

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В СМЕСИ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ И ЧАСТИЦ

А. Ю. Крайнов

Томский государственный университет, 634050 Томск

Сформулирована физико-математическая модель распространения пламени по газозвеси, состоящей из смеси газов (окислителя, горючего и инертного) и частиц конденсированного вещества, гетерогенно реагирующих с окислителем. На основе численного анализа получены зависимости скорости распространения пламени от параметров, характеризующих массовую концентрацию частиц, их размер, энергию активации гетерогенной реакции на поверхности частиц, тепловой эффект гетерогенной реакции и массообмен частиц. В зависимости от соотношения параметров дисперсной фазы скорость распространения пламени в такой среде может увеличиваться в несколько раз по сравнению со скоростью пламени в незапыленной газовой смеси либо уменьшаться, и тогда влияние частиц аналогично влиянию инертной дисперсной фазы.

В технологических процессах порошковой металлургии, в химической технологии, в производстве пищевых продуктов с использованием процесса сушки, в угледобывающих отраслях промышленности часто встречаются газозвеси различной природы: взвеси инертных частиц в инертном газе; взвеси частиц, способных к экзотермическому либо эндотермическому химическому реагированию, в инертном газе; газозвеси, в которых химическое тепловыделение может происходить в газовой фазе и на поверхности частиц. Наибольшую опасность представляют газозвеси, способные к химическому тепловыделению. Экспериментальное исследование таких сред затруднено. Теоретическое моделирование макрокинетики реагирования позволяет выяснить основные закономерности процесса в различных условиях и опасные последствия воспламенения, проанализировать способы предупреждения возгорания и способы тушения очагов воспламенения и горения.

В настоящей работе исследовано распространение фронта горения по газозвеси, в которой экзотермические химические реакции идут в газовой фазе и на поверхности частиц дисперсной фазы с одним из компонентов газовой фазы. Такие процессы, в частности, происходят при горении метановоздушной смеси со взвешенными в ней частицами угольной пыли.

Рассматривается полубесконечная газозвесь, состоящая из смеси газов (окислителя, горючего и инертного), в которой равномерно взвешены мелкие частицы вещества, способно-

го гетерогенно реагировать с одним из компонентов газовой смеси. Предполагается, что реакция на поверхности частиц идет с окислителем; газодисперсная смесь неподвижна; частицы имеют одинаковый размер и сферическую форму; теплообмен между частицами и газом происходит по закону Ньютона; скорость химических реакций в газе и на поверхности частиц зависит от температуры по закону Аррениуса; продуктами гетерогенной реакции на частицах являются газы; все химические реакции идут без возрастания объема; термическим расширением газовой смеси пренебрегаем; на границе области  $x = 0$  расположен источник воспламенения (горячая стенка), а газозвесь расположена на расстоянии  $l$  от горячей стенки.

Математическая модель горения такой смеси построена на основе теплодиффузионной модели горения газов [1], дополненной уравнениями энергии и выгорания дисперсной фазы с учетом межфазного теплового и массового взаимодействия. Подобные модели, учитывающие двухтемпературность среды, успешно применяли для моделирования самовоспламенения [2, 3] и зажигания газозвесей [4–8], для исследования вопросов пожаротушения и огнепреграждения [9–13]. С учетом сделанных допущений уравнения, описывающие процессы в такой смеси, имеют следующий вид: уравнение энергии газовой фазы —

$$c_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} + Q \rho_{g,0}^2 Y_1 Y_2 k_0 \exp\left(-\frac{E_g}{RT_g}\right) - S \alpha N (T_g - T_k) + (c_g T_g - c_k T_k) N \frac{dm}{dt}; \quad (1)$$

уравнение энергии частицы —

$$c_k m \frac{dT_k}{dt} = S\alpha(T_g - T_k) - q \frac{dm}{dt}; \quad (2)$$

уравнения сохранения массы горючего и окислителя в газовой фазе —

$$\rho_{g,0} \frac{\partial Y_1}{\partial t} = D\rho_{g,0} \frac{\partial^2 Y_1}{\partial x^2} - \rho_{g,0}^2 Y_1 Y_2 k_0 \exp\left(-\frac{E_g}{RT_g}\right), \quad (3)$$

$$\rho_{g,0} \frac{\partial Y_2}{\partial t} = D\rho_{g,0} \frac{\partial^2 Y_2}{\partial x^2} - \alpha_f \rho_{g,0}^2 Y_1 Y_2 k_0 \exp\left(-\frac{E_g}{RT_g}\right) + N \frac{dm}{dt}; \quad (4)$$

