

## ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПРОЦЕССЫ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Н. Голованов

Томский государственный университет, 634050 Томск

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о восприимчивости процесса термохимического разрушения композиционных материалов к малым периодическим возмущениям внешнего потока и вибрациям стенки. Получены устойчивые, неустойчивые и автоколебательные режимы горения материалов, найдены предельные условия для концентрации связующего и интенсивности колебаний, когда появляется возможность снижать тепловые нагрузки к стенке и управлять процессом тепло- и массообмена. Построены границы моностационарности и устойчивости, проведено сравнение с теорией.

Многие технологические процессы в химических реакторах, энергетических установках, летательных аппаратах сопровождаются вибрациями конструкций, пульсациями газовых потоков, акустическими турбулентными шумами и другими малыми возмущениями [1, 2]. При этом характеристики термохимического разрушения в таких системах могут претерпевать существенные изменения. Композиционные материалы (КМ), выполненные на основе угле- и стеклопластиков, используемые прежде всего как теплозащитные покрытия, также подвержены воздействию малых возмущений, генерируемых как внешними источниками, так и самим процессом разрушения КМ в потоке газа, содержащего окислитель.

В данной работе исследуется влияние вибраций стенки и пульсаций внешнего высокотемпературного потока газа на характеристики тепло- и массообмена современных КМ, причем малые возмущения создаются искусственно с помощью специальных устройств.

### МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ

Эксперименты проводили в струях низкотемпературной плазмы (плазматрон ЭДП-104 А/50) и нагретого газа, рабочим телом являлся воздух. Образцы КМ (П5-13Н, П5-15, УПУТ (30%), УПУТ (47%), УПЦТ, УКС, ВПР-10+ЭХД, ВПР-10+ИФЭД, СП-Т-10+ПН-62 и др.) цилиндрической формы устанавливали основаниями в рабочее сечение

струй. Вибрации поверхностей образцов в направлении оси симметрии струй создавались с помощью вибростенда, изготовленного на основе электродвигателя с насаженными на ось эксцентриками и редукторами. Пульсации газового потока задавались лопастями вентилятора. Частота колебаний варьировалась в пределах  $0 \leq f \leq 200$  Гц, амплитуда  $A = (0,5 \div 5,0) \cdot 10^{-3}$  м.

Измеряли температуру поверхности образцов в окрестности лобовой критической точки  $T_w$ , температуру материала внутри образца  $T$ , скорость уноса массы  $(\rho v)_w$ . Параметры струй: температура  $T_e = 580$  и  $3600$  К; скорость  $v_e = 7,2$  и  $59,0$  м/с; методики изложены в работах [3, 4].

При термохимическом разрушении КМ реализовывались как умеренные ( $f_w < -2$ ), так и интенсивные вдувы ( $f_w > -2$ ,  $f_w \leq -3,4$ ) продуктов газификации, где  $f_w = -\gamma R_1 \rho_w / \sqrt{\pi_t P_t} \rho_e$  — параметр вдува [5].

Кроме того, в опытах определяли коэффициенты удельной теплоемкости  $c_p$  и теплопроводности  $\lambda$  КМ методом динамического  $c_p$ - и  $\lambda$ -калориметра с помощью измерителей теплоемкости ИТ-С-400 и теплопроводности ИТ- $\lambda$ -400 [6]. При измерениях  $c_p$  и  $\lambda$  образцы предварительно обрабатывали шлифовальным порошком до шероховатости поверхности не хуже  $R_z = 0,63$ . Ввиду наличия пор на поверхности КМ вместо впитываемой смазки ПФМС-4 применяли алюминиевую пудру ГОСТ 5494-71. Градуировку приборов осуществляли по образцам с известными теплофизическими свойствами из меди и кварцевого стекла КВ. При

определении значений  $c_p$  и  $\lambda$  была обнаружена зависимость измеряемого сигнала от толщины смазки, поэтому систематическую погрешность измерения, обусловленную толщиной смазки, переводили в разряд случайной за счет варьирования толщины смазки в каждой серии опытов. Диапазон изменения температур был ограничен интервалом  $298 \leq T \leq 373$  К из-за технических условий эксплуатации приборов и начинавшегося при  $T > 373$  К пиролиза связующего КМ. Убыль массы образцов при нагреве до  $T = 373$  К составляла  $3 \div 5\%$  начальной массы, что, по всей видимости, связано с испарением влаги из образцов. Суммарные погрешности определения теплофизических характеристик  $c_p$  и  $\lambda$  не превышали  $10\%$ .

