

в данном случае выполняется. Но для того чтобы росла скорость горения, а вместе с ней и резко увеличивалось давление, необходимо, чтобы амплитуда акустических колебаний превышала некоторую пороговую величину (зависящую от частоты колебаний) [8]. Возможно, что при горении смесей, которые в отсутствие колебаний имеют ячеистую структуру, этот порог достигается легче.

Обратим внимание на то обстоятельство, что скорости горения и истечения горячих газов из камеры для смесей с содержанием пропана 3,5—4,5 % не столь сильно отличаются, так что механизм ускорения горения, связанный с наличием разрыва скорости вдоль пламени при истечении газов, скорее всего срабатывал или нет для всех смесей одновременно.

Исходя из того, что возбуждение вибрационного горения происходит после касания пламенем стенок, можно объяснить необычный порядок появления пиков давления в опытах работы [1] при изменении места инициирования горения. Действительно, чем дальше место инициирования горения от места истечения газов, тем позже начнется истечение продуктов сгорания, тем дольше видимая скорость пламени будет сохранять большее значение и тем раньше пламя подойдет к стенкам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Solberg D. M., Pappas J. A., Skrawstard E. // 18th Symp. (Intern.) on Combustion, 1981.
2. Van Wingerden C. J. M., Zeenwen J. P. Comb. Flame, 1983, 51, 109.
3. McCawn D. P. J., Thomas G. O., Edwards D. H. Arch. Comb., 1985, 5, 1, 83.
4. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение.— М.: Физматгиз, 1961.
5. Рэлей Дж. В. Теория звука.— М., 1955.— Т. 2.
6. Bradley D. B., Mitcheson A. Comb. Flame, 1978, 32, 221.
7. Yao C. // Hass Prevention Symp., 1971.— V. 8.
8. Маркштейн Дж. // Вопросы горения и детонационных волн.— М.: Оборонгиз, 1968.

Поступила в редакцию 25/XII 1985,
после доработки — 8/IX 1987

УДК 536.46

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АГЛОМЕРАЦИИ АЛЮМИНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСЕВЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

О. Б. Ковалев
(Новосибирск)

Эффективность использования смесевых конденсированных систем (СКС) существенно зависит от степени агломерации порошкообразного металла на реагирующей поверхности. Процесс агломерации металлов на поверхности горения исследуется более двух десятков лет. К настоящему времени накоплен огромный экспериментальный материал [1—9], на основе которого определились физические представления этого явления и удалось сформулировать ряд качественных закономерностей влияния на него природы горючего и окислителя, концентраций и размеров дисперсных компонентов, давления и скорости обдува поверхности горения.

Один из главных вопросов в теории агломерации — определение размеров агломератов, покидающих поверхность горения. Полное описание механизма агломерации с учетом многообразия физических процессов горения СКС затруднено, поэтому применимость существующих моделей [10—14] сильно ограничена. Модель накопления и установления контактов между исходными частицами металла в жидковязком поверх-

ностном слое [10, 11] применима к СКС с плавящимися компонентами. Модель «карманов» [12, 13], полученная из стереологического анализа гетерогенной структуры СКС, в предположении, что влияние частиц металла происходит в пределах элементарных ячеек между зернами окислителя, не учитывает влияния давления и природы компонентов СКС. В основу модели [14] положен механизм «удержания» агломерата на поверхности, обусловленный возникающей перемычкой из спекшихся частиц алюминия. Размер агломерата, покидающего поверхность горения, определяется из условия критического равновесия, записанного в виде баланса действующих на него сил. Для расчета прочности перемычки используется кинетика высокотемпературного разрушения твердых веществ. Модель [14] неприменима для гетерогенных СКС, влияние давления учитывается косвенно — через задаваемую зависимость скорости горения от давления.

Согласно сложившимся в последнее время представлениям о физике протекания процессов накопления и агломерации частиц алюминия на поверхности горения, в [15] предложен новый подход для моделирования этого явления.

В данной работе на основе полученных в [15] уравнений агломерации построена упрощенная модель, которая позволяет рассчитать средний диаметр агломератов с учетом влияния внешнего давления и состава СКС. Смесевой состав включает три основных компонента — окислитель, горючее и металлические добавки. В качестве окислителя используется перхлорат аммония в зернах, средний размер которых изменяется от 50 до 400 мкм. Горючее может быть различных типов (полибутадиен, полисульфид, фторуглерод, полиуретан и др. [16]), оно играет роль связующего в матрице СКС с вкрапленными в нее мелкими частицами Al.