уравнение изменения массы частицы —

$$\frac{dm}{dt} = -Sj\rho_{g,0} Y_{2,0}, \quad j = \frac{k(T_k)\beta_m}{k(T_k) + \beta_m} \frac{Y_2}{Y_{2,0}}, \quad (5)$$

$$k(T_k) = k_{0,k} \exp\left(-\frac{E_k}{RT_k}\right), \quad \beta_m = \frac{\text{Nu}_D D}{d};$$

уравнение сохранения массы среды —

$$\frac{d}{dt}(\rho_g + mN) = 0, \quad (6)$$

$$\rho_g = \rho_{g,0} Y_1 + \rho_{g,0} Y_2 + \rho_{in}.$$

Начальные условия:

$$T_k(x, 0) = T_g(x, 0) = T_0; \quad \rho_g(x, 0) = \rho_{g,0}; \quad (7)$$

$$Y_1(x, 0) = Y_{1,0}; \quad Y_2(x, 0) = Y_{2,0}; \quad m(x, 0) = m_0;$$

граничные условия:

$$x = 0: \quad T_g = T_a; \quad \frac{\partial Y_1}{\partial x} = \frac{\partial Y_2}{\partial x} = 0; \quad (8)$$

$$x = \infty: \quad \frac{\partial T_g}{\partial x} = \frac{\partial Y_1}{\partial x} = \frac{\partial Y_2}{\partial x} = 0.$$

Здесь  $t$  — время;  $x$  — координата;  $T$  — температура;  $\rho$  — плотность;  $c$  — удельная теплоемкость;  $Q\rho_{g,0}$  — теплота химической реакции в газе,  $q$  — на поверхности частиц;  $E$  — энергия активации химической реакции;  $k_0$ ,  $k_{0,k}$  — предэкспоненциальные множители в законе Аррениуса для гомогенной и гетерогенной реакций;  $m$  — масса частицы;  $d$ ,  $S$  — диаметр и площадь поверхности частицы;  $N$  — число частиц в единице объема;  $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $D$ ,  $\beta_m$  — коэффициенты теплопроводности, теплообмена, диффузии, массообмена;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $Y_1$ ,  $Y_2$  — концентрации горючего и окислителя в газовой фазе;  $\text{Nu}_D$  —

диффузионное число Нуссельта;  $\alpha_f$  — стехиометрический коэффициент. Индексы: 1 — горючий газ, 2 — окислитель,  $in$  — инертная часть исходной газовой смеси и продукты горения,  $g$  — газовая фаза,  $k$  — дисперсная фаза, 0 — начальные условия.

Для уменьшения количества параметров задачи систему уравнений (1)–(8) записали в безразмерной форме. В качестве масштабов выбраны следующие величины: времени —

$$t_* = \frac{c_g R T_a^2 / E_g}{Q\rho_{g,0} k_0 \exp(-E_g/RT_a) Y_{1,0} Y_{2,0}}$$

(характерное время химической реакции в газе);

координаты —

$$x_* = \sqrt{\frac{\lambda_g}{c_g \rho_{g,0}} t_*}$$

(толщина зоны химической реакции);

температуры —

$$\Delta T_* = \frac{R T_a^2}{E_g},$$

где  $T_a$  — адиабатическая температура горения газовой смеси. В безразмерной форме система уравнений (1)–(8) принимает вид

$$\bar{\rho}_g \frac{\partial \theta_g}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial \xi^2} + C_1 C_2 \exp\left(\frac{\theta_g}{1 + \beta \theta_g} - \frac{B}{\chi} \bar{r}^2 (\theta_g - \theta_k)\right) + \left(\theta_g - C\theta_k + \frac{1 - C}{\beta}\right) \frac{B}{C} \frac{d\bar{r}^3}{d\tau}, \quad (9)$$

$$\bar{r}^3 \frac{d\theta_k}{d\tau} = \frac{\bar{r}^2}{\chi} (\theta_g - \theta_k) - \frac{\bar{r}^2}{\chi} \delta \bar{j}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial \tau} = \text{Le} \frac{\partial^2 C_1}{\partial \xi^2} - \gamma C_1 C_2 \exp\left(\frac{\theta_g}{1 + \beta \theta_g}\right), \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial \tau} = \text{Le} \frac{\partial^2 C_2}{\partial \xi^2} - \alpha_{f,1} \gamma C_1 C_2 \exp\left(\frac{\theta_g}{1 + \beta \theta_g}\right) + \alpha_{f,2} \frac{B}{C} \frac{d\bar{r}^3}{d\tau}, \quad (12)$$