Термокинетические постоянные были получены методом динамической термогравиметрии [7] на дериватографе фирмы МОМ (Венгрия) в среде азота. Учитывая результаты работы [8], начальную массу образцов выбирали такой, чтобы избежать существенного влияния на термогравиметрическую кривую; она не превышала  $0,093 \cdot 10^{-3}$  кг. Темп нагрева варьировался в пределах  $2,1 \div 8,5$  К/мин.

Обработка дериватограмм методом спрямления [9, 10] позволила получить термокинетические постоянные  $E_1, k_1, E_2, k_2$  (энергия активации и предэкспонент в законе Аррениуса), необходимые для построения границ моностационарности и устойчивости при термическом разрушении КМ.

Доверительные границы результатов измерений рассчитывали по результатам 3–5 наблюдений при доверительной вероятности 0,95.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 показаны типичные осциллограммы температуры поверхности образцов П5-13Н в зависимости от времени, на рис. 2 — зависимости скорости уноса массы от времени.

При определенных частотах и амплитудах возмущений на осциллограммах температуры поверхности возникали пульсации (рис. 3). Без малых возмущений таких режимов термохимического разрушения не наблюдалось.

Из рисунков видно, что вибрации поверхностей КМ могут снижать температуру в окрестности лобовой критической точки, при этом возможны как устойчивые режимы термохимического разрушения, так и неустойчивые и автоколебательные. Пульсации внешнего

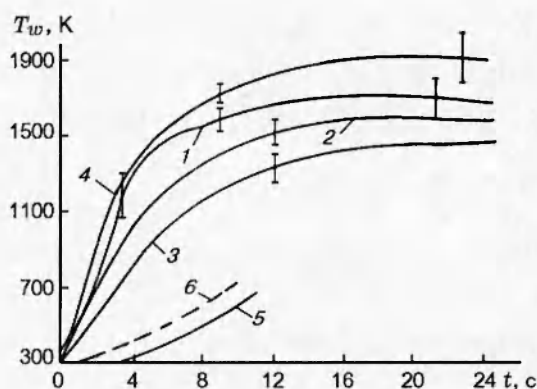


Рис. 1. Зависимости температуры от времени: 1 —  $f = 0$ ; 2–4 —  $A = 2 \cdot 10^{-3}$  м,  $f = 10, 30, 70$  Гц соответственно; 5, 6 — температура КМ на глубине от поверхности  $3 \cdot 10^{-3}$  м без вибраций и с вибрациями соответственно

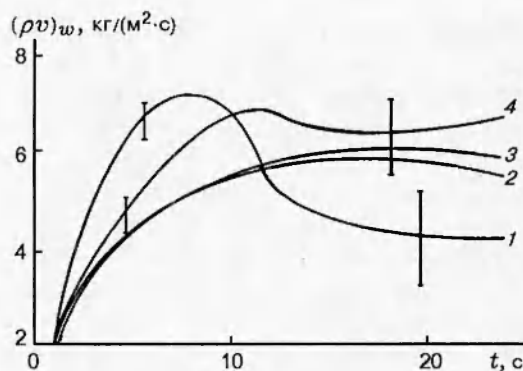


Рис. 2. Зависимости скорости уноса массы от времени: обозначения те же, что на рис. 1

потока не уменьшали тепловых нагрузок к поверхности КМ, но могли приводить к неустойчивым режимам. Как отмечено в работе [3], автоколебания температуры поверхности не связаны с резонансными свойствами системы и с инструментальной погрешностью измерительного комплекса. Процесс снижения тепловых нагрузок к КМ при вибрациях всегда сопровождался интенсификацией скорости разрушения образцов. Такое явление наблюдалось для материалов с массовой концентрацией связующего  $\varphi$  и интенсивностью колебаний  $J$ :

$$\varphi = 20 \div 47\%, \quad J = 0,02 \div 11,28 \text{ кг/с}^3, \quad (1)$$

где  $J = 0,5\rho c(2\pi fA)^2$ ,  $c$  — скорость звука. Температура поверхности при этом могла снижаться до 700 К, а скорость массового уноса возрастать в 1,5–2 раза.