По аналогии с карманным механизмом агломерации [12] считается, что слияние исходных частиц металла происходит в пределах поверхности элементарной ячейки (или плоского «кармана») СКС, образованной частицами окислителя, выступающими над поверхностью образца. Основные предположения, в рамках которых строится модель, сводятся к следующим:

— частицы металла, появляющиеся на участке поверхности СКС, занятой горючим в пределах одного «кармана», имеют температуру, близкую к температуре плавления алюминия, и за единицу времени сливаются в одну частицу сферической формы, при этом процесс слияния отдельных частиц не рассматривается;

— на агломерат действует сила, удерживающая его на поверхности, массовая сила и аэродинамическая, обусловленная потоком газов, образованных в результате разложения горючего;

— из-за неравномерности газификации горючего под частицей Al возникает крутящий момент аэродинамической силы, под действием которого она перемещается по поверхности и сливается с другими частицами;

— укрупнение агломерата за счет слияния с появляющимися в пределах кармана новыми частицами продолжается до момента воспламенения, при этом его внутренняя энергия изменяется под воздействием потока тепла от диффузионно-кинетического пламени между окислителем и горючим, за счет внутреннего саморазогрева в результате окисления металла и слияния с более холодными исходными частицами;

— отсутствует градиент температуры внутри агломерата, что позволяет ввести среднюю по диаметру температуру T ;

— по достижении критических условий, когда температура агломерата T становится равной температуре воспламенения, вся его поверхность воспламеняется мгновенно, в результате чего удерживающая связь с поверхностью разрушается, агломерат зависает над поверхностью и уносится газовым потоком.

В рамках этих предположений уравнения агломерации, полученные в [15] в безразмерных переменных, имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \Theta &= \kappa \gamma \frac{x}{1+\xi} \exp\left(\frac{\Theta}{1+\alpha\Theta}\right) + \sigma \Theta_g - (3/x + \sigma) \Theta, \\ \frac{d}{dx} \xi &= \gamma \frac{x^2}{1+\xi} \exp\left(\frac{\Theta}{1+\alpha\Theta}\right), \\ x &= x_s, \quad \Theta = 0, \quad \xi = 0, \\ \Theta &= \frac{E_{ал}}{RT_s^2} (T - T_s), \quad \xi = (\eta - \eta_s)/\eta_s, \quad x = \delta/D, \\ \alpha &= RT_s/E_{ал}, \quad \kappa = \frac{6}{\alpha} \frac{Q_{ал}}{\rho_{ал} c_{ал} T_s} \frac{\eta_s}{D}, \\ \gamma &= \frac{\pi k C_0^n}{2\beta_{ал} \omega S} \frac{D^3}{\eta_s^2} \exp\left(-\frac{1}{\alpha}\right), \\ \sigma &= \frac{3\pi \lambda_g D}{c_{ал} \rho_{ал} \beta_{ал} \omega S} Nu, \quad S = \pi D^2 (1 - \beta_{ок})/6\beta_{ок}; \\ t &= \frac{\pi \delta_s^3}{6\beta_{ал} \omega S} \left[\left(\frac{x}{x_s}\right)^3 - 1 \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь x — безразмерный текущий диаметр агломерата; $\Theta(x)$, $\xi(x)$ — безразмерные искомые функции температуры и толщины окисной пленки, t — время.

К задаваемым параметрам относятся: $Q_{ал}$, $E_{ал}$, kC_0^n — тепловой эффект, энергия активации и предэкспонент реакции окисления алюминия; R — универсальная газовая постоянная; T_s — начальная температура; $\rho_{ал}$, $c_{ал}$ — плотность и удельная теплоемкость Al; $\beta_{ал}$, $\beta_{ок}$ — объемные концентрации Al и окислителя в составе СКС; D — средний диаметр частиц окислителя на поверхности; ω — средняя скорость горения СКС; δ_s , η_s — начальный диаметр и начальная толщина окисной пленки исходных частиц Al. Значение x , при котором происходит срыв теплового равновесия, вызывающий неограниченный рост температуры, соответствует размеру образовавшегося агломерата в момент воспламенения и отрыва от поверхности образца. Из (2) определяется время пребывания частиц на поверхности горения.

Для расчета теплообмена между агломератом, находящимся в пределах поверхности плоского «кармана» S , с обтекающими его газообразными продуктами разложения СКС используется формула [17]

$$Nu = \begin{cases} 2 + 0,5 Re Pr, & Re \leq 1, \\ 2 + 0,46 Re^{0,55} Pr^{0,33}, & Re > 1, \end{cases} \quad (3)$$

где число Прандтля $Pr = c_p \mu_g / \lambda_g$, а число Рейнольдса $Re = \rho_g v_g \delta / \mu_g \approx (1 - \alpha_{ал}) \rho_T \omega \delta / \mu_g$, поскольку произведение плотности обтекающего частицу газа на его скорость $\rho_g v_g$ пропорционально массовой скорости горения $m = \rho_T \omega$, где $(1 - \alpha_{ал})$ — соответствует массовой доле горючего и окислителя в СКС; μ_g — коэффициент вязкости газа; ρ_T — средняя плотность СКС.

