

МЕХАНИКА

УДК 536.245.022

А.Н. Голованов, Е.В. Рулева, А.С. Якимов

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССООБМЕНА
В УГЛЕПЛАСТИКЕ ПРИ ПУЛЬСАЦИЯХ ГАЗОВОГО ПОТОКА¹**

Математически моделируется термохимическое разрушение теплозащитного материала при действии высокоэнтальпийного пульсирующего газового потока. Исследована возможность управления процессом тепломассообмена в углефенольном композите.

Ключевые слова: интенсификация процесса тепломассообмена, теплозащитный материал, пульсирующий газовый поток

В реальных условиях теплозащитные материалы эксплуатируются при воздействии на них малых энергетических возмущений: акустических колебаний, вибраций стенки, пульсаций газовых потоков [1, 2]. При этом характеристики термохимического разрушения в этих системах могут существенно изменяться. Проблема интенсификации процессов тепломассообмена в сплошных и проницаемых средах рассматривалась в [2 – 5]. В [2] найдены предельные условия для концентрации связующего и интенсивности колебаний, когда появляется возможность снижать тепловые нагрузки к стенке и управлять процессом тепломассообмена. В [3] изучается эффективность ведения каталитического процесса в режиме вынужденных внешних воздействий и используются нестационарные методы осуществления каталитических процессов с целью интенсификации тепломассообмена. В [4] был вскрыт один из механизмов интенсификации процессов переноса в жидкости для случая пульсационного течения (перераспределения градиентов в потоке). В [5] получено увеличение коэффициента теплопроводности пористого тела при наличии пульсаций давления на его границе. Отметим также работу [6], где изучается влияние звукового поля на интенсификацию процессов тепломассообмена в пограничном слое.

В данной статье исследуется влияние периодических возмущений, вибраций стенки на интенсивность процесса термохимического разрушения углепластика.

Постановка задачи

Считается, что задан переменный (пульсирующий) конвективный тепловой поток $q_w(v, t)$, действующий на теплозащитный материал определенное время

$$q_w = \frac{\alpha}{c_p} \left[1 - \frac{k(\rho v)_w}{\alpha / c_p} \right] (h_e - h_w), \quad \frac{\alpha}{c_p} = \left(\frac{\alpha}{c_p} \right)_n \left[1 + \frac{A \cos(2\pi v t)}{(\alpha / c_p)_n} \right], \quad (1)$$

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке программы ФАО «Развитие научного потенциала высшей школы (2009 – 2011 годы)». РН 2.1.1/2269.

где $(\alpha/c_p)_n$ – коэффициент теплообмена в отсутствии пульсаций; A, v – амплитуда и частота пульсаций; t – время; h – энтальпия; $(\rho v)_w$ – суммарный массовый унос теплозащитного материала; k – коэффициент ослабления для турбулентного режима течения в пограничном слое.

Сравнение результатов по исследованию фильтрационных и тепловых характеристик пористых материалов в присутствии пульсационных и вибрационных возмущений свидетельствует [7] о подобии зависимостей вязкостного члена в законе фильтрации и относительной функции теплообмена от интенсивностей колебаний и о гидродинамической природе процесса возрастания теплообмена. В [7] было получено выражение для дополнительного переноса тепла q' в пористом теле при периодических пульсациях газа-охлаждителя

$$q' = -\frac{\pi c_{p5} \Phi_5 \rho_5 B^2 v}{\sqrt{2}} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2)$$

где T – температура (однотемпературной) пористой среды, c_{p5} , ρ_5 , Φ_5 – удельная теплоемкость при постоянном давлении, истинная плотность газовой фазы и пористость теплозащитного материала, B – амплитуда периодических возмущений, y – пространственная координата.

Выражение для эффективной вязкости μ_{eff} в законе Дарси возьмем в виде модификации Эйнштейна [8]

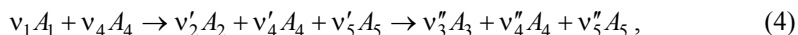
$$\mu_{\text{eff}} = \mu[1 + C \cos(2\pi vt)], \quad (3)$$

где C – безразмерный коэффициент, μ – вязкость газообразных продуктов фильтрации в отсутствии периодических возмущений ($0 < C \leq 0,25$).

