

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

Г. Н. Исаков

НИИ прикладной математики и механики при Томском государственном университете
634050 Томск, isak@niipmm.tsu.ru

Представлены методика проведения экспериментов и результаты исследований по воспламенению образцов различной формы из композиционных полимерных материалов в газовых потоках. Основным механизмом воспламенения в этих условиях считается переход гетерогенной реакции окисления продуктов сажеобразования (сажа и пироуглерод) с поверхности контакта с окислителем во внутривещное пространство, контролируемое диффузией. Приведено балансовое соотношение между теплоприходом и теплоотводом на пористой реагирующей поверхности для оценки условий воспламенения композиционных материалов в исследуемых условиях.

Ключевые слова: воспламенение, композиционный полимерный материал, нагрев, охлаждение, пористость, гетерогенность, пироуглерод, газовые потоки.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время композиционные материалы на полимерных связующих с армирующими углеродными волокнами и/или стеклотканями [1] широко применяются для изготовления трубопроводов, вытяжных и вентиляционных газоходов, цистерн и резервуаров для хранения и транспортировки агрессивных сред [1–3]. Это позволяет значительно удешевить монтаж и эксплуатацию технологического оборудования в нефтяной, химической и газодобывающей промышленности. Использование стекло- и углепластиков в несущих конструкциях должно сопровождаться обязательным их тестированием на пожарную опасность в аварийных ситуациях при импульсном тепловом воздействии от различных источников, например, для аварий с образованием «огненных шаров» [2], для расчета поражающих пожарных факторов при разгерметизации железнодорожных цистерн со сжиженными углеводородными газами [3] и т. д.

Наблюдаемые в этих условиях процессы можно представить следующим образом: сначала поверхность образца из композиционного полимерного материала (КПМ) кратковременно прогревается высокоинтенсивным источником тепла (конвективным [4, 5], радиационным [2, 3] или радиационно-конвективным [5]), а затем обдувается потоком холодного газообразного окислителя. При этом в прогретых слоях КПМ возможна термодеструкция полимер-

ного связующего [4, 5] с образованием пористого прококсированного слоя и отложением сажи и пироуглерода на поверхности и стенках пор [4]. При контакте с газообразным окислителем они химически реагируют с выделением значительного количества тепла, что приводит к саморазогреву поверхности, воспламенению и последующему горению [4]. Кроме того, газообразные продукты термодеструкции могут вступать в химическую реакцию с кислородом в пограничном слое [4, 5].

В таких сложных условиях известные стандарты по оценке пожаростойкости [6, 7] конструкций из КПМ недостаточны, так как не учитывают механизма процессов тепло- и массопереноса и воспламенения. Как справедливо отмечено в [8], не всегда удается установить эмпирическую взаимосвязь между кислородным индексом [6–8] и карбонизированным пористым слоем, образующимся при термодеструкции КПМ. Кроме того, не выполняются условия по величине критических тепловых потоков и времени их воздействия на КПМ [3], вызывающих воспламенение.

Целью данной работы является создание методики оценки условий воспламенения КПМ с помощью балансовых соотношений между обобщенными (безразмерными) параметрами тепло- и массообмена на пористых образцах различной конфигурации по данным измерений температурных полей в газовой и конденсированной фазах.

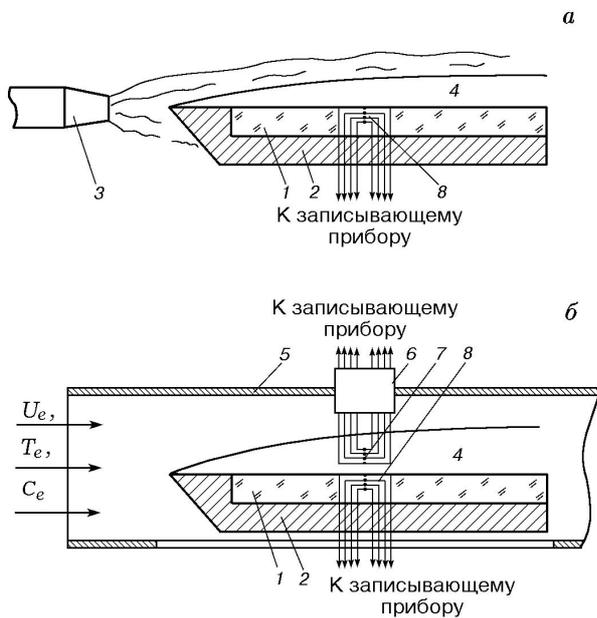


Рис. 1. Принципиальная схема теплового эксперимента:

a — при нагреве пластины из КПМ в потоке высокотемпературного газа, *б* — при обдуве потоком холодного окислителя; 1 — образец, 2 — держатель, 3 — газогенератор, 4 — пограничный слой, 5 — канал, 6 — зонд для измерения температуры в пограничном слое, 7 — микротермопары, 8 — зонд для измерения температуры в твердой фазе