$$\frac{d\bar{r}^3}{d\tau} = -\frac{\bar{r}^2}{\chi} \bar{j} \mu \text{Le} C \frac{\text{Nu}_D}{\text{Nu}_T} Y_{2,0}, \quad (13)$$

$$\bar{j} = C_2 \frac{\exp(E\theta_k/(1 + \beta\theta_k))}{1 + \mu \bar{r} \exp(E\theta_k/(1 + \beta\theta_k))}, \quad (13)$$

$$\frac{d}{d\tau} \left( \bar{\rho}_g + \frac{B}{C} \bar{r}^3 \right) = 0. \quad (14)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} \theta_k(\xi, 0) = \theta_g(\xi, 0) = -1/\gamma; \quad \bar{\rho}_g(\xi, 0) = 1; \\ C_1(\xi, 0) = 1; \quad C_2(\xi, 0) = 1; \quad \bar{r}(\xi, 0) = 1; \end{aligned} \quad (15)$$

граничные условия:

$$\begin{aligned} \xi = 0: \quad \theta_g = 0; \quad \frac{\partial C_1}{\partial \xi} = \frac{\partial C_2}{\partial \xi} = 0; \\ \xi = \infty: \quad \frac{\partial \theta_g}{\partial \xi} = \frac{\partial C_1}{\partial \xi} = \frac{\partial C_2}{\partial \xi} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \theta = \frac{E_g}{RT_a^2}(T - T_a), \quad C = \frac{c_k}{c_g}, \\ C_1 = \frac{Y_1}{Y_{1,0}}, \quad C_2 = \frac{Y_2}{Y_{2,0}}, \\ \tau = \frac{t}{t_*}, \quad \xi = \frac{x}{x_*}, \quad \bar{r} = \frac{r}{r_0}, \\ \alpha_{f,1} = \alpha_f \frac{Y_{1,0}}{Y_{2,0}}, \quad \alpha_{f,2} = \frac{1}{Y_{2,0}}; \quad E = \frac{E_k}{E_g}; \end{aligned}$$

$Nu_T$  — тепловое число Нуссельта,  $Le$  — число Льюиса.

В результате обезразмеривания в системе уравнений (9)–(16) появились безразмерные параметры, имеющие конкретный физический смысл: параметр

$$\chi = \frac{c_k \rho_k r_0}{3\alpha t_*}$$

характеризует размер частиц в газозвеси,

$$B = N \frac{c_k \rho_k}{c_g \rho_g} \frac{4\pi r_0^3}{3}$$

— массовую концентрацию дисперсной фазы; параметры

$$\gamma = \frac{c_g}{Q} \frac{RT_a^2}{E_g} \frac{1}{Y_{1,0}}, \quad \beta = \frac{RT_a}{E_g}, \quad Le = \frac{D}{\lambda_g/(c_g \rho_g)}$$

традиционные для теории горения газов [1];

$$\mu = \frac{k_{0,k} \exp(-E_k/RT_a)}{Nu_D D} 2r_0$$

характеризует массообмен частицы (отношение скорости химической реакции к скорости массообмена [14]),

$$\delta = \frac{q \rho_k E_g k_{0,k} \exp(-E_k/RT_a) Y_{1,0}}{\alpha RT_a^2}$$

— теплообмен частицы (отношение скорости тепловыделения в химической реакции к скорости теплообмена [14]). Параметры  $\delta$  и  $\mu$  определяют режим протекания гетерогенной химической реакции на поверхности частиц (диффузионный или кинетический режимы реагирования [14]).

