

вом. Это указывает на существенную неполноту реагирования исходной смеси при данном соотношении реагентов, влияние которой на  $T_{ад}$  трудно учесть.

В работе [14] показано, что

$$X/\sqrt{\tau\kappa} = 1,89$$

есть величина постоянная, универсальная для всех автоколебательных режимов горения. Здесь  $X$  — расстояние, проходимое фронтом за один период;  $\kappa$  — температуропроводность. Для экспериментально полученных значений  $X = 6 \cdot 10^{-2}$  см;  $\tau = 3,6 \cdot 10^{-1}$  с;  $\kappa = 6 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с это отношение составило 1,29, что близко к теории.

Поступила в редакцию  
30/VII 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Новиков, И. П. Боровинская, А. Г. Мержапов. — В сб.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1975.
2. Р. Б. Котельников, С. Н. Башлыков и др. Особо тугоплавкие элементы и соединения. М., Металлургия, 1969.
3. А. Г. Мержапов. Безгазовое горение. Препринт ОИХФ АН СССР, 1973.
4. В. А. Андреев, В. М. Мальцев, В. А. Селезнев. ФГВ, 1979, 15, 4.
5. И. П. Новиков, И. П. Боровинская, А. Г. Мержапов. ФГВ, 1974, 10, 2.
6. А. Г. Мержапов. ФГВ, 1973, 9, 1.
7. В. М. Маслов, А. С. Негапов и др. ФГВ, 1978, 14, 6.
8. В. М. Маслов, И. П. Боровинская, А. Г. Мержапов. ФГВ, 1978, 14, 5.
9. Д. Я. Свет. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения. М., Наука, 1968.
10. В. С. Литвинов, Г. Н. Рохлин. Тепловые источники оптического излучения. М., Энергия, 1975.
11. Справочник по редким металлам. М., Мир, 1965.
12. К. Г. Шкадицкий, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержапов. ФГВ, 1971, 7, 1.
13. И. П. Боровинская, А. Г. Мержапов и др. ФГВ, 1974, 10, 1.
14. Я. Б. Зельдович, О. И. Лейпунский, В. Б. Либрович. Теория стационарного горения пороха. М., Наука, 1975.

### УСЛОВИЯ НИЗКОЧАСТОТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ В ПОЛУЗАМКНУТОЙ КАМЕРЕ

А. П. Руднев  
(Томск)

Использование комбинированных конденсированных систем (КС), состоящих из нескольких сортов топлив, позволяет осуществлять физическое регулирование процесса горения в полужамкнутой камере в широком диапазоне изменения давления и температуры [1—5]. Возможность устойчивого горения комбинации двух топлив, для одного из которых параметр  $\nu$  (логарифмическая производная скорости горения по давлению) может быть больше единицы, в изотермическом приближении показана в [6].

В данной работе получены условия низкочастотной устойчивости горения комбинированных КС, включающих в себя произвольное количество горючих компонентов, при учете неполноты энерговыделения, эрозионного горения, различных теплофизических характеристик продук-

тов сгорания компонентов и теплопотерь в стенки камеры. По результатам расчетов диаграммы Бори и границ устойчивости горения сделаны качественные выводы.

Система уравнений, описывающая изменение осредненных давления, температуры и плотности химически не реагирующих продуктов сгорания компонентов КС в полузамкнутой камере, имеет следующий вид:

$$\frac{d}{dt}(\rho V) = \sum_{e=1}^L \sigma_e \rho_e u_e - M, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho V q_e) = \sigma_e \rho_e u_e - M q_e, \quad (e = 1, \dots, L-1), \quad (2)$$

$$\sum_{e=1}^L q_e = 1, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho V E) = \sum_{e=1}^L \sigma_e \rho_e u_e Q_e - M H - \sigma q, \quad (4)$$

