

двухфазного потока. Для слабокалорийных составов перенос тепла по поверхности двухфазным потоком отсутствует. Перемещение его во всех точках обусловлено теплопроводностью. В этих условиях нижние слои засыпки, контактирующие со слоем расплава продуктов горения (рис. 4, в), имеют преимущество перед верхними слоями состава. В этой ситуации скорость горения определяется процессами, происходящими в данной части канала. В результате наклон фронта горения становится более 90° . Аналогичные закономерности замечены на других термитных сложных составах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбанин С. С., Соболев С. Л. Распространение волн воспламенения в макронеоднородных системах/АН СССР. ОИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1986.— С. 11.
2. Струнина А. Г., Демидова Л. К., Фирсов А. И. и др. Устойчивость горения безгазовых систем при наличии потерь // ФГВ.— 1973.— 23, № 3.— С. 52.
3. Беляев А. Ф., Боболов В. К., Коротков А. И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв.— М.: Наука, 1973.
4. Плинер Ю. Л., Игнатенко Г. Ф. Восстановление окислов металлов алюминием.— М., 1967.
5. Мержанов А. Г., Юхвид В. И., Боровинская И. П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез литых тугоплавких соединений // Докл. АН СССР.— 1980.— 255, № 1.— С. 120—124.

п. Черноголовка

Поступила в редакцию 11/X 1990

УДК 536.46

И. Н. Дорожеев, Э. А. Штессель

РОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА ПРИ ГОРЕНИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Рассматривается влияние поверхностных процессов и химических транспортных реакций на горение СВС-систем через изменение поверхности контакта реагентов. Предлагается модель, позволяющая учесть изменение поверхности контакта в процессе распространения волны горения. Показано, что поверхностная диффузия и химический транспорт одного из реагентов к поверхности другого способны увеличить скорость горения в 3—4 раза, для достижения максимальных скоростей необходимо формирование поверхности контакта реагентов в зоне прогрева волны горения.

В настоящее время получение различных материалов с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) имеет широкое распространение. Существует большое количество теоретических и экспериментальных работ, изучающих механизм этого процесса [1, 2]. Одна из особенностей СВС-системы — дисперсный характер, частицы одного реагента имеют неполную поверхность контакта с частицами другого реагента. Кроме того, между частицами в такой системе существует свободное поровое пространство. Так как скорость тепловыделения зависит от удельной поверхности контакта, увеличением или уменьшением поверхности контакта можно изменять скорость волны горения.

Самым простым способом такого управления служит уплотнение шихты перед синтезом. Увеличить поверхность контакта в самом процессе СВС можно с помощью поверхностных процессов, таких как поверхностная диффузия, растекание [3, 4]; с помощью переноса одного из компонентов на свободную поверхность другого посредством химической транспортной реакции [5]. Тогда увеличением поверхности контакта реагентов можно обеспечить необходимое для распространения волны тепловыделение.

Макрокинетическая модель, описывающая указанные выше процессы, может быть сформулирована следующим образом. Рассмотрим СВС-

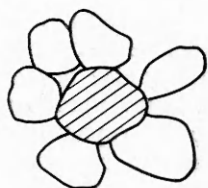


Рис. 1. Элементарная ячейка реакционной смеси.

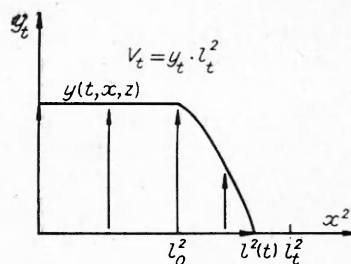


Рис. 2. Реакционный объем элементарной ячейки.

систему. Каждую частицу одного реагента окружает определенное количество частиц другого реагента. Если состав смеси не меняется, то несмотря на изменение плотности в среднем это количество останется постоянным, изменится лишь суммарная поверхность контакта частицы с частицами другого сорта. Такую группу будем считать элементарной ячейкой (рис. 1), из большого числа которых состоит смесь. Предполагается, что размер ячейки достаточно мал по сравнению с характерными размерами волны горения.