Систему уравнений (9)–(16) решали численно по неявной разностной схеме методом прогонки на сетке, сгущающейся в зоне интенсивных химических реакций. В расчетах физико-химические параметры газовой фазы взяты близкими к параметрам метановоздушной смеси [1], а параметры вещества дисперсной фазы — к параметрам древесного угля [15, 16]. Смесь газов предполагалась трех видов: с избытком окислителя ( $Y_{1,0} = 0,0349$ ,  $Y_{2,0} = 0,15504$ ), стехиометрическая смесь ( $Y_{1,0} = 0,0402$ ,  $Y_{2,0} = 0,15504$ ), с недостатком окислителя ( $Y_{1,0} = 0,045$ ,  $Y_{2,0} = 0,15504$ ). Определяющие безразмерные параметры, вычисленные на основе этих данных, имеют следующие значения:  $\gamma = 0,1$ ,  $\beta = 0,05$ ,  $Le = 1$ ,  $Nu_D/Nu_T = 1$ ,  $E = 0,33$ ,  $C = 2,5$ . В расчетах варьировались параметры дисперсной фазы (массовая концентрация, размер частиц, энергия активации химической реакции).

Для исключения влияния способа иницирования на горение газозвеси в численных экспериментах горение газозвеси инициировали волной горения газа. Предполагалось, что граница газозвеси находится на расстоянии  $l$  от источника воспламенения и участок  $0 < x < l$  заполнен горючей газовой смесью без примеси частиц (это задавалось ступенчатым изменением  $N$ :  $N(x) = 0$  при  $0 < x < l$ ,  $N(x) = N$  при  $x > l$ ). Расстояние  $l$  выбирали так, чтобы после зажигания газовой смеси волна горения вышла на стационарный режим распространения в газовой смеси, свободной от частиц горючего. Затем стационарно распространяющийся фронт горения встречается на своем пути запыленную область, взаимодействует с ней, при этом происходит перестройка структуры фронта горения, и фронт, пройдя некоторое расстояние, выходит на стационарный режим распространения пламени по газозвеси.

Перед фронтом реакции в зоне прогрева идет разогрев частиц и газа. В зависимости от размера частиц их температура либо близка к температуре газа (при малых значениях  $\chi$ ), либо отстает от нее (при больших  $\chi$ ). По мере прогрева газа и частиц перед фронтом горения в смеси начинается химическая реакция. В зависимости от соотношения параметров дисперсной и газовой фаз, опережающей будет либо реакция в газе, либо реакция на поверхности частиц. На рис. 1 представлена структура фронта горения газозвеси для двух

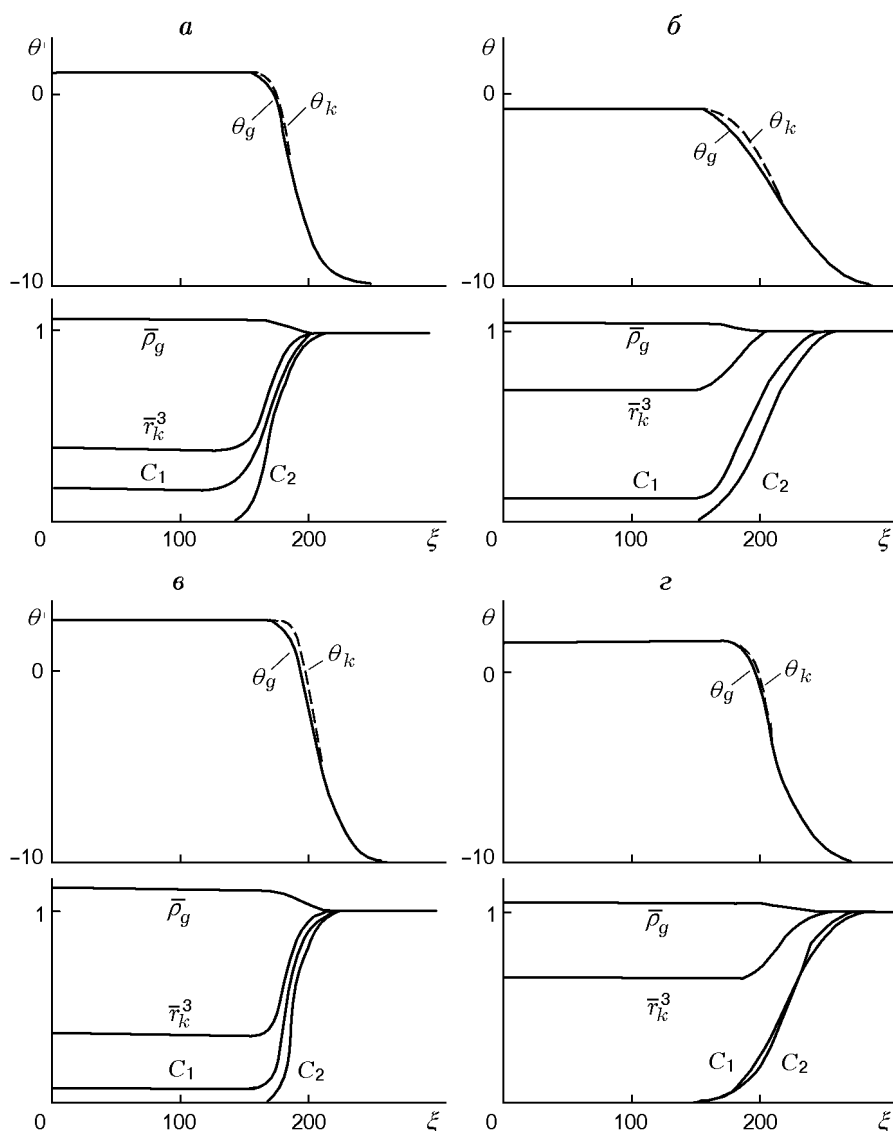


Рис. 1. Структура фронта пламени в газозвеси:

$\gamma = 0,1$ ,  $\beta = 0,05$ ,  $Le = 1$ ,  $Nu_D/Nu_T = 1$ ,  $E = 0,33$ ,  $C = 2,5$ ,  $\mu = 0,25$ ,  $\delta = 5$ ,  $B = 0,15$ ; *a* —  $Y_{1,0} = 0,0402$ ,  $Y_{2,0} = 0,15504$ ,  $\chi = 10$ ; *б* —  $Y_{1,0} = 0,0402$ ,  $Y_{2,0} = 0,15504$ ,  $\chi = 100$ ; *в* —  $Y_{1,0} = 0,0349$ ,  $Y_{2,0} = 0,15504$ ,  $\chi = 10$ ; *г* —  $Y_{1,0} = 0,0349$ ,  $Y_{2,0} = 0,15504$ ,  $\chi = 100$

комбинаций определяющих параметров газодисперсной смеси. При малых значениях параметра  $\chi$  (см. рис. 1, *a, в*) площадь поверхности частиц на единицу их массы большая. Они быстро прогреваются в волне горения и на фоне реакции в газовой фазе при повышении температуры в волне горения на поверхности частиц инициируется гетерогенная реакция. При этом за счет выгорания размер частиц уменьшается. Затем реакция прекращается из-за выгорания окислителя в газовой и гетерогенной реакциях. В случае стехиометрического состава газовой смеси позади фронта горения остается большая доля несгоревших частиц и некоторая

доля горючего (см. рис. 1, *a*). При избытке окислителя в газовой фазе выгорает большая доля горючего, несгоревшая доля частиц уменьшается (см. рис. 1, *б*). При этом реакция на частицах идет до полного выгорания окислителя. В случае крупных частиц ( $\chi = 100$ ) при стехиометрическом составе газовой смеси выгорание частиц незначительно; с понижением концентрации горючего выгорание увеличивается, но реакция на частицах идет в диффузионном режиме, достаточно медленно, поэтому выгорание окислителя происходит на большем пространстве позади фронта реакции (см. рис. 1, *б, г*).

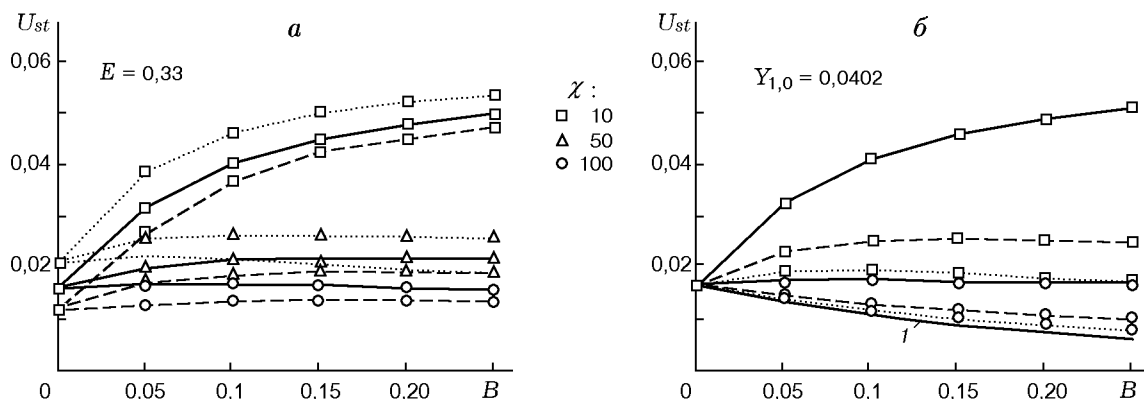


Рис. 2. Зависимости стационарной безразмерной скорости распространения пламени от массовой концентрации дисперсной фазы при различных соотношениях концентраций окислителя и горючего (а) и различных значениях энергии активации гетерогенной химической реакции (б) для частиц разного диаметра:

$\gamma = 0,1, \beta = 0,05, Le = 1, Nu_D/Nu_T = 1, C = 2,5, \mu = 0,25, \delta = 5$ ; а — пунктирные линии —  $Y_{1,0} = 0,0349$  (избыток окислителя), сплошные —  $Y_{1,0} = 0,0402$  (стехиометрическая смесь), штриховые —  $Y_{1,0} = 0,045$  (недостаток окислителя); б —  $E = 0,33$  (сплошные линии),  $0,66$  (штриховые),  $1,0$  (пунктирные),  $\infty$  (линия 1, инертные частицы)

В зависимости от соотношения параметров дисперсной фазы скорость распространения волны горения различна. При этом окислитель расходуется либо на реакцию в газовой фазе, и тогда большая доля дисперсной фазы остается несгоревшей за фронтом реакции, либо на реакцию с дисперсной фазой, и тогда большая доля горючего газа остается непрореагировавшей за фронтом реакции. Суммарное тепло, выделившееся в газе и на поверхности частиц (в соответствии с теплодиффузионной моделью распространения волны горения [1]), определяет скорость распространения пламени.

На рис. 2,а представлены зависимости стационарной скорости распространения фронта горения ( $U_{st}$ ) от массовой концентрации дисперсной фазы ( $B$ ) для частиц равного размера. Параметры  $\delta$  и  $\mu$  фиксированы ( $\delta = 5, \mu = 0,25$ ). Мелкие частицы ( $\chi = 10$ ) в зоне прогрева перед фронтом реакции прогреваются быстро, благодаря большой площади поверхности контакта газ — частицы. В высокотемпературной области фронта идут две параллельные реакции — реакция горения в газовой фазе и гетерогенная реакция на поверхности частиц, так как имеется достаточное количество окислителя и это способствует воспламенению и последующему горению частиц. С увеличением массовой концентрации мелкодисперсной фазы (кривые с квадратиками на рис. 2,а) скорость пламени возрастает благодаря увеличению тепловыделения на частицах, адиабати-

ческая температура за фронтом реакции становится выше. Уменьшение темпа роста  $U_{st}$  с увеличением значения  $B$  объясняется возрастанием затрат тепла на прогрев дисперсной фазы и недогоранием некоторой доли частиц из-за расходования окислителя в реакции в газовой фазе.

С увеличением размера частиц ( $\chi = 50$ ), но при той же массовой концентрации площадь контакта газ — частицы становится меньше. Частицы прогреваются медленнее, активация химической реакции на их поверхности происходит немного позже, чем в случае частиц с  $\chi = 10$ . На фоне начавшейся реакции в газе частица начинает активно реагировать в зоне, где концентрация окислителя ниже. Время сгорания частицы увеличивается, и за фронтом реакции остается большая доля несгоревшей дисперсной фазы. С увеличением массовой концентрации дисперсной фазы скорость волны горения немного увеличивается; она выше, чем скорость пламени в чистом газе, но незначительно, а с дальнейшим увеличением значения  $B$  даже начинает падать (кривые с треугольниками на рис. 2,а). Это обусловлено тем, что в данном случае, начиная с некоторого значения  $B$ , на прогрев частиц тратится больше тепла, температура во фронте реакции ниже, реакция на частицах идет медленнее, в газовой фазе расходуется больше окислителя и недогорание частиц дисперсной фазы при росте ее массовой концентрации увеличивается.

