

МЕХАНИКА

УДК 536.46
DOI 10.17223/19988621/36/7

А.А. Дементьев, А.Ю. Крайнов, К.М. Моисеева

О ВЛИЯНИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ГОРЮЧЕГО В ГИБРИДНОЙ ГАЗОВЗВЕСИ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ГОРЕНИЯ¹

Представлены результаты расчетно-теоретического исследования зависимости скорости распространения фронта горения в гибридной газозвеси от концентрации газообразного горючего в смеси, массовой концентрации реагирующих с кислородом воздуха частиц, их размеров. В математической модели учитывается тепловое расширение среды и связанное с ним движение фаз. Получено, что в случае малых начальных концентраций горючего в газе присутствие в газовой смеси реагирующих частиц увеличивает скорость распространения фронта горения. При значениях концентрации горючего в газе, близких к стехиометрической, частицы тормозят пламя.

Ключевые слова: *гибридная газозвесь, реагирующие частицы, ламинарное пламя, скорость горения.*

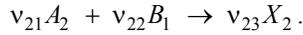
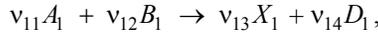
Газозвеси порошков различных веществ встречаются в природе, технике, используются в различных технологиях. Порошки металлов, их окислов используются в современных порошковых технологиях. В процессах сушки, десублимации, дробления, перемалывания также получают газозвеси порошков. В процессах добычи и переработки полезных ископаемых образуются газозвеси реагирующих частиц. Особую опасность представляют газозвеси угольной пыли в метановоздушной смеси, которые образуются при добыче угля шахтным методом [1, 2]. При возникновении очага возгорания в метановоздушной смеси в выработке угольной шахты распространяющийся фронт пламени возмущает атмосферу перед собой. Мелкодисперсные частицы угля поднимаются со стен выработок, смешиваются с газом и создают углеметановоздушную смесь. Изучение закономерностей распространения фронта горения в таких смесях является важной с позиций пожаро- и взрывоподавления и пожаробезопасности.

Физико-математическая постановка задачи

Рассмотрим процесс горения газовой смеси горючего и окислителя, в которой равномерно распределены твердые горючие частицы. Считаем, что реакция протекает гомогенно в газовой фазе и гетерогенно на поверхности частиц. Окисли-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-03-02578 а.

тель в газовой фазе расходуется в реакции с горючим газом и с частицами с образованием газообразных продуктов. Одновременно протекают две реакции:



Для записи математической модели рассматриваемого процесса введем следующие предположения: рассматривается газовзвесь реагирующих частиц в горючем газе с окислителем, занимающая полубесконечную область $0 \leq x < \infty$. В начальный момент времени газ и частицы покоятся, частицы равномерно распределены во взвеси. В координате $x = 0$ расположена непроницаемая горячая стенка с температурой равной адиабатической температуре сгорания газа в изобарических условиях (зажигание у «закрытого торца» [3]). Параметры состояния газа удовлетворяют уравнению состояния идеального газа. Учитывается перенос тепла в газовой смеси за счет теплового расширения смеси (конвективный теплоперенос) и теплопроводности. Теплообмен между частицами и газом определяется по закону Ньютона для теплоотдачи. Скорость тепловыделения в химических реакциях на поверхности частиц и в газе зависит от температуры по закону Аррениуса со вторым порядком реакции в газовой фазе и первым порядком для гетерогенной реакции на частицах. Константа скорости химической реакции определяется по методу сложения сопротивлений [4]. Предполагаем, что коэффициенты диффузии и теплопроводности постоянны и не зависят от температуры. Окислитель в реакции расходуется на две конкурирующие реакции – гомогенную в газе и гетерогенную на поверхности частиц; в балансе массы газа учитывается расход окислителя и массоприход газообразных продуктов от реакции на частицах. Учитывается изменение размера частиц твердого вещества при их сгорании. Предполагается, что горение протекает в ламинарном режиме в условиях постоянного давления. Применимость подобного подхода для описания распространения медленного фронта пламени с учетом теплового расширения газа обоснована в [5–7]. Энергия частиц изменяется за счет химической реакции на поверхности и теплообмена с газовой фазой. На частицы со стороны газа действует сила сопротивления, описываемая законом Стокса. Обратным влиянием движения частиц на движение газа пренебрегаем из-за малой их объемной концентрации. Форма частиц шаровая, между собой они не сталкиваются.

