

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ИСКРОЙ СМЕСИ ГАЗООБРАЗНЫХ ОКИСЛИТЕЛЯ И ГОРЮЧЕГО С РЕАГИРУЮЩИМИ ЧАСТИЦАМИ

А. Ю. Крайнов, В. А. Баймлер

Томский государственный университет, 634050 Томск, akrainov@ftf.tsu.ru

На основе двухтемпературной теплодиффузионной модели горения рассмотрена задача об искровом зажигании газозвеси «топливо — окислитель — реагирующие частицы». Получены зависимости минимальной энергии зажигания от параметров, характеризующих дисперсную фазу. Выявлено неоднозначное влияние присутствия частиц экзотермически реагирующей дисперсной фазы на минимальную энергию искры, приводящую к зажиганию газозвеси. Полученные значения нижнего и верхнего концентрационных пределов воспламенения метановоздушной смеси со взвешенными в ней частицами угольной пыли хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: гибридная газозвесь, искровое зажигание, критические условия, концентрационные пределы.

Во многих современных технологических процессах химической промышленности используются материалы, находящиеся в дисперсном состоянии. В некоторых случаях внутри промышленных аппаратов или в открытом пространстве формируются газозвеси, состоящие из смеси газов (окислителя, горючего и инертного) со взвешенными в ней частицами дисперсной фазы, гетерогенно реагирующей с окислителем газовой фазы [1]. Такие газозвеси возникают при сушке дисперсных материалов и обязательно при добыче угля и его переработке, так как уголь содержит адсорбированный на поверхности пор метан и другие легколетучие горючие компоненты [2], которые постепенно выходят в газовую фазу. Наличие горючих газов в несущей фазе газозвеси смещает пределы горения и концентрационные пределы воспламенения [1], что требует использования специальных мер безопасности [3, 4]. Особенности химического реагирования в подобных системах изучены слабо. В [1] приведены данные по искровому воспламенению таких газозвесей, в [5–7] предложена модель горения, изучены закономерности распространения фронта горения и особенности зажигания горячей стенкой и очагового воспламенения.

Цель данной работы — исследование закономерностей искрового зажигания газовых сме-

сей окислителя и горючего с твердыми реагирующими частицами на основе теплодиффузионной модели горения таких газозвесей.

Пусть в пространстве образовалось неподвижное облако газозвеси; содержание горючего и окислителя в газовой фазе и массовая концентрация дисперсной фазы известны. Предполагается, что сферические частицы одного диаметра равномерно распределены в газе; теплообмен между газом и частицами происходит по закону Ньютона; реакция на поверхности частиц идет с окислителем; скорость химической реакции в газе и на поверхности частиц зависит от температуры по закону Аррениуса; термическое расширение газа не учитывается. Искра моделируется мгновенным нитевидным источником тепловыделения. Требуется найти критические значения энергии искры, разграничивающие режимы «зажигание — отсутствие зажигания газозвеси», и зависимости ее от концентраций компонентов газовой смеси, массовой концентрации дисперсной фазы и других параметров задачи.

Для исследования искрового зажигания газозвеси используем теплодиффузионную модель горения смеси горючих газов и частиц [5, 6]. Записанная в цилиндрической системе координат в безразмерной форме система уравнений, описывающая горение газозвеси с учетом стехиометрических коэффициентов веществ, вступающих в реакцию [8], имеет вид

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 98-01-03009).

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

$$\frac{\partial \theta_p}{\partial \tau} = \frac{1}{\bar{r}_p^2 \chi} (\theta_g - \theta_p) + \frac{\delta \bar{J}}{\bar{r}_p \chi} Y_{2,0}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial \tau} = \text{Le} \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial C_1}{\partial \xi} \right) - \gamma C_1 C_2 \exp \frac{\theta_g}{1 + \beta \theta_g}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial \tau} = \text{Le} \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial C_2}{\partial \xi} \right) - a_1 \gamma C_1 C_2 \exp \frac{\theta_g}{1 + \beta \theta_g} + a_2 \frac{B}{C} \frac{\partial \bar{r}_p^3}{\partial \tau}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{r}_p^3}{\partial \tau} = - \frac{\bar{r}_p^2}{\chi} \bar{J} \text{Le} C \frac{\text{Nu}_d}{\text{Nu}_t} Y_{2,0}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\bar{\rho}_g + \frac{B}{C} \bar{r}_p^3 \right) = 0, \quad (6)$$