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве объектов исследования были использованы образцы полусферической формы [5], в виде пластин [4, 5], а также трубчатые с относительной длиной $L/d \geq 10$ и относительной толщиной стенок $h/d \leq 10$ (L , h , d — длина, толщина стенок и диаметр цилиндра соответственно). Для исследований выбраны следующие типы КПМ: текстолит ПТ-10 [5]; стеклопластики на основе эпоксифенольной смолы ИФ-ЭД6 [1, 4] и двух типов стеклоткани: ТСУ 8/3 [1] (условное обозначение КПМ-1) и ВПР-10 [1] (условное обозначение КПМ-2); стеклопластик на основе смолы ЭХД со стеклотканью ТСУ 8/3 [1] (условное обозначение КПМ-3).

Методика экспериментального изучения воспламенительной способности стеклопластиков состоит в следующем (рис. 1). Исследуемый образец в форме полусферы или пластины, теплоизолированной с боковых сторон и установленной в держателе, нагревается в течение времени t_{tem} в потоке высокотемпературного

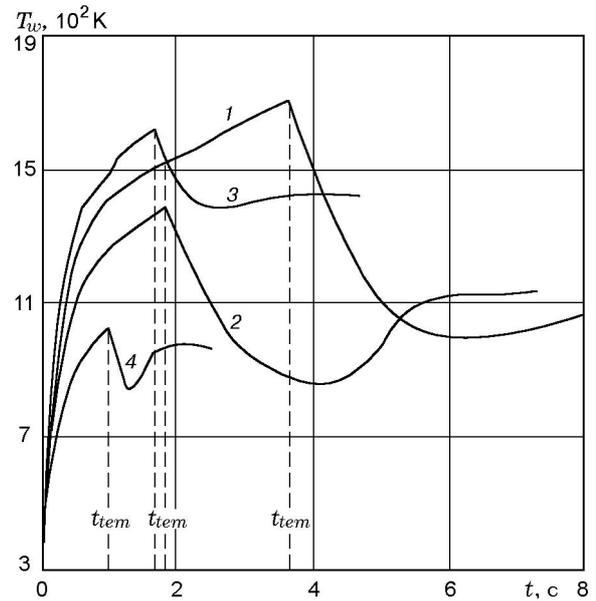


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $T_w(t)$ для полусферических образцов из различных КПМ:

1 — КПМ-2, $C_e = 0,98$, $\beta_x = 80 \text{ c}^{-1}$; 2 — ПТ-10, $C_e = 0,5$, $\beta_x = 130 \text{ c}^{-1}$; 3 — КПМ-2, $C_e = 0,98$, $\beta_x = 115 \text{ c}^{-1}$; 4 — ПТ-10, $C_e = 0,98$, $\beta_x = 80 \text{ c}^{-1}$

газа от газогенератора. Пластина совмещена с осью генератора и передней частью держателя, изготовленной в виде остроугольного натека, как показано на рис. 1, *a*. Затем образец автоматически вводится в поток холодного окислителя (см. рис. 1, *б*) с известными скоростью U_e , температурой T_e и концентрацией кислорода C_e . Образец по истечении заданного времени предварительного отжига t_{tem} с помощью электросекундомера и специального устройства автоматически вводится во внутрь блока, схема которого изображена на рис. 1, *б*.

Для измерения пространственно-временных профилей в газовой и конденсированной фазах на плоских образцах в виде пластин [4] используются микротермопарные зонды. Зонд для измерения профиля температуры в пограничном слое над поверхностью образца при $t > t_{tem}$ состоит из 3–4 хромель-алюмелевых микротермопар [5], сигналы с которых регистрируются во времени записывающим прибором. Зонд для измерения температуры в твердой фазе также состоит из 4 микротермопар, заделанных на различных расстояниях от поверхности в технологических условиях изготовления самих образцов.