Система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая процессы в гибридной газовзвеси с учетом сделанных допущений, в безразмерной форме имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_g}{\partial \tau} + \bar{u}_g \frac{\partial \theta_g}{\partial \xi} = \frac{1}{\bar{\rho}_g} \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial \xi^2} + \bar{\rho}_g C_1 C_2 \exp\left(\frac{\theta_g}{1 + \beta \theta_g}\right) - \\ - \frac{B}{\chi} \frac{\bar{r}_k}{\bar{\rho}_g} \bar{n}(t) (\theta_g - \theta_k) - \frac{1}{\bar{\rho}_g} \frac{B}{\chi} \left(\theta_g - C \theta_g + \frac{1-C}{\beta} \right) A; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial \tau} + \bar{u}_g \frac{\partial C_1}{\partial \xi} = \frac{Le}{\bar{\rho}_g} \frac{\partial^2 C_1}{\partial \xi^2} - \gamma \bar{\rho}_g C_1 C_2 \exp\left(\frac{\theta_g}{1 + \beta \theta_g}\right) - \frac{B}{\chi} \left(\frac{\nu_{23} M_{23}}{\nu_{22} M_{22}} - 1 \right) \frac{C_1}{\bar{\rho}_g} A; \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial \tau} + \bar{u}_g \frac{\partial C_2}{\partial \xi} = \frac{\text{Le}}{\bar{\rho}_g} \frac{\partial^2 C_2}{\partial \xi^2} - \frac{1}{\bar{\rho}_g Y_{2,0}^*} \frac{B}{\chi} A \left[1 + C_2 Y_{2,0}^* \left(\frac{v_{23} M_{23}}{v_{22} M_{22}} - 1 \right) \right] - \left(\frac{v_{12} M_{12}}{v_{11} M_{11}} \right) \left(\frac{Y_{1,0}^*}{Y_{2,0}^*} \right) \gamma \bar{\rho}_g C_1 C_2 \exp \left(\frac{\theta_g}{1 + \beta \theta_g} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_g}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{\rho}_g \bar{u}_g}{\partial \xi} = \frac{B}{\chi} A \left(\frac{v_{23} M_{23}}{v_{22} M_{22}} - 1 \right); \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_k}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{\rho}_k \bar{u}_k}{\partial \xi} = - \frac{v_{21} M_{21}}{v_{22} M_{22}} \frac{B}{\chi Z_2} \frac{u_k}{\rho_k} A; \quad (5)$$

$$\bar{\rho}_g = (1 - \beta / \gamma) / (1 + \beta \theta_g); \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta_k}{\partial \tau} + \bar{u}_k \frac{\partial \theta_k}{\partial \xi} = \frac{(\theta_g - \theta_k)}{\bar{r}_k \chi} + \frac{\delta}{\chi Z_1} \left(\frac{Y_{2,0}^*}{Y_{1,0}^*} \right) \frac{C_2 \bar{\rho}_g \bar{j}}{\bar{r}_k^2}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial \tau} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial \xi} = \frac{3}{2} \frac{\text{Pr} C}{\text{Nu} \chi} \frac{(\bar{u}_g - \bar{u}_k)}{\bar{r}_k} + \frac{v_{21} M_{21}}{v_{22} M_{22}} \frac{B}{\chi Z_2} \frac{\bar{u}_k}{\bar{\rho}_k} A; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{n}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{n} \bar{u}_k}{\partial \xi} = 0; \quad (9)$$