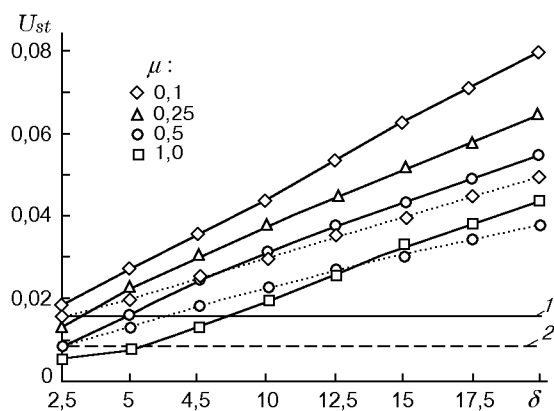


Рис. 3. Зависимость стационарной безразмерной скорости распространения пламени от параметра  $\delta$  при различных значениях параметра  $\mu$ :

$\gamma = 0,1$ ,  $\beta = 0,05$ ,  $Le = 1$ ,  $Nu_D/Nu_T = 1$ ,  $C = 2,5$ ,  $B = 0,15$ ,  $Y_{1,0} = 0,0402$ ;  $\chi = 50$  (сплошные линии), 100 (пунктирные); 1 — незапыленная газовая смесь, 2 — газовзвесь инертных частиц при  $\chi = 100$ ,  $B = 0,15$

В случае крупных частиц ( $\chi = 100$ ) площадь контакта газ — частицы становится еще меньше. Частицы прогреваются медленнее; химическая реакция на них начинает активироваться за фронтом реакции в газе в зоне, где из-за полного выгорания горючего в газовой фазе реакция уже закончилась. Поэтому влияние дисперсной фазы на распространение фронта горения незначительно. С увеличением массовой концентрации дисперсной фазы скорость распространения волны горения уменьшается (кривые с кружками на рис. 2,а). Описанные особенности зависимости скорости распространения фронта горения от параметров дисперсной фазы не меняются при уменьшении концентрации горючего, но при этом значения  $U_{st}$  становятся меньше (см. рис. 2).

Проанализируем влияние физико-химических параметров дисперсной фазы на стационарную скорость распространения волны горения. С увеличением энергии активации гетерогенной химической реакции выгорание частиц в волне горения замедляется, скорость распространения фронта пламени в такой газовзвеси падает (см. рис. 2,б). Уже при  $E = 1$  и  $\chi > 100$  химические реакции на поверхности частиц дисперсной фазы не сказываются на распространении пламени по газовзвеси; влияние этой фазы эквивалентно влиянию инертной дисперсной фазы.

Изменение параметров  $\delta$  и  $\mu$  можно трактовать как изменение теплового эффекта гетерогенной реакции и коэффициента массоотдачи. На рис. 3 представлены зависимости стационарной скорости горения от параметра  $\delta$  при различных значениях  $\mu$ . Увеличение  $\delta$  приводит к более сильному прогреву частиц, и химическая реакция на частицах, определяемая аррениусовской зависимостью ее скорости от температуры и скоростью массообмена, протекает быстрее, чем при меньших значениях  $\delta$ . В свою очередь, сильно разогретые частицы интенсивнее прогревают газ, ускоряя протекание реакции в газовой фазе. При уменьшении параметра  $\mu$ , характеризующего массообмен (увеличение коэффициента массообмена), скорость распространения волны горения также увеличивается. Интересно отметить, что скорость распространения волны горения по газовзвеси при малых значениях  $\delta$  может быть ниже скорости в чистом газе (линия 1) и даже ниже, чем в газовзвеси инертных частиц при той же массовой концентрации дисперсной фазы и том же составе газовой смеси (линия 2).

На основе представленной модели горения смеси реагирующих газов и частиц (1)–(8) проведен расчет распространения пламени по газовзвеси, состоящей из метановоздушной смеси и взвешенных в ней мелких частиц каменного угля. Теплофизические и формально-кинетические параметры компонентов рассматриваемой газовзвеси взяты следующие (для метановоздушной смеси — из [1], для каменного угля — из [17]):  $c_g = 1000$  Дж/(кг·К),  $c_k = 960$  Дж/(кг·К),  $\rho_g = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_k = 1400$  кг/м<sup>3</sup>, теплота сгорания горючего в газе  $Q\rho_{g,0} = 35 \cdot 10^6$  Дж/кг, теплота сгорания каменного угля  $q = 20 \cdot 10^6$  Дж/кг, энергии активации химических реакций  $E_g = 226260$  Дж/моль,  $E_k = 115 \cdot 10^3$  Дж/моль,  $k_0 = 30 \cdot 10^{10}$  1/с,  $k_{0,k} = 2 \cdot 10^4$  м/с. Расчеты проводились для метановоздушной смеси с концентрацией метана 6% ( $\alpha_f = 4$ ,  $Y_{1,0} = 0,0342$ ,  $Y_{2,0} = 0,228$ ) при начальной температуре  $T_0 = 400$  К. По этим данным вычислены следующие безразмерные параметры:  $\gamma = 0,07476$ ,  $\beta = 0,05604$ ,  $E = 0,481$ ,  $C = 0,96$ ,  $Le = 1$ ,  $\alpha_{f,1} = 0,6$ ,  $\alpha_{f,2} = 4,386$ . Расчеты проведены для двух значений массовой концентрации частиц и четырех значений размера частиц дисперсной фазы. Результаты расчетов приведены в таблице (в последней строке таблицы указано значение скорости горения газовой смеси без частиц угля).