Для ячейки определим возможный реакционный объем, заполнение которого новой фазой будет означать, что компоненты в ячейке прореагировали. Предполагается, что новая фаза (продукт реакции) образуется мгновенно при взаимном контакте исходных компонентов (механизм реакционной диффузии). Тепловыделение идет на границе образования продукта реакции, а диффузия в глубину реакционного объема — через развитую площадь контакта, увеличивающуюся за счет поверхностных процессов или осаждения одного компонента на свободную поверхность другого.

Предположим, что в таком объеме реакционная диффузия и изменение поверхности контакта происходят во взаимно перпендикулярных направлениях. Тогда реальное положение частиц в ячейке можно формально учесть введением двух характерных масштабов: y_t — для реакционной диффузии, отражающий размер частиц и их взаимное расположение; l_t — для поверхностной диффузии, квадрат которого характеризует максимально возможную поверхность реагирования между частицами в ячейке.

Введем следующие обозначения: l_0^2 , $l^2(t)$ — начальная и текущая поверхность контакта; x — линейная координата для поверхностной диффузии; z — линейная координата для распространения волны горения; $y(t, x, z)$ — текущая глубина реакционной диффузии ($y = 0$ при $l(t) < x < l_t$); $V_t = y_t l_t^2$ — полный реакционный объем (рис. 2). Если V_t отражает объем получаемого продукта в ячейке, а l_t^2 — максимально возможная поверхность контакта между реагентами, то y_t можно охарактеризовать как масштаб гетерогенности смеси при полном контакте реагентов. При взаимодействии с не меняющейся в ходе процесса начальной площадью контакта $l_0^2 < l_t^2$ значение y_t^* , при котором реакционный объем заполнится, увеличивается; y_t^* будет означать изменившийся масштаб гетерогенности, связанный при таком описании с поверхностью контакта. Тем самым эффективный масштаб гетерогенности будет изменяться вместе с поверхностью контакта в ходе взаимодействия.

Функция тепловыделения выглядит следующим образом:

$$\Phi = (\rho Q / V_t) \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{l^2(t)} y dx^2,$$

где ρ — плотность смеси; Q — тепловой эффект на единицу массы смеси.

В качестве примера выберем поверхностную диффузию, характеризующуюся экспоненциальной зависимостью от температуры:

$$D_1 = D_1^0 \exp(-E_1/RT),$$

D_1^0 — предэкспонент; E_1 — энергия активации процесса. Варьирование D_1^0 и E_1 позволяет изменять характерное время поверхностной диффузии.

Запишем систему уравнений для описания волны горения с учетом поверхностной диффузии

$$\begin{aligned} \rho r \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + (\rho Q/V_t) \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{l^2(t)} y(t, x, z) dx^2 - \frac{\alpha}{r} (T - T_0), \\ z = 0 \quad T &= T_s, \quad z = +\infty \quad T = T_0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dl^2(t)}{dt} &= D_1^0 \exp(-E_1/RT), \quad l^2(t) < l_i^2, \\ \frac{dl^2(t)}{dt} &= 0, \quad l^2(t) \geq l_i^2; \end{aligned} \quad (2)$$

$$l^2(0, z) = l_0^2, \quad (3)$$

$$\frac{dy^2(t, x, z)}{dt} = D_2^0 \exp(-E_2/RT) \exp(-fy), \quad 0 \leq x \leq l(t), \quad (4)$$

$$y(t, x, z) = 0 \quad \text{при} \quad x > l(t), \quad \int_0^{l^2(t)} y dx^2 \leq V_t. \quad (5)$$

Здесь D_2^0 — предэкспонент реакционной диффузии; E_2 — энергия активации реакционной диффузии; f — фактор торможения реакционной диффузии продуктом реакции; α — коэффициент теплоотдачи; r — характерный размер реакционной полости; T_0 — начальная температура смеси; T_s — температура зажигания.