Для замыкания системы уравнений (1) — (3) необходимо задать дополнительное соотношение на функцию

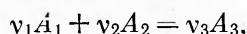
$$\Theta_g(x) = \frac{E_{ал}}{RT_s^2} (\tilde{T}_g(x) - T_s),$$

где $\tilde{T}_g(x)$ — средняя температура газа на поверхности агломерата с текущим диаметром x .

Согласно принятым представлениям в теории гетерогенного горения СКС, реагирующая поверхность считается состоящей из элементарных

поверхностей горючего и окислителя, продукты разложения которых реагируют между собой с образованием микропламен. За счет взаимодействия с локальными микропламенами разогрев и воспламенение агломератов, находящихся в плоском кармане, ускоряются [8]. В случае переобогащения СКС горючим поверхности стехиометрического соотношения компонентов смыкаются над частицами окислителя. На некотором расстоянии от твердой поверхности, которое определяется кинетикой химических реакций и давлением, формируется фронт кинетического пламени (ФКП). Формирование ФКП на стехиометрической поверхности продуктов разложения приводит к возникновению диффузионного микропламени. Появление микропламен, а также расстояние от микропламени до твердой поверхности определяется положением ФКП. Так, при низких давлениях ФКП может сформироваться на стехиометрической поверхности крупных частиц окислителя [8]. Положение ФКП является фактором, сдерживающим рост частиц, и, таким образом, лимитирующим степень агломерации. Решение задачи о гетерогенном горении СКС, которое дает положение ФКП, в общем случае затруднено.

В данной работе будем придерживаться упрощенной трактовки процессов, сопровождающих горение СКС. Считается, что химические процессы в пламени необратимы и протекают в одну стадию



где ν_1 , ν_2 , ν_3 — стехиометрические коэффициенты окислителя, горючего и продуктов реакции соответственно. Наличие частиц Al не оказывает существенного влияния на околоповерхностные процессы и образование микропламен. Расстояние, на котором формируется ФКП, будем определять из решения одномерных уравнений

$$\begin{aligned} c_p m \frac{d}{dz} T_g - \lambda_g \frac{d^2}{dz^2} T_g &= Q_g W(y_1, y_2, T_g), \\ m \frac{d}{dz} y_1 - \rho_g D_g \frac{d^2}{dz^2} y_1 &= -\nu_1 \mu_1 W(y_1, y_2, T_g), \\ m \frac{d}{dz} y_2 - \rho_g \bar{D}_g \frac{d^2}{dz^2} y_2 &= -\nu_2 \mu_2 W(y_1, y_2, T_g); \end{aligned} \quad (4)$$

$$z = 0: T_g = T_s, y_1 = y_{1s} = \frac{\alpha_{ок}}{1 - \alpha_{ал}}, y_2 = y_{2s} = 1 - \frac{\alpha_{ок}}{1 - \alpha_{ал}};$$

$$z = +\infty: T_g = T_f, y_1 = y_{1f}, y_2 = y_{2f}.$$

Последние условия нужно понимать так, что если первый компонент (окислитель) в СКС содержится с недостатком, то $y_{1f} = 0$, $y_{2f} \neq 0$, в противном случае $y_{1f} \neq 0$, $y_{2f} = 0$,

$$W = A_g \left(\frac{y_1 p}{RT_g} \right)^{\nu_1} \left(\frac{y_2 p}{RT_g} \right)^{\nu_2} \exp(-E_g/RT_g). \quad (5)$$

Координата z изменяется по направлению нормали к поверхности образца k -системы. Для определения искомых функций T_g и y_i ($i = 1, 2$) — температуры газа и массовых концентраций газообразных компонентов окислителя и горючего — необходимо задать входящие в (4), (5) параметры: $m = \rho_T \omega$ — среднюю массовую скорость горения СКС, μ_1 , μ_2 — молекулярные массы окислителя и горючего, c_p , ρ_g , D_g , λ_g — удельную теплоемкость, плотность, коэффициенты диффузии и теплопроводности газообразных продуктов разложения, Q_g , A_g , E_g — тепловой эффект, предэкспоненциальный множитель и энергию активации химической реакции горения в газовой фазе, p — давление окружающей среды, $\alpha_{ок}$, $\alpha_{ал}$ — массовые концентрации ПХА и алюминия в СКС.