$$p = \rho R T. \quad (5)$$

Здесь  $t$  — время;  $e$  — порядковый номер компонента КС;  $\sigma_e$ ,  $\rho_e$ ,  $u_e$ ,  $q_e$ ,  $Q_e$  — соответственно поверхность горения, плотность, скорость горения, массовая доля продуктов сгорания, энергосодержание  $e$ -го компонента;  $L$  — количество компонентов;  $p$ ,  $\rho$ ,  $T$ ,  $E$ ,  $H$ ,  $R$  — соответственно давление, плотность, температура, удельная внутренняя энергия, удельная энтальпия, удельная газовая постоянная смеси продуктов сгорания

$$E = c_V T, \quad H = c_p T, \quad c_V = \sum_{e=1}^L c_{Ve} q_e, \quad c_p = \sum_{e=1}^L c_{pe} q_e, \quad R = \sum_{e=1}^L (c_{pe} - c_{Ve}) q_e, \quad (6)$$

$c_{Ve}$ ,  $c_{pe}$  — удельные теплоемкости продуктов сгорания  $e$ -го компонента при постоянных объеме и давлении;  $c_V$ ,  $c_p$  — аналогичные величины для смеси продуктов сгорания;  $M$  — расход газов из камеры (заданная функция давления и температуры);  $V$  — свободный объем;  $\sigma$  — внутренняя поверхность камеры;  $q$  — плотность теплового потока от продуктов сгорания в стенки камеры [7]

$$q = D_1 G^b (T - T_c), \quad G = \rho W = D_2 M/F; \quad (7)$$

$W$  — средняя скорость смеси продуктов сгорания;  $G$  — средняя плотность потока газов;  $F$  — поперечное сечение камеры, свободное для прохода продуктов сгорания;  $T_c$  — средняя температура внутренней поверхности стенок камеры;  $D_1$  — известная функция теплофизических характеристик смеси продуктов сгорания и эквивалентного диаметра;  $b$ ,  $D_2$  — константы.

Инерционность конденсированной фазы учитывается уравнениями теплопроводности для компонентов КС:

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} = \kappa_e \frac{\partial^2 T_e}{\partial x_e^2} - u_e \frac{\partial T_e}{\partial x_e}, \quad (0 > x_e > -\infty; e = 1, \dots, L) \quad (8)$$

с условиями

$$T_e(0, t) = T_{se}, \quad T_e(-\infty, t) = T_0, \quad (9)$$

$$T_e(x_e, 0) = T_0 + (T_{se} - T_0) \exp(u_e x_e / \kappa_e), \quad (0 \geq x_e > -\infty), \quad (10)$$

где  $x_e$ ,  $T_e(x_e, t)$ ,  $T_{se}(t)$ ,  $\kappa_e$  — соответственно пространственная координата, текущая температура, температура поверхности, коэффициент теплопроводности  $e$ -го компонента;  $T_0$  — начальная температура; здесь и далее стационарные величины отмечаются градусом сверху.

$\frac{F_*}{\sigma_1}$	$\varphi^\circ, \text{ атм}$	$T, \text{ К}$	$\rho_1 u_1^\circ, \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$	$\frac{\rho_2 u_2^\circ \sigma_2}{\sigma_1}, (\text{см}^2 \cdot \text{с})$	$Q_1^\circ, \frac{\text{кал}}{\text{г}}$	$Q_2^\circ, \frac{\text{кал}}{\text{г}}$
0,01116	39,4	2720	0,915	2,236	907	1180
	28,1	2190	0,72	1,786	874	887
	19,9	1710	0,565	1,439	738	675
0,01197	14	1500	0,444	1,173	581	616
0,0107	48	2810	1,054	2,563	909	1230

Скорость горения, температура поверхности и энерговыделение каждого компонента КС в нестационарных условиях считаются известными функциями давления, градиента температуры на поверхности и плотности потока продуктов сгорания

$$u_e = u_e(p, f_e, G), T_{se} = T_{se}(p, f_e, G), Q_e = Q_e(p, f_e, G), \quad (11)$$

которые могут быть получены, например, из соответствующих стационарных зависимостей известным градиентным методом [8—11].