Введем следующие безразмерные параметры:

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{E_2(T_r - T_0)}{RT_r^2}, \quad \varepsilon = \frac{E_1}{E_2}, \quad \eta = \frac{y}{y_t}, \quad s = \frac{l^2(t)}{l_t^2}, \quad \Theta = \frac{E_2(T_0 - T_r)}{RT_r^2},$$

$$T_r = T_0 + \frac{Q}{c}, \quad m = fy_t, \quad \tau = \frac{t}{t^*}, \quad \psi = \frac{z}{z^*}, \quad t^* = \frac{y_t^2}{D_2(T_r)}, \quad s' = \frac{x^2}{l_t^2},$$

$$D_2(T_r) = D_2^0 \exp(-E_2/RT_r), \quad z^* = \sqrt{at^*}, \quad a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad \beta = \frac{RT_r}{E_2}, \quad \text{Nu} = \frac{\alpha t^*}{rc\rho}.$$

Система (1) — (5) в безразмерном виде имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \psi^2} + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^{s(\tau)} \eta ds' - \text{Nu} \left(\Theta + \frac{1}{\gamma} \right), \\ \varphi &= 0, \quad \Theta = \Theta_s, \quad \varphi = +\infty, \quad \Theta = -1/\gamma; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{ds(\tau)}{d\tau} &= J \exp\left(\frac{\varepsilon \Theta}{1 + \beta \Theta}\right), \\ s &\leq 1, \quad s(0, \varphi) = s_0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\eta^2(\tau, s', \varphi)}{d\tau} &= \exp(-m\eta) \exp\left(\frac{\Theta}{1 + \beta \Theta}\right), \\ s' &< s(\tau), \quad \int_0^{s(\tau)} \eta ds' \leq 1, \quad \eta = 0 \quad \text{при} \quad s' \geq s \geq s(\tau). \end{aligned} \quad (8)$$

Параметр $J = \frac{y_t^2}{l_t^2} \frac{D_1(T_r)}{D_2(T_r)}$ — отношение характерных времен реакционной и поверхностной диффузии при температуре горения. Система

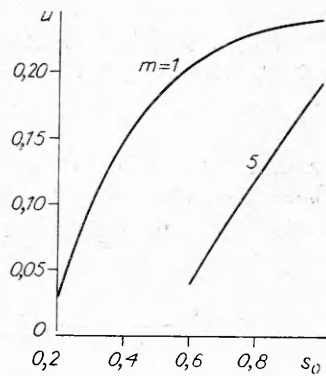


Рис. 3. Зависимость $u(s_0)$ при $J = 0$.

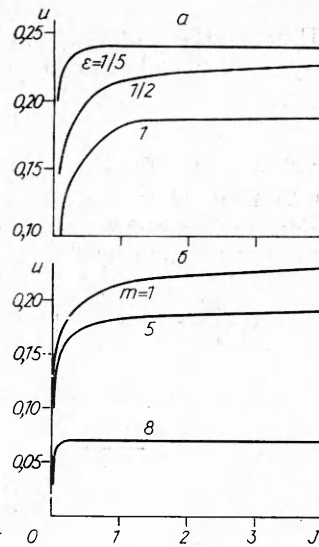


Рис. 4. Зависимость скорости горения от параметра J .

(6) — (8) анализировалась численно. Скорость распространения волны горения u определялась как скорость перемещения в пространстве выбранной температуры. В качестве T_* использовалась температура горения T_r .

На рис. 3 представлены результаты влияния начальной площади контакта s_0 на u ($m=1, 5$ при $J=0$). Для дальнейших исследований взята $s_0=0,1$, при которой волна горения без участия поверхностной диффузии не распространяется. Анализировалось влияние параметров J, ϵ, m на величину u при $\beta=0,184, \gamma=0,212, Nu=10^{-5}$.

На рис. 4, а приведены зависимости при $m=1$. Видно, что влияние поверхностной диффузии весьма существенно. Даже при $J \ll 1$, но при сильной экспоненциальной зависимости поверхностной диффузии от температуры ($\epsilon=1$) поверхностная диффузия обеспечивает распространение волны горения. От параметра ϵ зависит, при каких характерных значениях J (т. е. величин предэкспонента D_1^0 при заданном ϵ) скорость горения выходит на максимум. При уменьшении ϵ u_{\max} достигается при меньших значениях J .