В предположении, что число Льюиса $Le = \lambda_g / \rho_g D_g c_p = 1$, система (4), (5) сводится к уравнению теплопроводности (6), записанному в безраз-

мерных переменных:

$$\frac{d}{dh} \tau - \frac{d^2}{dh^2} \tau = \frac{\lambda_g Q_g}{m^2 c_p^2 T_f \alpha_g} W(y_{1s}, \tau), \quad (6)$$

$$h = 0: \tau = \tau_s,$$

$$h = +\infty: \tau = 0,$$

$$h = \frac{c_p m}{\lambda_g} z, \quad \tau = \frac{E_g}{RT_f^2} (T_g - T_f), \quad \alpha_g = \frac{RT_f}{E_g}.$$

Для решения (6) используется приближенный интегральный метод с аппроксимацией температуры многочленом третьей степени

$$\tau = \tau_s [1 + 0,5(h/H)^3 - 1,5(h/\bar{H})], \quad (7)$$

где коэффициенты определены из граничных условий

$$h = 0: \tau = \tau_s, \quad \frac{d^2}{dh^2} \tau = 0,$$

$$h = \bar{H}: \tau = 0, \quad \frac{d}{dh} \tau = 0.$$

Здесь H — безразмерная толщина теплового пограничного слоя или расстояние, на котором формируется ФКП. Задание дополнительных граничных условий на производные является естественным требованием в теории стационарного теплового пограничного слоя.

Подставляя (7) в (6) и интегрируя по h от нуля до \bar{H} , получим квадратное уравнение на \bar{H} , решая которое, находим

$$\bar{H} = \frac{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + 6\Phi}}{2},$$

где

$$\frac{1}{\Phi} = - \frac{\lambda_g Q_g A_g y_{1s}^{\nu_1} y_{2s}^{\nu_2}}{\tau_s \alpha_g T_f (c_p m)^2} \left(\frac{p}{RT_f} \right)^{\gamma_0} \exp \left(- \frac{1}{\alpha_g} \right) \int_0^{\bar{H}} \Psi(\tau(\bar{H}t)) dt;$$

$$\Psi = (\tau/\tau_s)^{\nu_1} [1 - y_{1s}/\nu y_{2s} (1 - \tau/\tau_s)]^{\nu_2} \frac{\exp \left(\frac{\tau}{1 + \alpha_g \tau} \right)}{(1 + \alpha_g \tau)^{\gamma_0}};$$

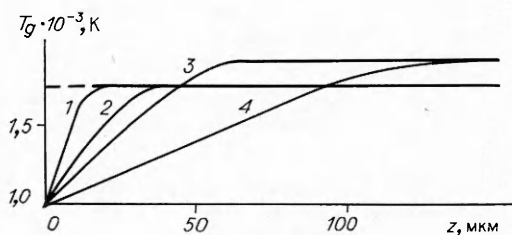
$$\gamma_0 = \nu_1 + \nu_2, \quad \nu = \nu_1 \mu_1 / \nu_2 \mu_2.$$

В диапазоне $0 \leq t \leq 1$ τ меняется от нуля до $\tau_s < 0$. Нетрудно убедиться, что на отрезке $\tau_s \leq \tau < 0$ $\Psi(\tau) \geq 0$ и ограничена при условии $y_{1s}/\nu y_{2s} \leq 1$, что соответствует недостатку окислителя в СКС.

Результаты численного решения уравнения (6) представлены на рис. 1. Расчетные профили температуры $T_g(z)$ включают две группы кривых 1, 2 и 3, 4, которые соответствуют разным значениям констант кинетики химических реакций. Нужно отметить, что большему значению теплового эффекта соответствует большее значение температуры пламени, а уменьшение на порядок предэкспоненциального множителя привело к оттеснению теплового пограничного слоя примерно в 3,8 раза. Оттеснению пограничного слоя также способствует увеличение скорости го-

Рис. 1. Влияние констант химических реакций в газовой фазе, скорости горения СКС и давления на толщину температурного пограничного слоя и профиль температуры $T_g(z)$.

1, 2 — $Q_g = 7,83 \cdot 10^7$ Дж/кмоль, $A_g = 2,61 \cdot 10^{11}$ м³/((кмоль·с), $T_f = 1763$ К; 3, 4 — $Q_g = 8,723 \cdot 10^7$ Дж/кмоль, $A_g = 2,61 \cdot 10^{10}$ м³/((кмоль·с), $T_f = 1940$ К; 2, 4 — $p = 10$ атм, $\omega = 2,8$ мм/с; 1, 3 — $p = 20$ атм, $\omega = 4,8$ мм/с.



рения и снижение уровня внешнего давления. Результаты расчетов согласуются с [18], где методами термического анализа получены профили температуры вблизи реагирующей поверхности двухосновного неметаллизированного твердого топлива на основе ПХА.