Численные расчеты стационарных решений системы (1)—(5), удовлетворяющих соотношениям

$$\sum_{e=1}^L \sigma_e \rho_e u_e^\circ = M^\circ, \quad q_e^\circ = \frac{\sigma_e \rho_e u_e^\circ}{\sum_{e=1}^L \sigma_e \rho_e u_e^\circ}, \quad (e = 1, \dots, L), \quad (12)$$

$$\sum_{e=1}^L \sigma_e \rho_e u_e^\circ Q_e^\circ = T^\circ \sum_{e=1}^L \sigma_e \rho_e u_e^\circ c_{pe} + \sigma q^\circ, \quad (13)$$

для комбинированной системы порох Н + порох НЕС 4016, показали (рис. 1, таблица), что при  $F_*/\sigma_1 = 0,01116$   $\sigma_2/\sigma_1 = 1,5$ , где  $F_*$  — критическое сечение сопла,  $\sigma_1, \sigma_2$  — соответственно поверхность горения пороха Н и пороха НЕС 4016, возможны три стационарных режима горения (на рис. 1 точки  $S_1, S_2, S_3$  пересечения кривых суммарного прихода газов  $\rho_1 u_1/q_1$  (кривая 1) и расхода  $M/\sigma_1$  (кривая 2), отнесенных к поверхности горения пороха Н). Однако из трех возможных режимов горения устойчивы лишь верхний и нижний режим.

При достаточно больших значениях  $F_*/\sigma_1$  существует только нижний режим (на рис. 1 точка  $S_4$  пересечения кривых 1 и 3 при  $F_*/\sigma_1 = 0,01197$ ,  $\sigma_2/\sigma_1 = 1,5$ ), при малых значениях  $F_*/\sigma_1$  — верхний режим (точка  $S_5$  пересечения кривых 1 и 4 при  $F_*/\sigma_1 = 0,0107$ ,  $\sigma_2/\sigma_1 = 1,5$ ).

Здесь и далее расчеты проведены без учета эрозии и теп-

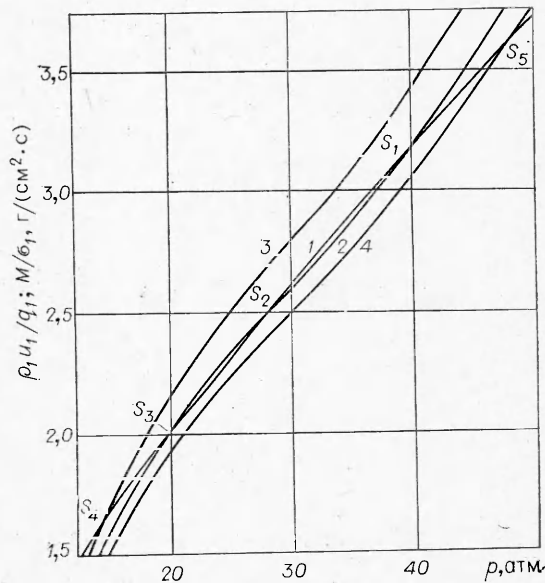


Рис. 1.

лопотерь при начальной температуре 25°C, экспериментальные зависимости скорости горения и энерговыделения компонентов КС от давления [12—14] аппроксимировались формулами

$$u_e = w_e + \psi_e \bar{p}^{\delta_e}, \quad Q_e = \frac{\lambda_e + [m_e(1+a_e) - \lambda_e] \exp[-\Delta_e(p-d_e)]}{1 + a_e \exp[-\Delta_e(p-d_e)]} + 104,3,$$

( $e = 1, 2; 10 \leq p \leq 150$  атм).

Для пороха Н:  $w_1 = 0,02696$  см/с,  $\psi_1 = 0,03465$  см/с,  $\delta_1 = 0,75$ ,  $\lambda_1 = 805$  кал/г,  $m_1 = 361$  кал/г,  $d_1 = 5$  атм,  $a_1 = 20,5$ ,  $\Delta_1 = 0,239$  атм<sup>-1</sup>,  $c_{p1} = 0,39$  кал/(г·К),  $n_1 = c_{p1}/c_{v1} = 1,25$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = 1,6$  г/см<sup>3</sup>; для пороха НЕС 4016:  $w_2 = 0,158$  см/с,  $\psi_2 = 0,0379$  см/с,  $\delta_2 = 0,821$ ,  $\lambda_2 = 1140$  кал/г,  $m_2 = 510$  кал/г,  $d_2 = 13,6$  атм,  $a_2 = 24$ ,  $\Delta_2 = 0,207$  атм<sup>-1</sup>,  $c_{p2} = 0,41$  кал/(г·К),  $n_2 = c_{p2}/c_{v2} = 1,22$ , зависимость расхода от давления и температуры бралась в виде

