

4. А. А. Самарский. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977.
5. А. М. Ильин. Матем. заметки, 1969, 6, 2, 237.
6. А. И. Задорин, В. И. Игнатьев. ЖВММФ, 1983, 23, 3, 620.
7. Л. Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970.

*Поступила в редакцию 12/XII 1984,
после доработки — 11/IX 1985*

ПИРОЛИЗ ДВУХСЛОЙНОГО ТЕПЛОЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЗАДАННОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

А. М. Гришин, А. С. Якимов
(Томск)

Вопрос о математическом моделировании термохимического разрушения и горения коксующихся теплозащитных материалов (ТЗМ) обсуждался в [1—4]. В данной работе теоретически рассматривается термохимическое разрушение двухслойного теплозащитного покрытия, первый слой которого выполнен из тефлона или капрона с наполнителем, а второй представляет собой стеклопластик. Для описания термохимического разрушения обоих слоев используются модель недеформированного пористого реагирующего тела [4] и существенно различные теплофизические и термокинетические постоянные, характеризующие структуру и реакционные свойства ТЗМ. Исследуется влияние механического уноса на характеристики разрушения и горения.

Постановка задачи

С целью повышения эффективности ТЗМ довольно часто на его поверхность наносят защитную пленку — квазисублиматор. В данной задаче в качестве внешнего (первого) диспергируемого слоя принимаем квазисублиматор толщиной l_1 из тефлона или капрона и частиц инертного наполнителя — Sb_2O_3 . Второй (внутренний) слой — коксующийся стеклопластик конечного размера l_2 . Считается, что задан переменный конвективный тепловой поток $q_w(t)$ или лучистый поток постоянной интенсивности q_n , действующий на ТЗМ определенное время. Необходимо найти поля температур и давления газа на любой глубине, температуру поверхности, массовый унос и линейную скорость перемещения поверхности разрушения в функции от времени.

Предполагается, что в первом слое идет реакция деструкции тефлона (ПТФЭ) [5, 6] $A_T \rightarrow A_{газ}$. Надо отметить, что известные нам литературные данные по термохимическому разрушению тефлона носят противоречивый характер. Согласно результатам [7—9], при деструкции тефлона образуется жидкая пленка. В то же время обнаружено [5, 6], что при термохимическом разрушении тефлона в высокоэнтальпийном потоке расплав не образуется.

Следует [5, 6], считаем, что в результате деструкции при $T_* \geq 800$ К тефлон сублимирует в газ-мономер без образования пленки расплава, что частицы наполнителя шарообразны, а их расположение в композиционном материале равномерно упорядочено [10]. Считается, что проницаемость квазисублиматора и стеклопластика определяется известной формулой Козени — Кармана [10], но начальные проницаемость и пористость квазисублиматора на порядок меньше этих величин стеклопластика:

$$k_j = \frac{k_{j0} \varphi_{3,j}^3}{(1 - \varphi_{3,j})^2}, \quad j = 1; 2.$$

В результате воздействия теплового потока полимерное связующее квазисублиматора разлагается в тонком слое у нагреваемой поверхности, частицы наполнителя оголяются, их связь с материалом ослабевает и они

открываются под действием возрастающего внутреннего градиента давления газообразных продуктов реакции разложения [4]. Кроме того, частицы наполнителя могут также оголяться в результате реакции горения на поверхности связующего. Известно [11], что в атмосфере кислорода тетрафторэтилен сгорает с образованием углекислоты и четырехфтористого углерода: $C_2F_4 + O_2 \rightarrow CO_2 + CF_4$. Тогда массовая скорость гетерогенной реакции окисления определяется формулой