Введем среднюю температуру газа на поверхности агломерата

$$\bar{T}_g(\delta) = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T_g(z) dz. \quad (8)$$

Из (7) и (8) после интегрирования в безразмерных переменных получим

$$\Theta_g(x) = \begin{cases} -\Theta_f \left[\frac{1}{8} \left(\frac{x}{x_g} \right)^3 - \frac{3}{4} \left(\frac{x}{x_g} \right) \right], & x \leq x_g, \\ -\Theta_f \left(\frac{5}{8} \frac{x_g}{x} - 1 \right), & x > x_g, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$\Theta_f = (T_f - T_s) / \alpha T_s; \quad x_g = \lambda_g H / c_p m D.$$

Дополняя уравнения (1)–(3) соотношением (9), получаем замкнутую математическую модель агломерации алюминия на поверхности горения СКС. Интегрирование уравнений (1), (2) проводилось методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности с переменным шагом. В расчетах использовались следующие значения постоянных параметров, входящих в (1)–(3), (9): $T_s = 980$ К, $\eta_s = 5 \cdot 10^{-7}$ м, $\lambda_g = 0,1257$ Дж/(м · с · К), $\mu_g = 7,2 \cdot 10^{-5}$ Н · с/м², $c_p = 1257$ Дж/(кг · К), $\nu_1 = 1$, $\nu_2 = 1$, $c_{ал} = 10^3$ Дж/(кг · К), $\rho_{ал} = 2 \cdot 10^3$ кг/м³, $R = 1,986$ кал/(моль · К), $\mu_1 = 27,893$ кг/кмоль, $\mu_2 = 30$ кг/кмоль.

В силу малоизученности гетерогенного горения СКС константы химических реакций в газовой фазе в литературе практически отсутствуют. Для проведения тестовых расчетов использовались в качестве характерных данные [19]: $E_g = 35\,600$ кал/моль, $Q_g = 8,7 \cdot 10^7$ Дж/кмоль, $A_g = 6,3 \cdot 10^{11}$ м³/(моль · с), которые затем варьировались. Закон окисления агломератов алюминия заимствован из [20]: $E_{ал} = 10^5$ кал/моль, $kC_0^n = 3,84 \cdot 10^3$ м²/с, $Q_{ал} = 3,352 \cdot 10^{10}$ Дж/м³.

Из анализа работ по исследованию горения СКС [2–4, 7–9] следует, что дисперсность частиц ПХА активно воздействует на степень агломерации алюминия. В частности, установлено, что среднемассовый диаметр агломератов растет пропорционально дисперсности ПХА [7]. На рис. 2 представлены результаты численных экспериментов, проведенных по модели (1)–(3), (9). Средний диаметр частиц ПХА изменялся от 50 до 400 мкм для $p = 10, 20$ и 50 атм. Состав СКС соответствовал [7] $\beta_{ал} = 0,12$, $\beta_{ок} = 0,37$, $\delta_s = 14$ мкм. Задаваемые зависимости скорости горения от диаметра D приведены на рис. 3. Во всех случаях наблюдается рост размеров агломератов с увеличением дисперсности окислителя. При

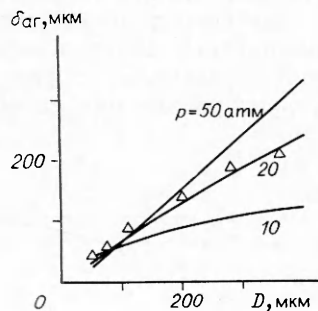


Рис. 2. Зависимость среднего диаметра агломератов от дисперсности ПХА.

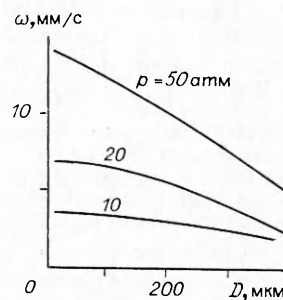
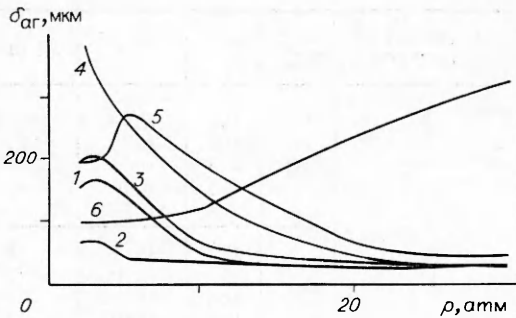


Рис. 3. Скорость горения в зависимости от среднего диаметра частиц ПХА.

Рис. 4. Влияние констант кинетики химических реакций в газовой фазе и содержания окислителя на зависимость среднего диаметра агломератов от давления ($D = 390$ мкм, $\delta_s = 30$ мкм, $T_f = 2647$ К, $\beta_{ал} = 0,16$, $\beta_{ок} = 0,645$ (1-5); $T_f = 1763$ К, $\beta_{ал} = 0,12$, $\beta_{ок} = 0,37$ (6)).