На рис. 2 приведены осциллограммы тем-

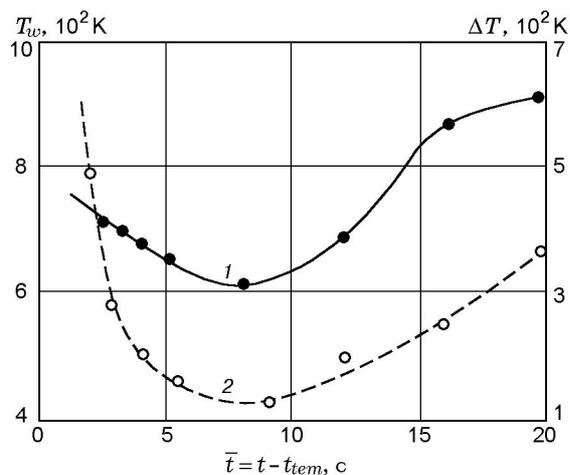


Рис. 3. Зависимости $T_w(t)$ (1) и $\Delta T(t)$ (2) для образца в форме пластины из КПМ-2 для $t > 4$ с:

$$T_e = 295 \text{ K}, C_e = 0,98, U_e = 0,5 \text{ м/с}, t_{tem} = 7,6 \text{ с}$$

температуры поверхности T_w полусферических образцов. Образцы отжигали в пламени горелки [4, 5] в течение времени t_{tem} , а затем вводили (время ввода $\approx 0,04$ с) [4, 5] в поток газообразного окислителя с $T_e = 295$ К и различными значениями C_e и β_x , где $\beta_x = 1,5U_e/r_w$ — газодинамический параметр [5], r_w — радиус полусферы.

Зондовые измерения профилей температуры в газовой и конденсированной фазах на образцах в форме пластин из КПМ-2, проведенные с помощью П-образных прокатанных хромель-алюмелевых микротермопар толщиной 50 мкм (погрешность измерений $\approx 8\%$ [4, 5]), показали наличие «горбов» температуры в прококсованном слое [4]. При этом изменение разности температур $\Delta T(\bar{t})$ в газовой фазе ($T_g(\bar{t})$) и на поверхности ($T_w(\bar{t})$) эквидистантно температуре $T_w(\bar{t})$, что указывает на квазистационарность протекающих газофазных процессов [4, 5] при $\bar{t} > 4$ с (рис. 3). Нарушение эквидистантности при $\bar{t} < 4$ с объясняется, по-видимому, дополнительным теплоприходом за счет выгорания сажистых отложений на поверхности микротермопары при зондовых измерениях в газовой фазе.

Для тепловых испытаний трубчатых образцов из КПМ использовался экспериментальный стенд, схема которого изображена на рис. 4, а. Стенд состоит из стального цилиндрического стакана с установленным в нем трубчатым образцом из КПМ, торцы которого плот-

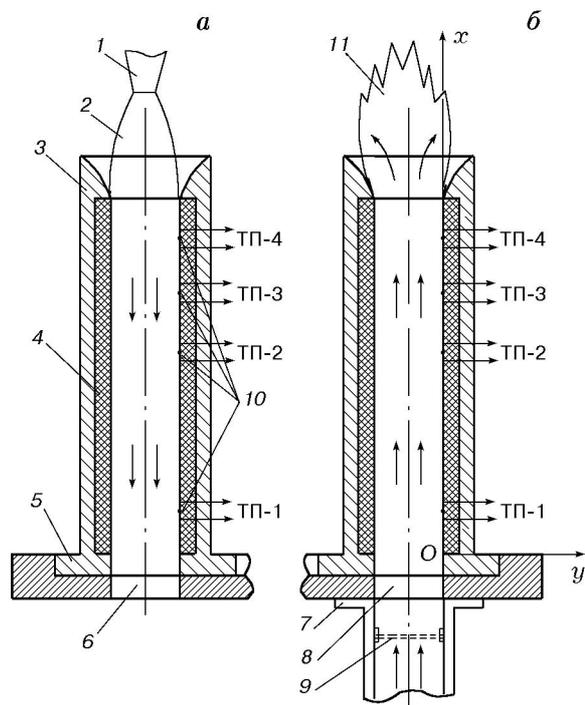


Рис. 4. Схема испытаний трубчатого образца из КПМ:

1 — сопло газогенератора, 2 — высокотемпературная струя, 3 — стальной цилиндрический стакан, 4 — образец, 5 — основание с выходным отверстием 6, 7 — патрубок с отверстием 8, по которым течет холодный газообразный окислитель, 9 — сетка, 10 — термопары, 11 — пламя

но подогнаны к установочным выступам стакана. При этом верхний торец стакана выполнен в виде конфузора так, чтобы истекающая из сопла газогенератора высокотемпературная струя газов на входе в образец имела устойчивый профиль скорости во все время работы газогенератора. Наличие сужающейся части стакана устраняет влияние начального участка на формирование пограничного слоя в полном образце из КПМ. В нижней части стакана имеется устойчивое основание с соосным выходным отверстием. При $t > t_{tem}$ стакан с образцом перемещается и соосно совмещается с патрубком и отверстием, по которым течет холодный газообразный окислитель (см. рис. 4, б). Для создания равномерного профиля скорости на входе в полость образца используется сетка.

Распределения температуры поверхности T_w вдоль координаты x измеряются во времени четырьмя прокатанными термопарами, обозначенными на рис. 4 ТП-1–ТП-4. Профили температур по координате y в любом сечении

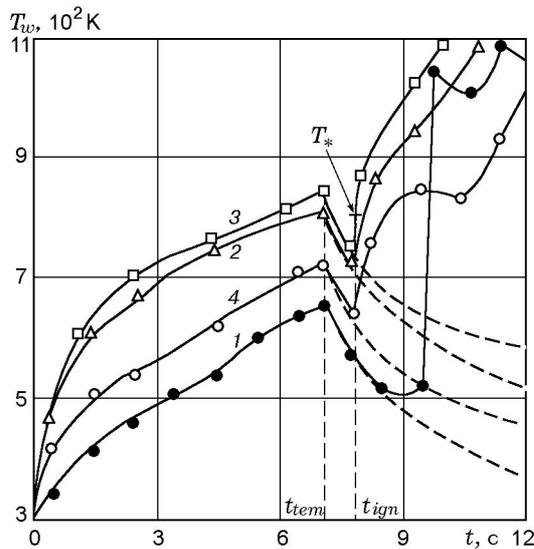


Рис. 5. Зависимости $T_w(t)$ для трубчатого образца из КПМ-2 при различных значениях продольной координаты:

x , м: 1 — $2,5 \cdot 10^{-2}$; 2 — $12,5 \cdot 10^{-2}$; 3 — $17,5 \cdot 10^{-2}$; 4 — $22,5 \cdot 10^{-2}$; сплошные линии — воспламенение, штриховые — потухание

трубчатого образца определяются с помощью микротермопарных зондов, аналогичных зондам на рис. 1. Воспламенение образца, визуализация появления пламени над верхним торцом стакана и динамика его развития регистрируются фотозлеменами и кинокамерой. На рис. 5 приведены осциллограммы температуры поверхности в четырех сечениях по длине трубы (вдоль координаты x) из КПМ-2, полученные с помощью хромель-алюмелевых микротермопар [4, 5]. Видно, что характер изменения температуры поверхности для трубчатого образца аналогичен динамике температуры поверхности для полусферических (см. рис. 2) и плоских (см. рис. 3) образцов из различных КПМ. Это указывает на существование единого механизма воспламенения КПМ в данных условиях тепло- и массообмена.

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Для понимания механизма воспламенения КПМ в описанных выше условиях необходимо знать временную зависимость потери массы образца $\Delta M(t)$. С этой целью необходимо провести опыты для определения скорости массового уноса $(\rho v)_w$ по методике, изложенной в работах [5, 9, 10]. В таких экспериментах по окончании нагрева в течение времени t_{tem} вы-

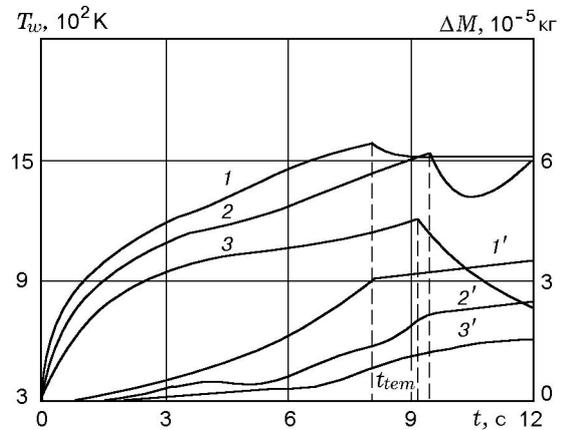


Рис. 6. Экспериментальные зависимости температуры поверхности (кривые 1–3) и потери массы (кривые 1'–3') для стеклопластика КПМ-3