$$R_{гw} = -k_{гw} \rho_{з,1w} c_{гw}^n \exp(-E_{гw}/RT_{1w}).$$

Поскольку прогретый слой ТЗМ очень тонок [6] и его разложение происходит в узком приповерхностном слое, процесс термохимического разрушения можно считать одномерным. Связующее разлагается при относительно низких температурах, поэтому полагаем, что частицы наполнителя не испытывают фазовых превращений. Тогда первый слой ТЗМ можно формально считать коксующимся (с низкой начальной пористостью и проницаемостью), где роль твердого остатка (кокса) играет наполнитель. Задача рассматривается в неподвижной системе координат, связанной с первоначальным положением границы раздела сред. Условием диспергирования частиц наполнителя будем считать достижение предельной объемной доли связующего

$$\varphi_{1,1}[s(t), i] = \varphi_{1,1*}. \quad (1)$$

Тогда линейная скорость уноса определяется по формуле

$$\omega = -(\partial\varphi_{1,1}/\partial t)|_{y=s} : (\partial\varphi_{1,1}/\partial y)|_{y=s}, \quad (2)$$

которая получается путем дифференцирования по времени соотношения (1).

Математически сформулированная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений

$$\rho_{1,1} \partial\varphi_{1,1}/\partial t = -k_{0,1} \rho_{1,1} \varphi_{1,1} \exp(-E_1/RT_1) = -R_1, \quad (3)$$

$$\rho_{2,1} \partial\varphi_{2,1}/\partial t = 0, \quad (4)$$

$$\partial(\rho_{3,1}\varphi_{3,1})/\partial t + \partial(\rho_{3,1}\varphi_{3,1}v_1)/\partial y = \alpha_1 R_1, \quad (5)$$

$$c_{p1} \partial T_1/\partial t + c_{p3,1} \varphi_{3,1} \rho_{3,1} v_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) - q_1 R_1. \quad (6)$$

$$v_1 = -\frac{k_1}{\mu_1} \frac{\partial p_1}{\partial y}, \quad (7a)$$

$$p_1 = \rho_{3,1} RT_1/M_{3,1}, \quad (7b)$$

$$\sum_{i=1}^3 \varphi_{i,1} = 1, \quad (7b)$$

$$c_{p1} = \sum_{i=1}^3 c_{pi,1} \rho_{i,1} \varphi_{i,1}, \quad \mu_1 = \mu_{1*} \sqrt{\frac{T_1}{T_*}}, \quad \alpha_1 = \frac{v_3 M_{3,1}}{v_1 M_{1,1}}.$$

Для вычисления λ_1 первого слоя целесообразно использовать модифицированную формулу В. И. Оделевского [12], учитывающую замкнутые включения

$$\lambda_1 = \lambda_{1,1} \left[1 + \frac{v_{2,1}(v-1)}{3 + \varphi_{1,1}(v-1)} \right] + \lambda_{3,1} \varphi_{3,1}.$$

где $v = \lambda_{2,1}/\lambda_{1,1}$; $\lambda_{1,1} = (12,1 + 4,85 \cdot 10^{-2} T_{1,w}) 10^{-2}$ Вт/(м·К) [6]. (3) — (6) есть уравнения сохранения массы полимерного связующего, наполнителя, газообразного продукта реакции деполимеризации и энергии двухфазной реагирующей среды соответственно, (7a) — закон сохранения количества движения (закон Дарси), (7b) и (7b) — термическое уравнение состояния газообразных продуктов фильтрации и алгебраический интеграл, вытекающий из определения объемных долей компонентов [4]. Надо сказать, что в (5), (6) опущены члены, характеризующие окисление газо-

образных продуктов реакции разложения, так как приток окислителя в поры ТЗМ из-за выдува продуктов разложения ТЗМ мал.

