

## МЕХАНИКА

УДК 536.46

А.А. Дементьев, А.Ю. Крайнов

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ВЗВЕСИ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ НА СКОРОСТЬ ФРОНТА ГОРЕНИЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Исследуется зависимость скорости горения газовой смеси с инертными частицами от концентрации горючего, взятого в стехиометрическом соотношении с окислителем и в недостатке. Приведено сравнение результатов расчетов, полученных на основе двух математических моделей: с учетом теплового расширения, без его учета. Получены зависимости скорости распространения фронта горения от размера и массовой концентрации инертных частиц при различных начальных концентрациях горючего.

**Ключевые слова:** *газовзвесь, ламинарное пламя, инертные частицы, скорость горения.*

Газодисперсные системы, к которым относятся различные газовзвеси инертных частиц, а также частиц органических горючих, часто используются в химической, пищевой промышленности, инертные порошки используются для пожаротушения [1–5]. Исследование и моделирование процессов, происходящих при воспламенении и горении газовзвесей, изучение качественных и количественных характеристик – скоростей горения, температур, плотностей и т.д., является необходимым для эффективного развития промышленных технологий.

В данной работе представлены результаты теоретического исследования горения газовой смеси со взвешенными в ней мелкими инертными частицами с учетом теплового расширения газа. Проведено сравнение результатов с результатами вычислений по модели, в которой не учитывается тепловое расширение газовой фазы и движение частиц.

#### Физико-математическая постановка задачи

Горючая газовая смесь с взвесью инертной пыли занимает область  $0 < x < \infty$ . Считается, что реакция в газовой фазе проходит по второму порядку. Частицы одного размера, сферической формы, с радиусом  $r_k$ , в начальный момент времени распределены равномерно в газовой смеси. В координате  $x = 0$  размещена горячая непроницаемая стенка с температурой равной адиабатической температуре сгорания газа в изобарических условиях. Такое граничное условие моделирует зажигание у «закрытого торца» [6]. Горение протекает в ламинарном режиме при постоянном давлении [7–9]. Предполагается, что число Льюиса и коэффициент теплопроводности не зависят от температуры; теплообмен между газовой фазой и частицами описывается законом Ньютона; при движении на частицы со стороны газа

действует сила сопротивления, описываемая законом Стокса, из-за малой объемной концентрации частиц пренебрегаем их обратным влиянием на движение газа.

Система уравнений, описывающая процессы в горячем газе с инертными частицами, в безразмерной форме запишется в виде

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

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

$$\frac{\partial C_2}{\partial \tau} + \bar{u} \frac{\partial C_2}{\partial \xi} = \frac{Le}{\bar{\rho}_g} \frac{\partial^2 C_2}{\partial \xi^2} - \left(\frac{\nu_2 \mu_2}{\nu_1 \mu_1}\right) \left(\frac{Y_{10}}{Y_{20}}\right) \gamma \bar{\rho}_g C_1 C_2 \exp\left(\frac{\theta_g}{1 + \beta \theta_g}\right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_g}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{\rho}_g \bar{u}}{\partial \xi} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_k}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{\rho}_k \bar{w}}{\partial \xi} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta_k}{\partial \tau} + \bar{w} \frac{\partial \theta_k}{\partial \xi} = \frac{(\theta_g - \theta_k)}{\chi}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_k \bar{w}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{\rho}_k \bar{w}^2}{\partial \xi} = \frac{3}{2} \frac{PrC}{\chi Nu} \bar{\rho}_k (\bar{u} - \bar{w}); \quad (7)$$

$$\bar{\rho}_g = (1 - \beta/\gamma) / (1 + \beta \theta_g). \quad (8)$$

**Граничные условия:**

$$\theta_g(0, \tau) = 0, \quad \frac{\partial \theta_g(\infty, \tau)}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial \theta_k(0, \tau)}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial \bar{\rho}_k(0, \tau)}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial C_1(0, \tau)}{\partial \xi} = 0, \\ \frac{\partial C_2(0, \tau)}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial C_1(\infty, \tau)}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial C_2(\infty, \tau)}{\partial \xi} = 0, \quad \bar{u}(0, \tau) = 0, \quad \bar{w}(0, \tau) = 0. \quad (9)$$

**Начальные условия:**

$$\theta_g(\xi, 0) = -1/\gamma, \quad \theta_k(\xi, 0) = -1/\gamma, \quad C_1(\xi, 0) = C_{10}, \quad C_2(\xi, 0) = 1, \\ \bar{u}(\xi, 0) = 0, \quad \bar{w}(\xi, 0) = 0, \quad \bar{\rho}_k(\xi, 0) = 1. \quad (10)$$

Уравнение (1) описывает перенос тепла в газовой смеси за счет теплопроводности, конвекции, с учетом теплообмена между газовой фазой и частицами, тепловыделения за счет химической реакции; (2) – уравнение концентрации горючего; (3) – уравнение концентрации окислителя; (4), (5) – уравнения сохранения массы газа и частиц; (6) – уравнение энергии частицы, с учетом ее движения и теплообмена с газом; (7) – уравнение движения частиц. (8) – уравнение состояния идеального газа, записанное при постоянном давлении.