Повышение или понижение вязкости связано с дополнительной диссипацией энергии вследствие перераспределения градиентов температур, давлений и т.д. в потоке для случая пульсационного течения.

Как показывает анализ термогравиметрических измерений [9], процесс пиролиза углепластика на основе термореактивного полимерного связующего носит многостадийный характер. Он включает в себя стадию разложения полимерного связующего, которая протекает с поглощением тепла, стадию образования промежуточного конденсированного (пирозоля) и конечного конденсированного (кокса) продукта. Стадия образования кокса может быть интерпретирована как реакция синтеза, которая имеет экзотермический характер [9].

Физика процесса в конденсированной фазе такова [11, 12]. Под воздействием высокотемпературного потока температура углепластика увеличивается до температуры разложения связующего (смола). Затем начинается пиролиз термореактивного связующего с образованием пирозоля и углеродистого остатка (кокса), который удерживается внутри матрицы армирующих волокон из углерода:



где $v_1, v_4, v'_2, v'_4, v''_3, v''_5, v'_5, v''_5$ – стехиометрические коэффициенты, $A_i, i=1, \dots, 5$ – символы связующего исходного конденсированного вещества, промежуточного конденсированного продукта реакции (пирозоля), конечного конденсированного продукта (кокса), армировки из углеродного волокна и газообразного продукта реакции пиролиза соответственно. При $T_w > 800$ К углеродистая поверхность разрушается в результате взаимодействия с компонентами диссоциированного

воздуха. Газообразные продукты реакции пиролиза могут фильтроваться к границе раздела сред $y = 0$, вдуваться в пограничном слое и вместе с продуктами окисления углерода снижать поступающий к телу конвективный тепловой поток.

При постановке задачи сделаем следующие допущения [11, 12]:

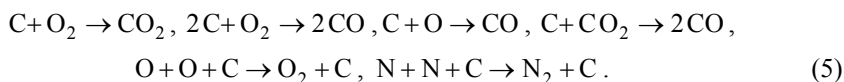
1) число Рейнольдса в набегающем гиперзвуковом потоке воздуха достаточно велико ($Re_\infty \gg 1$) и в окрестности поверхности тела сформировался пограничный слой;

2) воздух на внешней границе пограничного слоя находится в состоянии термодинамического равновесия и представляет собой пятикомпонентную смесь: O, O_2, N, N_2, NO ;

3) перенос в пограничном слое рассматривается при упрощающих предположениях о равенстве коэффициентов диффузии, число Льюиса $Le = 1$;

4) для расчета состава на границе раздела газообразной и конденсированной фаз будем использовать аналогию процесса тепломассообмена [10] в предположении о заморозенности химических реакций внутри пограничного слоя [12];

5) на внешней поверхности теплозащитного материала протекают при $T_w < 2600$ К следующие гетерогенные реакции:



Отметим, что согласно экспериментальным данным [2] в пограничном слое наблюдался турбулентный режим течения при обтекании теплозащитного материала, для которого коэффициент ослабления (k) в тепловом потоке (1) известен [10].

Пусть в (5), (6) порядковый номер компонентов соответствует следующему порядку их перечисления: O, O_2, N, N_2, CO, CO_2 . Молярные и массовые скорости протекания химических реакций (5) на внешней поверхности тела подробно описаны в [11, 12], а выражение для массовой скорости уноса имеет вид

$$\begin{aligned} (\rho v)_{2w} = (\varphi_4 \rho)_w &\left[\left(\frac{m_6}{m_2} - 1 \right) c_{2w} B_1 + \left(2 \frac{m_5}{m_2} - 1 \right) c_{2w} B_2 + \right. \\ &\left. + \left(\frac{m_5}{m_1} - 1 \right) c_{1w} B_3 + \left(2 \frac{m_5}{m_6} - 1 \right) c_{6w} B_4 \right], \end{aligned} \quad (6)$$

$$B_i = k_{iw} \exp \left(-\frac{E_{iw}}{RT_w} \right), \quad i = \overline{1, 4}, \quad \rho_w = \left(\frac{P_e m_w}{RT_w} \right), \quad m_w^{-1} = \sum_{\alpha=1}^6 \frac{c_{\alpha w}}{m_\alpha}. \quad (7)$$