Уравнения сохранения массы, энергии и импульса во втором слое ТЗМ [4], где идет реакция пиролиза $\nu_1 A_1 \rightarrow \nu_3 A_3 + \nu_4 A_4$ имеют вид

$$\rho_{1,2} \frac{\partial \varphi_{1,2}}{\partial T} = -k_{0,2} \rho_{1,2} \varphi_{1,2} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_2}\right) = -R_2, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \varphi_{4,2}}{\partial t} = \frac{\nu_4 M_{4,2} R_2}{\nu_1 M_{1,2} \rho_{4,2}}, \quad \rho_{2,2} \frac{\partial \varphi_{2,2}}{\partial t} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho_{3,2} \varphi_{3,2}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{3,2} \varphi_{3,2} v_2}{\partial y} = (1 - \alpha_2) R_2, \quad (10)$$

$$c_{p2} \frac{\partial T_2}{\partial t} + c_{p3,2} \rho_{3,2} v_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) - q_2 R_2, \quad (11)$$

$$v_2 = -\frac{k_2}{\mu_2} \frac{\partial p_2}{\partial y}, \quad p_2 = \frac{R \rho_{3,2} T_2}{M_{3,2}}, \quad \sum_{i=1}^4 \varphi_{i,2} = 1, \quad (12)$$

$$c_{p2} = \sum_{i=1}^4 c_{pi,2} \rho_{i,2} \varphi_{i,2}, \quad \lambda_2 = \sum_{i=1}^4 \lambda_{i,2} \varphi_{i,2}, \quad \mu_2 = \mu_{2*} \sqrt{\frac{T_2}{T_*}}, \quad \alpha_2 = \frac{\nu_4 M_{4,2}}{\nu_1 M_{1,2}}.$$

Систему (3)–(12) необходимо решать с учетом следующих начальных и граничных условий:

$$q_{\pi} + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=s-0} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=s+0} + q_m \rho_1 v_m + \varepsilon \sigma T_1^4 \Big|_{y=s+0}, \quad (13)$$

$$\text{где } \rho_1 = \rho_{1,1} \varphi_{1,1} + \rho_{2,1} \varphi_{2,1}; \quad q_m = H_i - H, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=s-0} = q_w(t);$$

$$p_1 \Big|_{y=s+0} = p_e, \quad (14)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=l_1-0} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=l_1+0}, \quad T_1 \Big|_{y=l_1-0} = T_2 \Big|_{y=l_1+0}, \quad (15)$$

$$(\rho_3 \varphi_3 v) \Big|_{y=l_1-0} = (\rho_3 \varphi_3 v) \Big|_{y=l_1+0}, \quad (16)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=l_1+l_2} = \alpha (T_2 - T_n) \Big|_{y=l_1+l_2}, \quad (17)$$

$$v_2 \Big|_{y=l_1+l_2} = 0, \quad (18)$$

$$q_{\pi} + q_w(t) = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=l_1+0} + \varepsilon \sigma T_2^4 \Big|_{y=l_1+0}, \quad (19)$$

$$p \Big|_{y=l_1+0} = p_e, \quad (20)$$

$$T_j \Big|_{t=0} = T_n, \quad \rho_{i,j} \Big|_{t=0} = \rho_{i,j,n}, \quad \varphi_{i,j} \Big|_{t=0} = \varphi_{i,j,n}, \quad i = 1, 2, 3 (j = 1), \\ i = 1, \dots, 4 (j = 2).$$

Здесь и ниже t — время; y — пространственная координата; T — температура; p — давление газа в порах; $s(t)$ — граница раздела газообразной и конденсированной фаз; ω — линейная скорость перемещения поверхности разрушения; $(\rho_3 \nu_3 \varphi_3)_w$ — массовый унос; q_m — удельная теплота сублимирующего слоя; ρ — плотность; M — молекулярная масса; v — скорость газообразных продуктов реакции разложения; α_1, α_2 — приведенные стехиометрические коэффициенты; ε — излучательная способность поверхности; c_p, λ, μ, k и α — коэффициенты теплоемкости, теплопроводности, динамической вязкости, проницаемости и теплоотдачи соответственно; c_{rw} — массовая концентрация кислорода на границе раздела газообразной и конденсированной фаз; $q_w(t)$ — тепловой поток из газовой фазы; Q_w — суммарный тепловой поток, поступающий в к-фазу; $\varphi_{1,1}, \varphi_{2,1}, \varphi_{3,1}$ — объемные доли связующего, наполнителя и газа в первом слое ТЗМ соответственно; σ — постоянная Стефана — Больцмана; $\varphi_{1,2}, \varphi_{2,2}$,