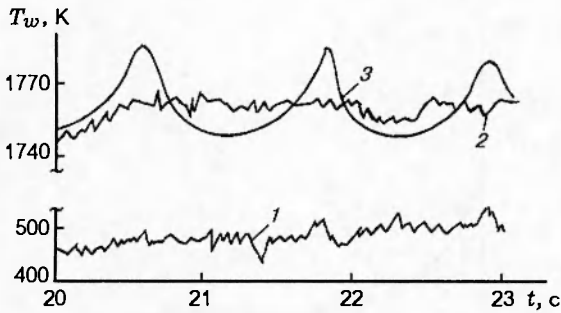


Рис. 3. Неустойчивый и автоколебательный режимы разрушения КМ:  
1 — ВР-1 + ИФД; 2, 3 — П5-13Н

Таблица 1

Теплофизические характеристики композиционных материалов

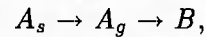
Материал	T, K	c <sub>p</sub> , Дж/(кг·K)	λ, Вт/(м·K)
П5-13Н	298	1511,03	0,52 (0,53)
	323	1552,31	0,55
	348	1601,20	0,60
	373	1689,11 (1685)	0,64 (0,66)
	473	1960,02 (1969)	0,69 (0,72)
	523	2070,33 (2077)	0,70 (0,74)

Немонотонный характер изменения  $(\rho v)_w$  с течением времени объясняется различными скоростями разложения наполнителя и связующего КМ. Визуальный осмотр структуры поверхности образцов подтвердил это. В интервале времени  $t \approx 0 \div 18$  с происходит вдув продуктов газификации, поверхность образцов остается гладкой, при  $t > 16 \div 18$  с наблюдаются сдиры и отслоения наполнителя, для некоторых материалов увеличивается высота образцов  $h$ , происходит их вспучивание и диспергирование.

Полученные экспериментальные режимы устойчивого, неустойчивого и автоколебательного термохимического разрушения теоретически предсказаны авторами работ [5, 11, 12]. В этой связи представляет интерес построение границ моностационарности и устойчивости процесса разрушения КМ с использованием математической модели и основных допущений из работы [11]. При этом теплофизические характеристики и термокинетические константы взяты из результатов эксперимента (см. табл. 1, 2).

В табл. 1 в скобках приведены значения  $c_p$  и  $\lambda$  из справочника [13], видно удовлетворительное согласование результатов измерений с результатами работы [13]. Доверительные границы результатов измерений не превышали 3,5%. В табл. 2 в скобках приведены значения термокинетических констант, взятых из работы [8].

описывает процесс термохимического разрушения КМ при обтекании затупленного тела реакционноспособным газом в окрестности лобовой критической точки с учетом сопряженности теплообмена, излучения, интенсивного вдува продуктов газификации и двухстадийности кинетики разрушения:



где  $A_s$  — исходное конденсированное вещество,  $A_g$  — продукты газификации,  $B$  — продукты газофазной химической реакции.

Система уравнений из [11] сводится к динамической системе нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, которая позволяет осуществлять качественный анализ различных режимов термохимического разрушения КМ [12].

Безразмерная массовая скорость газификации КМ  $\varphi_2 R_1 = \exp \frac{\theta_w}{1 + \beta \theta_w}$  соответствует скорости уноса массы вещества

$$(\rho v)_w = k_1 \exp \left( - \frac{E_1}{RT_w} \right) \quad (2)$$

для кинетического режима горения КМ, реализуемого при умеренных параметрах вдува и температурах. Здесь  $\theta = E_1/RT_*^2(T - T_*)$  —

Таблица 2

Термокинетические константы

Материал	$E_1/R, K$	$k_1, 1/c$	$E_2/R, K$	$k_2, 1/c$
П5-13Н	3462	$3,6 \cdot 10^3$	11305	$1,2 \cdot 10^5$
ВР-10 + ИФД	5117 (5480)	0,31 (0,334)	10439 (10670)	$0,15 \cdot 10^5$ (0,122 · 10 <sup>5</sup> )

ПОСТРОЕНИЕ ГРАНИЦ  
МОНОСТАЦИОНАРНОСТИ  
И УСТОЙЧИВОСТИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО  
РАЗРУШЕНИЯ КМ