Балансовые соотношения для массовых концентраций компонент (c_{iw}) запишем, используя закон Фика для диффузионных потоков и аналогию процессов тепломассообмена [10, 11]:

$$J_{iw} + (\rho v)_w c_{iw} = R_{iw}, \quad i = \overline{1, 6}, \quad J_{iw} = \beta_i (c_{iw} - c_{ie}), \quad \beta_i = \alpha / c_p,$$

где формулы для R_{iw} приведены в [12], полный унос $(\rho v)_w = (\rho v)_{1w} + (\rho v)_{2w}$; $(\rho v)_{1w}$ – массовая скорость уноса за счет пиролиза; $(\rho v)_{2w}$ – массовая скорость уноса за счет гетерогенных химических реакций (5); $k = 0,19 (m_e / m_w)^{0,35}$ [10];

$$m_e^{-1} = \sum_{i=1}^5 c_{ie} / m_{ie}.$$

Считается, что продукты разрушения слабо разбавляют воздушную смесь в пограничном слое. Это позволяет использовать принятые выше допущения 1) – 4) в пограничном слое.

При математической постановке задачи в конденсированной фазе используются следующие допущения:

- 1) процесс термохимического разрушения углепластика одномерный;
- 2) фильтрующийся газ предполагается однородным со значением молекулярной массы, близкой к воздушной смеси;
- 3) пористая среда в процессе теплообмена считается однотемпературной;
- 4) течение газа внутри разгорающихся пор предполагается ламинарным и описывается линейным законом Дарси [10, 11].

Первое допущение достаточное точное, так как размер реакционной зоны порядка $2,5 \cdot 10^{-3}$ м при $T \geq 600$ К и толщина прогретого слоя меньше $4 \cdot 10^{-3}$ м (см. ниже рис. 2), что значительно меньше начальной длины теплозащитного материала: $L_n = 10^{-2}$ м.

Второе допущение берется для простоты модели, так как в используемом материале [2] не известен химический состав продуктов фильтрующего газа при термохимическом разрушении.

Как правило, для двухтемпературной разрушающейся среды [13] (в отличие от инертной [10]) коэффициент объемного теплообмена A_v определяется со значительной погрешностью. Разность температур твердой и газовой фаз при наиболее реальных значениях $A_v = 10^6 - 10^8$ Вт/(К·м³) согласно [13] не превышает 323 – 373 К, если температура коксового остатка 1273 – 2273 К.

Наконец, в реальности [2] при термохимическом разрушении углепластика имеет место переходный и турбулентный режим фильтрации газа в порах, который описывается нелинейным законом Дарси [10, 11]. Однако вязкостный и инерционный коэффициенты для рассмотренного ниже материала [2] в случае химически реагирующей среды в доступной литературе не обнаружены.

Математически задача сводится к решению системы уравнений, записанной в подвижной системе координат [11, 12], связанной с фронтом термохимического разрушения:

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} - \omega \frac{\partial T}{\partial y} \right) + c_{p5} \rho_5 \varphi_5 v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - q_1 R_1 + q_2 R_2; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho_5 \varphi_5}{\partial t} - \omega \frac{\partial \rho_5 \varphi_5}{\partial y} + \frac{\partial \rho_5 \varphi_5 v}{\partial y} = (1 - \alpha_1) R_1 + (1 - \alpha_2) R_2; \quad (9)$$

$$\rho_1 \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} - \omega \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right) = -k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp \left(-\frac{E_1}{RT} \right); \quad (10)$$

$$\rho_2 \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} - \omega \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} \right) = \alpha_1 k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp \left(-\frac{E_1}{RT} \right) - k_2 \rho_2 \varphi_2 \exp \left(-\frac{E_2}{RT} \right); \quad (11)$$

$$\rho_3 \left(\frac{\partial \varphi_3}{\partial t} - \omega \frac{\partial \varphi_3}{\partial y} \right) = \alpha_2 k_2 \rho_2 \varphi_2 \exp \left(-\frac{E_2}{RT} \right); \quad (12)$$