$\varphi_{3,2}$ и $\varphi_{4,2}$ — объемные доли связующего, наполнителя, газа и кокса во втором слое ТЗМ соответственно; $t_{*(k)}, t_{*(k-1)}$ — время достижения критической объемной доли $\varphi_{1,1*}$ при $y = y_{(k)}$ и $y = y_{(k-1)}$; $(k-1)$ — предыдущий слой по y ; t_0 — время сублимации первого слоя ТЗМ; k_{0j}, q_j, E_j и n , $j = 1; 2$ — предэкспонент, тепловой эффект, энергия активации и порядок реакции разложения (окисления) соответственно; индексы * и e характеризуют величины и их значения в горячем газовом потоке; w — термодинамические параметры на границе раздела г- и к-фаз; n — начальные значения; m, l — величины, связанные с механическим уносом и с излучением; gw — с гетерогенной реакцией окисления; $i = 1, 2, 3$ при $j = 1$ для первого слоя ТЗМ, $i = 1, \dots, 4$ при $j = 2$ для второго слоя ТЗМ.

Уравнения (13), (14) и (19), (20) — условия баланса энергии и равенства давлений в порах и во внешней среде на нагреваемой стороне первого слоя ТЗМ и стеклопластика в момент завершения сублимации первого слоя; (15), (16) — условия баланса энергии, равенства температур и закон сохранения массы газовой фазы па границе, разделяющей первый и второй слой ТЗМ; (17), (18) — условия теплообмена по закону Ньютона и непротекания газовой фазы на холодной границе второго слоя ТЗМ. При записи последнего слагаемого в правой части равенств (13) и (19) предполагается существование на границе раздела сред локального термодинамического равновесия. Так как в известной нам литературе не удалось обнаружить термокинетические постоянные гетерогенной реакции горения, то на первом этапе исследования эта реакция в математической постановке задачи не учитывалась.

Одна из важных характеристик процесса термохимического разрушения — линейная скорость механического уноса v_m — согласно [4], при отсутствии гетерогенных химических реакций совпадает со скоростью линейного уноса ω .

Методика расчета и исходные данные

Система (3) — (12) с краевыми условиями (13) — (21) решалась при помощи итерационно-интерполяционного метода [4]. Линейная скорость перемещения поверхности разрушения (2) определялась по формуле

$$\omega = \frac{\delta y}{\sigma t_*} = \frac{y_{(k)} - y_{(k-1)}}{t_{*(k)} - t_{*(k-1)}}.$$

Для проверки программы расчета повторены результаты работ [4, 13]. Кроме того, при прочих равных входных данных проведен расчет для разных шагов по пространству $h_1 = 10^{-4}$, $h_2 = h_1/h_2$, $h_3 = h_1/4$, $h_4 = -h_1/8$. Различия по времени сублимации первого слоя t_0 падало: $\varepsilon_1 = 12\%$, $\varepsilon_2 = 6,6\%$, $\varepsilon_3 = 4,9\%$. Расчетный шаг по пространству в первом слое $h_1 = 2,5 \cdot 10^{-5}$ м, во втором слое — переменный шаг по пространству. Влияние выбора величины при варьировании $\varphi_{1,1*}$ в интервале $(0,05 \div 0,2)$ $\varphi_{1,1*}$ на характеристики тепло- и массопереноса в первом слое ТЗМ не более 5%. Кроме того, значение $\varphi_{1,1*}$ может быть известно из экспериментальных данных.