Математическая модель [11] приближенно

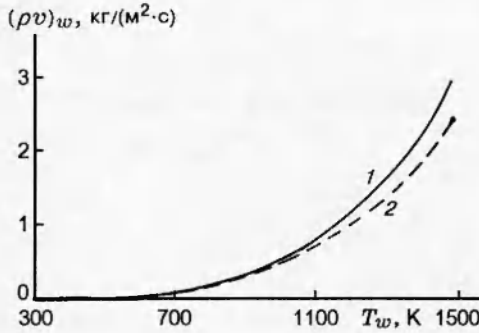


Рис. 4. Экспоненциальный закон газификации КМ П5-13Н:

1 — результаты эксперимента, 2 — расчет по формуле (2)

безразмерная температура. Экспоненциальный закон газификации (2) удовлетворительно согласуется с экспериментальными результатами для  $300 < T_w < 1200$  К (рис. 4).

Стационарным режимам разрушения КМ отвечают состояния равновесия системы, координаты которых  $c_m^0, \theta_w^0$  на фазовой плоскости находятся из системы уравнений:  $p(c_m^0, \theta_w^0) = 0$ ,  $Q(c_m^0, \theta_w^0) = 0$ , где  $p$  — давление,  $c_w$  — относительная массовая концентрация. Граница моностационарности на бифуркационной диаграмме  $c_1, c_2$  [12, 14, 15] определяется из условия  $\Delta = 0$ , где  $\Delta$  — коэффициент характеристического уравнения для системы

$$\Delta = \frac{\partial p}{\partial c_w} \frac{\partial Q}{\partial \theta_w} - \frac{\partial p}{\partial \theta_w} \frac{\partial Q}{\partial c_w}$$

Параметрическая граница устойчивости в выбранной плоскости  $c_1, c_2$  находится из условия  $\sigma_1 = 0$  [12], где

$$\sigma_1 = - \left( \frac{\partial p}{\partial c_w} + \frac{\partial Q}{\partial \theta_w} \right)$$

— коэффициент характеристического уравнения. Под моностационарностью здесь понимается единственность стационарных состояний динамической системы [12, 15].

На рис. 5 показаны границы моностационарности и устойчивости (линия с петлей), где [14]

$$c_1 = \left\{ \frac{b-2}{1+\beta\theta_w^0} [L_1(\theta_w^0 - \theta_1) - V\Pi] \left[ L_1 + V \left( \frac{\Pi}{(1+\beta\theta_w^0)^2} + \frac{4\beta}{(1+\beta\theta_w^0)^3} \right) \right]^{-1} - 1 \right\} \times \exp \frac{(2-b)\theta_w^0}{1+\beta\theta_w^0},$$

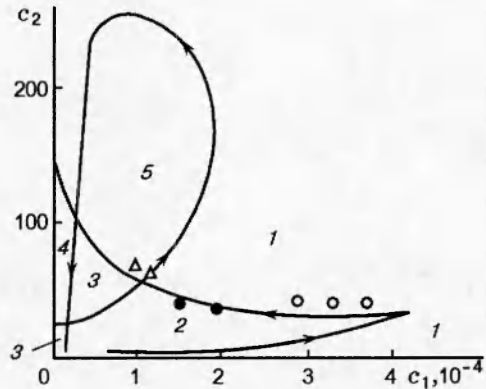


Рис. 5. Границы моностационарности и устойчивости для материала П5-13Н

$$c_2 = (\theta_w^0 - \theta_1)(b-2)[L_1(\theta_w^0 - \theta_1) - V\Pi] \{ (b-2)[L_1(\theta_w^0 - \theta_1) - V\Pi](1+V\Pi) - (1+\beta\theta_w^0)^2 [L_1 + V(\Pi(1+\beta\theta_w^0)^{-2} + 4\beta(1+\beta\theta_w^0)^3)] \}^{-1},$$

$$\bar{c}_1 = \pi_\delta, \quad \bar{c}_2 = \frac{\pi_\sigma}{\gamma}, \quad c_1 = \frac{\bar{c}_1}{A}, \quad c_2 = \frac{\bar{c}_2}{L_1},$$