На рис. 4, б представлены результаты расчета скорости горения в зависимости от изменяющихся значений фактора торможения m при $\epsilon=1/2$. Увеличение m означает переход от систем, имеющих при горении узкую зону реакции, когда u определяется в основном скоростью реакции вблизи максимальной температуры T_r , к системам, имеющим при горении широкую зону реакции, когда скорость определяется максимальной скоростью реакции при $T^* < T_r$. Глубина превращения при $T=T^*$ меньше единицы, полное реагирование компонентов происходит за фронтом волны горения. В данном случае снижение глубины превращения с ростом m означает уменьшение η^* , при котором идет максимальное тепловыделение ($\eta^* < \eta_i$).

При уменьшении s_0 выделение тепла в единицу времени посредством реакционной диффузии еще более затруднено, скорость горения при этом резко падает (см. рис. 3). В этих условиях с ростом m увеличение поверхности контакта становится особенно эффективно. Для систем с сильным торможением диффузии продуктами реакции реагирование с открываемой поверхностной диффузией площади контакта практически полностью определяет скорость тепловыделения (значения J , при которых достигается u_{\max} , уменьшаются с ростом m). С увеличением m при $J < 1$ сменяется режим взаимодействия — при наличии поверхностной диффузии взаимодействие реагентов переходит от кинетического режима, когда основное тепловыделение происходит на подготовленной за время про-

грева площади контакта, к диффузионному режиму, когда скорость поверхностной диффузии определяет распространение волны горения. Аналогичные результаты, связанные с растеканием одного из компонентов по поверхности другого, получены в [6].

Из приведенных выше результатов можно сделать выводы относительно влияния различных типов поверхностных процессов на распространение волны горения в СВС-системах:

1) наличие поверхностных процессов резко интенсифицирует взаимодействие реагентов, существенно увеличивает скорость волны горения;
2) параметр J влияет на отношение характерных времен поверхностных процессов и реакционной диффузии. При любых типах поверхностных процессов, характеризующихся определенными значениями J и ϵ , система (6)–(8) не меняет вида. При этом значения этих параметров определяются конкретными типами процессов, изменяющих поверхность контакта;

3) характер влияния величины J на горение СВС-систем (отличающихся различными γ , β , m) постоянный: максимальные значения скорости достигаются уже при небольших значениях J .

Другим способом влияния на поверхность контакта может служить перенос через газовую фазу одного из реагентов с помощью химической транспортной реакции. В работе [7] анализировались возможности такого переноса в рамках традиционной модели горения СВС-систем, предполагающей полную поверхность контакта реагентов [8]. С помощью модели горения СВС-систем с изменяющейся в ходе синтеза поверхностью контакта возможен более подробный анализ влияния транспорта на горение.

В рамках предложенной выше модели необходимо вывести закон изменения поверхности контакта при химическом осаждении в ячейке. Рассмотрим частицу, на которую осаждается вещество В. Предположим, что площадь частицы, закрытая осажденным веществом, зависит от количества этого вещества g по формуле $s = M \left[1 - \exp\left(-\frac{g}{V_0 \rho_B}\right) \right]$, где V_0 — объем частицы, на которую происходит осаждение; ρ_B — плотность осаждаемого вещества. Пусть при $g = g^* \left(\frac{g^*}{V_0 \rho_B} = k \right)$ поверхность частицы полностью закрывается, $S = S_t$ [9]. При осаждении на частицу, имеющую начальную поверхность контакта S_0 с другими частицами, зависимость закрываемой поверхности от массы осажденного вещества g будет следующей:

$$S = S_0 + (S_t - S_0) \frac{M}{S_t} \left[1 - \exp\left(-\frac{g}{V_0 \rho_B}\right) \right]$$

или в безразмерном виде (оставляя обозначения площади)

$$s = s_0 + (1 - s_0) \frac{M}{S_t} \left[1 - \exp\left(-\frac{g}{V_0 \rho_B}\right) \right]. \quad (9)$$

Изменение площади определяется формулой

$$\Delta s = (1 - s_0) \frac{M}{S_t} \exp\left(-\frac{g}{V_0 \rho_B}\right) \frac{1}{V_0 \rho_B} \Delta g. \quad (10)$$