$$M = A_0 F_* p / \sqrt{RT}, \quad A_0 = \sqrt{n} [2/(n+1)]^{(n+1)/2(n-1)}, \quad n = c_p/c_v.$$

Неединственность стационарного режима горения конденсированных систем при учете неполноты энерговыделения для простейшего случая, когда в полузамкнутой камере сжигается топливо только одного сорта, ранее теоретически показана в [15].

Исследование на устойчивость системы уравнений (1)–(5), (8) при условиях (6), (7), (9)–(13) показало, что в квазистационарном режиме горение комбинированной КС в полузамкнутой камере устойчиво в малом, если выполняется неравенство

$$v_I < \varepsilon_1/\varepsilon_2, \quad (14)$$

где  $I$  — произвольно зафиксированный порядковый номер ( $1 \leq I \leq L$ );

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 = & \delta \left( 1 - \sum_{e=1}^L q_e \hat{h}_e \right) \left[ n^\circ + \frac{1}{1-a} \left( \sum_{e=1}^L q_e N_e - n^\circ \right) \right] - \\ & - \beta \left( 1 - \sum_{e=1}^L q_e \hat{h}_e \right) \left\{ q_I \left( N_I + n^\circ - \frac{c_{pI}}{c_v} \right) v_I - \sum_{e=1}^L q_e \left[ \left( N_e + n^\circ - \frac{c_{pe}}{c_v} \right) v_e + \right. \right. \\ & \left. \left. + N_e \alpha_e \right] \right\} - \left( \sum_{e=1}^L q_e v_e - q_I v_I \right) \left\{ n^\circ (1 + \beta) - \beta \sum_{e=1}^L q_e \left[ N_e c_e + \right. \right. \\ & \left. \left. + \left( N_e + n^\circ - \frac{c_{pe}}{c_v} \right) h_e \right] + \left( \frac{1}{1-a} + \beta b \right) \left( \sum_{e=1}^L q_e N_e - n^\circ \right) \right\}, \end{aligned}$$

$$N_e = \frac{Q_e}{c_v T^\circ}, \quad (e = 1, \dots, L),$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 = & q_I \left[ n^\circ (1 + \beta) - \beta \left( N_I + n^\circ - \frac{c_{pI}}{c_v} \right) \left( 1 - \sum_{e=1}^I q_e \hat{h}_e \right) - \right. \\ & \left. - \beta \sum_{e=1}^I q_e \left[ \left( N_e + n^\circ - \frac{c_{pe}}{c_v} \right) h_e + N_e c_e \right] \left( \frac{1}{1-a} + \beta b \right) + \left( \sum_{e=1}^I q_e N_e - n^\circ \right) \right]; \end{aligned}$$

параметры  $v_e = \left( \frac{\partial \ln u_e}{\partial \ln p} \right)_{T_0, G}$ ,  $h_e = \left( \frac{\partial \ln u_e}{\partial \ln G} \right)_{p, T_0}$ ,  $\alpha_e = \left( \frac{\partial \ln Q_e}{\partial \ln p} \right)_{T_0, G}$ ,

$c_e = \left( \frac{\partial \ln Q_e}{\partial \ln G} \right)_{p, T_0}$ , ( $e = 1, \dots, L$ ) характеризуют степень зависимости скорости горения и энерговыделения  $e$ -го компонента КС от давления и плотности потока обдувающих газов в стационарных условиях;  $\delta = (\partial \ln M^\circ /$

$(\partial \ln p)_T$ ,  $\beta = (\partial \ln M^\circ / \partial \ln T)_p$  — степень зависимости расхода от давления и температуры в стационарном режиме,  $a = T_c / T^\circ$  — относительная температура стенок камеры.