$$\bar{c}_1 = \left( \left( -L_1 + L_1(\theta_w^0 - \theta_1) \frac{b-2}{(1+\beta\theta_w^0)^2} - V\Pi \frac{b-2}{(1+\beta\theta_w^0)^2} - V\Pi(1+\beta\theta_w^0)^{-2} - 4V\beta(1+\beta\theta_w^0)^3 \right) \varepsilon - 1 \right) \exp \frac{(\bar{z}-\beta)\theta_w^0}{1+\beta\theta_w^0},$$

$$A = \frac{\gamma^2}{L}, \quad L_1 = L\pi_\varepsilon,$$

$$\bar{c}_2 = (\theta_w^0 - \theta_1)L_1 \left( -1 + \right.$$

$$\left. + (\theta_w^0 - \theta_1) \frac{b-2}{(1+\beta\theta_w^0)^2} \right) \varepsilon \left( L_1 \left( -1 + + (\theta_w^0 - \theta_1) \frac{b-2}{(1+\beta\theta_w^0)^2} \right) \varepsilon - 1 \right)^{-1},$$

$$\Pi = (1+\beta\theta_e)^4 - (1+\beta\theta_w^0)^4,$$

$$V = \frac{\pi_\sigma \gamma}{A} \exp \frac{-\theta_w^0}{1+\beta\theta_w^0}, \quad \varepsilon = \left( 1 + \pi_\rho \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \right)^{-1},$$

$$R_3 = \pi_\sigma \gamma \varphi_1 R_{11} [(1+\beta\theta_e)^4 - (1+\beta\theta_w^0)^4],$$

$$\varphi_1 = \frac{\lambda_e}{\lambda_{v1}}, \quad \varphi_2 = \frac{\rho_w}{\rho_e}, \quad b = \frac{E_2}{E_1},$$

$$\varphi_2 R_{11} = \exp \frac{\theta_w}{1+\beta\theta_w},$$

$$R_2 = c_w \exp \frac{b\theta_w}{1 + \beta\theta_w},$$

$$\pi_\delta = \frac{\rho_s \lambda_s}{\rho_e \lambda_e}, \quad \gamma = \frac{c_{p,e} RT_*^2}{|q_1| E_1},$$

$$L = \frac{Pr}{Sc}, \quad Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}, \quad Sc = \frac{\mu}{\rho D},$$

$$\alpha_1 = \frac{q_1}{|q_1|}, \quad \pi_q = \frac{q_2 c_0}{|q_2|}, \quad \pi_e = \frac{c_{p,s}}{c_{p,e}},$$

$$\pi_\sigma = \frac{\varepsilon_R \sigma T_*^2 y_* E_1}{R \lambda_e},$$

$$\varepsilon_R = \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1},$$

$$y_* = \frac{\lambda_e RT_*^2}{\rho_e E_1 |q_1| R_1} \exp \frac{E_1}{RT_*},$$

$$\beta = \frac{RT_*}{E_1}, \quad \theta_{s,n} = \frac{E_1}{RT_*^2} (T_* - T_s),$$

$$\theta = \frac{E_1}{RT_*^2} (T - T_*), \quad t_* = \frac{2y_*^2 \rho_e c_{p,e}}{\lambda_e},$$

$$\tau = \frac{t}{t_*}, \quad c_w = \frac{c}{c_0}, \quad c_0 = \frac{\nu_1 M_1}{\sum_i \nu_i M_i},$$

$$D = 0,18 \left( \frac{T_3}{T_e} \right)^2, \quad T_3 = \frac{T_w - T_e}{\ln(T_w/T_e)}.$$

Здесь  $\nu_i, M_i$  — стехиометрические коэффициенты и молекулярные веса продуктов реакции газификации,  $i = 1$  соответствует лимитирующему компоненту;  $R_1, R_2$  — безразмерные массовые скорости реакции газификации и газофазной реакции;  $\alpha_1, \beta, \gamma, b, \pi_t, \pi_q, \pi_\rho, \pi_\sigma, \pi_\delta, L, Pr, Sc$  — безразмерные параметры;  $\rho$  — плотность;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости;  $D$  — эффективный коэффициент диффузии;  $E_1, q_1, k_1, E_2, q_2, k_2$  — энергия активации, тепловой эффект и предэкспонент реакции газификации и газофазной реакции соответственно;  $\varepsilon_R$  — приведенная степень черноты;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — степени черноты газа и стенки соответственно;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $\Delta, \sigma_1$  — коэффициенты характеристического уравнения; индексы  $n, s, e, w, *$  относятся соответственно к начальным значениям, к параметрам конденсированной фазы, к параметрам газовой фазы на внешней границе пограничного слоя, к параметрам на границе раздела сред, к характерным величинам. При расчетах  $c_1, c_2$  в качестве аргументов использованы значения  $T_w$  и

$(\rho v)_w$ , реализуемые при термохимическом разрушении материала П5-13Н. Если соответствующая состоянию точка фазового пространства расположена в области 1 ( $\Delta > 0$ ), то ей отвечает единственный стационарный режим разрушения КМ [2, 11, 12, 15]. В областях 2–4 ( $\Delta < 0$ ) имеют место три стационарных режима, один из которых абсолютно неустойчив; в области 2 устойчив только низкотемпературный, а в области 4 — только высокотемпературный режимы; в области 5 ( $\Delta > 0, \sigma_1 > 0$ ) реализуется автоколебательный режим разрушения КМ; область 3 ( $\Delta > 0, \sigma_1 < 0$ ) соответствует неустойчивому состоянию системы [12]. Светлые значки в области 1 на рис. 5 — расчеты  $c_1, c_2$  для материала П5-13Н с вибрациями поверхности, темные значки в области 2 отвечают неустойчивому режиму разрушения КМ (см. кривую 2 на рис. 3), светлые значки в области 5 — автоколебательному режиму (см. кривую 3 на рис. 3).

Сравнение расчетов границ моностационарности и устойчивости с результатами экспериментов свидетельствует об удовлетворительном согласовании и возможности качественного анализа и прогнозирования режимов разрушения КМ с помощью математической модели [5, 11].

### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Взаимодействие КМ с высокотемпературными потоками — сложный многостадийный физико-химический процесс, сопровождающийся нагревом материала, пиролизом, плавлением, испарением связующего, зажиганием, горением, термической деструкцией наполнителя, диспергированием твердого реагента, пиролитическим осаждением продуктов газофазных и гетерогенных реакций на поверхности образующихся пор, образованием коксового остатка и т. д. [5, 16]. В плазменных струях подробное изучение каждой стадии процесса практически невозможно из-за несовершенства аппаратуры, методик измерений, а также сложности самого механизма разрушения. Однако анализ интегральных характеристик  $(\rho v)_w, T_w$ , применяемых для проектирования теплозащитных конструкций, позволяет выделить отдельные важные стадии процесса, кинетический и диффузионный режимы горения, диспергирование конденсированных частиц.

При интенсивностях колебаний и массовой концентрации связующего из (1) температура

поверхности КМ может снижаться на величину до 700 К, скорость разрушения при этом возрастает. Вибрации КМ приводят к интенсификации межфазного теплообмена между связующим и наполнителем, появляется дополнительный «транспорт» тепла вглубь материала (см. кривые 5, 6 на рис. 1) за счет эффективного коэффициента теплопроводности [4]  $\lambda_{eff} = \pi c_p p_s \bar{u}'^2 / 2\pi f$ , где  $u'^2$  — пульсационная составляющая скорости фильтрации.

Температура на глубине от поверхности КМ при вибрациях повышается, этот процесс сопровождается более ранним термическим разложением связующего и фильтрацией продуктов газификации через поры и образующийся кокс к внешней поверхности материала. Скорость фильтрации  $v = (\partial p / \partial y) / \alpha \mu_s$ , как это следует из закона Дарси [5], возрастает вследствие уменьшения коэффициента динамической вязкости  $\mu_s$  при увеличении температуры.

Интенсификация вдува продуктов газификации, вызванная вибрациями поверхности, приводит к усилению межфазного теплообмена (наполнитель — связующее), а также к разбавлению и оттеснению внешнего потока и снижению тепловых нагрузок к стенке.

Следует отметить, что пульсации внешнего потока не вызывали интенсификации вдува продуктов газификации —  $(\rho v)_w$  — и снижения температуры поверхности, а приводили лишь к неустойчивым режимам разрушения КМ. Этот факт также свидетельствует в пользу предложенного механизма снижения тепловых нагрузок к поверхности КМ при вибрациях.