При записи системы уравнений выбраны следующие масштабы: времени  $t^* = RT_a^2 c_g / (Q E \rho_{g0} Y_{10} Y_{20} k_0 \exp(-E/(RT_a)))$ ; координаты  $x^* = (\lambda t^* / (c_g \rho_{g0}))^{1/2}$ ; скорости

$V_* = x/t_*$ ; плотности газа  $\rho_{g0}$  – начальная плотность газа; приведенной плотности частиц  $\rho_{k0}$  – начальная приведенная плотность частиц; температуры  $T_* = RT_a^2/E$ , где  $T_a$  – адиабатическая температура продуктов сгорания газа в изобарических условиях. Безразмерные переменные:  $\tau = t/t_*$  – время;  $\xi = x/x_*$  – координата;  $\theta_{g,k} = (E/RT_a^2)/(T_{g,k} - T_a)$  – температура;  $C_1 = Y_1/Y_{10}$ ,  $C_2 = Y_2/Y_{20}$  – относительные концентрации горючего и окислителя в газовой фазе, где  $Y_1 = \rho_1/\rho_g$ ,  $Y_2 = \rho_2/\rho_g$ ,  $\bar{\rho}_g = \rho_g/\rho_{g0}$  – плотность газа;  $\bar{\rho}_k = \rho_k/\rho_{k0}$  – приведенная плотность частиц;  $\bar{u} = u/V_*$  – скорость газа;  $\bar{w} = w/V_*$  – скорость частиц. Индексы:  $g$  – газ,  $k$  – частицы,  $0$  – начальные условия,  $1$  – горючее,  $2$  – окислитель,  $*$  – масштаб, черта над обозначением – безразмерная величина.

Безразмерные параметры (критерии):  $Pr = \eta_g c_g/\lambda$  – число Прандтля,  $Nu = ar_k/\lambda$  – число Нуссельта,  $Le = Dc_g\rho_{g0}/\lambda$  – число Льюиса,  $C = c_k/c_g$  – отношение теплоемкостей,  $B = 4\pi r_k^3 c_k \rho_{k0} n / (3c_g \rho_{g0})$  – начальная массовая концентрация частиц,  $\chi = r_k^2 c_k \rho_{k0} / 2Nu\lambda t_*$  – размер частиц,  $\gamma = c_g RT_a^2 / (QEY_{10})$ ,  $\beta = RT_a/E$  – параметры, характеризующие тепловой эффект и энергию активации химической реакции.

Обозначения:  $t$  – время,  $x$  – координата,  $T$  – температура,  $Y$  – отношение плотности окислителя/горючего к плотности газовой смеси,  $\rho$  – плотность,  $u$  – скорость газа,  $w$  – скорость частиц,  $c$  – удельная теплоемкость,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $D$  – коэффициент диффузии,  $\eta_g$  – коэффициент вязкости,  $\mu$  – молекулярная масса,  $\nu$  – стехиометрический коэффициент,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $r_k$  – радиус частиц,  $n$  – количество частиц в единице объема,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $Q$  – тепловой эффект реакции,  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель,  $E$  – энергия активации химической реакции.

Математическая модель (1) – (10) описывает распространение пламени в газовой смеси с инертными частицами с учетом теплового расширения. При  $\bar{u} \equiv 0$ ,  $\bar{w} \equiv 0$ ,  $\rho_g \equiv 1$ , модель переходит в теплодиффузионную модель горения газодисперсных сред [10–13].

Система уравнений (1) – (10) решалась численно. Уравнения (1) – (3) решались по неявной разностной схеме, конвективное слагаемое аппроксимировалось разностями против потока. Значения температуры газа на новом временном слое использовались для нахождения плотности газа из уравнения (8). Затем из уравнения сохранения массы (4) определяли скорость газа. Уравнения (5) – (7) решались по явной разностной схеме.