$$\rho_4 \left(\frac{\partial \varphi_4}{\partial t} - \omega \frac{\partial \varphi_4}{\partial y} \right) = 0; \quad (13)$$

$$v = -\frac{z}{\mu_{ef}} \frac{\partial P}{\partial y}, \quad z = \frac{z_* \varphi_5^3}{(1 - \varphi_5)^2}, \quad \varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i, \quad P = \frac{\rho_5 R T}{M_5}; \quad (14)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^5 \lambda_i \varphi_i, \quad c_p = \sum_{i=1}^4 c_{pi} \rho_i \varphi_i, \quad \lambda_5 = \lambda_{5*} \sqrt{\frac{T}{T_*}}, \quad \mu = \mu_* \sqrt{\frac{T}{T_*}}, \quad \alpha_1 = \frac{v_2' M_{2s}}{v_1 M_{1s}},$$

$$R_1 = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad R_2 = k_2 \rho_2 \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right),$$

$$\alpha_2 = \frac{v_3'' M_{3s}}{v_2' M_{2s}}, \quad \omega = \frac{(\rho v)_{2w}}{(\rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2 + \rho_3 \varphi_3 + \rho_4 \varphi_4)_w}, \quad (\rho v)_{1w} = (\rho_5 v \varphi_5)_w,$$

$$c_{p5} = b_1 + 2b_2 T, \quad \lambda_4 = \lambda_{4y} + \lambda_4', \quad \lambda_4' = \frac{\pi c_{p5} \varphi_5 \rho_5 B^2 v}{\sqrt{2}}. \quad (15)$$

Систему уравнений (8) – (13) необходимо решать с учетом следующих начальных и граничных условий:

$$T|_{t=0} = T_n, \quad \rho_5|_{t=0} = \rho_{5n}, \quad \varphi_i|_{t=0} = \varphi_{in}, \quad i = 1, \dots, 4; \quad (16)$$

$$q_w - (\rho v)_{1w}(h_w - h_g) - (\rho v)_{2w}(h_w - h_c) - \varphi_4 \varepsilon \sigma T_w^4 = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0-s(t)}; \quad (17)$$

$$l = L_n - s(t), \quad s(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau, \quad h_w = \sum_{\alpha=1}^6 h_{\alpha} c_{\alpha w}, \quad h_g = c_{\alpha w};$$

$$P_e = P_w \Big|_{y=0-s(t)}, \quad P_e = \rho_e T_e R \sum_{i=1}^5 \frac{c_{ie}}{m_{ie}}; \quad (18)$$

$$T \Big|_{y=l} = T_n, \quad v \Big|_{y=l} = 0, \quad \varphi_i \Big|_{y=l} = \varphi_{in}, \quad i = 1, \dots, 4. \quad (19)$$

Здесь и ниже b_i , $i = 1, 2$, – постоянные; c_p – коэффициент удельной теплоемкости при постоянном давлении; $c_{\alpha w}$ – массовые концентрации компонент на границе раздела газовой и конденсированной фазы [11]; E_i – энергия активации; k_i , $i = 1, 2$, – предэкспоненциальный множитель; l – переменная толщина углепластика; L_n – начальная толщина углепластика; m – молекулярный вес; M_5 – молекулярный вес газообразных продуктов реакции пиролиза; P – давление газа в порах; q_i , $i = 1, 2$, – тепловые эффекты реакции разложения связующего и пирозоля; R – универсальная газовая постоянная; $s(t)$ – глубина выгорания; v – скорость газообразных продуктов реакции разложения связующего; z – коэффициент проницаемости углепластика; α_1, α_2 – приведенные стехиометрические коэффициенты [11] из кинетической схемы пиролиза (4); β – коэффициент массообмена; ε – интегральный коэффициент черноты; $(\rho v)_w$ – суммарный массовый унос; φ_i , $i = 1, 4$, – объемные доли; λ_i , $i = 1, 5$, – коэффициенты теплопроводности; μ – коэффициент динамической вязкости; ρ – плотность; σ – постоянная Стефана – Больцмана; ω – линейная скорость термохимического разрушения углепластика; индексы: e – внешняя граница пограничного слоя; w – поверхность обтекаемого тела; * – характерная величина; n – начальные условия; s – конденсированная фаза; g – газо-

вая фаза; ∞ – параметры на бесконечности; с – углеродная поверхность; 1 – 5 – в конденсированной фазе соответствуют связующему, пирозолу, коксу, наполнителю, газу; у – углеродным волокнам; штрих вверх – пульсациям; eff – эффективная величина.