Для теплофизических параметров тефлона, частиц и стеклопластика использовались данные работ [6—10, 13], причем приводимые ниже результаты получены при $T_n = 300$ К, $T_* = 885$ К, $q_n = 1,5 \cdot 10^6$ Вт/м², $\rho_{1,1} = 2300$ кг/м³, $\rho_{2,1} = 1510$ кг/м³, $\rho_{3,1*} = 4$ кг/м³, $c_{p1,1} = (0,515 + 1,56 \times 10^{-3} T_1) \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), $c_{p2,1} = 1100$ Дж/(кг · К), $c_{p3,1} = 583$ Дж/(кг · К), $\lambda_{2,1} = 0,226$ Вт/(м · К), $\lambda_{3,1} = (1 \div 6) \cdot 10^{-1}$ Вт/(м · К), $M_{3,1} = 100$ кг/кмоль, $k_{0,1} = 3,1 \cdot 10^{19}$ с⁻¹, $E_1 = 3,49 \cdot 10^5$ Дж/моль, $q_1 = 1,745 \cdot 10^6$ Дж/кг, $E_2 = 8,4 \cdot 10^4$ Дж/моль, $k_{0,2} = 5 \cdot 10^5$ с⁻¹, $q_2 = 1,26 \cdot 10^6$ Дж/кг, $c_{p1,2} = 1050$ Дж/(кг · К), $c_{p2,2} = c_{p4,2} = 1400$ Дж/(кг · К), $c_{p3,2} = 1200$ Дж/(кг · К), $\rho_{1,2} = 1885$ кг/м³, $\varepsilon = 0 \div 0,5$, $\rho_{2,2} = 2400$ кг/м³, $\rho_{3,2*} = 1$ кг/м³, $\rho_{4,2} = 1300$ кг/м³, $\alpha = 200$ Вт/(м² · К), $\lambda_{1,2} = 0,42$ Вт/(м · К), $\lambda_{2,2} = \lambda_{4,2} = 0,45$ Вт/(м · К), $\lambda_{3,2} = 0,1$ Вт/(м · К), $h_{1*} = 8 \cdot 10^{-11}$ м², $k_{2*} = 10^{-11}$ м², $\mu_{1*} \approx \mu_{2*} = 5 \cdot 10^{-5}$ кг/(м · с), $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К), $M_{3,2} =$

$= 25$ кг/кмоль, $p_e = 10^5$ Н/м², $R = 8,31$ Дж/(моль · К), $l_1 = 10^{-3}$ м, $l_2 = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $q_m = (4,2 \div 5,5) \cdot 10^5$ Дж/кг, $\varphi_{1,1H} = 0,49 \div 0,29$, $\varphi_{1,1*} = 0,1 \cdot \varphi_{1,1H}$, $\varphi_{2,1} = 0,5 \div 0,7$, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 0,5$, $\varphi_{3,1H} = 10^{-2}$, $\varphi_{1,2H} = 0,2$, $\varphi_{2,2} = 0,7$, $\varphi_{3,2H} = 0,09$, $\varphi_{4,2H} = 10^{-2}$.