Расчеты проводились при значениях параметров:  $\gamma = 0,1$ ,  $\beta = 0,07$ ,  $Le = 1$ ,  $Nu = 1$ ,  $\nu_1\mu_1 = 16$ ,  $\nu_2\mu_2 = 64$ ,  $Y_{10} = 0,05$ ,  $Y_{20} = 0,2$ ,  $Pr = 1$ ,  $C = 1$ ,  $B = 0,15$ . В расчетах варьировались значения  $C_1$  в интервале от 1 до 0,7, параметр  $\chi$  в интервале от 2000 до 500000,  $B$  в интервале от 0 до 0,25.

В численных экспериментах горение газозвеси инициировали передачей тепла от горячей стенки. В момент времени, когда фронт пламени достигал безразмерной координаты  $\xi = 500$ , граничное условие  $\theta_g(0, \tau) = 0$  заменялось граничным условием  $\partial\theta_g(0, \tau)/\partial\xi = 0$ . Скорость фронта определялась скоростью перемещения координаты с концентрацией горючего  $C_1 = 0,5$ .

На рис. 1 представлены распределения параметров среды в последовательные моменты времени с интервалом безразмерного времени  $\Delta\tau = 120000$  для модели без учета теплового расширения, на рис. 2 – для модели с учетом расширения при значениях  $\chi = 50000$ ,  $C_1 = 0,8$ ,  $B = 0,15$ .

Температура частиц во фронте горения ниже, чем у газовой смеси, за фронтом их температуры выравниваются (рис. 1, а, 2, а). Концентрация горючего, взятого в недостатке, за фронтом пламени обращается в ноль. Окислитель, взятый в избытке, расходуется до концентрации  $C_2 = 0,2$  (рис. 1, б, 2, б).

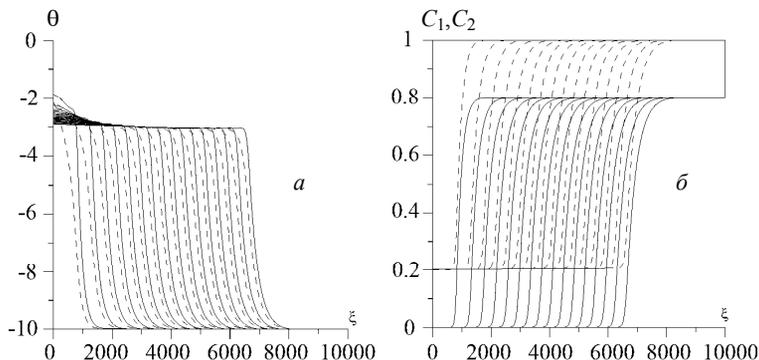


Рис. 1. Распределения температуры (а) (сплошная линия – газ, пунктир – инертные частицы), концентраций (б) (сплошная линия – горючее, пунктир – окислитель). Модель без учета расширения

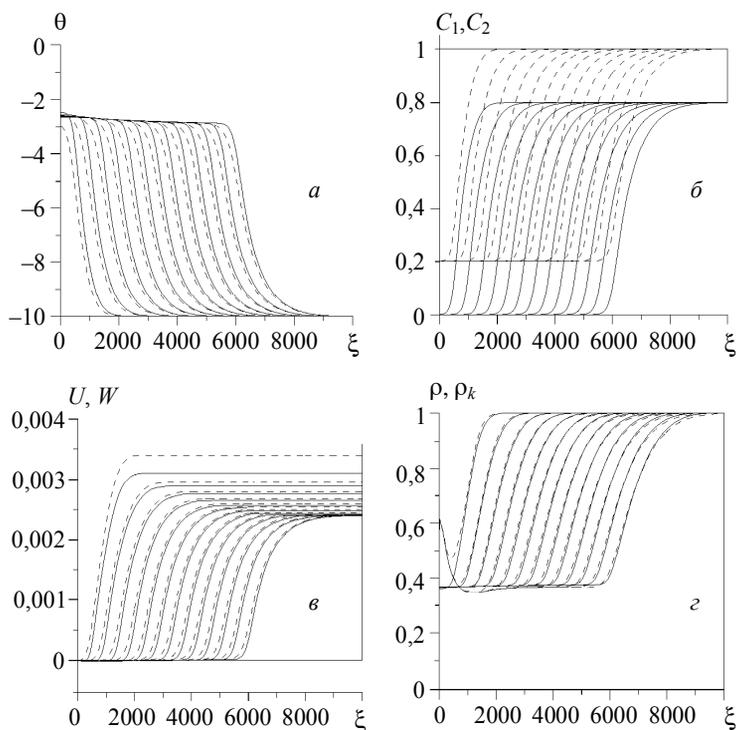


Рис. 2. Распределения температуры (а), концентраций (б), скорости (в), плотности (г); (а, в, г: сплошная линия – газ, пунктир – инертные частицы), (б: сплошная линия – горючее, пунктир – окислитель). Модель с учетом расширения