сокотемпературное пламя отсекается заслонкой и канал продувается потоком газообразного окислителя с заданными значениями T_e , U_e и C_e . На рис. 6 показаны экспериментальные зависимости $T_w(t)$ и $\Delta M(t)$ для стеклопластика КПМ-3, приведенные в работе [10].

Анализ результатов экспериментов (см. рис. 2, 3, 5 и 6) показывает, что возможны три режима нестационарных процессов тепло- и массообмена в этих условиях:

1) режим воспламенения, когда температура поверхности при $t > t_{tem}$ сначала падает, а затем постепенно возрастает с течением времени и выходит на стационарное значение (образец горит); этот режим наблюдается для любых типов образцов: (см. кривые 1–4 на рис. 2 для полусферических образцов, кривые 1–4 на рис. 5 для трубчатых образцов, кривые 1, 2' на рис. 6 для образцов в виде таблеток [10]);

2) при высоких значениях T_w при $t > t_{tem}$ температура поверхности незначительно уменьшается (см. кривые 1, 1' на рис. 6) и выходит на режим стационарного горения, не образуя минимума на кривой $T_w(t)$;

3) режим потухания, когда условия воспламенения не достигаются и при $t > t_{tem}$ наблюдается монотонное снижение температуры с течением времени (см. штриховые линии на рис. 5 и кривые 3, 3' на рис. 6).

Наличие перечисленных выше режимов указывает на существование в исследуемых условиях критических условий воспламенения

Результаты экспериментов на воспламеняемость двух типов стеклопластиков

Материал	T_{tem} , К	T_e , К	C_e	U_e , м/с	Результат
КПМ-1	1600	1070	0,23	4,6	Воспламенился
КПМ-1	1600	800	0,23	6,7	Не воспламенился
КПМ-1	1830	292	0,23	4,3	—//—
КПМ-1	1630	292	0,98	0,8	Воспламенился
КПМ-3	1360	1128	0,23	9,2	Не воспламенился
КПМ-3	1535	1128	0,23	9,2	Воспламенился
КПМ-3	1270	292	0,98	0,9	Не воспламенился
КПМ-3	1210	292	0,98	1,9	Воспламенился

КПМ. Для количественной оценки критических условий в таблице приведены результаты испытаний воспламенительной способности двух типов стеклопластиков после предварительного нагрева, взятые из работы [10].

Динамика температуры поверхности для образцов различной формы из различных КПМ (см. рис. 2, 3, 5, 6), а также наличие трех режимов (см. рис. 6) и критических условий (см. таблицу) позволяют считать, что механизм воспламенения КПМ в газовых потоках с переменными свойствами был следующим (впервые предложен в [4]). В момент времени $t = t_{tem}$, когда образец помещается в поток холодного окислителя, на поверхности начинается гетерогенное окисление пленки сажи, однако тепла этой реакции недостаточно и температура поверхности уменьшается вследствие охлаждения, а скорость массового уноса $(\rho v)_w$ стремится к нулю. После достижения некоторого минимального значения T_* температура поверхности начинает возрастать, что объясняется выгоранием пленки сажи на поверхности и раскрытием устьев пор. При этом кислород из набегающего потока диффундирует внутрь пористого слоя и вступает в химическую реакцию с продуктами сажеобразования (сажей и пироуглеродом) [4]. Тепловыделения экзотермической гетерогенной реакции на сильноразвитой внутрипористой поверхности становится достаточно для того, чтобы начался саморазогрев пористого слоя и поверхности. Этому способствует также тепловыделение газофазных реакций окисления мелкодисперсных сажевых включений, а также водорода, метана и оксида углерода [10–12]: $2H_2 + O_2 = 2H_2O$; $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$, $2CO + O_2 = 2CO_2$.

Эксперименты (см. рис. 3) подтверждают

квазистационарность процессов в газовой фазе. Поэтому для определения интегрального теплового эффекта на поверхности от газофазных реакций в пламени воспользуемся выражениями для эффективных высот отдельно взятых пламен (Y_f) и для массовых скоростей горения (m_i) мелкодисперсных сажевых включений, H_2 , CH_4 и CO , при этом будем исходить из модели конкурирующих пламен [5]:

$$Y_{f,2} = \frac{\rho_2}{\rho_s} \frac{m_2}{m_{f,2}}, \quad Y_{f,i} = \frac{m_2}{m_{f,i}} + 0,6 \langle R_s \rangle, \quad (1)$$

$$Y_f = \varphi_{f,2} Y_{f,2} + \sum_i \varphi_{f,i} Y_{f,i}, \quad i = H_2, CH_4, CO;$$

$$m_2 = \varphi_2 \rho_2 k_{0,2} (\rho_w C_w) \exp\left(-\frac{E_w}{RT_w}\right), \quad (2)$$

$$m_{f,2} = k_{0,2} (\rho_2 C_2) (\rho_e C_e) \exp\left(-\frac{E_w}{RT_{f,2}}\right), \quad (3)$$

$$m_{f,i} = k_{0,f,i} (\rho C)_i (\rho_e C_e)^{\nu_{f,i}} \exp\left(-\frac{E_{f,i}}{RT_{f,i}}\right), \quad (4)$$

$$T_{f,i} = \frac{Q_{f,i}}{c_{p,g}} + \frac{T_{tem} + T_s^0}{2}. \quad (5)$$

Здесь ρ — плотность; T — температура; m_2 , m_f — массовые скорости гетерогенной и газофазных реакций; $\langle R_s \rangle$ — среднестатистический радиус пор; φ — объемная доля; E , ν , k_0 , Q — энергия активации, порядок, предэкспонент и тепловой эффект химической реакции;

C — массовая концентрация; R — универсальная газовая постоянная; c_p — удельная теплоемкость; индексы: s — твердое тело, 2 — продукты сажеобразования, f — пламя, w — поверхность, g — газ, e — окислитель во внешнем потоке, tem — предварительный отжиг, нуль вверху — начальное состояние.

Безразмерные высоты отдельно взятых пламен имеют вид

$$\xi_{f,2} = \frac{c_{p,g}}{\lambda_g} \frac{\rho_2}{\rho_s} m_2 Y_{f,2}, \quad \xi_{f,i} = \frac{c_{p,g}}{\lambda_g} m_2 Y_{f,i}, \quad (6)$$

где λ_g — теплопроводность газа.

Учитывая (1)–(6), запишем выражение для интегрального теплового эффекта от газофазных реакций в пламени:

$$Q_{f,w} = \varphi_{f,2} Q_w \frac{Y_{f,2} \rho_2}{y_* \rho_s} \exp(-\xi_{f,2}) + \sum_i \varphi_{f,i} Q_{f,i} \frac{\rho_{f,i}}{y_* \rho_s} Y_{f,i} \exp(-\xi_{f,i}), \quad (7)$$

где y_* — характерный размер зоны химической реакции. При таком подходе скорость изменения реагирующих в газовой фазе компонентов, отнесенная к единице поверхности твердого тела, может быть представлена в следующем виде:

$$\rho_{f,w} Y_f \frac{\partial(\varphi_f \eta_{f,w})}{\partial t} = \varphi_{f,2} \rho_e C_e (Y_{f,2})^{-1} \rho_2 k_{0,2} \times \times (1 - \eta_{w,2}) \exp\left(-\frac{E_w}{RT_w}\right) + \sum_i \varphi_{f,i} \rho_{f,w} (Y_{f,i}) \times \times (1 - \eta_{w,i}) k_{0,f,i} (\rho_e C_e)^{\nu_{f,i}} \exp\left(-\frac{E_{f,i}}{RT_w}\right). \quad (8)$$

Таким образом, с помощью выражений (1)–(8) удастся приближенно описать тепловыделение газофазных реакций, если учитывать экспериментальную информацию о квазистационарности процессов в газовой фазе [4, 5] при воспламенении образцов из КПМ различной формы по описанному выше механизму.