$$\bar{J} = C_2 \frac{\exp(E \theta_p / (1 + \beta \theta_p))}{1 + \mu \bar{r} \exp(E \theta_p / (1 + \beta \theta_p))}, \quad (7)$$

$$\rho_g = \rho_1 + \rho_2 + \rho_{in}.$$

Искра моделируется мгновенным нитевидным источником тепловыделения в точке $\xi = 0$. После выделения энергии за время τ_0 в газе формируется профиль температуры в виде функции Гаусса [9–11]. Задание начального распределения температуры газа в виде функции Гаусса обсуждена в [12], где показано, что с уменьшением зоны энерговыведения от искры и времени ее действия минимальная энергия зажигания асимптотически стремится к постоянной величине.

Начальные условия:

$$\theta_g(\tau_0, \xi) = \frac{M}{\tau_0} \exp \left(- \frac{\xi^2}{4\tau_0} \right) + \theta_0,$$

$$\theta_p(\tau_0, \xi) = \theta_0, \quad C_1(\tau_0, \xi) = 1, \quad C_2(\tau_0, \xi) = 1, \quad (8)$$

$$\bar{r}_{p,0}(\tau_0, \xi) = 1, \quad \bar{\rho}_g(\tau_0, \xi) = 1.$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial \theta_g(\tau, 0)}{\partial \xi} = \frac{\partial C_1(\tau, 0)}{\partial \xi} = \frac{\partial C_2(\tau, 0)}{\partial \xi} = 0,$$

$$\frac{\partial \theta_g(\tau, \infty)}{\partial \xi} = \frac{\partial C_1(\tau, \infty)}{\partial \xi} = \frac{\partial C_2(\tau, \infty)}{\partial \xi} = 0. \quad (9)$$

При записи математической постановки задачи в безразмерной форме (1)–(9) использовались масштабы: $t_* = (c_g R T_*^2 / E_g) / (Q \rho_{g,0} k_{0,g} \exp(-E_g / R T_*) Y_{1,0} Y_{2,0})$ — характерное время химической реакции в газе при температуре $T_* = T_{ad} - b R T_{ad}^2 / E_g$ (масштаб температуры); $x_* = \sqrt{\lambda_g t_* / c_g \rho_{g,0}}$ — характерная толщина зоны химической реакции в газе; $\rho_* = \rho_{g,0}$ — начальная плотность газа; $r_* = r_{p,0}$ — начальный размер частиц. Безразмерные переменные: $\tau = t / t_*$, $\xi = x / x_*$, $\theta = (E_g / R T_*^2)(T - T_*)$, $\bar{\rho}_g = \rho_g / \rho_{g,0}$, $\bar{r}_p = r_p / r_*$, $C_1 = Y_1 / Y_{1,0}$, $C_2 = Y_2 / Y_{2,0}$, $Y_1 = \rho_1 / \rho_{g,0}$, $Y_2 = \rho_2 / \rho_{g,0}$. Безразмерные параметры: $\beta = R T_* / E_g$, $\gamma = c_g R T_*^2 / Q \rho_{g,0} E_g Y_{1,0}$, $B = (4/3) \pi r_{p,0}^3 c_p \rho_p N / c_g \rho_{g,0}$, $\chi = \rho_p c_p r_{p,0}^2 / 3 t_* \text{Nu}_t \lambda_g$, $\delta = q \rho_{g,0} E_g k_{0,p} \exp(-E_g / R T_*) r_{p,0} / R T_*^2 \text{Nu}_t \lambda_g$, $\mu = k_{0,p} \exp(-E_g / R T_*) r_{p,0} / \text{Nu}_d D$, $M = A E_g / 4 \pi \lambda_g t_* R T_*^2$, $\text{Le} = D / (\lambda_g / c_g \rho_{g,0})$, $E = E_p / E_g$, $C = c_p / c_g$, $\text{Nu}_t = \alpha r_{p,0} / \lambda_g$, $\text{Nu}_d = \beta_m r_{p,0} / D$, $a_1 = \nu_{21} \mu_{21} Y_{1,0} / \nu_{11} \mu_{11} Y_{2,0}$, $a_2 = \nu_{22} \mu_{22} / \nu_{12} \mu_{12} Y_{2,0}$, где t — время; x — координата; T — температура; ρ — плотность; Y — массовая концентрация компонентов; c — теплоемкость; λ , D , α , β_m — коэффициенты теплопроводности, диффузии, теплообмена, массообмена; Nu_t , Nu_d — тепловое и диффузионное числа Нуссельта; r_p — радиус частицы; N — числовая концентрация частиц; $Q \rho_{g,0}$, q — тепловые эффекты гомогенной и гетерогенной химических реакций; k_0 — предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса; E — энергия активации химической реакции; R — универсальная газовая постоянная; A — линейная плотность тепловыделения от искры; b — число семеновских интервалов $R T_{ad}^2 / E_g$, на которое значение T_* ниже T_{ad} — адиабатической температуры сгорания газовозвеси; ν_{ij} , μ_{ij} — стехиометрические коэффициенты и молярные массы веществ, вступающих в реакцию. Индексы: 1 — горючее, 2 — окислитель, in — инертный газ, g — газовая фаза, p — частицы, 0 — начальные условия, * — масштабные значения.