$$\bar{r}_k = (\bar{\rho}_k / \bar{n})^{\frac{1}{3}}, \quad (10)$$

$$A = \mu \text{Le} \frac{\text{Nu}_D}{\text{Nu}} Y_{2,0}^* \bar{j} C_2 \bar{r}_k^2 \bar{\rho}_g \bar{n}, \quad \bar{j} = \frac{\exp(E_{kg} \theta_k / (1 + \beta \theta_k))}{\bar{r}_k \mu \exp(E_{kg} \theta_k / (1 + \beta \theta_k)) + 1}, \quad E_{kg} = \frac{E_k}{E_g}.$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \theta_g(0, \tau) = 0, \quad \partial \theta_g(\infty, \tau) / \partial \xi = 0, \quad \partial \theta_k(0, \tau) / \partial \xi = 0, \quad \partial \bar{\rho}_k(0, \tau) / \partial \xi = 0, \\ \partial \bar{n}(0, \tau) / \partial \xi = 0, \quad \partial C_1(0, \tau) / \partial \xi = 0, \quad \partial C_2(0, \tau) / \partial \xi = 0, \\ \partial C_1(\infty, \tau) / \partial \xi = 0, \quad \partial C_2(\infty, \tau) / \partial \xi = 0, \quad \bar{u}_g(0, \tau) = 0, \quad \bar{u}_k(0, \tau) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} \theta_g(\xi, 0) = -1/\gamma, \quad \theta_k(\xi, 0) = -1/\gamma, \quad C_1(\xi, 0) = C_{1,0}, \quad C_2(\xi, 0) = 1, \\ \bar{u}_g(\xi, 0) = 0, \quad \bar{u}_k(\xi, 0) = 0, \quad \bar{\rho}_g(\xi, 0) = 1, \quad \bar{\rho}_k(\xi, 0) = 1, \quad \bar{n}(\xi, 0) = 1. \end{aligned} \quad (12)$$

При обезразмеривании использованы следующие масштабные величины:

$$\begin{aligned} x_* = \sqrt{\lambda t_* / (c_g \rho_{g,0})} - \text{масштаб координаты}, \quad t_* = \frac{RT_a^2 c_g}{QE_g \rho_{g,0} Y_{1,0}^* Y_{2,0}^* k_{0,g} \exp(-E_g / RT_a)} \\ - \text{масштаб времени}, \quad V_* = x_* / t_* - \text{скорости}, \quad \rho_{*,g} = \rho_{g,0} - \text{плотности газа}, \quad \rho_{*,k} = \rho_{k,0} \\ - \text{приведенная плотность частиц}, \quad T_* = RT_a^2 / E_g - \text{температуры}, \quad Y_{1,0}^* = \rho_{1,0} / \rho_{g,0} - \end{aligned}$$

концентрации горючего, $Y_{2,0}^* = \rho_{2,0} / \rho_{g,0}$ – концентрации окислителя. Безразмерные переменные: $\tau = t / t_*$ – время; $\xi = x / x_*$ – координата; $\theta_{g(k)} = (E / RT_a^2)(T_{g(k)} - T_a)$ – температура газа (частиц); $C_1 = Y_1 / Y_{1,0}$, $C_2 = Y_2 / Y_{2,0}$ – относительные концентрации горючего и окислителя в газовой фазе, где $Y_{1,0} = \rho_1 / \rho_{g,0}$, $Y_{2,0} = \rho_2 / \rho_{g,0}$, $Y_1 = \rho_1 / \rho_g$, $Y_2 = \rho_2 / \rho_g$; $\bar{\rho}_g = \rho_g / \rho_{g,0}$ – плотность газа; $\bar{\rho}_k = \rho_k / \rho_{k,0}$ – приведенная плотность частиц; $\bar{u}_g = u_g / V_*$ – скорость газа; $\bar{u}_k = u_k / V_*$ – скорость частиц; \bar{n} – число частиц в единице объема; \bar{r}_k – радиус частицы.