Граница колебательной устойчивости горения комбинированной КС в линейном приближении определяется из уравнений

$$\left( \frac{\Omega + \sqrt{\Omega^2 - 4K\Psi}}{2K} \right)^2 \left( \frac{\Omega + \sqrt{\Omega^2 - 4K\Psi}}{2K} - Y \right) + \frac{\Omega + \sqrt{\Omega^2 - 4K\Psi}}{2K} Z + S = 0, \quad (15)$$

$$\chi = \frac{\Omega + \sqrt{\Omega^2 - 4K\Psi}}{2K\gamma}. \quad (16)$$

Здесь  $\gamma$  — безразмерная частота;

$$K = 1 + N + n^\circ D - \Gamma - (n^\circ - 1)B;$$

$$\Psi = \Phi \sum_{e=1}^L q_e^\circ W_e - N \left( \delta - \sum_{e=1}^L q_e^\circ M_e \right) - \Gamma \left( \beta - \sum_{e=1}^L q_e^\circ E_e \right) - \Lambda \sum_{e=1}^L q_e^\circ F_e;$$

$$\Omega = n^\circ \sum_{e=1}^L q_e^\circ W_e + N \sum_{e=1}^L \frac{c_{pe} - c_{ve}}{R^\circ} q_e^\circ W_e + (n^\circ - 1) \sum_{e=1}^L q_e^\circ F_e + \\ + \Gamma \sum_{e=1}^L \frac{c_{pe} - c_{ve}}{R^\circ} q_e^\circ F_e + \Lambda (1 + B) + \Phi (1 + D);$$

$$S = \Gamma \sum_{e=1}^L q_e^\circ F_e + N \sum_{e=1}^L q_e^\circ W_e + \Phi \left( \delta - \sum_{e=1}^L q_e^\circ M_e \right) - \Lambda \left( \beta - \sum_{e=1}^L q_e^\circ E_e \right);$$

$$Y = \Lambda + \Phi + n^\circ \sum_{e=1}^L \frac{c_{pe} - c_{ve}}{R^\circ} q_e^\circ W_e + (n^\circ - 1) \sum_{e=1}^L \frac{c_{pe} - c_{ve}}{R^\circ} q_e^\circ F_e;$$

$$Z = \Gamma (1 + B) - N (1 + D) - n^\circ \left( \delta - \sum_{e=1}^L q_e^\circ M_e \right) - (n^\circ - 1) \left( \beta - \sum_{e=1}^L q_e^\circ E_e \right) - \\ - \Lambda \sum_{e=1}^L \frac{c_{pe} - c_{ve}}{R^\circ} q_e^\circ F_e + \Phi \sum_{e=1}^L \frac{c_{pe} - c_{ve}}{R^\circ} q_e^\circ W_e;$$

$$B = -\beta + \sum_{e=1}^L \frac{c_{pe} - c_{ve}}{R^\circ} q_e^\circ E_e; \quad D = \delta - \sum_{e=1}^L \frac{c_{pe} - c_{ve}}{R^\circ} q_e^\circ M_e;$$

$$\Gamma = \sum_{e=1}^L q_e^\circ \left( N_e \Gamma_e - \frac{c_{pe}}{c_v} M_e \right) - \delta b \left( \sum_{e=1}^L q_e^\circ N_e - n^\circ \right);$$

$$\Lambda = \sum_{e=1}^L q_e^\circ \left( N_e \Lambda_e - \frac{c_{pe}}{c_v} W_e \right); \quad \Phi = \sum_{e=1}^L q_e^\circ \left( N_e \Phi_e - \frac{c_{pe}}{c_v} F_e \right);$$

$$N = n^\circ - \sum_{e=1}^L q_e^\circ \left( N_e \Pi_e - \frac{c_{pe}}{c_v} E_e \right) + \left( \frac{1}{1-a} + \beta b \right) \left( \sum_{e=1}^L q_e^\circ N_e - n^\circ \right);$$

$$A_e = \left( k_c - r_e \frac{\gamma_{ve}}{2R_e} \right) S_e - 1; \quad B_e = \frac{k_e S_e}{2R_e} - r_e R_e;$$

