(\alpha/c_p)_0$	0	0,2	0,4	0,5
$(\rho\nu)_{2w}/(\alpha/c_p)_0$	0,156	0,138	0,119	0,1

При $(\rho\nu)_{1w} = 0$ решение (21) согласуется со значением, полученным в [14]. При наличии вдува за счет пиролиза решения (19), (21) хорошо согласуются с результатами численных расчетов, представленных на рис. 1, что делает возможным использование полученных решений вместо соотношений (6), (10). Вследствие упрощения исходной кинетической схемы при использовании аналитических выражений (19), (21) в качестве c_{2e} следует брать его значение без учета процессов диссоциации, т.е. $c_{2e} \approx 0,23$.

Интересно рассмотреть процессы тепло- и массообмена и разрушения материала при переменных условиях теплового нагружения, отвечающих входу в атмосферу. Для модельных зависимостей коэффициента теплообмена $(\alpha/c_p)_0$, энтальпии торможения h_{e0} и давления p_e от времени протекания процесса (рис. 2) проведены расчеты по полной модели для краевой задачи

(1)–(8) при $(\rho\nu)_w = \sum_{i=1}^3 (\rho\nu)_{iw}$ в законе ослабления для α/c_p и величине $\gamma = \gamma_2$, отвечающей турбулентному характеру течения в пограничном слое. В приближенной постановке унос с поверхности определялся из выражений (19)–(21). Использовалась также модифицированная для случая вдува газа за счет процесса пиролиза формула Скалы — Джилберта:

$$\begin{aligned}
(\rho\nu)_{2w} + (\rho\nu)_{3w} & = \left[\left(\frac{\alpha}{c_p} \right)_0 - \gamma (\rho\nu)_{1w} \right] 0,16 + \\
& + \left(\frac{\alpha}{c_p} \right)_0 2,24 \cdot 10^6 P_e^{-0,67} \exp \left(-\frac{61400}{RT_w} \right). \quad (22)
\end{aligned}$$

Первое слагаемое правой части (22) отвечает диффузионному режиму и совпадает с (21), а для уноса за счет сублимации поверхности использовалось допущение о слабом влиянии $(\rho\nu)_{1w}$ на величину $(\rho\nu)_{3w}$. Для заданных условий с течением времени последовательно реализуются кинетический, диффузионный и сублимационный режимы протекания гетерогенных химических реакций, а при $t > 8$ с тепловые нагрузки снижаются и происходит обратная смена режимов химического реагирования на поверхности.

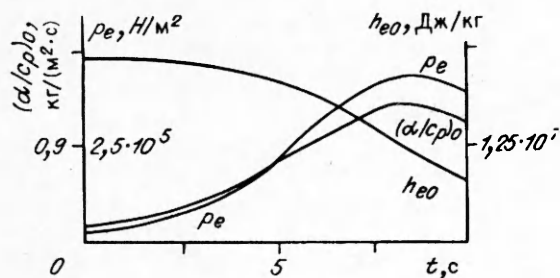


Рис. 2. Параметры торможения.

Что касается балансового условия сохранения энергии на границе раздела сред, то для высоких значений T_w при $t > 3$ с, когда начинается сублимация поверхности, а также для больших времен, когда h_{e0} становится сравнимой с величиной h_w , использование упрощенного условия вида (16) может давать большую погрешность при определении температуры поверхности. Поэтому для указанных случаев следует использовать точные балансовые условия сохранения энергии (5), (14) либо упрощенное условие (15), причем (14), (15) будут отвечать таким температурным режимам, когда сублимация поверхности не достигается. При этом встает вопрос об определении эн-

тальпии реагирующей смеси $h_w = \sum_{j=1}^8 c_w h_j$ на границе раздела сред. Наряду с условиями сохранения массы компонентов (6) для определения концентраций c_{jw} рассматривался предельный случай равновесного режима протекания гетерогенных химических реакций, для которого снимается вопрос о точности задания используемых термокинетических характеристик в выражениях для R_j [1]. Вводя концентрации элементов O, N, C

$$c_{Ow}^* \frac{m}{m_1} = x_1 + 2x_2 + x_5 + 2x_6, \quad c_{Nw}^* \frac{m}{m_3} = x_3 + 2x_4, \quad c_{Cw}^* \frac{m}{m_7} = x_7 + x_5 + x_6 + 3x_8,$$

где $x_i = c_{im}/m_i$ — молярная концентрация i -го компонента, балансовые условия сохранения массы i -го элемента с учетом аналогии тепло- и массообмена можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{c_p} (c_{Ow}^* - c_{Oe}^*) + (\rho v)_w c_{Ow}^* &= 0, \\ \frac{\alpha}{c_p} (c_{Nw}^* - c_{Ne}^*) + (\rho v)_w c_{Nw}^* &= (\rho v)_{1w}, \\ \frac{\alpha}{c_p} c_{Cw}^* + (\rho v)_w c_{Cw}^* &= (\rho v)_{2w} + (\rho v)_{3w}. \end{aligned} \quad (23)$$

Добавляя к условиям (23) уравнения равновесия для независимых химических реакций и условие равновесной сублимации

$$\begin{aligned} k_{p1} &= x_1^2 p / x_2, \quad k_{p2} = x_3^2 p / x_4, \quad k_{p3} = x_7 x_1^2 p^2 / x_6, \\ k_{p4} &= x_7 x_1 p / x_5, \quad k_{p5} = x_7^2 p^2 / x_8, \quad k_{p6} = x_7 p, \end{aligned} \quad (24)$$