Выбранным масштабам соответствуют следующие безразмерные параметры подобия: $\delta = q \rho_{k,0} r_{k,0} (E_g / RT_a^2) k_{0,k} \exp(-E_k / RT_a) Y_{1,0} / (\text{Nu}_T \lambda)$ – параметр, характеризующий интенсивность теплообмена частицы (отношение скорости тепловыделения в химической реакции к скорости теплообмена), $\mu = k_{0,k} \exp(-E_k / RT_k) / (\text{Nu}_D D)$ – параметр, характеризующий интенсивность массообмена частицы (отношение скоростей химической реакции и массообмена), $\text{Pr} = \mu_g c_g / \lambda$ – число Прандтля, $\text{Nu} = \alpha r_{k,0} / \lambda$ – число Нуссельта, $\text{Nu}_D = \beta_m r_{k,0} / D$ – диффузионное число Нуссельта, определяет соотношение между массообменом и диффузией, $\text{Le} = D c_g \rho_{g,0} / \lambda$ – число Льюиса, $C = c_k / c_g$ – отношение теплоемкостей, $B = (4/3) \pi r_{k,0}^3 c_k \rho_k^0 n_0 / (c_g \rho_{g,0})$ – начальная массовая концентрация частиц, $\chi = r_{k,0}^2 c_k \rho_k^0 / (3 \text{Nu} \lambda t_*)$ – начальный размер частиц, $\gamma = c_g RT_a^2 / (Q E \rho_{g,0} Y_{1,0})$ – параметр Годеса, $\beta = RT_a / E$ – параметр Аррениуса, характеризует энергию активации реакции, $Z_1 = \rho_k^0 / \rho_{g,0}$ – отношение плотности конденсированной фазы к начальной плотности газа, $Z_2 = \rho_{k,0} / \rho_{g,0}$ – отношение начальной приведенной плотности частиц к начальной плотности газа, $E_{k,g} = E_k / E_g$ – отношение энергий активации горючего в конденсированной и газовой фазах. Принятые обозначения: t – время; x – координата; T – температура; ρ – плотность; ρ_k^0 – плотность вещества частиц; u_g – скорость газа; u_k – скорость частиц; c – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; D – коэффициент диффузии; μ – вязкость; α – коэффициент теплоотдачи; r – радиус частиц; n – количество частиц в единице объема; R – универсальная газовая постоянная; j – скорость гетерогенной химической реакции; Y – относительная концентрация; Q – тепловой эффект реакции в газовой фазе; q – тепловой эффект гетерогенной реакции на поверхности частиц; k – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации химической реакции; U_{fr} – скорость распространения фронта горения; β_m – коэффициент массоотдачи; τ_{tr} – сила, действующая на частицы со стороны газа; M_{ij} , ν_{ij} – молекулярные массы и стехиометрические коэффициенты в реакциях. Индексы: g – газ, k – частицы, * – масштаб, 0 – начальные условия, 1 – горючее, 2 – окислитель.

Система уравнений (1) – (10) с граничными и начальными условиями (11), (12) решалась численно. Уравнения (1) – (3) решались по неявной разностной схеме, конвективные слагаемые аппроксимировались разностями против потока. Значения температуры газа на новом временном слое использовались для нахождения плотности газа из уравнения (6). Затем из уравнения сохранения массы (4) определяли скорость газа. Уравнения (5), (7) – (9) решались по явной разностной схеме.

Расчеты проводились при значениях параметров: $\delta = 700$, $\mu = 0.25$, $\gamma = 0.1$, $\beta = 0.07$, $Le = 1$, $Nu = 1$, $\nu_1\mu_1 = 16$, $\nu_2\mu_2 = 64$, $Y_{1,0} = 0.05$, $Y_{2,0} = 0.2$, $Pr = 1$, $C = 1$, $Z_1 = 1000$. Параметры, характеризующие частицы, варьировались в интервале значений: $B = 0.005–0.1$, $\chi = 100–10000$, концентрация горючего $C_{1,0} = 0.6–1.0$.

На рис. 1 показаны распределения по пространству безразмерных значений параметров среды, построенные через промежутки времени, соответствующие перемещению фронта горения на расстояние $\Delta\xi = 3000$. Положение фронта горения определялось пространственной координатой ξ , в которой содержание горючего равнялось половине от входного значения $C_{1,0}$.