$$\Gamma_e = \alpha_e + \delta c_e + \left\{ (k_e + b_e) (\mu_e + \delta j_e) \left( A_e S_e \frac{\gamma_{ve}}{2R_e} + B_e R_e \right) - \right. \\ \left. - (v_e + \delta h_e) \left[ A_e \left( 1 + r_e S_e \frac{\gamma_{ve}}{2R_e} + b_e S_e \right) + B_e \left( r_e R_e + \frac{b_e S_e}{2R_e} \right) \right] \right\} / (A_e^2 + B_e^2);$$

$$E_e = \beta \left\{ k_e j_e \left( A_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} + B_e R_e \right) - h_e \left[ A_e \left( 1 + r_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} \right) + B_e r_e R_e \right] \right\} / (A_e^2 + B_e^2);$$

$$F_e = \beta \left\{ k_e j_e \left( A_e R_e - B_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} \right) - h_e \left[ A_e r_e R_e - B_e \left( 1 + r_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} \right) \right] \right\} / (A_e^2 + B_e^2);$$

$$M_e = \left\{ k_e (\mu_e + \delta j_e) \left( A_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} + B_e R_e \right) - (v_e + \delta h_e) \left[ A_e \left( 1 + r_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} \right) + B_e r_e R_e \right] \right\} / (A_e^2 + B_e^2);$$

$$\Lambda_e = \left\{ (k_e + b_e) (\mu_e + \delta j_e) \left( A_e R_e - B_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} \right) - (v_e + \delta h_e) \left[ A_e \left( r_e R_e + \frac{b_e S_e}{2R_e} \right) - B_e \left( 1 + r_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} + b_e S_e \right) \right] \right\} / (A_e^2 + B_e^2);$$

$$\Pi_e = \beta c_e + \beta \left\{ j_e (k_e + b_e) \left( A_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} + B_e R_e \right) - h_e \left[ A_e \left( 1 + r_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} + b_e S_e \right) + B_e \left( \frac{b_e S_e}{2R_e} + r_e R_e \right) \right] \right\} / (A_e^2 + B_e^2);$$

$$\Phi_e = \beta \left\{ j_e (k_e + b_e) \left( A_e R_e - B_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} \right) - h_e \left[ A_e \left( \frac{b_e S_e}{2R_e} + r_e R_e \right) - B_e \left( 1 + r_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} + b_e S_e \right) \right] \right\} / (A_e^2 + B_e^2);$$

$$W_e = \left\{ k_e (\mu_e + \delta j_e) \left( A_e R_e - B_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} \right) - (v_e + \delta h_e) \left[ A_e r_e R_e - B_e \left( 1 + r_e S_e \frac{\gamma \tau_e}{2R_e} \right) \right] \right\} / (A_e^2 + B_e^2);$$

$$R_e = \sqrt{\frac{1}{8} \left( \sqrt{1 + 16\gamma^2 \tau_e^2} - 1 \right)}; \quad S_e = 1 - \frac{R_e}{\gamma \tau_e}; \quad \tau_e = \frac{\kappa_e (u_1^\circ)^2}{(u_e^\circ)^2 \kappa_1}; \quad e = 1, \dots, L;$$

$\chi = V p^\circ (R^\circ T^\circ M^c \kappa_1)^{-1} (u_1^\circ)^2$  — отношение времен релаксации камеры и прогретого слоя компонента, имеющего максимальное время релаксации;  $\tau_e$  — относительное время релаксации прогретого слоя  $e$ -го компонента КС; параметры  $k_e$ ,  $r_e$ ,  $\mu_e$ ,  $j_e$ ,  $b_e$  характеризуют степень зависимости скорости горения, температуры поверхности, энерговыделения  $e$ -го компонента от начальной температуры, давления и плотности потока продуктов сгорания в стационарном режиме

$$k_e = (T_{Se}^\circ - T_0) \left( \frac{\partial \ln u_e^\circ}{\partial T_0} \right)_{p,G}, \quad r_e = \left( \frac{\partial T_{Se}^\circ}{\partial T_0} \right)_{p,G}, \quad \mu_e = \frac{1}{T_{Se}^\circ - T_0} \left( \frac{\partial T_{Se}^\circ}{\partial \ln p} \right)_{T_0,G},$$

$$j_e = \frac{1}{T_{Se}^\circ - T_0} \left( \frac{\partial T_{Se}^\circ}{\partial \ln G} \right)_{p,T_0}, \quad b_e = (T_{Se}^\circ - T_0) \left( \frac{\partial \ln Q_e^\circ}{\partial T_0} \right)_{p,G}, \quad (e = 1, \dots, L).$$