Одним из основных вопросов теории воспламенения в гетерогенных системах [5, 13] является вопрос об оценке критических условий исходя из равенства теплоприхода и теплоотвода на поверхности раздела сред [13]. Для рассматриваемой задачи таким условием является

переход гетерогенной реакции окисления продуктов сажеобразования при $t > t_{tem}$ во внутридиффузионную область [13]. При этом должно выполняться условие касания кривых теплоприхода и теплоотвода на пористой поверхности при некоторой температуре T_* . Тогда с учетом (2) и результатов работ [5, 13] имеем

$$\sqrt{\Theta_{tem}} \frac{2\varphi_2}{\langle R_s \rangle / y_*} q_{2,w} k_{0,2} (\rho_* C_e) \exp\left(-\frac{E_w}{RT_*}\right) \geq \geq \sigma \varepsilon_w (T_*^4 - T_e^4) + \alpha_c (T_* - T_e), \quad (9)$$

где $\Theta_{tem} = E_w (T_{tem} - T_*) / RT_*^2$ — безразмерная температура поверхности при $t = t_{tem}$; α_c — коэффициент теплоотдачи за счет конвекции; ε_w — степень черноты поверхности; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана — Больцмана; $q_{2,w}$ — тепловой эффект гетерогенной реакции.

Для удобства дальнейшего анализа теплоотвод за счет переизлучения в выражении (9) представим как [5]

$$\sigma \varepsilon_w (T_*^4 - T_e^4) = \sigma \varepsilon_w T_*^3 \left[1 + \frac{T_e}{T_*} + \left(\frac{T_e}{T_*}\right)^2 + \left(\frac{T_e}{T_*}\right)^3 \right] (T_* - T_e). \quad (10)$$

Обозначим через

$$\alpha_r = \sigma \varepsilon_w T_*^3 \left[1 + \frac{T_e}{T_*} + \left(\frac{T_e}{T_*}\right)^2 + \left(\frac{T_e}{T_*}\right)^3 \right]$$

эффективный коэффициент теплоотдачи за счет переизлучения при $T_e \ll T_*$. Тогда в правой части балансового соотношения (9) будем иметь теплоотвод тепла в поток холодного окислителя при $\alpha = \alpha_c + \alpha_r$ с учетом (10), а (9) в безразмерном виде переписется так:

$$\sqrt{\Theta_{tem}} B_{s*} \delta_w \geq -\Theta_e, \quad (11)$$

где

$$\delta_w = \frac{E_w q_{2,w} k_{0,2} (\rho_* C_e)}{\alpha RT_*^2} \exp\left(-\frac{E_w}{RT_*}\right)$$

— параметр Франк-Каменецкого [13]; $B_{s*} = 2\varphi_2 y_* / \langle R_s \rangle$ — параметр, характеризующий структуру пористого слоя; $\Theta_e = (T_e - T_*) E_w / (RT_*^2)$ — безразмерная температура внешнего потока окислителя.

В качестве характерного размера y_* необходимо брать глубину проникновения реакции

окисления продуктов сажеобразования в пористый слой:

$$y_* = \sqrt{D_{s,e} t_{ign}}, \quad (12)$$

где t_{ign} — время диффузионного воспламенения, отсчитываемое от $t = t_{tem}$ до точки перегиба на кривой $T_w(t)$; $D_{s,e} = D_e \Pi_s^2$ — эффективный коэффициент диффузии окислителя в пористый слой [11, 14]; D_e — коэффициент бинарной диффузии; Π_s — пористость слоя.

В качестве примера проведем расчет условий воспламенения для кривой 3 на рис. 5, используя данные из [4, 5, 10, 11, 13, 14]. Опуская промежуточные вычисления величин, входящих в соотношения (10)–(12), получим следующие значения безразмерных параметров: $\Theta_{tem} = 1,210$; $B_{s*} = 22,656$; $\delta_w = 0,585$; $\Theta_e = -13,287$.

Как следует из рис. 5, наблюдается диффузионное воспламенение продуктов сажеобразования в пористом слое (см. кривую 3) с последующим переходом к самоподдерживающемуся горению трубчатого образца из КПМ-2 в потоке газообразного окислителя при $C_e = 0,98$. Для данного примера выполняются и классические оценки условий гетерогенного воспламенения, проведенные Д. А. Франк-Каменецким [13], где получено предельное значение $\delta_w \approx e^{-1} \approx 0,368$. Действительно, если уменьшить концентрацию кислорода в потоке газа до значения $C_e = 0,23$ (атмосферный воздух), то получим $\delta_w = 0,124$. Согласно [13] условия гетерогенного воспламенения не реализуются, и для данных рис. 5 трубчатый образец потухает, что подтверждается экспериментально (см. штриховые линии).