Q_g , Дж/кмоль: 1-5 - $4,656 \cdot 10^8$, 6 - $7,83 \cdot 10^7$; A_g , м³/(кмоль·с): 1, 3-5 - $1,61 \cdot 10^{10}$, 2 - $4,61 \cdot 10^{10}$, 6 - $2,61 \cdot 10^{11}$.



этом имеется удовлетворительное согласование с данными экспериментов [7] для $p = 20$ атм.

Влияние условий в камере, прежде всего давления, при котором происходит сжигание образца, на степень агломерации и среднемассовый диаметр агломератов — предмет большого числа экспериментальных исследований [2-4, 6-9]. Выяснено, что характер влияния давления зависит от состава СКС. Если в [2, 3, 6, 8] с ростом давления степень агломерации, как правило, падает, то в [4, 8, 9] зависимость среднемассового диаметра агломератов от давления более сложная, имеющая участки как резкого спада, так и быстрого роста, а также участки с почти постоянным значением, не меняющиеся с давлением.

На рис. 4 нанесены расчетные кривые изменения среднего диаметра агломератов δ_{ag} от давления. Поведение кривых подтверждает сказанное. В расчетах менялись состав СКС, объемные концентрации компонентов и константы скорости химической реакции горения в газовой фазе.

Используемые в расчетах значения скорости горения как функции давления $\omega = \omega(p)$ для четырех составов даны на рис. 5. Для составов с объемным содержанием окислителя $\beta_{ок} = 0,645$ $T_f = 2647$ К, а с $\beta_{ок} = 0,37$ $T_f = 1763$ К, что согласуется с данными [13].

Из анализа результатов следует, что чем выше T_f и меньше толщина теплового пограничного слоя, тем быстрее происходит разогрев и воспламенение агломератов. Рост давления ведет к поджатию пограничного слоя, с одной стороны, и увеличению скорости горения СКС — с другой. Если первый фактор ускоряет воспламенение частиц и снижает степень агломерации, то увеличение ω способствует оттеснению пограничного слоя и росту агломератов. Действительно, до $p = 5$ атм, когда влияние давления еще невелико, наблюдается увеличение δ_{ag} с повышением скорости горения (см. рис. 4, кривые 1, 3, 5). Дальнейший рост давления приводит к монотонному снижению δ_{ag} , при этом тоже заметно влияние ω . Наконец, при $p \geq 22$ атм кривые 1-5 (см. рис. 4) выходят на

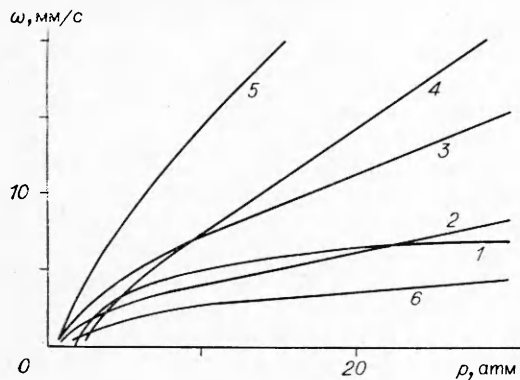


Рис. 5. Зависимость скорости горения от давления. Номер кривой соответствует номеру расчетной кривой на рис. 4.

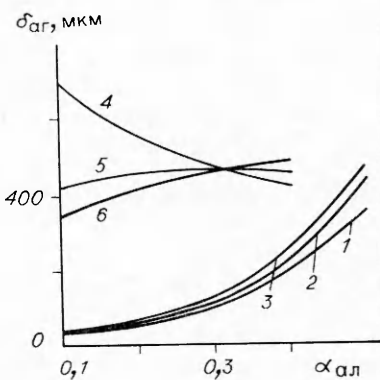


Рис. 6. Влияние концентрации алюминия на средний диаметр агломератов.
 p , атм: 1, 4 - 2, 2, 5 - 10, 3, 6 - 25.