Методика расчета, тестовые проверки и исходные данные

Система уравнений (8) – (13) с начальными и граничными условиями (16) – (19) решалась численно при помощи неявной, абсолютно устойчивой монотонной разностной схемы [14]. Для проверки программы расчета были повторены результаты [12]. Кроме того, для опорного варианта (комбинированный режим теплообмена) была проделана процедура тестирования численного метода. При прочих равных входных данных проведен расчет для разных шагов по пространству $h_1 = 10^{-4}$, $h_2 = h_1 / 2$, $h_3 = h_1 / 4$, $h_4 = h_1 / 8$. Фиксировалась температура ТЗМ и плотность газа ρ_5 по глубине тела в различные моменты времени. Во всех вариантах задача решалась с переменным шагом по времени, который выбирался из условия заданной точности, одинаковой для всех шагов по пространству. Различие погрешности по температуре тела и плотности газа в теплозащитном материале ($\varepsilon = \max [\varepsilon_T, \varepsilon_{\rho_5}]$) падало: $\varepsilon_1 = 10,8 \%$, $\varepsilon_2 = 5,1 \%$, $\varepsilon_3 = 1,9 \%$.

Термокинетические постоянные k_{iw}, E_{iw} в (7) для реакций (5) приведены в [11], а для (4) – в [2, 9]. Энтальпия углеродного материала в конденсированном состоянии h_c рассчитывалась по формулам [15]. Для углефенольного композита теплофизические коэффициенты: c_{p4} , λ_{4y} и плотность ρ_4 брались из [16]. Коэффициент удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении c_{p5} из (15) находился по интерполяционной формуле работы [17]. Проницаемость (z) идеальной пористой среды в законе Дарси из (14) определяется известной формулой Козени [11].

Приводимые ниже результаты получены при $T_n = 293$ К, $(\alpha / c_p)_n = 0,2$ кг/(с·м²), $A = 0,01$ кг/(с·м²), $v = 10 - 30$ с⁻¹, $\mu_* = 4,2 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), $B = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $T_* = 1500$ К, $\lambda_{5*} = 0,067$ Вт/(м·К), $T_e = 3600$ К, $h_e = 1,449 \cdot 10^7$ Дж/кг, $\rho_e = 0,088$ кг/м³, $c_{p1} = c_{p2} = 1700$ Дж/(кг·К), $c_{p3} = 1020$ Дж/(кг·К), $\rho_1 = 1200$ кг/м³, $\rho_2 = 1100$ кг/м³, $\rho_3 = 1300$ кг/м³, $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,21$ Вт/(м·К), $\lambda_3 = 0,041$ Вт/(м·К), $R = 8,314$ Дж/(моль·К), $L_n = 10^{-2}$ м, $E_1/R = 3462$ К, $E_2/R = 11305$ К, $k_1 = 9,6 \cdot 10^4$ с⁻¹, $k_2 = 1,2 \cdot 10^5$ с⁻¹, $q_1 = 2 \cdot 10^5$ Дж/кг, $q_2 = 10^5$ Дж/кг, $z_* = 5 \cdot 10^{-11}$ м², $M_5 = 29$ кг/кмоль, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴), $\alpha_1 = 0,5$, $\alpha_2 = 0,5$, $\varepsilon = 0,9$, $\varphi_{1n} = 0,3$, $\varphi_{2n} = 0,01$, $\varphi_{3n} = 0,01$, $\varphi_{4n} = 0,6$, $b_1 = 965,5$, $b_2 = 0,0735$.