получаем систему девяти уравнений для отыскания концентраций x_i и c_i и массового уноса $(\rho v)_{2w} + (\rho v)_{3w}$ из последнего соотношения (23), что в сравнении с выражениями (19)—(21) позволяет оценить влияние режима протекания поверхностных реакций на величину уноса $(\rho v)_{2w} + (\rho v)_{3w}$. Отметим также, что принятое допущение о равновесном характере протекания гетерогенных химических реакций позволило оценить роль реакции образования циана, для которой в (24) добавлялось уравнение $k_{p7} = x_7 x_3 p / x_9$, $x_9 = x_{CN}$. Это важно из-за отсутствия достаточно надежных термокинетических постоянных при неравновесном режиме протекания указанной реакции. При известном уносе $(\rho v)_{2w} + (\rho v)_{3w}$ для отыскания c_{jw} целесообразно первые два уравнения (23) представить в виде $c_{Ow}^* / c_{Nw}^* = c_{Oe}^* / [c_{Ne}^* + (\rho v)_{1w} / (\alpha / c_p)]$, использовать интеграл $\sum_{j=1}^3 c_{jw}^* = 1$ и условия (24).

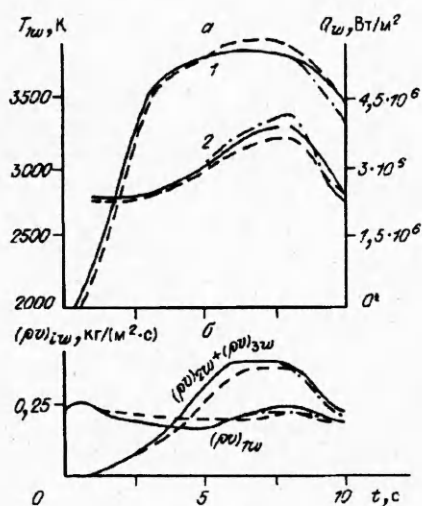


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности (1), суммарного теплового потока (2) (а) и массового уноса (б) от времени.

На рис. 3 представлены результаты расчета T_w , Q_w , $(\rho v)_{1w}$, $(\rho v)_{2w} + (\rho v)_{3w}$ от времени движения по полной модели (1)–(10) (сплошные кривые) и приближенным моделям, когда унос за счет гетерогенных реакций рассчитывался из (22) (штриховые кривые) и (19)–(21) (штрихпунктирные кривые). В двух последних случаях при $t > 2$ с расчет проводился для точного условия сохранения энергии (5) с определением h_w с помощью системы уравнений (23), (24). Результаты по энергетическим характеристикам и величинам уноса удовлет-

ворительно согласуются, что позволяет рекомендовать полученные для уноса формулы в широком диапазоне изменения условий обтекания. В отличие от рис. 1 преобладающий вклад в суммарное значение $(\rho v)_w$ при $t > 4$ с дает унос за счет реакций окисления и сублимации, а для начального периода движения суммарный выдув, как и следовало ожидать, определяется процессом пиролиза УП.

Используя полученные формулы (19), (20) и (22), можно провести оценку температуры поверхности с учетом протекания процессов пиролиза в теплозащитном материале. Для этого в качестве входной информации по величине уноса необходимо использовать результаты экспериментальной отработки теплостойкости материалов при постоянных параметрах торможения, которые представляются в виде $[(\rho v)_{2w} + (\rho v)_{3w}] / (\alpha / c_p)_0 = f(p_e, h_{e0})$, а также результаты весовых испытаний для определения величины $(\rho v)_{1w}$, например, в условиях инертной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зинченко В.И., Якимов А.С. Режимы термохимического разрушения углефенольного композиционного материала под действием теплового потока // ФГВ. — 1988. — 24, № 2. — С. 141.
2. Гришин А.М., Фомин В.М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. — Новосибирск: Наука, 1984.
3. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. — М.: Энергия, 1976.
4. Эприл, Пайк, Валле // РТК. — 1971. — 9, № 6. — С. 148.
5. Зинченко В.И., Федорова О.П., Якимов А.С. // Теплообмен. — Минск: ИТМО АН БССР, 1988. — Секция 3. — С. 77.
6. Гришин А.М., Берцун В.Н., Зинченко В.И. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. — Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
7. Предводителев А.С., Ступоченко Е.В., Самуйлов Е.В. и др. Таблицы термодинамических функций воздуха (для температур от 6000 до 12000 К и давлений от 10^{-3} до 10^3 атм). — М.: Изд-во АН СССР, 1957.
8. Лапин Ю.В. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. — М.: Наука, 1982.
9. Бучнев Л.М., Смыслов А.И. и др. // ТВТ. — 1987. — 25, № 6. — С. 1120.
10. Карапетьянц М.Х., Карапетьянц М.М. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ. — М.: Химия, 1966.
11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Физматгиз, 1963.
12. Гришин А.М., Парашин А.Д., Якимов А.С. Термохимическое разрушение углепластика при многократном импульсном нагружении // ФГВ. — 1993. — 29, № 1. — С. 87.
13. Шнайдер, Долтон, Рид // РТК. — 1968. — 7, № 1. — С. 76.
14. Скала, Джильберт // РТК. — 1965. — 3, № 9. — С. 37.

634050, г.Томск,
НИИПММ

Поступила в редакцию 20/XI 1992,
после доработки — 10/VI 1993