Как для относительно мелких частиц ($\chi = 100$, рис. 1), так и для относительно крупных, при данных параметрах газозвеси газ и частицы движутся вместе, с небольшим отличием скорости газа и частиц (рис. 1, *a, z, d*). При значении начальной концентрации газового горючего $C_{1,0} = 1$ реакция идет преимущественно в газовой фазе, и частицы в этой реакции практически не принимают участия. В случае же недостатка газофазного горючего, как показано на рис. 1, реакция на частицах оказывает влияние на процесс горения. В присутствии мелких частиц (рис. 1) реакция протекает активнее, чем в присутствии крупных. В случае мелких частиц окислитель расходуется полностью (рис. 1, *б*) в узком фронте реакции, что вызывает больший рост температуры (рис. 1, *a*) по сравнению со случаем крупных частиц, где окислитель, оставшийся от реакции в газовой фазе, продолжает медленно реагировать с частицами за фронтом. Этот эффект объясняется большей суммарной площадью поверхности мелких частиц дисперсной фазы.

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчетов установившейся скорости распространения фронта пламени. Видно, что наличие реагирующих частиц дисперсной фазы приводит к уменьшению скорости горения при больших значениях концентрации горючего в газовой фазе. Это происходит потому, что, нагреваясь, частицы понижают температуру во фронте пламени. Также они забирают часть окислителя из газовой фазы на реакцию. А так как тепловой эффект их сгорания меньше, чем реакции в газовой фазе, то это также приводит к уменьшению скорости горения. При уменьшении концентрации горючего наличие реагирующих частиц малых размеров приводит к увеличению скорости фронта горения, по сравнению со скоростью в газе без частиц. Это связано с увеличением общего теплового эффекта от реакций горения газового и дисперсного горючего. Для крупных частиц такого эффекта не наблюдается.

С ростом концентрации газообразного горючего при фиксированной массовой концентрации *k*-фазы, реакционные способности реагирующих частиц снижаются. Выгорание частиц уменьшается настолько, что можно рассматривать реагирующие частицы как инертные. Скорость распространения фронта пламени по сравнению с чистым газом уменьшается (рис. 2, *в* и 3).