Номер серии расчетов	p , атм	$\alpha_{ал}$	$\alpha_{ок}$	H , мм	T_f , К	$\delta_{ар}$, мм	Номер кривой на рис. 6
1	2	0,1	0,76	69,8	2722	37,5	1
		0,2	0,66	92,0	2488	64,0	
		0,3	0,56	126,0	2276	109,3	
		0,4	0,46	184,9	2075	191,8	
		0,5	0,36	301,0	1878	367,4	
	10	0,1	0,76	31	2722	36,7	2
		0,2	0,66	41,5	2488	64,6	
		0,3	0,56	58,1	2276	122,7	
		0,4	0,46	87,4	2075	230	
		0,5	0,36	146	1878	449	
	25	0,1	0,76	17,7	2722	36,9	3
		0,2	0,66	23,5	2488	66,3	
		0,3	0,56	32,5	2276	130,6	
		0,4	0,46	47,9	2075	247,8	
		0,5	0,36	78,7	1878	482,4	
2	2	0,1	0,36	645	1690	692	4
		0,2		548	1728	555	
		0,3		457	1771	478	
		0,4		374	1820	419	
		0,5		301	1878	367,4	
	10	0,1	0,36	321	1690	430	5
		0,2		272	1728	455	
		0,3		225	1771	466	
		0,4		183	1820	463	
		0,5		146	1878	449	
	25	0,1	0,36	170	1690	341	6
		0,2		144	1728	417	
		0,3		120	1771	461	
		0,4		98,3	1820	480	
		0,5		78,7	1878	482,4	

некоторые постоянные значения, которые не меняются с ростом p . Однако для низкотемпературной СКС $\delta_{ар}$ с увеличением давления ($p \geq 10$ атм) растет пропорционально закону скорости горения (см. рис. 4, кривая б). Это объясняется тем, что при низкой температуре пламени разогрев и воспламенение агломератов несколько замедляются, что способствует их укрупнению независимо от толщины теплового пограничного слоя.

Установлено [3, 4], что изменение соотношения компонентов входящих в состав СКС может существенно влиять на степень агломерации. В [4] экспериментально исследовано влияние соотношения между ПХА и металлическим горючим на среднемассовый диаметр агломератов при различных значениях p . Увеличение содержания Al по отношению к ПХА приводит к возрастанию числа контактов между отдельными частицами Al и интенсивному укрупнению агломератов. При этом зависимость $\delta_{ар}$ ($\alpha_{ал}$) носит экспоненциальный характер [4].

Проведены численные исследования влияния состава СКС (таблица, рис. 6), состоящие из двух серий расчетов по три расчета в каждой. В первой серии выбран состав, в котором соотношение между ПХА и Al менялось при условии, что массовая доля горючего оставалась неизменной (14%), а $p = 2, 10$ и 25 атм. Задаваемая зависимость $\omega(p)$ соответствовала кривой б на рис. 5. Расчеты первой серии (см. рис. 6, 1—3) показали, что при увеличении относительного содержания Al $\delta_{ар}$ аналогично [4] растет во всех случаях экспоненциально. Во второй серии расчетов количество Al в СКС менялось за счет содержания горючего, а $\alpha_{ок} = 0,36$ и оставалось постоянной (см. рис. 6, 4—6). С увеличением $\alpha_{ал}$ величина $\delta_{ар}$ при $p = 10$ и 25 атм слабо растет, а при $p = 2$ атм — падает. В таблице представлены зависимости изменения

T_f и расстояния отхода пламени от поверхности горения $H = \overline{H} \lambda_g / c_p m$ с увеличением $\alpha_{ок}$, которые объясняют этот факт. В первой серии расчетов с ростом $\alpha_{ал}$ увеличивается H , а T_f уменьшается. И то, и другое ведет к задержке воспламенения и интенсификации агломерационных процессов. Во второй серии рост $\alpha_{ал}$ приводит к уменьшению H и увеличению T_f , что, как известно, способствует снижению степени агломерации.

Изложенная выше модель агломерации базируется на определяющем влиянии воспламенения на пребывание, укрупнение и отрыв частиц от поверхности горения. Основанием для такого допущения послужили результаты киносъемки горящих образцов СКС [7, 8], на которой регистрировались, как правило, уже расплавленные агломераты сферической формы, покидающие поверхность в момент воспламенения. Это предположение несправедливо, по-видимому, для низкотемпературных или высокоуглеродистых смесевых составов, имеющих температуру поверхности ниже температуры плавления металла, когда исходные частицы цементируются или спекаются продуктами разложения [4]. При этом критерием отрыва может служить, например, механизм «удержания» посредством возникающей перемычки между агломератом и поверхностью [14].

Предлагаемый в данной работе подход справедлив для горения СКС в камере постоянного давления без обдува поверхности горения с равномерным распределением одинаковых по размеру частиц металла и окислителя в структуре связующего и не отражает влияния дисперсности исходных металлических частиц на размеры образующихся агломератов, поскольку не учитывает процессов, протекающих в поверхностном слое к-фазы.

В заключение сделаем следующие выводы.