Результаты численного решения и их анализ

На рис. 1 изображены поля температур (а) и давления газа (б) в порах ТЗМ по пространству в моменты времени t , с: 1 — 1,05, 2 — 1,2, 3 — 1,36, 4 — 1,89, 5 — 2,11, 6 — 2,5. На рис. 2 дана зависимость температуры поверхности (а) и суммарного теплового потока (в) в ж-фазу от времени при $\varphi_{1,1H} = 0,29$, $\varphi_{2,1} = 0,7$, $q_{л} = 0$, $\varepsilon = 0$, $q_m = 4,2 \cdot 10^5$ Дж/кг и q_w , отвечающей кривой 1 на рис. 2, в. Штриховые кривые на рис. 1 и 2 — теплопроводности подложки, увеличенные в 3 раза, при тех же значениях прочих параметров. Температура поверхности стеклопластика $T_{2w} = 1060$ К в момент $t_0 = 2,11$ с, соответствующий полному разрушению первого слоя, меньше температуры стеклопластика без квазисублиматора [13]. Последний эффект обусловлен уносом энергии с массой диспергируемого материала. По этой же причине $Q_{w3} = q_{л} - \varepsilon \sigma T_w^4 - q_m \rho_1 v_m$ ($q_{л} = 1,5 \cdot 10^6$ Вт/м², $\varepsilon = 0,3$) или $Q_{w1} = q_w(t) - q_m \rho_1 v_m$ (см. на рис. 2, в кривые 3 и 2 соответственно) с учетом влияния механического уноса дисперсного наполнителя меньше тепловых потоков ($q_{л}$ или q_w) из газовой фазы. Интересно, что Q_{w3} сначала падает в результате выдува продуктов реакции разложения, а затем из-за уменьшения толщины первого слоя и давления газа в порах со временем начинает расти. В момент полного завершения термохимического разрушения Q_{w3} достигает максимального значения, однако при $t > t_0$ в результате роста температуры поверхности стеклопластика Q_{w3} уменьшается.

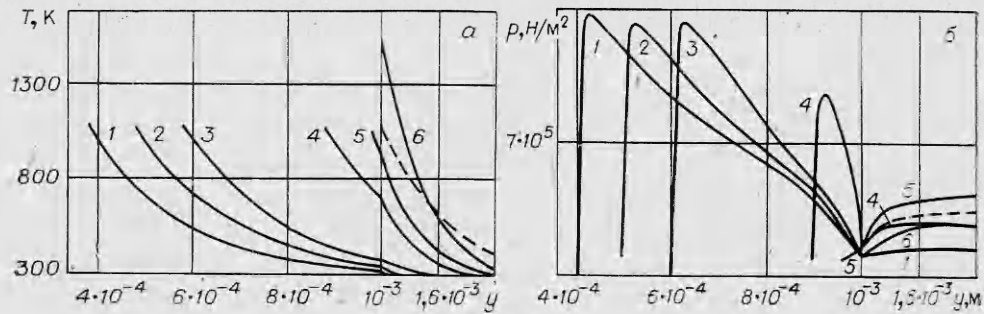


Рис. 1.

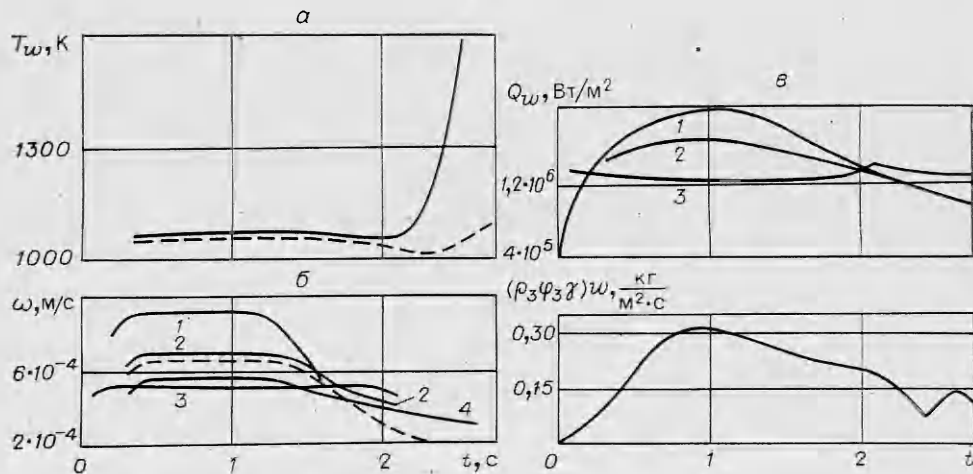


Рис. 2.