Изменение массы осажденного вещества в ячейке можно выразить через концентрацию газообразного соединения $\Delta \rho_A$ по реакции $\nu_1 A_r + \nu_2 B_r + \nu_3 C_r$:

$$\Delta g = \left(\frac{S_1}{S_2} \right) n V_n \Delta \rho_A. \quad (11)$$

Здесь $n = \nu_2 \mu_B / \nu_1 \mu_A$; S_1/S_2 — отношение удельной поверхности реагента, на которую происходит осаждение, к удельной поверхности всей смеси; V_n — объем порового пространства в ячейке; μ_A , μ_B — молекулярные мас-

сы соединений А и В. Подставляя (11) в (10) и используя (9), получаем

$$\Delta s = \left(s_0 + \frac{M(1-s_0)}{S_t} - s \right) \frac{\Pi}{1-\Pi} \frac{S_1}{S_2} \frac{\Delta \rho_A}{\rho_B}, \quad (12)$$

где Π — пористость смеси $\left(\frac{V_{\Pi}}{V_0} = \frac{\Pi}{1-\Pi} \right)$. Концентрация газообразного соединения ρ_A определяется уравнением

$$\frac{d\rho}{dt} = D_r \frac{d^2\rho}{dz^2} + k_+(T)(\rho_0 - \rho) - k_-(T)\rho,$$

в котором $k_+(T)(\rho_0 - \rho)$ — реакция образования; $k_-(T)\rho$ — реакция разложения газообразного соединения А; ρ_0 — плотность газовой фазы. Переходя к парциальному давлению p и пренебрегая точностью описания при низких температурах, получаем

$$\frac{dp}{dt} = D_r \frac{d^2p}{dz^2} + k_+(T)(p_0 - p) - k_-(T)p.$$

Здесь p_0 — общее давление ($p_0 = \text{const}$); D_r — коэффициент диффузии в газе; $k_+(T) = k_+^0 \exp(-E_+/RT)$; $k_-(T) = k_-^0 \exp(-E_-/RT)$.

Используя безразмерные переменные

$$\alpha_1 = E_+/E_2, \quad \alpha_2 = E_-/E_2, \quad w_1 = a/D_r, \quad c = p/p_0, \\ \Theta = \frac{E_2(T - T_r)}{RT_r^2}, \quad w_2 = t^* k_+(T_r), \quad K_r = \frac{k_-(T_r)}{k_+(T_r)}, \quad \varphi = \frac{z}{z^*}, \quad \tau = \frac{t}{t^*},$$

получаем

$$\frac{dc}{d\tau} = w_1^{-1} \frac{d^2c}{d\varphi^2} + w_2 \exp\left(\frac{\alpha_1 \Theta}{1 + \beta \Theta}\right) \left[1 - c - K_r c \exp\left(\frac{(\alpha_2 - \alpha_1) \Theta}{1 + \beta \Theta}\right) \right]. \quad (13)$$

Параметр w_1 характеризует отношение времен диффузионной и тепловой релаксаций, w_2 — отношение характерных времен тепловыделения и образования газообразного соединения.

Решая численно уравнение (13) во фронте распространяющейся волны горения, которая описывается формулой (6), находим изменение c по времени. Для переноса реагента В необходимо, чтобы по мере роста температуры в волне горения концентрация c вышла на кривую равновесных значений и спустилась вдоль этой кривой до равновесного значения при T_r [7].

Изменение $\Delta \rho$ связано с Δc по выражению

$$\Delta \rho = \Delta \left(\frac{c}{1 + \beta \Theta} \right) \frac{p_0 \mu_A}{RT_r} = \Delta \left(\frac{c}{1 + \beta \Theta} \right) \rho(T_r, p_0).$$

Возвращаясь к (12), получаем формулу изменения Δs через

$$\Delta \left(\frac{c}{1 + \beta \Theta} \right): \\ \Delta s = \left[s_0 + \left(\frac{1}{1 - \exp(-k)} \right) (1 - s_0) - s \right] n \frac{\Pi}{1 - \Pi} \frac{\rho(p_0, T_r)}{\rho_B} \frac{S_1}{S_2} \Delta \left(\frac{c}{1 + \beta \Theta} \right). \quad (14)$$

Обозначая через L произведение параметров, имеем окончательно

$$\Delta s = \left[s_0 + \left(\frac{1}{1 - \exp(-k)} \right) (1 - s_0) - s \right] L \Delta \left(\frac{c}{1 + \beta \Theta} \right), \quad (15)$$

$$L = n \frac{\Pi}{1 - \Pi} \frac{\rho(p_0, T_r)}{\rho_B} \frac{S_1}{S_2}.$$

Подставляя (15) в систему (6) — (8) вместо (7) и используя (13), получаем набор уравнений, описывающих взаимное влияние химической транспортной реакции и волны горения друг на друга.

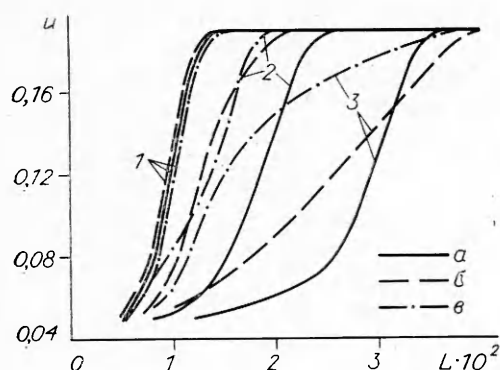


Рис. 5. Зависимость скорости горения от параметра L .

$a - k = 0,02$ (1), $0,04$ (2), $0,06$ (3); $b - w_2 = 600$ (1), 200 (2), 40 (3); $в - K_p = 3$ (1), 1 (2), $0,33$ (3).

представлены зависимости $u(L)$ при различных значениях k . s -образный вид кривых можно объяснить следующим образом. При малых L лимитирует процесс осаждения реагента. При возрастании L сменяется характер взаимодействия; осаждение успевает увеличить поверхность контакта до основного тепловыделения. С ростом k (k — доля необходимого для закрывания всей поверхности объема вещества) один режим переходит в другой при более высоком значении L .

На рис. 5, б показано влияние w_2 на зависимость $u(L)$ ($k = 0,02$). Уменьшение w_2 означает увеличение характерного времени образования газообразного соединения, что приводит к снижению количества вещества, осаждаемого на поверхность. Величина u при этом более прямо зависит от L , играющего роль начальных условий. Рис. 5, в иллюстрирует зависимость $u(L)$ при различных значениях K_p ($w_2 = 600$, $k = 0,02$). С помощью K_p можно изменять характерную скорость разложения: при уменьшении K_p она снижается, при этом изменяется и равновесное значение c_p^* при $\Theta = 0$ ($T = T_r$), равное $1/(1 + K_p)$. С ростом c уменьшается разность $1 - c_p^*$, определяющая максимальное количество вещества, способного осадиться на поверхность в волне горения (рис. 6). Все это приводит к более сильной зависимости от L .

Параметр L определяется внешними условиями, при которых происходит транспорт одного из реагентов к поверхности другого: внешнее давление p_0 , пористость смеси П, доля поверхности, на которую происходит осаждение, S_1/S_2 . Изменение L может означать изменение любого из этих условий, характер их влияния на скорость горения один и тот же: с ростом L взаимодействие реагентов переходит от режима, когда лимитирующей стадией является осаждение реагента, к кинетическому режиму с реагированием на подготовленной за время прогрева поверхности. По оценкам параметр $L = 10^{-3} \div 10^{-1}$, для точного определения L в системе необходимо знание данных по химическим веществам, участвующим в процессе переноса.

Второй вывод, который можно сделать из проведенного анализа, состоит в том, что при наличии химического транспорта скорость способна возрасти в несколько раз (для данного случая — в 4 раза). При реальном взаимодействии реагентов в СВС-системах из-за высокой температуры изучение механизма процесса сильно затруднено. В литературе отсутствуют и данные по высокотемпературной кинетике хлоридов, фторидов и иодидов, обычно использующихся в качестве газотранспортных агентов. Все это сильно затрудняет точное определение характера и путей влияния добавок химических соединений на горение конденсированных гетерогенных систем [7].