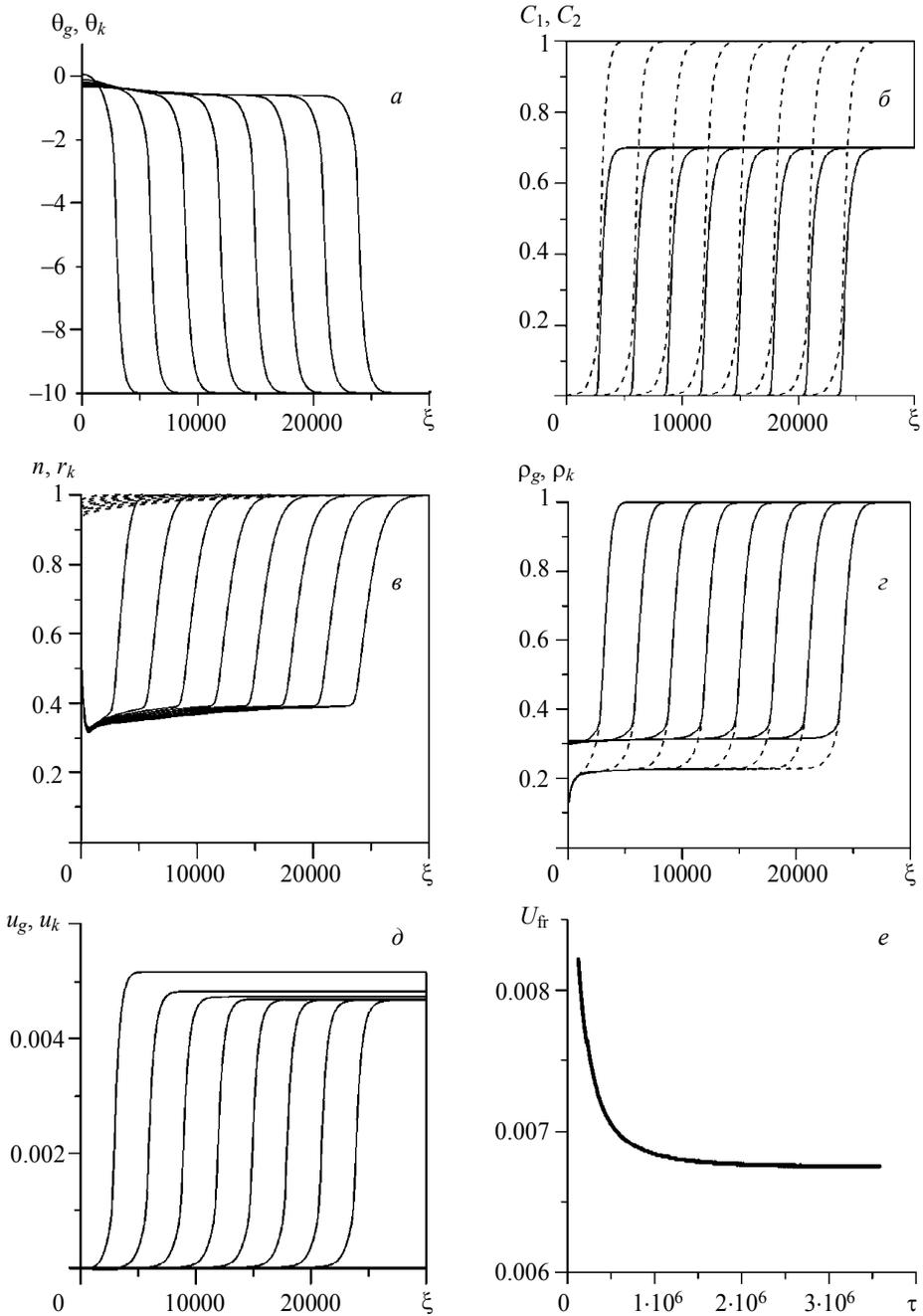


Рис. 1. Распределение безразмерных параметров газозвеси при $\chi = 100$, $B = 0.06$, $C_{1,0} = 0.7$. Температуры частиц и газа (а), концентрации горючего и окислителя (пунктирная линия) (б), относительного числа частиц в единице объема газа и радиуса частиц (в), плотности газа и приведенной плотности дисперсной фазы (пунктирная линия) (г), скорости движения газа и частиц (д), зависимость скорости распространения фронта пламени от безразмерного времени (е)