Максимальное давление газа в порах (см. рис. 1, б) при термохимическом разрушении сначала постоянно, а затем падает в результате уменьшения толщины ТЗМ и вместе с ней массы образующегося газа в слое ТЗМ. По только что отмеченным причинам линейная скорость разрушения ω (см. кривую 2 на рис. 2, б, которая соответствует входным параметрам сплошных кривых рис. 1) первого слоя ТЗМ при наличии механического уноса в начале несколько увеличивается и остается практически постоянной. При подходе тепловой волны ко второму слою ТЗМ значение ω для режимов сопряженного тепло- и массопереноса уменьшается из-за падения величины $q_w(t)$ и стока тепла в стеклопластик. Кривая 3 на рис. 2, б ($t_0 = 2,118$ с) получена при $\epsilon = 0,3$, $q_{\pi} = 1,5 \cdot 10^6$ Вт/см², $q_w = 0$ и прочих одинаковых входных величинах, соответствующих параметрам сплошных кривых рис. 1. Отметим также, что при увеличении излучательной способности поверхности ($\epsilon = 0,5$) время полного термохимического разрушения первого слоя изменяется незначительно и составляет $t_0 = 2,131$ с.

Массовая скорость вдува (см. рис. 2, г) увеличивается, потом остается некоторое время постоянной. Далее вследствие уменьшения q_w и температуры поверхности она снижается и, наконец, начинает падать в силу того, что произошло термохимическое разрушение первого слоя, а скорость массового уноса $(\rho_3 \varphi_3 v)_w$ в стеклопластике значительно меньше, чем композиционного материала на основе тефлона. Однако затем при $t > t_0$ вследствие резкого роста температуры поверхности стеклопластика значение $(\rho_3 \varphi_3 v)_w$ несколько возрастает. В дальнейшем уменьшение $(\rho_3 \varphi_3 v)_w$ связано с утолщением прококсованного слоя и падением градиента давления газа в порах вследствие поглощения тепла во втором слое ТЗМ [14]. Отметим, что $(\rho_3 \varphi_3 v)_w$ в стеклопластике при $t > t_0$ для эндотермической реакции пиролиза по порядку величины согласуется с приведенной в [14].

С увеличением удельной теплоты до $q_m = 5,5 \cdot 10^5$ Дж/кг, уносимой при термохимическом разрушении тела при тепловом потоке $q_w(t)$ (см. кривую 1 на рис. 2, в), время диспергирования первого слоя растет и составляет $t_0 = 2,33$ с, однако с ростом $q_w(t)$ на 25% при прежнем значении $q_m = 4,2 \cdot 10^5$ Дж/кг, как и следовало ожидать, первый слой сублимирует раньше ($t_0 = 1,7$ с).

Изменение первоначального состава квазисублиматора $\varphi_{1,1n} = 0,49$, $\varphi_{2,1} = 0,5$ при прочих равных входных данных рис. 1, 1—б, наоборот, ведет к более поздней сублимации первого слоя: $t_0 = 2,63$ с (см. для ω кривую 4 на рис. 2, б). Это связано с увеличением концентрации связующего (тефлона) и теплозащитного эффекта вследствие выдува фильтрующегося газа через поры при термохимическом разрушении первого слоя ТЗМ. При повышении теплопроводности стеклопластика в 3 раза время термохимического разрушения первого слоя выше ($t_0 = 2,35$ с) в силу того, что возрастает сток тепла во второй слой ТЗМ. Поэтому температура поверхности, а вместе с ней и линейная скорость разрушения падают (см. штриховые кривые на рис. 1, а и 2, б соответственно, штриховые кривые на рис. 1 даны в момент времени $t_0 = 2,5$ с).