Параметр B характеризует массовую концентрацию дисперсной фазы, χ — размер частиц, δ — теплообмен частицы, μ — массообмен

частицы, M — линейную плотность тепловыделения от искры, C — отношение теплоемкостей вещества частиц и газа, E — отношение энергий активации гетерогенной и гомогенной химических реакций, Le — число Льюиса, a_i — массовые стехиометрические коэффициенты.

Система уравнений (1)–(9) решалась численно по явной разностной схеме на неравномерной сетке. Особенностью поставленной задачи является то, что в ней имеется три характерных пространственных масштаба, отличающиеся друг от друга на порядок: размер искры, определяемый шириной функции Гаусса в момент времени τ_0 , толщина зоны химической реакции и толщина прогретого слоя перед зоной реакции при распространении фронта горения при успешном зажигании. Для получения корректных результатов численного решения системы (1)–(9) внутри каждого масштаба должно быть достаточное количество точек разностной сетки. Поэтому решение уравнений (1)–(9) проводилось на неравномерной сетке, построенной следующим образом: в области искрового тепловыделения шаг разностной сетки брался равномерным, начиная с $\xi = \xi_c$ шаг сетки увеличивался по геометрической прогрессии с коэффициентом 1,03. Величину ξ_c выбирали больше характерной толщины прогретого слоя перед фронтом горения ($\xi_c = 8$). Такое построение сетки позволяет получить расчет начального этапа формирования волны горения на равномерной сетке со вторым порядком точности по пространственной координате и проследить начальный этап распространения фронта горения при зажигании газозвеси.

Вторая особенность поставленной задачи состоит в том, что адиабатическая температура сгорания газозвеси T_{ad} зависит от содержания горючего, окислителя и массовой концентрации дисперсной фазы. В расчетах используется масштабная температура T_* , которая выбирается на несколько семеновских интервалов (RT_{ad}^2/E_g) меньше адиабатической температуры выбранной смеси газов с соответствующей массовой концентрацией дисперсной фазы. Поэтому для каждого соотношения концентраций горючего и частиц параметры сетки подбирали исходя из сходимости результатов расчетов (определения критического значения энергии искры A_{cr} — размерной линейной плотности тепловыделения от искры) при уменьшении шага сетки по пространству и величины τ_0 . Расчеты критической энергии искры проводи-

лись на сетке, обеспечивающей точность вычисления A_{cr} не хуже 3%. Энергия A_{cr} определялась методом дихотомии с точностью 2% на выбранной сетке. Критерием успешного зажигания является формирование фронта горения и его распространение по газозвеси на расстояние, равное 3 ÷ 4 толщине характерной зоны прогрева перед фронтом горения, где кривизна фронта становится несущественной; критерием отсутствия зажигания является понижение температуры в центре тепловыделения от искры до значений ниже $(\theta_{ad} + \theta_0)/2$.

В расчетах контролировалось выполнение законов сохранения полной энергии. Проведено сравнение результатов решения задачи об искровом зажигании газа с параметрами, взятыми из [10] (модель (1)–(9) идентична модели [10] при $B = 0$ и $C_2 \equiv 1$). Расчеты выполнены для случаев цилиндрической и сферической симметрии источника, получено согласие с результатами [10] в пределах 2%.