Результаты численного решения и их анализ

На рис. 1 представлены зависимости температуры поверхности T_w (a) и суммарного массового уноса $(\rho v)_w$ (b) с поверхности теплозащитного материала в зависимости от времени. Кривые 1–3 на рис. 1 отвечают величине частоты: $v = 10, 20$ и 30 с⁻¹ соответственно. При этом массовый унос $(\rho v)_w$ имеет максимум в мо-

мент времени, близкий к начальному ($t < 0,5$ с) из-за резкого подъема T_w . Затем в силу образования прококсованного слоя и увеличения его сопротивления движению фильтрующего газа величина $(\rho v)_w$ может уменьшиться. Однако по мере роста нагрева теплозащитного материала со стороны конвективного теплового потока q_w и продвижения тепловой волны в глубь тела продолжается пиролиз углеродистого материала с образованием газообразных и конденсированных продуктов реакции разложения связующего (смолы). Поскольку максимум давления газообразных продуктов фильтрации находится внутри теплозащитного материала [12], то газообразные продукты фильтрации могут продвигаться в глубь тела. Вследствие экзотермической реакции образования кокса из пирозоля (4) они могут нагревать прококсованные и последующие холодные слои теплозащитного материала. Это приводит к дальнейшему росту величины $(\rho v)_w$. Кроме того, при $T_w > 800$ К унос массы с поверхности ТЗМ непрерывен в силу разрушения углеродной поверхности при кинетическом $T_w < 1500$ К и диффузионном $T_w > 1500$ К [10] режимах протекания гетерогенных химических реакций (5).

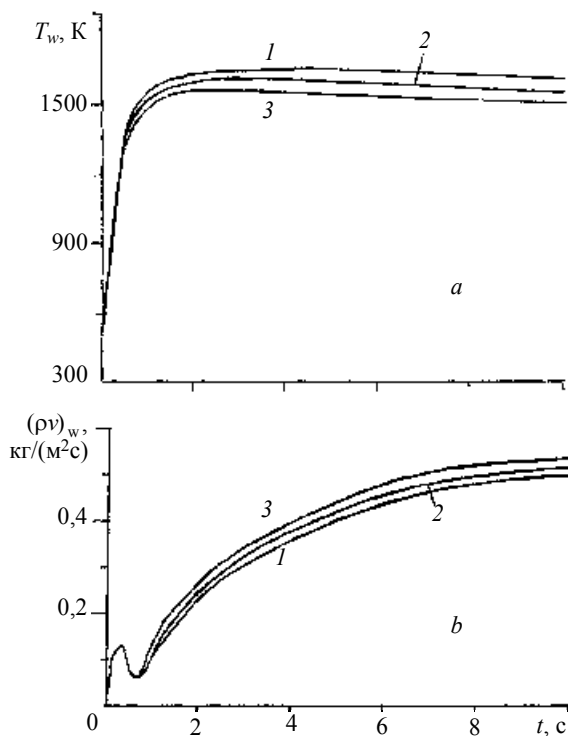


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности (а) и суммарной массовой скорости уноса (б) от времени. Кр. 1–3 отвечают величине частоты $\nu = 10, 20, 30 \text{ с}^{-1}$

Надо сказать, что с ростом частоты $\nu = 10, 20$ и 30 с^{-1} интенсивность теплообмена потока с углеродистым падает (см. рис. 1, а), а массообмен растет (см. рис. 1, б). Последний результат качественно согласуется с экспериментальными

данными [2]. Это связано с тем, что пульсации теплового потока приводят к более интенсивному термическому разрушению связующего и увеличению вдува $(\rho v)_{1w}$. При этом температура поверхности снижается из-за падения конвективно-го теплового потока q_w в формуле (1) и уменьшения суммарного теплового потока в конденсированную фазу

$$Q_w = q_w - (\rho v)_{1w}(h_w - h_g) - (\rho v)_{2w}(h_w - h_c) - \varphi_4 \varepsilon \sigma T_w^4.$$

На стационарном участке термохимического разрушения углепластика $8 \leq t \leq 10$ с отличие расчетной температуры поверхности от экспериментальной [2] при $v = 10 \text{ с}^{-1}$ и $v = 30 \text{ с}^{-1}$ составляет не более 22 и 30 % соответственно. В нестационарном режиме прогрева углепластика $t < 8$ в физическом эксперименте с ростом температуры наблюдались [2] переходный и турбулентный режимы фильтрации. Кроме того, имел место немонотонный характер изменения $(\rho v)_w$ с течением времени [2], поведение и величина которого связана с различной скоростью разложения связующего и наполнителя углепластика. Отметим, что на первом этапе исследования эти физические процессы (турбулентный режим течения в порах, сдиры и отслоения наполнителя) при прогреве теплозащитного материала в математической модели не учитываются. Это связано с отсутствием надежных данных по фильтрационным, структурным и кинетическим характеристикам используемых материалов [2, 16].