Для заданных значений  $\gamma$ , физико-химических и геометрических харак-

теристик горючих компонентов и условий истечения из (15) находим критическое значение  $k_I$  ( $I$  — любой, произвольно выбранный порядковый номер,  $1 \leq I \leq L$ ), а из (16) — величину  $\chi$ , отвечающую границе устойчивости.

Потеря устойчивости горения комбинированной КС путем скачкообразного изменения декремента затухания имеет место лишь в модели с постоянной температурой поверхности при любом одном или нескольких значениях  $k_e - 1$  ( $1 \leq e \leq L$ ). Из полученных критериев устойчивости горения комбинированной КС при  $\delta = 1$ ,  $\beta = -0,5$  следуют, как частный случай, соответствующие условия устойчивости горения КС, состоящей из топлива только одного сорта ( $L = 1$ ) [9, 15, 16] и комбинации двух горючих компонентов без

учета переменности температуры продуктов сгорания и температуры поверхности топлив, эрозии, теплопотерь в стенки камеры и неодинаковости теплофизических характеристик продуктов сгорания компонентов КС ( $L = 2$ ,  $Q_1 = Q_2 = \text{const}$ ,  $r_1 = r_2 = \mu_1 = \mu_2 = j_1 = j_2 = h_1 = h_2 = 0$ ,  $q_1 N_1 + q_2 N_2 = n^\circ$ ,  $c_{p1} = c_{p2} = \text{const}$ ,  $c_{v1} = c_{v2} = \text{const}$ ) [6].

На рис. 2 представлены результаты расчетов правой части неравенства (14) для горючей системы, состоящей из двух компонентов (порох Н + порох НЕС 4016), в пренебрежении эрозией и теплопотерями в стенки при  $\delta = 1$ ,  $\beta = -1/2$ . Кривые 1—5 — теоретические зависимости  $v_{1*}(p, \sigma_2/\sigma_1) = \varepsilon_1/\varepsilon_2$  соответственно при  $\sigma_2/\sigma_1 = 2; 1,5; 1; 0,5; 0$ ; кривая 6 — экспериментальная зависимость  $v_1(p)$  для пороха Н [12]. Ветви кривых  $v_{1*}(p, \sigma_2/\sigma_1)$ , лежащие выше линии  $v_1(p)$ , соответствуют устойчивым режимам горения. Видно, что если конденсированное топливо с параметром  $v > 1$  сжигается в полузаткнутой камере одновременно с топливами других сортов, то в общем случае возможно устойчивое горение таких систем.

Неполнота энергосвободы компонентов обуславливает верхний и нижний предел горения комбинированных КС по давлению. Однако путем подбора компонентов с соответствующими физико-химическими и геометрическими характеристиками можно добиться отсутствия пределов горения комбинированных КС по давлению, даже если такие пределы существуют для каждого компонента в отдельности.

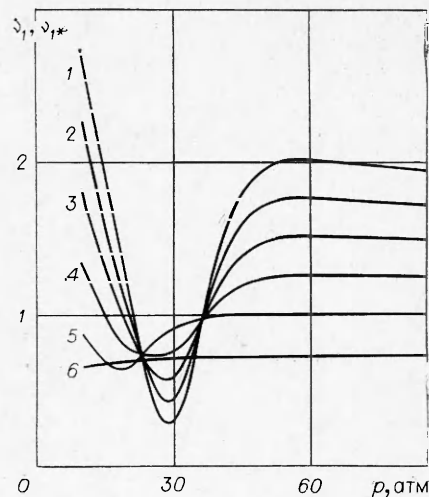


Рис. 2.