Расчеты выполнены для метановоздушной смеси со взвешенными в ней частицами угольной пыли. Теплофизические и химико-кинетические параметры угля взяты из [13], метановоздушной смеси — из [14]: $c_g = 1000$ Дж/(кг · К), $c_p = 960$ Дж/(кг · К), $\rho_{g,0} = 1,29$ кг/м³, $\rho_p = 1400$ кг/м³, $\lambda_g = 0,025$ Вт/(м · К), $k_{0,p} = 2 \cdot 10^4$ м/с, $k_{0,g} = 3 \cdot 10^{11}$ с⁻¹, $E_g = 226260$ Дж/моль, $E_p = 115000$ Дж/моль, $Q\rho_{g,0} = 35$ МДж/кг, $q = 20$ МДж/кг. (С такими данными проведены расчеты распространения фронта пламени в [5].) Расчеты выполнены для частиц с начальными размерами $r_{p,0} = 0,001 \div 0,15$ мм.

Так как безразмерная энергия искры M (как и большинство безразмерных параметров) зависит от масштаба температуры T_* , который подбирался для каждого состава метановоздушной смеси, результаты расчетов анализировались для размерных величин энергии и параметров газозвеси. Исследовано влияние массовой концентрации частиц различного размера на величину A_{cr} . На рис. 1 представлены результаты расчетов минимальной энергии искры, достаточной для воспламенения газозвеси, состоящей из метановоздушной смеси с 6% метана, в зависимости от массовой концентрации дисперсной фазы (m). Начальная температура смеси $T_0 = 400$ К. Видно, что присутствие в смеси частиц размером $r_{p,0} = 0,01$ мм уменьшает энергию воспламенения и с увеличением их массовой концентрации энергия ис-

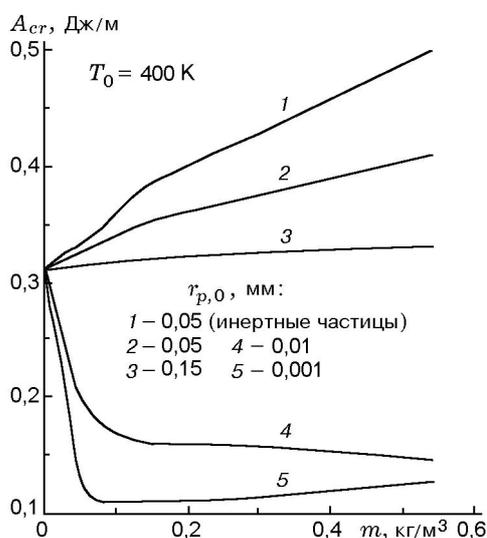


Рис. 1. Зависимость минимальной энергии искры, достаточной для воспламенения метано-воздушной смеси с 6 % метана, от массовой концентрации дисперсной фазы.

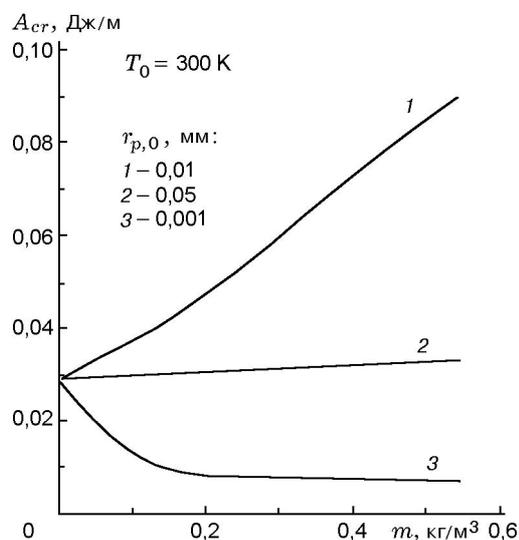


Рис. 2. Зависимость минимальной энергии искры, достаточной для воспламенения метано-воздушной смеси с 9,5 % метана (стехиометрический состав), от массовой концентрации дисперсной фазы

кры, необходимая для зажигания, уменьшается (кривая 4). Это связано с тем, что большое количество частиц вступает в реакцию в зоне энерговыделения от искры. Присутствие частиц меньшего размера еще больше уменьшает энергию искры, так как их общая поверхность гетерогенной реакции увеличивается (кривая 5). С ростом массовой концентрации таких частиц минимальная энергия искры уменьшается, достигает минимума и затем незначительно увеличивается A_{cr} . Частицы большего размера затрудняют зажигание (кривая 2), поскольку тепловые затраты на их нагрев на начальном этапе зажигания не компенсируются теплом химических реакций из-за сравнительно малой поверхности горения и инерционности прогрева. Их влияние на минимальную энергию зажигания искрой сравнимо с влиянием инертных частиц такого же размера (кривая 1), при дальнейшем увеличении размера частиц их влияние становится несущественным (кривая 3).

Аналогичные расчеты проведены для газозвеси угольной пыли в стехиометрической метано-воздушной смеси при начальной температуре $T_0 = 300$ К (рис. 2). Присутствие мелких частиц уменьшает минимальную энергию искры, с увеличением их массовой концентрации энергия A_{cr} уменьшается (кривая 3). Наличие частиц размером $r_{p,0} = 0,01$ мм увели-

чивает значение A_{cr} , и с ростом их массовой концентрации энергия A_{cr} монотонно возрастает. Частицы такого размера для метано-воздушной смеси с 6 % метана играют роль источников тепла, а в смеси стехиометрического состава являются стоками тепла (см. рис. 1, 2). Частицы размером $r_{p,0} = 0,05$ мм практически не влияют на значение A_{cr} (см. рис. 2, кривая 2).

При искровом зажигании мелкие частицы, взвешенные в газе, прогреваются быстро и из стока тепла превращаются в его источники, компенсируя отвод тепла теплопроводностью из высокотемпературной зоны на периферию зоны тепловыделения от искры. Этот эффект сильнее проявляется в бедных метано-воздушных смесях, так как в них содержится избыток окислителя, характерное время химической реакции в газовой фазе больше, чем в стехиометрической смеси, и частицы за время реакции в газовой фазе успевают прогреться до большей температуры, чем при реакции в стехиометрической смеси, интенсивнее выделяя тепло в реакции с окислителем, которого в бедной метано-воздушной смеси также больше (см. рис. 1, кривую 5 и рис. 2, кривую 3). При увеличении размера частиц время их прогрева до температуры, при которой скорость химической реакции на их поверхности становится существен-

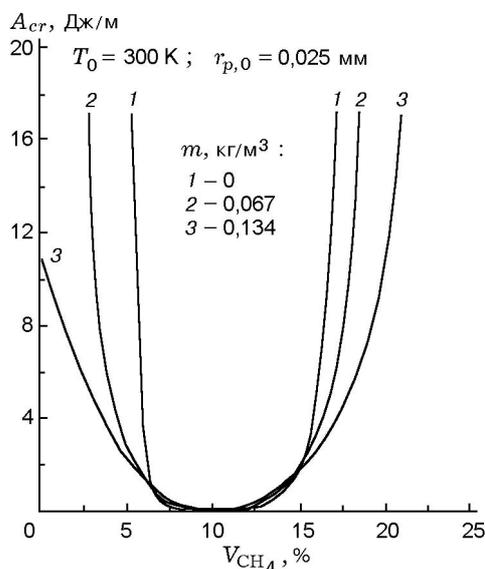


Рис. 3. Зависимость критической энергии искры от содержания метана

ной, увеличивается. Частицы с $r_{p,0} = 0,01$ мм в метановоздушной смеси с 6% метана успевают прогреться до температуры, при которой скорость их реакции становится существенной, и превратиться из стока тепла в источник, уменьшая энергию A_{cr} . В стехиометрической метановоздушной смеси такие частицы не прогреваются до достаточно высокой температуры, окислитель практически весь сгорает в газофазной реакции и его не остается для реагирования частиц во время прогрева. Поэтому присутствие частиц такого же размера в стехиометрической газовой смеси увеличивает энергию A_{cr} (см. рис. 2, кривая 1). При дальнейшем росте размера частиц они становятся стоком тепла, увеличивая энергию A_{cr} (их влияние аналогично влиянию инертных частиц такого же размера (см. рис. 1, кривые 1, 2)). Дальнейшее увеличение размера частиц приводит к тому, что газ перестает «чувствовать» присутствие частиц дисперсной фазы, как это наблюдается при распространении фронта горения по газу, запыленному инертными частицами дисперсной фазы [15, 16]. За время зажигания крупные частицы из-за малости суммарной поверхности теплообмена не успевают отвести из зоны реакции заметное количество тепла на свой разогрев. Такой же эффект наблюдается в стехиометрической метановоздушной смеси при меньших, чем в бедных смесях, размерах частиц (см. рис. 1, 2).