На рис. 2 при $v = 10 \text{ с}^{-1}$ приведено распределение температуры углепластика по глубине слоя в различные моменты времени. Сплошные кривые на рис. 2 отвечают режиму разрушения теплозащитного материала при отсутствии пульсационных составляющих теплообмена $\lambda'_4 = 0$ в (2), (15) и вязкости $C = 0$ в (3), штриховые – варианту $\lambda'_4 \neq 0$, $C = 0$, штрихпунктирные – комбинированному режиму ТМО $\lambda'_4 \neq 0$, $C = 0,2$. Линии, помеченные цифрами 1–3, приведены в моменты времени t : 1, 5, 10 с.

Из анализа кривых рис. 2 следует, что волновой коэффициент теплопроводности λ'_4 , возникающий при действии пульсаций в проникаемом материале, снижает температуру теплозащитного материала за счет возрастания интенсивности фильтрационных потоков. Этот эффект продолжает усиливаться в комбинированном режиме тепломассообмена: $\lambda'_4 \neq 0$,

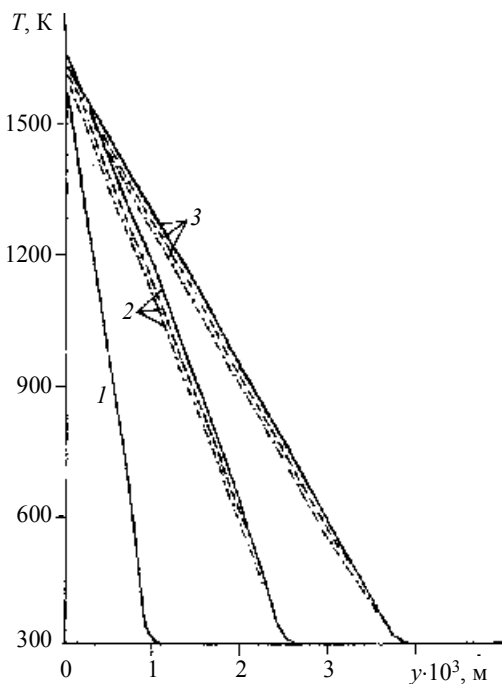


Рис. 2. Распределение температуры по глубине слоя в различные моменты времени для $v = 10 \text{ с}^{-1}$. Сплошные линии отвечают $\lambda'_4 = 0$, $C = 0$, штриховые – $\lambda'_4 \neq 0$, $C = 0$ и штрихпунктирные – $\lambda'_4 \neq 0$, $C \neq 0$ соответственно. Линии, помеченные цифрами 1–3, приведены в моменты времени $t = 1, 5, 10 \text{ с}$

$C \neq 0$ (см. рис. 2). По-видимому, этот способ отвода тепла целесообразно использовать при протекании реакций с экзотермическим эффектом в разрушающихся теплозащитных материалах.

В таблице приведены значения температуры углепластика на поверхности и в глубине тела при $t = 10$ с в зависимости от пульсационных составляющих λ'_4 и C в формулах (15) и (3). Из анализа таблицы видно, вдали от поверхности: $y = 3 \cdot 10^{-3}$ м температура углепластика ведет себя монотонным образом с увеличением C , а тепловая волна практически слабо прогревает образец. Однако температура поверхности и вблизи нее $y = 2 \cdot 10^{-3}$ м может вести себя немонотонно: сначала увеличивается, а затем уменьшается с ростом C . Последний результат, по-видимому, связан с дополнительной диссипацией энергии, обусловленной пульсационным течением.

**Температура углепластика в зависимости от параметров
пульсационного течения при $t = 10$ с**

$y, \text{ м}$	$T, \text{ К}$		
	0	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
$\lambda'_4 = 0, C = 0$	1647	773	433
$\lambda'_4 \neq 0, C = 0$	1615	758,3	406
$\lambda'_4 \neq 0, C = 0,15$	1627	760	408
$\lambda'_4 \neq 0, C = 0,2$	1614	758,6	413
$\lambda'_4 \neq 0, C = 0,25$	1591	757,4	420

Заключение

1. Дана постановка задачи о термохимическом разрушении теплозащитного материала с учетом воздействия пульсаций в пористом теле.