Неустойчивый и автоколебательный режимы термохимического разрушения КМ при периодических возмущениях могут возникать по схеме, несколько отличной от известной [12], обусловленной диффузионно-тепловой неустойчивостью пламени, связанной с искривлением фронта горения. Малая флуктуация температуры в зоне горения в газовой фазе может увеличить скорость химической реакции, подчиняющейся аррениусовской кинетике. Выделяющееся при этом тепло тратится на дополнительный прогрев КМ и интенсификацию вдува продуктов газификации, зона горения отодвигается от поверхности материала и ее температура снижается, а процесс газификации замедляется. Зона горения снова приближается к стенке, процесс периодически повторяется. Относительное подобие пульсаций температуры (см. кривые 1, 2 на рис. 3), вызванных вибраци-

ями поверхности и колебаниями внешнего потока, подтверждает газофазный механизм возникновения неустойчивости.

Общим условием для колебательного протекания процесса является наличие в системе положительной или отрицательной обратной связи [15], благодаря которым система управляет поступлением энергии от непериодического источника. Положительная обратная связь при возбуждении автоколебаний вибрациями стенки создается теплом, выделяющимся в экзотермической химической реакции. Следовательно, полученные автоколебания можно отнести к термокинетическим колебаниям [12].

Существует мягкое и жесткое возбуждение автоколебаний [15]. Скачкообразное возникновение автоколебаний конечной амплитуды при температуре, близкой к температуре зажигания, слабая зависимость амплитуды и частоты от скорости газификации свидетельствуют о жестком возбуждении автоколебательного процесса, полученного в настоящей работе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общепринято считать, что неустойчивые колебательные процессы отрицательно сказываются на эксплуатационных характеристиках различных устройств. Однако оптимальный выбор амплитуды, частоты вибраций, массового содержания связующего материала позволяют регулировать тепловые нагрузки к КМ и управлять процессами термохимического разрушения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение. М.: Физматгиз, 1961.
2. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.
3. Голованов А. Н. О влиянии вибраций на процесс горения некоторых углеграфитовых материалов // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 4. С. 69–71.
4. Голованов А. Н. Гидродинамические и тепловые характеристики систем пористого охлаждения при наличии малых периодических возмущений // Инж.-физ. журн. 1994. Т. 66, № 6. С. 695–701.
5. Гришин А. М., Фомин В. М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука, 1984.

6. **Теплофизические измерения и приборы** / Под ред. Е. С. Платунова. Л.: Машиностроение, 1986.
7. **Белихмаер Я. А., Смолянинова Н. М., Смолянинов С. И.** Техника эксперимента: Учебное пособие. Томск: Изд-во Томск. политехи. ин-та, 1983.
8. **Синицин С. П.** Решение обратной задачи пиролиза композиционных полимерных материалов при двухстадийной кинетической схеме // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 4. С. 48–56.
9. **Уэндланд У.** Термические методы анализа / Под ред. В. А. Степанова, В. А. Берштейна. М.: Мир, 1978.
10. **Исаков Г. Н.** Моделирование нестационарных процессов тепломассопереноса и воспламенения в реакционноспособных средах. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1988.
11. **Агранат В. М., Гришин А. М.** Качественный анализ режимов нестационарного тепломассообмена в пограничном слое с химическими реакциями при интенсивных вдувах // Прикл. математика и механика. 1978. Т. 42, вып. 6. С. 1056–1067.
12. **Агранат В. М.** Аналитическое исследование тепломассообмена и трения в пограничном слое. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1991.
13. **Назаров Г. И., Сушкин В. В.** Теплостойкие пластмассы: Справочник. М.: Машиностроение, 1980.
14. **Губин Д. А.** К вопросу прогнозирования нестационарного тепломассообмена в реакционноспособных системах // Физическое и математическое моделирование тепловых и гидродинамических процессов: Сб. науч. тр. / Томск. политехи. ин-т. Томск, 1990. С. 104–109.
15. **Вольтер Е. Б., Сальников И. Е.** Устойчивость режимов работы химических реакторов. М.: Химия, 1981.
16. **Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б.** Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.

*Поступила в редакцию 16/II 1998 г.,  
в окончательном варианте — 12/X 1998 г.*

---