Важными характеристиками горючих газов и газовзвесей являются значения нижнего и верхнего концентрационных пределов воспламенения, значения которых определяются в экспериментах [17–19]. В [12] показано, что при решении задачи об искровом зажигании газовой смеси значения критической энергии искрового зажигания резко увеличиваются при уменьшении концентрации горючего для бедных смесей и при увеличении — для богатых смесей. По значению получающихся вертикальных асимптот в зависимостях критической энергии зажигания от содержания горючего можно определять концентрационные пределы воспламенения. Система уравнений (1)–(9) при $B = 0$ описывает искровое зажигание газовой смеси заданного стехиометрического соотношения (заданного содержания горючего). Для анализа влияния дисперсной фазы на величину минимальной энергии искры при различных концентрациях горючего газа вначале был проведен расчет значений A_{cr} для смеси газов без частиц дисперсной фазы при различных концентрациях горючего газа. Расчеты проводили с теплофизическими и формально-кинетическими параметрами, взятыми для метановоздушной смеси. Соотношение компонентов смеси задавали следующим образом: выбиралась объемная доля горючего (метана), а отношение объемного содержания кислорода к объему воздуха полагалось постоянным и равным 0,21 ($V_{O_2}/(V_{O_2} + V_{N_2}) = 0,21$ [17]). Заданием различных значений доли метана изменялось стехиометрическое соотношение горючего и окислителя в смеси газов. Результаты расчетов представлены на рис. 3. Для газовой смеси без дисперсной фазы минимум зависимости $A_{cr}(V_{CH_4})$, полученной из решения системы уравнений (1)–(9) при $B = 0$, соответствует содержанию метана 9,5% и при увеличении и уменьшении содержания CH_4 энергия A_{cr} возрастает, а при приближении содержания CH_4 к значению 5,4% (недостаток горючего) и 17% (избыток горючего) энергия A_{cr} начинает резко возрастать до значений, соответствующих предельным, реализуемым в экспериментах по определению концентрационных пределов воспламенения [17] (см. рис. 3, кривая 1). Соответствующие этим большим энергиям искры значения концентрации горючего можно трактовать как нижний и верхний концентрационные пределы метановоздушной смеси, определяемые методом искрового зажигания. По данным

[17, 18, 3] экспериментальные значения верхнего и нижнего концентрационных пределов воспламенения для метановоздушных смесей находятся в пределах $5,3 \div 6$ и $15 \div 17$ соответственно. Значения этих пределов, полученные по модели (1)–(9) с формально-кинетическими параметрами реакций горения метана в воздухе, совпадают с экспериментальными данными в пределах точности измерений.

Был проведен расчет зависимости $A_{cr}(V_{CH_4})$ в присутствии частиц угольной пыли ($r_{p,0} = 0,025$ мм) при $m = 0,134$ кг/м³ и $T_0 = 300$ К. Присутствие такого количества дисперсной фазы приводит к тому, что нижний концентрационный предел воспламенения исчезает, а верхний сдвигается в сторону более богатых горючим смесей (≈ 21 % CH₄) (см. рис. 3, кривая 3). При этом присутствие угольных частиц заданного размера увеличивает значения A_{cr} вблизи стехиометрического состава газовой смеси и уменьшает их вдали от стехиометрического состава по сравнению со значениями A_{cr} для газа без частиц угольной пыли. Расчет по модели (1)–(9) нижнего концентрационного предела воспламенения для метановоздушной смеси с угольной пылью ($r_{p,0} = 0,025$ мм) при $m = 0,067$ кг/м³ и $T_0 = 300$ К дает предельную концентрацию метана 2,1% и верхнего концентрационного предела 18,5% (кривая 2 на рис. 3).

Расширение концентрационных пределов воспламенения обусловлено тем, что энергия активации химической реакции на частицах меньше. Поэтому частицы, прогретые тепловым импульсом от искры, начинают реагировать при меньшей температуре, чем газовая смесь. Они прогревают газ, который при обычных условиях не воспламеняется, но становится способным к горению при повышении температуры за счет тепла химической реакции на частицах (при повышении температуры концентрационные пределы горения метановоздушной смеси расширяются [17, 3]).