Рассмотрим два предельных случая энергетики процесса механического уноса. Допустим, что энтальпия оторвавшейся частицы мгновенно подстраивается под ее значение в газовой фазе, тогда $H_u = H$ и $q_m = 0$. Следовательно, механический унос не влияет на T_{1w} и t_0 убывает и достигает 1,59 с, а ω растет (см. кривую 1 на рис. 2, б). Если $H_1(t) = H(t - \delta t_*)$, то частицы в окрестности границы раздела сред практически не обмениваются энергией с внешним потоком. В этом случае $t_0 = 1,95$ с, а ω уменьшается. Однако это время меньше, чем при $q_m = 4,2 \cdot 10^5$ Дж/кг ($t_0 = 2,11$ с).

Как показали расчеты, использование двухслойного ТЗМ позволяет более эффективно блокировать падающий на конструктивный элемент тепловой поток, причем значительную роль при этом играет механический унос инертного наполнителя.

Таким образом, данное исследование показывает, что для правильного предсказания скорости термохимического разрушения необходимо корректно моделировать энергетику так называемого механического уноса дисперсного наполнителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Т. Никитин, Ф. Б. Юревич.— В кн.: Тепло- и массоперенос. Т. 2, ч. 2. Минск: ИТМО АН БССР, 1972.
2. Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
3. К. Г. Омельченко, М. В. Савелов, В. П. Тимошенко. ТВТ, 1974, 12, 4, 261.
4. А. М. Гришин. Математическое моделирование некоторых нестационарных аэротермохимических явлений. Томск: Изд-во ТГУ, 1973.
5. Ю. А. Душин. Работа теплозащитных материалов в горячих газовых потоках. Л.: Химия, 1968.
6. Ф. Б. Юревич, М. Н. Ролин. ИФЖ, 1971, 20, 1, 70.
7. Кларк. Тр. Амер. общ. инж.-мех. Сер. С. Теплопередача, 1972, 94, 4, 13.
8. Ленгелле. РТК, 1970, 8, 11, 85.
9. Араи. РТК, 1979, 17, 6, 103.
10. Л. С. Лейбензон.— В кн.: Подземная гидрогазодинамика. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1953.
11. Патент США 2351390 (1944); Chem. Abstracts, 1944, 38, 5228.
12. Г. П. Дульнев, Ю. П. Заричняк. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974.
13. А. М. Гришин, А. С. Якимов, В. Л. Миков. ФГВ, 1981, 17, 2, 13.
14. А. С. Якимов.— В кн.: Исследование по гидродинамике и теплообмену. Новосибирск: Наука, 1976.

Поступила в редакцию 3/1 1985

К ТЕОРИИ ТЕПЛООВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН МНОГОСТАДИЙНЫХ РЕАКЦИЙ, ОПИСЫВАЕМЫХ ПРОСТЫМИ БРУТТО-СХЕМАМИ

Е. А. Некрасов, А. М. Тимохин

(Томск)

Простые брутто-схемы многостадийного химического превращения в волне горения постоянно вызывают пристальное внимание исследователей. Допуская приближенное аналитическое решение или подробный параметрический анализ на ЭВМ, такие схемы позволяют выделить наиболее характерные режимы распространения фронта, отражающие главные особенности реальных процессов химического реагирования в зоне горения.

Основы теории стадийного горения для брутто-схем заложены в работах [1, 2] применительно к последовательной реакции



в газе и газифицирующих системах. Согласно [1, 2], механизм распространения сложных реакций можно изучать, сравнивая соответствующие одностадийные скорости и температуры горения. Асимптотический анализ распространения реакции (1) в газе и конденсированной среде, подтвердивший выводы [1], выполнен в [3, 4]. Волновые режимы протекания многостадийной последовательной реакции рассмотрены в [5].

Дальнейшие исследования по стадийному горению [6—11] посвящены параллельным реакциям



Принципиальное значение имеют результаты работ [7, 8], в которых предсказана неединственность стационарных режимов распространения фронта кинетической природы, обусловленная конкуренцией путей превраще-