Перед установившимся фронтом горения скорость газа и частиц имеет одинаковое значение, позади фронта скорость газа и частиц равна нулю, во фронте прогрева газовой фазы частицы имеют скорость выше скорости газовой фазы из-за их механической инерции (рис. 2, в). Частицы в области химических превращений имеют увеличенную приведенную плотность (рис. 2, з). В силу этого эффекта в зоне интенсивных химических реакций локально присутствует большее количество частиц, которые локально понижают температуру в зоне реакции сильнее, чем это получается в расчетах на основе модели без учета расширения газа и относительного движения частиц. Подогретые в зоне химических реакций частицы и имеющие скорость большую, чем газ, переносят тепло в зону прогрева перед фронтом горения. Это способствует растяжению волны горения в газе.

На рис. 3 представлены зависимости скорости горения от начальной концентрации горючего, полученные на основе модели без учета теплового расширения (рис. 3, а) и с его учетом (рис. 3, б) при массовой концентрации частиц  $B = 0,15$  и трех значениях параметра  $\chi$ , характеризующего размер частиц. Видно, что тепловое расширение увеличивает скорость распространения фронта пламени в чистом газе на величину от 20 до 30 % (кривые 1 на рис. 3, а, б). Присутствие крупных инертных частиц в газе не сказывается на скорости распространения пламени в модели без учета теплового расширения газа (кривая 2, рис. 3, б). Расчет на основе модели с учетом теплового расширения показывает, что скорость пламени уменьшается, несмотря на то, что частицы во фронте пламени не успевают нагреться, забрав тепло из зоны химической реакции. Этот эффект обусловлен меньшей температурой газа позади фронта реакции и в связи с этим меньшим объемным расширением газа. С уменьшением размера частицы начинают влиять на скорость химической реакции во фронте горения, уменьшая в нем температуру (кривые 3, 4, рис. 3, а, б). Существует интервал значений  $\chi$ , при которых частицы слабо влияют на скорость пламени при стехиометрическом и близком к нему соотношении окислителя и горючего и сильно влияют на скорость при значительном отклонении состава газовой смеси от стехиометрической (кривые 3, рис. 3, а, б).

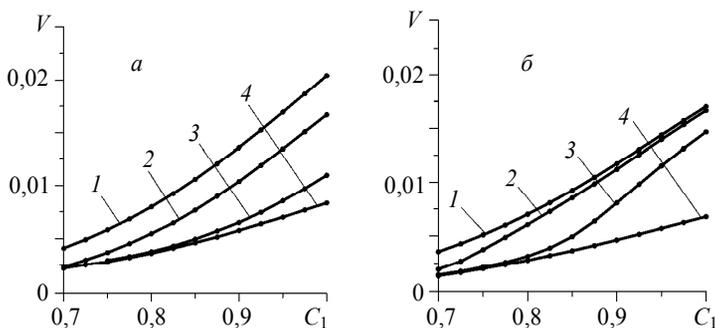


Рис. 3. Зависимости значений скоростей фронта пламени от концентрации горючего: а – модель с учетом расширения (1 – незапыленная газовая смесь, 2 –  $\chi = 500000$ , 3 –  $\chi = 50000$ , 4 –  $\chi = 2000$ ); б – модель без учета расширения (1 – незапыленная газовая смесь, 2 –  $\chi = 300000$ , 3 –  $\chi = 50000$ , 4 –  $\chi = 2000$ )

На рис. 4 представлены зависимости относительной безразмерной скорости распространения фронта пламени от параметров дисперсной фазы –  $B$  и  $\chi$  при двух значениях начальной концентрации горючего в газовой смеси ( $C_1 = 0,85$  и

$C_1 = 1$ ), рассчитанные по модели, учитывающей тепловое расширение.  $V_0$  – значение скорости фронта горения для чистой газовой смеси, которое имеет значение при  $C_1 = 1 - V_0 = 0,02$ , при  $C_1 = 0,85 - V_0 = 0,01$ . Параметр  $\chi$  изменялся в следующем интервале:  $2000 \leq \chi \leq 500\,000$ , параметр  $B$ :  $0 \leq B \leq 0,25$ . Из рис. 4 видно, что при фиксированном  $\chi$  с увеличением массовой концентрации скорость пламени уменьшается. Чем мельче частицы, тем их влияние на скорость пламени значительнее.