Закономерности изменения нижних концентрационных пределов воспламенения смесей горючих газов подчиняется правилу Ле-Шателье. В [1] выдвинута гипотеза о том, что правило Ле-Шателье применимо и для определения нижних концентрационных пределов в газовзвесах. Там же приведены экспериментальные данные по нижним концентрационным пределам воспламенения метановоздушной смеси с частицами угольной

пыли, где обнаружено небольшое отклонение предельных горючих концентраций такой газовзвеси от линии, построенной по правилу Ле-Шателье, в сторону меньших значений концентраций горючих компонентов в газовой фазе. Рассчитанные по модели (1)–(9) значения предельных концентраций компонентов близки к значениям, определяемым по правилу Ле-Шателье. Отмеченное в [1] отклонение можно объяснить только свойством угольной пыли выделять при нагревании адсорбированный на его поверхности метан и другие летучие компоненты [2, 13]. Это приводит к увеличению концентрации горючего газа в газовой фазе гибридной газовзвеси, реально участвующего в реакции.

Таким образом, проведенное исследование искрового зажигания метановоздушной смеси с угольной пылью показало, что влияние дисперсной фазы на минимальную энергию искры, приводящую к зажиганию газовзвеси, неоднозначно: мелкие частицы уменьшают минимальную энергию искры, частицы большего размера вблизи стехиометрического состава газовой смеси увеличивают минимальную энергию зажигания, а вдали от стехиометрического состава — уменьшают. Крупные частицы практически не влияют на минимальную энергию искры, ее энергия равна энергии зажигания газовой смеси. Из численного решения системы уравнений, описывающих искровое воспламенение, получены значения нижнего и верхнего концентрационных пределов воспламенения метановоздушной смеси, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными. Исследование влияния дисперсной фазы на нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения показало, что реагирующие частицы дисперсной фазы расширяют концентрационные пределы горения газовых смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Корольченко А. Я.** Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. М.: Химия, 1986.
2. **Самовозгорание и взрывы пыли натуральных топлив** / В. В. Померанцев, С. Л. Шагалова, В. А. Резник, В. В. Кушнаренко. Л.: Энергия, 1978.
3. **Умнов А. Е., Голик А. С., Палеев Д. Ю., Шевцов Н. Р.** Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях. М.: Недра, 1990.
4. **Устав ВГСЧ по организации и ведению горноспасательных работ.** М.: Недра, 1986.

5. **Крайнов А. Ю.** Моделирование распространения пламени в смеси горючих газов и частиц // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 2. С. 3–9.
6. **Krainov A. Yu.** Flame propagation in the suspension of combustible particles and gases // Archivum Combust. 1996. V. 16, N 3–4. P. 189–198.
7. **Крайнов А. Ю.** Численное исследование зажигания различными источниками гибридной газозвеси (смеси реагирующих газов и частиц) // Химическая физика процессов горения и взрыва: Материалы XII симпозиума по горению и взрыву. Черногоровка, 2000. Ч. II. С. 28–30.
8. **Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М.** Описание воспламенения и горения смесей газа и твердых частиц методами механики сплошной среды // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 2. С. 3–9.
9. **Вилюнов В. Н.** К теории искрового воспламенения // Докл. АН СССР. 1973. Т. 208, № 1. С. 66–69.
10. **Вилюнов В. Н., Некрасов Е. А., Баушев В. С., Тимохин А. М.** О закономерностях искрового воспламенения и выхода на стационарный режим горения // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 3. С. 361–366.
11. **Губин Е. И., Дик И. Г.** О зажигании пылевого облака искрой // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 2. С. 10–17.
12. **Дик И. Г., Замятина И. П., Прокофьев В. Г.** Воспламенение газовых смесей нестехиометрического состава искровым разрядом с пространственно-временным энерговыделением // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 2. С. 3–8.
13. **Основы** практической теории горения: Учебное пособие для вузов / Под ред. В. В. Померанцева. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
14. **Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М.** Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
15. **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.
16. **Губин Е. И., Дик И. Г., Крайнов А. Ю.** Ингибирование газовых пламен порошковыми составами // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 2. С. 57–62.
17. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968.
18. **Щетинков Е. С.** Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
19. **Кумагаи С.** Горение. М.: Химия, 1980.

Поступила в редакцию 9/VI 2001 г.