2. При действии периодических возмущений интенсификация процесса тепло-массообмена снижает температуру углепластика.

3. С ростом частоты пульсаций поведение расчетной температуры поверхности разрушения теплозащитного материала качественно согласуются с экспериментальными данными [2].

4. При пульсационном течении в теплозащитном материале с ростом C из (3) в законе Дарси (14) температура поверхности ведет себя немонотонно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение. М.: ГИФМЛ, 1961. 500 с.
2. Голованов А.Н. Влияние периодических возмущений на процесс термохимического разрушения некоторых композиционных материалов // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35. № 3. С. 67–73.
3. Боресков Г.К., Матрос Ю.Ш., Киселев О.В., Бунимович Г.А. Осуществление гетерогенного каталитического процесса в нестационарном режиме // ДАН СССР. 1977. Т. 237. № 1. С. 160–163.
4. Капица П.Л. Теплопроводность и диффузия в жидкой среде при периодическом течении // ЖЭТФ. 1951. Т. 21. № 9. С. 964–978.
5. Ажицев Н.Л., Быков В.И. Об интенсификации переноса тепла в пористых средах при пульсации давления // Изв. СО АН СССР. Сер. тех. наук. 1987. Вып. 6. № 21. С. 27–30.
6. Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Болдарев А.М., Терлеев П.Н. Тепло- и массообмен в звуковом поле. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1970. 253 с.

7. Голованов А.Н. Гидродинамические и тепловые характеристики систем пористого охлаждения при наличии малых периодических возмущений // Инженерно-физический журнал. 1994. Т. 66. № 6. С. 695–701.
8. Эйнштейн А., Смолюховский М. Броуновское движение. М.-Л.: Глав. ред. общетехнич. литературы, 1936. 607 с.
9. Калинин Г.А., Миков В.Л., Морозова Т.П. Исследование полиаминоамидного связующего методом комплексного термического анализа // Изв. Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1981. № 2. С. 164–167.
10. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 326 с.
11. Гришин А.М., Фомин В.М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука, 1984. 319 с.
12. Зинченко В.И., Якимов А.С. Режимы термохимического разрушения углефенольного композиционного материала под действием теплового потока // ФГВ. 1988. Т. 24. № 2. С. 141–149.
13. Василевский К.К., Фёдоров О.Г. Исследование внутреннего теплообмена между газом и каркасом в разрушающемся материале // Тепломассоперенос. Минск: Наука и техника, 1968. Т. 2. С. 67–74.
14. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 552 с.
15. Бучнев Л.М., Смыслов А.И., Дмитриев И.А. и др. Экспериментальное исследование энтальпии квазимонокристалла графита и стеклоглерода в интервале температур 300 – 3800 К // Теплофизика высоких температур. 1987. Т. 25. № 6. С. 1120–1125.
16. Гришин А.М., Парашин А.Д., Якимов А.С. Термохимическое разрушение углепластика при многократном импульсном нагружении // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29. № 1. С. 87–95.
17. Карапетьянц М.Х., Карапетьянц М.М. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ. М.: Химия, 1968. 471 с.

Статья поступила 16.04.2011 г.

Golovanov A.N., Rulyova E.V., Yakimov A.S. NUMERICAL MODELING OF THE HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESS IN CARBON-PLASTIC UPON PULSATIONS OF GAS FLOW. Thermochemical destruction of a thermal protection material is simulated upon action of high-enthalpy pulsating gas flow. A possibility of control for the process of heat and mass exchange in a carbophenol composite is studied.

Keywords: intensification of the heat and mass exchange process, thermal protection material, pulsating gas flow.

Golovanov Aleksandr Nikolaevich (Tomsk State University)

E-mail: fire@mail.tsu.ru

Rulyova Evgeniya Valer'evna (Tomsk State University)

Yakimov Anatolii Stepanovich (Tomsk State University)

E-mail: yakimovas@mail.ru