В заключение следует отметить, что соотношения (9) и (11) позволяют определять либо неизвестные характеристики пористого слоя в КПМ (параметр B_{s*}) при заданных макроскопических параметрах гетерогенной реакции окисления продуктов сажеобразования и коэффициентов теплоотдачи, либо по известному параметру B_{s*} при заданных условиях теплообмена находить неизвестные макроскопические параметры реакции.

Соответствующие процедуры известны и хорошо разработаны для различных типов реакций (см., например, метод «спрямления» в работах [5, 9, 11, 13, 14]).

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика проведения экспериментов по исследованию процессов терморазрушения и воспламенения полусферических, плоских и трубчатых образцов из КПМ в газовых потоках с переменными свойствами.

2. По результатам экспериментов установлено три режима воспламенения предварительно отожженного образца из КПМ в потоке относительно холодного газообразного окислителя, один из которых (потухание) указывает на существование критических условий.

3. Зондовыми термометрическими измерениями нестационарных температурных полей в газовой и конденсированной фазах доказан квазистационарный механизм протекания газозависимых реакций, продуктов термодеструкции КПМ в момент контакта с окислителем из внешнего потока, интенсивность которых не оказывает преобладающего воздействия на наблюдаемые режимы воспламенения. Приведены формулы для расчета интегрального тепловыделения от этих реакций на поверхности исходя из модели конкурирующих пламен.

4. Сформулировано балансовое соотношение между теплоприходом и теплоотводом на пористой реагирующей поверхности, позволяющее оценивать критические условия диффузионного воспламенения КПМ в исследуемых условиях. Интересно, что оно не противоречит классическим представлениям о гетерогенном воспламенении, если учесть параметр B_{s*} , характеризующий диффузионный механизм переноса окислителя в порах. Это подтверждено конкретными расчетами и экспериментами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Конструкционные** стеклопластики / В. И. Альперин, Н. В. Корольков, А. В. Мотавкин и др. М.: Химия, 1979.
2. **Шевчук А. П., Симонов О. А., Шебеко Ю. Н. и др.** Закономерности протекания аварий на резервуарах со сжиженными углеводородными газами с образованием «огненных шаров» // Хим. пром-сть. 1991. № 6. С. 18–20.
3. **Шебеко Ю. Н., Шевчук А. П., Смолин И. М. и др.** Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом. 2. Расчет поражающих факторов пожара и взрыва при разгерметизации цистерны со сжиженными углеводородными газами // Пожаровзрывобезопасность. 1993. № 1. С. 39–45.

4. **Исаков Г. Н., Мамонтов Г. Я.** Нестационарный теплообмен и воспламенение стеклопластиков при переменных тепловых нагрузках // Молодые ученые и специалисты — народному хозяйству: Материалы регион. науч.-практ. конф. Подсекция механ.-матем. Томск: Изд-во ТГУ, 1977. С. 203–205.
5. **Исаков Г. Н.** Тепломассоперенос и воспламенение в гетерогенных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
6. **ISO 4589:1984.** Plastics. Determination of flammability by oxygen index.
7. **ISO 9773:1990.** Plastics. Determination of burning behavior of flexible vertical specimens in contact with a small-flame ignition source.
8. **Решетников И. С., Антонов А. В., Халтуринский Н. А.** Математическое описание горения вспучивающихся полимерных систем // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 6. С. 48–67.
9. **Несмелов В. В., Исаков Г. Н. и др.** Новые данные о закономерностях термодеструкции полимеров при конвективном тепломассообмене // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292, № 5. С. 1123–1126.
10. **Несмелов В. В.** Влияние предварительной тепловой обработки на воспламенительную способность коксующихся полимерных материалов // Томск, 1987. Деп. в ВИНТИ 05.06.87, № 4047–В87.
11. **Лавров Н. В.** Физико-химические основы процесса горения топлива. М.: Наука, 1971.
12. **Щетинков Е. С.** Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
13. **Франк-Каменецкий Д. А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.
14. **Оренбах М. С.** Реакционная поверхность при гетерогенном горении. Новосибирск: Наука, 1973.

*Поступила в редакцию 8/VI 2001 г.,
в окончательном варианте — 5/XI 2001 г.*