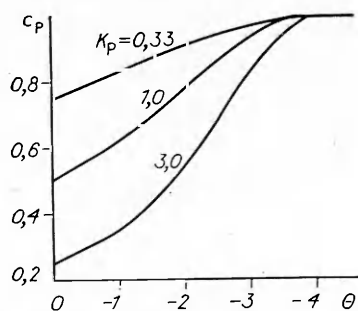


Рис. 6. Зависимость $c_p(\Theta)$.

Для расчетов выбираем параметры горения: $\gamma = 0,212$, $\beta = 0,184$, $m = 5$, $Nu = 10^{-5}$, $s_0 = 0,5$; кинетические параметры: $\alpha_2 = 0,9$, $\alpha_1 = 0,5$, $w_1 = 0,2$, $w_2 = 600$, $K_p = 3$. На рис. 5, а

Вместе с тем можно сказать, что различное влияние таких добавок не сводится к простому увеличению удельной поверхности реагентов за счет травления. Так, обработка ниобия хлором, фтором, иодом путем добавления в порошок 3 % (по массе) соединений C_6Cl_6 , $(-C_2F_4-)_n$ и иода с дальнейшей выдержкой при разных температурах и длительности обработки приводит во всех случаях к увеличению удельной поверхности от 0,1 (для необработанного порошка) до 0,2 м²/г. В экспериментах по горению смеси Nb—C с добавлением упомянутых выше веществ скорость горения может отличаться в 3 раза [7].

Проведен следующий эксперимент. Смесь Nb и C с добавленными 5 % иода догревалась внешним источником до температуры, близкой к температуре теплового взрыва смеси (670—700 °С). В реакторе смесь находилась в среде аргона [7]. После этого (в первом случае) реактор продувался потоком аргона в течение 20 мин, затем быстро охлаждался при слабом токе аргона, исключая подсос кислорода в реактор. Инициировать волну горения в этом случае не удалось. Во втором случае продувка аргоном исключалась. После инициирования волна горения распространялась по реактору. Тем самым возможная очистка поверхности от примесей, затрудняющих реагирование компонентов, не приводила к созданию условий для распространения волны горения. Возможно, что иод или его соединения могут служить в качестве поверхностно-активных веществ или в качестве газотранспортных агентов.

Одним из косвенных свидетельств в пользу химического транспорта может служить тот факт, что те количества химических веществ, при которых наблюдалось горение системы Nb—C [7], создают, по оценкам, давление внутри пор в шихте ~1 атм. В этом случае рост скорости горения в зависимости от количества добавки определяется повышением парциального давления газотранспортного носителя при общем давлении 1 атм.

Прямое доказательство того или иного механизма влияния требует более тщательных экспериментов. Однако проведенный теоретический анализ на основе модели горения с изменяющейся в ходе реакции поверхностью контакта позволяет получить общие закономерности и характер влияния тех или иных процессов на горение конденсированных веществ и анализировать сложные экспериментальные данные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольперт В. А., Барзыкина Р. А. и др. Теория волн горения в СВС-системах/ АН СССР. ОИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1988.
2. Мержанов А. Г. // Физическая химия. Современные проблемы // Под ред. Я. Н. Колотыркина.— М.: Химия, 1983.
3. Гегузин Я. Е. // Поверхностная диффузия и растекание.— М.: Наука, 1969.
4. Гегузин Я. Е. Физика спекания.— М.: Наука, 1984.
5. Шефер Г. Химические транспортные реакции.— М.: Мир, 1964.
6. Некрасов Е. А., Максимов Ю. М. и др. Влияние капиллярного растекания на распространение волны горения в безгазовых системах // ФГВ.— 1978.— 5, 26.
7. Штессель Э. А., Дорожевец И. Н. Горение гетерогенных конденсированных систем при наличии химических транспортных реакций // ФГВ.— 1990.— 26, № 1.— С. 59.
8. Хайкин Б. И. // Процессы горения в химической технологии и металлургии.— Черноголовка, 1975.
9. Кулик А. Я., Борисов Ю. С. и др. Газотермическое напыление композиционных порошков.— Л.: Машиностроение, 1985.

п. Черноголовка

*Поступила в редакцию 3/1 1991,
после доработки — 12/IV 1991*