В предположении об определяющей роли воспламенения в механизме отрыва частиц металла за счет взаимодействия с локальными микропламенами, возникающими между газообразными окислителем и горючим, построена математическая модель процесса агломерации порошкообразного алюминия на реагирующей поверхности. Численно проведено систематическое исследование уравнений построенной модели применительно к условиям горения модельных СКС. Представлены результаты расчетов влияния дисперсности окислителя, давления окружающей среды, скорости горения и соотношения компонентов входящих в состав СКС на степень агломерации и размеры образующихся агломератов. Сравнительный анализ численных результатов с ранее опубликованными экспериментальными данными позволяет заключить, что заложенные в модель представления о физике процесса агломерации алюминия в рамках имеющихся ограничений правильно отвечают основным закономерностям этого явления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Похил П. Ф., Логачев В. С., Мальцев В. М. Горение металлизированных конденсированных систем.— М.: ИХФ АН СССР, 1962.
2. Rovinelli L. A., Rosenstein R. A. AIAA J., 1964, 2, 10.
3. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах.— М.: Наука, 1972.
4. Канпоров Л. Я., Фролов Ю. В., Острцов Г. А. и др. ФГВ, 1975, 11, 1, 33.
5. Гладун В. Д., Фролов Ю. В., Канпоров Л. Я. 1977, 13, 5, 705.
6. Ganu A., Caveny L. P., Summerfield M. AIAA J., 1978, 16, 7.
7. Григорьев В. Г., Зарко В. Е., Куценогий К. П. ФГВ, 1981, 17, 3, 3.
8. Sambamurthi J. K., Price E. W., Sigman R. AIAA J., 1984, 22, 8.
9. Бабук В. А., Белов В. П., Ходосов В. В. и др. ФГВ, 1985, 21, 3, 20.
10. Гладун В. Д., Фролов Ю. В. ФГВ, 1976, 12, 2, 191.
11. Ganu A., Caveny L. H. // 17th Symp. (Intern.) on Combustion, Univ. Leeds, England, 1978.
12. Григорьев В. Г., Куценогий К. П., Зарко В. Е. ФГВ, 1981, 17, 4, 9.
13. Cohen N. S. AIAA J., 1983, 21, 5, 720.

14. Зырянов В. Я. // Горение конденсированных и гетерогенных систем.— Черног-
ловка, 1986.
15. Ковалев О. Б., Петров А. П., Фольц А. В. ФГВ, 1987, 23, 2, 17.
16. Cohen N. S., Fleming B. W., Derr R. L. AIAA J., 1974, 12, 2, 242.
17. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред.— М.: Наука, 1978.
18. Kubota N., Kuwahara T., Mjuzaki S. et al. J. Propulsion and Power, 1986, 4, 296.
19. Shanon L. J., Deverall L. I. AIAA J., 1969, 7, 3, 497.
20. Полищук Д. И., Шевчук В. Г., Великанова В. Л. и др. ФГВ, 1978, 14, 2, 53.

*Поступила в редакцию 29/IX 1987,
после доработки — 19/II 1988*

УДК 536.46

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ И НЕАДИАБАТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ГОРЕНИИ ДИССОЦИИРУЮЩИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

*А. П. Алдушин, В. П. Филипенко
(Черноголовка)*

Элементарная модель горения конденсированных систем с диссоциирующими продуктами реакции, базирующаяся на экспериментальном изучении самораспространяющегося высокотемпературного синтеза нитридов и гидридов металлов [1], построена в [2]. В теоретическом плане эта модель представляет интерес в связи с тем, что она является удобным объектом, позволяющим исследовать характерные особенности распространения волн горения в системах с фиксированной температурой прекращения тепловыделения (так называемые модели горения второго рода [2]). В отличие от детально изученных моделей горения первого рода, которые связывают прекращение действия источников тепла с полным выгоранием реагентов, модели второго рода теоретически исследованы значительно меньше.

Анализ устойчивости стационарных волн [3] и влияния теплотерь на фронт горения [4, 5], проведенный в приближении Зельдовича — Франк-Каменецкого, выявил специфические эффекты распространения волн горения в системах, описываемых моделями первого и второго рода. В настоящей работе приведены результаты численного решения задачи, выполненного с целью проверки выводов приближенной теории, а также исследования нестационарных режимов, возникающих вследствие неустойчивости стационарного фронта либо в результате внешних воздействий.

Постановка задачи

Распространение фронта горения в конденсированной среде с диссоциирующим продуктом реакции в простейшем случае описывается уравнениями теплового баланса и выгорания исходного вещества

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + qw(T, \eta) - \alpha(T - T_0), \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} &= w(\eta, T), \quad q = Q/c. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь t — время; x — координата; T — температура; Q — тепловой эффект реакции; κ, c — температуропроводность и теплоемкость среды; η — глубина превращения; α — коэффициент теплотерь; T_0 — начальная температура. Специфика рассматриваемой задачи проявляется в задании источника тепловыделения. Скорость химического превращения в диссо-