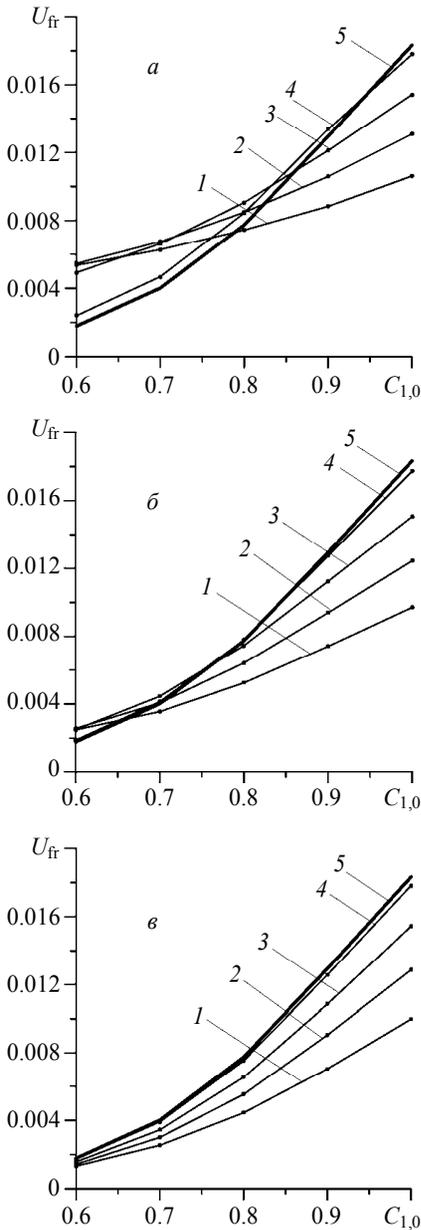


Рис. 2. Зависимости установившейся скорости фронта пламени U_{fr} от безразмерной начальной концентрации горючего в газовой фазе $C_{1,0}$, при различных значениях параметров дисперсной фазы (размеров частиц и их массовой концентрации): а – $\chi = 100$; б – $\chi = 1000$, в – $\chi = 10000$; кр. 1 – $B = 0,1$; кр. 2 – $B = 0,06$; кр. 3 – $B = 0,03$; кр. 4 – $B = 0,005$; кр. 5 – беспылевая газовая смесь

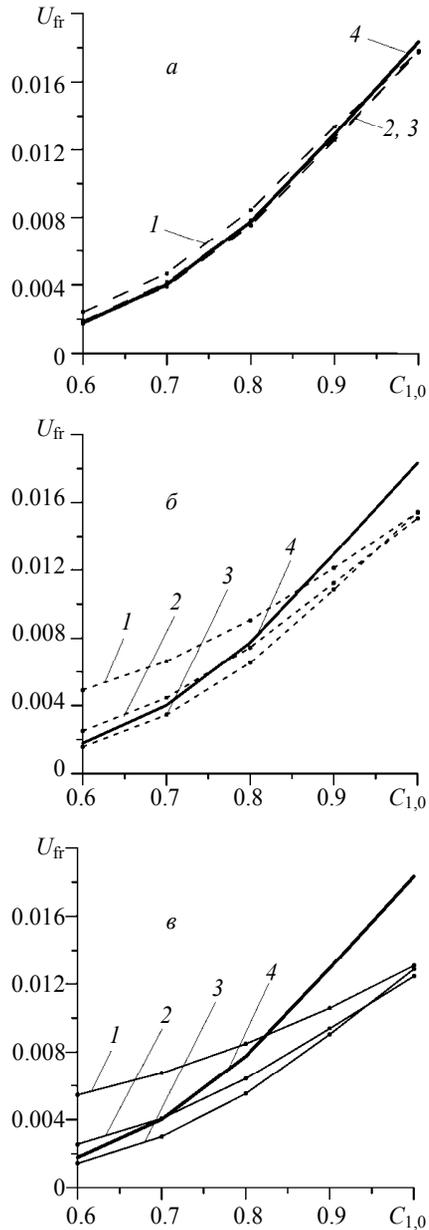


Рис. 3. Зависимости установившейся скорости фронта пламени от начальной концентрации горючего в газовой фазе $C_{1,0}$, при различных значениях параметров дисперсной фазы (размеров частиц и их массовой концентрации): а – $B = 0,005$; б – $B = 0,03$; в – $B = 0,06$; кр. 1 – $\chi = 100$; кр. 2 – $\chi = 1000$; кр. 3 – $\chi = 10000$; кр. 4 – незапыленная газовая смесь

Это может быть объяснено тем, что начинает преобладать реакция в газовой фазе. Для частиц малого размера ($\chi = 100$) при начальных значениях концентрации горючего $C_{1,0} < 0.8$ наблюдается некоторый прирост скорости горения, по сравнению с газом без частиц (рис. 3). Это происходит благодаря большой площади поверхности частиц малых размеров.