Поступила в редакцию  
30/V 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A. C. Keathley, R. E. Allenson. Modular construction of solid rocket fuel charges. Пат. США, кл. 102—98, № 3008417, 1961.
2. B. R. Adelman. Rocket and propellant charge there for. Пат. США, кл. 60—35.6, № 3017743, 1962.
3. W. Schaafsma. Rocket motor. Пат. США, кл. 60—35.6, № 3107487, 1963.
4. V. L. Head. Segmented rocket engine. Пат. США, кл. 102—98, № 3175497, 1965.
5. W. Oversohl, P. Semmler. Feststoffreibsätze für Raketenantrieb.— Пат. ФРГ, кл. 78 d 5/00, (C 06 d 5/00), № 2026907, 1973.
6. Ю. И. Медведев. ФГВ, 1971, 7, 1.
7. Я. Б. Зельдович, М. А. Ривин, Д. А. Франк-Каменецкий. Импульс реактивной силы пороховых ракет. М., Оборонгиз, 1963.
8. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 11—12.
9. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1963, 1.



10. Б. В. Новожилов. ПМТФ, 1965, 4.
11. Ю. А. Гостинцев, Л. А. Суханов, П. Ф. Похил. ПМТФ, 1971, 5.
12. А. А. Зенин. ФГВ, 1966, 2, 3.
13. B. L. Crawford Jr., C. Muggett et al. J. Anal. Chem., 1947, 19, 9.
14. L. Bruce, B. L. Crawford Jr. et al. J. Phys. Col. Chem., 1950, 54, 6.
15. В. Н. Вилюпов, А. П. Руднев. ПМТФ, 1972, 6.
16. Б. В. Новожилов. ФГВ, 1967, 3, 1.

---

## ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ГОРЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ

*Г. М. Махвиладзе, С. Б. Щербак*  
(Москва)

Конвективное движение газа над поверхностью горящего вещества возникает и поддерживается за счет химической реакции, сопровождающейся значительным выделением тепла и переходом вещества из конденсированного состояния в газ, и из-за действия силы тяжести. Отток горячих газов от очага горения приводит к формированию струйного течения (конвективной колонки), взаимодействующего с покоящимся окружающим газом [1—4]. В ряде случаев наблюдается образование вихревых структур [5—8]. Течение газа над очагом горения, в свою очередь, оказывает существенное влияние на процессы тепло- и массопередачи вблизи очага горения и тем самым на процесс горения. В последнее время интерес к газодинамике продуктов горения твердых и жидких веществ возрастает в связи с тем, что все большее внимание уделяется решению экологических проблем и, в частности, вопросов пожаробезопасности.

Трудности исследования перечисленных вопросов заключаются в сложности постановки задачи, что требует аккуратного выделения основных факторов, определяющих физическую картину явления. Сложна и исходная система нелинейных уравнений газовой динамики, в которую должны быть включены еще и нелинейные члены, описывающие зависимость скорости химической реакции от температуры и концентрации реагирующих веществ. Из-за этих трудностей число теоретических работ в области исследования газодинамики горения твердых веществ крайне мало; более того, различные упрощающие предположения зачастую делают теоретический анализ недостаточным. Обычно эти предположения приводят к тому, что взаимодействие газодинамических и химических факторов вообще не учитывается и рассматривается только какая-либо сторона процесса, например конвективная струя газа над источником тепла химической природы с заданными и неизменяющимися свойствами.

Ввиду перечисленных трудностей возникает необходимость применения численных методов исследования, которые позволяют на основе какой-либо простой, но вместе с тем достаточно общей модели горения получить эффективное решение задачи. Цель данной работы — учесть взаимодействие очага горения и поля течения над ним. Предложена модель горения с сосредоточенным на поверхности твердого горючего вещества слоем, в котором протекают химические реакции. Модель позволяет рассмотреть газодинамику горения твердых топлив, содержащих или не содержащих окислитель, формирование крупномасштабных конвективных течений при пожарах (лесных, степных или городских), а также может быть применена к описанию экзотермических каталитических реакций