$B$	$r_0$ , мм	$\chi$	$\delta$	$\mu$	$u_{st}$ , см/с
0,05	0,01	18,08	2122	1,1	20,45
0,05	0,05	452	10610	5,48	5,04
0,1	0,05	452	10610	5,48	5,4
0,1	0,1	1808	21220	11	3,02
0,1	0,5	45200	106100	54,8	1,15
0	—	—	—	—	1,26

Из таблицы видно, что небольшая массовая концентрация мелких частиц каменного угля ( $r_0 = 0,01$  мм), взвешенных в горючей газовой смеси, значительно увеличивает скорость распространения пламени. С увеличением размера частиц скорость пламени уменьшается, и, начиная с некоторого размера частиц, становится меньше скорости пламени в незапыленной горючей газовой смеси.

Таким образом, построена математическая модель горения газозвеси, состоящей из смеси газообразного окислителя и горючего и взвешенных в ней частиц, гетерогенно реагирующих с газообразным окислителем. Проведенное численное исследование влияния параметров дисперсной фазы на стационарную скорость распространения пламени по газозвеси показало, что в зависимости от соотношения параметров газовой и дисперсной фаз возможны случаи, когда наличие химически активной дисперсной фазы увеличивает скорость распространения волны горения в несколько раз по сравнению со скоростью фронта горения в чистой газовой смеси. Это может быть причиной перехода горения такой смеси в детонацию. При некоторых соотношениях параметров дисперсной фазы ее влияние аналогично влиянию инертной дисперсной фазы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. М.: Наука, 1980.
2. Лисицын В. И., Руманов Э. Н., Хайкин Б. И. О периоде индукции при воспламенении совокупности частиц // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 1. С. 3–9.
3. Атаманова И. В., Дик И. Г., Крайнов А. Ю. Период индукции немонодисперсной совокупности // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. Черноголовка, 1989. С. 75–77.
4. Виллюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ. М.: Наука, 1984.
5. Лисицын В. И., Пироженко А. А., Виллюнов В. Н. О периоде индукции при зажигании дисперсной системы // Горение и взрыв. М.: Наука, 1972. С. 186–190.
6. Дик И. Г., Крайнов А. Ю. Режимы воспламенения газозвеси в сосуде с нагретыми стенками // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 5. С. 58–61.
7. Дик И. Г., Крайнов А. Ю., Макаров А. И. О воспламенении газозвеси в полости с нагретыми излучающими стенками // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 5. С. 20–24.
8. Крайнов А. Ю. Воспламенение неоднородного облака частиц лучистым потоком // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 4. С. 19–24.
9. Губин Е. И., Дик И. Г. Распространение пламени в запыленном газе // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 6. С. 25–29.
10. Дик И. Г., Губин Е. И., Крайнов А. Ю. Нестационарное взаимодействие волны горения с пылевым облаком // Инж.-физ. журн. 1988. Т. 55, № 2. С. 236–243.
11. Губин Е. И., Дик И. Г., Крайнов А. Ю. Ингибирование газовых пламен терморазлагающимися составами // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 2. С. 57–62.
12. Krainov A. Yu., Shaurman V. A. Inhibition of gas flame by spray // Chemical Gasdynamics and Combustion of Energetic Materials: Intern. Workshop-95. Tomsk, 1995. P. 76.
13. Крайнов А. Ю., Шаурман В. А. Ингибирование газового пламени аэрозолем капельной жидкости // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 4. С. 55–61.
14. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.
15. Справочник по теплообменникам. Т. 2. М.: Энергоатомиздат, 1987.
16. Сборник задач по теории горения: Учебное пособие для вузов / Под ред. В. В. Померанцева. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
17. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / Под ред. В. В. Померанцева. Л.: Энергоатомиздат, 1986.

Поступила в редакцию 27/І 1997 г.,  
в окончательном варианте — 24/VI 1998 г.