Выводы

Получены зависимости установившейся скорости фронта пламени от концентрации горючего в газовой фазе при различных значениях массовой концентрации и размерах реагирующих с окислителем частиц. Показано, что в случае малых начальных концентраций горючего в газе ($C_{1,0}$) присутствие в газовой смеси реагирующих частиц увеличивает скорость горения. При значениях концентрации горючего в газе, близкой к стехиометрической, частицы тормозят скорость распространения пламени. Это следует учитывать при проектировании автоматических систем огнепреграждения и пожаровзрывобезопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. М.: Химия, 1986. 216 с.
2. Таубкин С.И., Таубкин И.С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. М.: Химия, 1976. 264 с.
3. Dementiev A.A., Krainov A.Yu. Effect of inert particles on the rate of flame propagation in igniting it from a «closed end» and an «open end» // 7 ISFS: book of abstracts. 2011. URL: <http://www.kinetics.nsc.ru/ксп/7ISFS/CD/Theses/OP-28.pdf> (дата обращения 20.08.2012).
4. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. 492 с.
5. Мержанов А.Г., Хайкин Б.И., Шкадинский К.Г. Установление стационарного распространения пламени при зажигании газа накаленной поверхностью // ПМТФ. 1969. № 5. С. 42–48.
6. Шкадинский К.Г., Барзыкин В.В. Закономерности зажигания газов накаленной поверхностью с учетом диффузии и гидродинамики // ФГВ. 1968. Т. 4. № 2. С. 176–181.
7. Дементьев А.А., Крайнов А.Ю. К вопросу о распространении ламинарного пламени в газе с инертной пылью // ФГВ. 2011. Т. 47. № 4. С. 70–75.

Статья поступила 11.06.2015 г.

Dement'ev A.A., Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. ON THE INFLUENCE OF THE FUEL CONCENTRATION IN A HYBRID GAS-SUSPENSION ON THE SPEED OF THE COMBUSTION FRONT PROPAGATION

DOI 10.17223/19988621/36/7

A physico-mathematical model of combustion of the hybrid gas suspension with allowance for the heat expansion of the gas mixture and the movement of the phases is presented. Distributions of medium parameters in the combustion front are presented. Results of the numerical study of the dependence of the combustion front velocity in the hybrid gas suspension on the concentration of the gas fuel in the mixture, size of the reacting particles, and the mass concentration of the particles. The presence of reacting particles of the dispersed phase decreases the combustion rate at large values of fuel concentration in the gas phase. This occurs due to the fact that heated particles decrease the temperature in the front of the flame. They also take a part of the oxidizer from the gas phase for the reaction. Since the thermal effect from their combustion is lower than that of the reaction in the gas phase, this also leads to a decrease in the combustion rate. With a decrease in the concentration of the fuel, the presence of small-size reacting particles leads to an increase in the combustion rate in comparison with the case of combustion in a gas mixture with-

out particles. It is explained by the increase in the general heat effect of combustion reactions of the gas and dispersible fuel.

Keywords: hybrid gas suspension, reactant, laminar flame, combustion rate

DEMENT'EV Aleksandr Aleksandrovich (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: daa024@ftf.tsu.ru

KRAINOV Alexey Yurievich (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

MOISEEVA Ksenia Mihailovna (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: moiseeva_km@t-sk.ru

REFERENCES

1. Korol'chenko A.Ya. *Pozharovzryvoopasnost' promyshlennoy pyli*. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 216 p. (in Russian)
2. Taubkin S.I., Taubkin I.S. *Pozharo- i vzryvoopasnost' pylevidnykh materialov i tekhnologicheskikh protsessov ikh pererabotki*. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 264 p. (in Russian)
3. Dementiev A.A., Krainov A.Yu. Effect of inert particles on the rate of flame propagation in igniting it from a «closed end» and an «open end». *7 ISFS: book of abstracts*, 2011. URL: <http://www.kinetics.nsc.ru/kcp/7ISFS/CD/Theses/OP-28.pdf> (data obrashcheniya 20.08.2012).
4. Frank-Kamenetskiy D.A. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 492 p. (in Russian)
5. Merzhanov A.G., Khaikin B.I., Shkadinskii K.G. Establishment of steady flame propagation when igniting a gas by a heated surface. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1969, no. 5(10), pp. 725–730.
6. Shkadinskii K.G., Barzykin V.V. Hot-surface ignition of gases with allowance for diffusion and hydrodynamics. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1968, no. 2 (4), pp. 100–104.
7. Dement'ev, A.A., Krainov, A. Yu. On the problem of laminar flame propagation in a gas with an inert dust. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2011, vol. 47, no. 4, pp. 436–441.