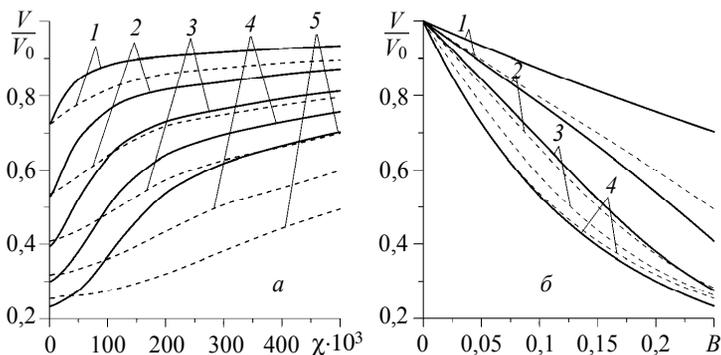


Рис. 4. Зависимости значений относительных скоростей фронта пламени от параметров дисперсной инертной фазы, пунктир – концентрация  $C_1 = 0,85$ , сплошная линия –  $C_1 = 1$ : а – зависимость от величины, характеризующей размер частиц  $\chi$  ( $1 - B = 0,05$ ,  $2 - B = 0,1$ ,  $3 - B = 0,15$ ,  $4 - B = 0,2$ ,  $5 - B = 0,25$ ); б – зависимость от массовой концентрации  $B$  ( $1 - \chi = 500\,000$ ,  $2 - \chi = 120\,000$ ,  $3 - \chi = 50\,000$ ,  $4 - \chi = 2000$ )

Сформулирована математическая модель горения газовой смеси с взвешенными в ней инертными частицами, учитывающая тепловое расширение газа и относительное движение фаз. Получены зависимости скорости распространения пламени от массовой концентрации, размера инертных частиц и концентрации горючего в газовой смеси.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бесчастнов М.В., Соколов В.М. Предупреждение аварий в химических производствах. М.: Химия, 1979. 392 с.
2. Таубкин С.И., Таубкин И.С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. М.: Химия, 1976. 264 с.
3. Абдурагимов И. М., Говоров В. Ю., Макаров В. Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров – М.: Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, 1980.
4. Баратов А.Н., Вогман Л.П. Огнетушащие порошковые составы. М.: Стройиздат, 1982.
5. Корольченко А.А. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. М.: Химия, 1986. 216 с.
6. Krainov A.Yu., Dementiev A.A. Effect of inert particles on the rate of flame propagation in igniting it from a «closed end» and an «open end» // Proc. 7<sup>th</sup> International Seminar on Flame Structure 7ISFS, July 11 – July 19, 2011, Novosibirsk, Russia. P. 43.
7. Мержанов А.Г., Хайкин Б.И., Шкадинский К.Г. Установление стационарного распространения пламени при зажигании газа накаливаемой поверхностью // ПМТФ. 1969. № 5. С. 42–48.

8. Шкадинский К.Г., Барзыкин В.В. Закономерности зажигания газов накаливаемой поверхностью с учетом диффузии и гидродинамики // ФГВ. 1968. Т. 4. № 2. С. 176–181.
9. Дементьев А.А., Крайнов А.Ю. К вопросу о распространении ламинарного пламени в газе с инертной пылью // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47. № 4. С. 70–75.
10. 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.
11. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.
12. Krainov A.Yu. Flame Propagation in the suspension of combustible particles and gases // Archivum Combustionis. 1996. V.16. No. 3–4. P. 189–198.
13. Крайнов А.Ю. Распространение пламени в смеси горючих газов и частиц // ФГВ. 2000. Т. 36. № 2. С. 3–9.

Статья поступила 12.09.2012 г.

*Dementiev A.A., Krainov A.Yu.* STUDYING THE INFLUENCE OF RELATIVE MOTION OF SUSPENDED INERT PARTICLES ON THE RATE OF THE GAS MIXTURE COMBUSTION FRONT. The dependence of the burning rate of a gas mixture with inert particles on concentration of fuel taken in the stoichiometric ratio with the oxidant and under the lack of fuel is studied. The compared calculation results were obtained based on two mathematical models: with allowance for the thermal expansion and without regard to it. The dependences of the propagation velocity of the combustion front on the size and mass concentration of the inert particles were obtained at different initial concentrations of fuel.

Keywords: gas mixture, laminar flame, inert particles, the burning rate.

*DEMENTIEV Aleksandr Aleksandrovich* (Tomsk State University)

E-mail: daa024@ftf.tsu.ru

*KRAINOV Alexey Yurievitch* (Tomsk State University)

E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru