

УДК: 536.46+662.61

DOI 10.17223/19988621/56/7

К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов

ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ И ВЫХОДА НА УСТОЙЧИВЫЙ РЕЖИМ ГОРЕНИЯ БЕДНОЙ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Представлена математическая модель и результаты решения задачи искрового зажигания бедной метано-воздушной смеси. В задаче определялась минимальная энергия искры, при которой было возможно инициирование процесса горения бедной метано-воздушной смеси с выходом на устойчивый режим распространения фронта горения. Задача решалась численно с использованием алгоритма распада произвольного разрыва методом С.К. Годунова. Из решения задачи определены зависимости минимальной энергии искрового зажигания, а также видимой и нормальной скорости распространения фронта горения метано-воздушной смеси от содержания горючей компоненты в газе.

Ключевые слова: *скорость горения, искровое зажигание, бедная метано-воздушная смесь, устойчивость горения, математическое моделирование.*

Задача инициирования устойчивого горения реагирующей газовой или газодисперсной смеси искровым разрядом является актуальной и исследована в работах ряда авторов. Основная цель проводимых работ – определение минимальной энергии разряда, необходимой для инициирования процесса горения. Одной из причин широкого исследования задачи искрового зажигания в газах являются требования техники безопасности на производстве. В [1] указано, что минимальная энергия зажигания является критерием оценки способности газа воспламениться. Под минимальной энергией зажигания подразумевается наименьшая величина энергии искры электрического разряда, достаточная для воспламенения газа. Таким образом, оценка зависимости минимальной энергии зажигания газа от состава необходима для прогнозирования пожаро-взрывоопасности горючих газовых смесей.

В работах [2 – 4] выполнено численное исследование задачи о минимальной энергии зажигания смеси реагирующего газа и частиц. Получены условия инициирования горения для двухфазной, двухтемпературной теплодиффузионной модели горения [2], а также условия для моделей, учитывающих термическое расширение газа [3], лучистый теплоперенос [4]. Из решения задач определено влияние параметров смеси, а также движения газа и лучистого теплопереноса от частиц на критические условия инициирования горения.

Оценка энергии зажигания и энергии инициирования детонации в углеродо-воздушных смесях приведена в работах [5, 6]. В работе [5] приведена оценка перехода от режима горения к режиму детонации для водородо-воздушной смеси. В работе [6] показано, что при высоких энергиях искрового заряда возможен переход от режима зажигания с устойчивым распространением фронта горения метано-воздушной смеси к детонационному режиму. Согласно [6], энергия зажигания метано-воздушной смеси лежит в диапазоне $E_3 = 10^{-4} - 11$ Дж в зависимости

от молярной доли метана в газе. Известно, что минимальная энергия искрового зажигания метано-воздушной смеси составляет 0.28 мДж [7].

Под искровым зажиганием классически принято понимать зажигание с выходом на устойчивый режим распространения пламени. В случае зажигания с выходом на устойчивый режим горения после инициирования процесса тепловая волна должна продвигаться по пространству с постоянными значениями видимой и нормальной скорости горения. Зависимость нормальной скорости горения метано-воздушной смеси от состава, определенная экспериментально, представлена в работе [8].

Целью настоящей работы является численное определение критических условий инициирования зажигания с последующим устойчивым распространением фронта горения метано-воздушной смеси (МВС), а также определение нормальной и видимой скорости распространения горения.

Построение математической модели

Математическая модель зажигания МВС формулируется на основе моделей [3, 9] при следующих допущениях: МВС с объемной концентрацией метана a_{vol} находится в бесконечном объеме. Нитевидный мгновенный источник зажигания расположен в центре. Внешняя граница расчетной области полагается бесконечно удаленной от источника зажигания. Потерями тепла на электроды пренебрегается. Теплоотдача излучением от продуктов сгорания не учитывается. Диссоциация молекул продуктов сгорания при высокой температуре также не учитывается. Коэффициенты диффузии и теплопроводности зависят от температуры [9]. Газовая постоянная определяется составом газовой смеси. Константа скорости химической реакции зависит от температуры по закону Аррениуса, скорость реакции зависит от концентрации метана и кислорода и описывается кинетикой первого порядка по метану и первого порядка по кислороду. Учитывается движение газа, обусловленное тепловым расширением газа при повышении температуры.

Математическая постановка задачи при сформулированных допущениях имеет вид:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial r} = 0. \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial r(\rho u^2 + p)}{\partial r} = p. \quad (2)$$

Уравнение энергии:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho(\varepsilon + u^2/2)}{\partial t} + \frac{\partial r[\rho u(\varepsilon + u^2/2) + pu]}{\partial r} = \\ & = \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + r Q k_0 \rho_{CH_4} \rho_{O_2} \exp \left(-\frac{E}{R_u T} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение баланса массы метана в смеси:

$$\frac{\partial r \rho_{CH_4}}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{CH_4} u}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r D(T) \rho_g \frac{\partial a_{CH_4}}{\partial r} \right) - r k_0 \rho_{CH_4} \rho_{O_2} \exp \left(-\frac{E}{R_u T} \right). \quad (4)$$

Уравнение баланса массы кислорода в смеси:

$$\frac{\partial r \rho_{O_2}}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{O_2} u}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r D(T) \rho_g \frac{\partial a_{O_2}}{\partial r} \right) - r \alpha_1 k_0 \rho_{CH_4} \rho_{O_2} \exp \left(-\frac{E}{R_u T} \right). \quad (5)$$

Уравнение состояния идеального газа:

$$p = \rho R T. \quad (6)$$

Начальные условия:

$$T(r, t_z) = T_b + \frac{Q_z}{4\pi\lambda_b t_z} \exp \left(-\frac{r^2}{4\chi_b t_z} \right),$$

$$\rho_{CH_4}(r, t_z) = \rho_{CH_4,b}, \rho_{O_2}(r, t_z) = \rho_{O_2,b}, u(r, t_z) = 0, \rho_g(r, t_z) = \rho_b. \quad (7)$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial \rho(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial T(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{CH_4}(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{O_2}(0, t)}{\partial r} = 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial T(\infty, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{CH_4}(\infty, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{O_2}(\infty, t)}{\partial r} = 0. \quad (9)$$

Здесь u – скорость, t – время, r – координата по радиусу, p – давление, k_0 – константа скорости химической реакции, T – температура, E_a – энергия активации, R_u – универсальная газовая постоянная, ρ – плотность, ρ_{CH_4} , ρ_{O_2} – парциальные плотности метана и кислорода в газе, Q – тепловой эффект реакции, Q_z – энергия

искрового разряда, $\varepsilon = \frac{p}{\rho(\gamma-1)}$ – внутренняя энергия газа, $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ – показатель

адиабаты, $\alpha_1 = \frac{\mu_{O_2} \nu_{O_2}}{\mu_{CH_4} \nu_{CH_4}}$ – стехиометрический коэффициент расхода кислорода в

реакции с метаном. Переменные ρ_{CH_4} и ρ_{O_2} определяют значения парциальных плотностей метана и кислорода в смеси, $\rho_{CH_4} = a_{CH_4} \rho$, $\rho_{O_2} = a_{O_2} \rho$, где a_{CH_4} , a_{O_2} – относительные массовые концентрации метана и кислорода. Связь между относительной массовой концентрацией метана и кислорода и объемным содержанием метана a_{vol} в смеси определяется из соотношений:

$$a_{O_2} = a_{air, O_2} \frac{(100 - a_{vol}) \mu_{air}}{(100 - a_{vol}) \mu_{air} + a_{vol} \mu_{CH_4}}, \quad a_{CH_4} = \frac{a_{vol} \mu_{CH_4}}{(100 - a_{vol}) \mu_{air} + a_{vol} \mu_{CH_4}}.$$

Здесь a_{vol} – объемная процентная концентрация метана в смеси, μ_{CH_4} – молярная масса метана, μ_{air} – молярная масса воздуха, a_{air, O_2} – массовое содержание кислорода в воздухе. Зависимости коэффициентов диффузии и теплопроводности от температуры определяются выражениями [9]

$$\lambda = \lambda_{st} \left(\frac{T}{T_b} \right)^{2/3}, \quad D = \frac{\lambda(T)}{c_p \rho},$$

λ_{st} – значение коэффициента теплопроводности при $T = 300$ К. Газовая постоянная рассчитывалась в зависимости от состава смеси из соотношения $R = R_u / (a_{O_2} \mu_{O_2} + a_{CH_4} \mu_{CH_4} + (1 - a_{O_2} - a_{CH_4}) \mu_{N_2})$, где μ_{N_2} , μ – молярная масса азо-

та и кислорода. Индексом z отмечены характеристики параметров искры, b – начальные параметры смеси при температуре $T_b = 300$ К.

Метод решения и результаты

Для численного решения задачи (1) – (9) был использован метод Годунова [10]. Слагаемые в правых частях уравнений, описывающие процессы переноса за счет механизмов теплопроводности и диффузии, аппроксимировались явно на трехточечном шаблоне. Шаг по пространству в области источника зажигания (до координаты $r = 2 \cdot 10^{-3}$ м) задавался равным $\Delta h_{\text{const}} = 10^{-5}$ м. После координаты $r = 2 \cdot 10^{-3}$ м шаг по пространству увеличивался в направлении правой границы по правилу $\Delta h_{i+1} = 1.005 \cdot \Delta h_i$. Координата правой границы определялась из условий (9). Величина схемной диффузии при выбранном шаге Δh была много меньше коэффициента диффузии D . Шаг по времени выбирался минимальный из двух условий устойчивости Куранта: $\Delta t < \Delta h_{\text{const}} / \max[|u_g| + c_g]$, где c_g – скорость звука в газе, и $\Delta t < \Delta h_{\text{const}}^2 / (2\chi_g)$, где $\chi_g = \lambda_g / (c_v \rho_g)$ – коэффициент температуропроводности газа.

Решение задачи (1) – (9) выполнено при следующих значениях размерных величин [9]:

$$\begin{aligned} Q &= 55.7 \text{ МДж/кг}, k_0 = 1.125 \cdot 10^{12} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}), p_b = 0.1 \text{ МПа}, \\ E &= 239 \text{ кДж/моль}, c_p = 1065 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, c_v = 768.2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \\ \lambda_{\text{st}} &= 0.025 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, R_u = 8.31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}, T_b = 300 \text{ К}. \end{aligned}$$

В расчетах варьировалась объемная доля метана в метано-воздушной смеси в диапазоне $a_{\text{vol}} = 5 - 9.5\%$, что соответствует диапазону значений коэффициента

избытка горючего $\phi = 0.55 - 1$, $\phi = \frac{a_{\text{CH}_4}/a_{\text{O}_2}}{(a_{\text{CH}_4}/a_{\text{O}_2})_{\text{стех}}}$, где $(a_{\text{CH}_4}/a_{\text{O}_2})_{\text{стех}}$ – соотно-

шение между относительными массовыми концентрациями метана и кислорода для стехиометрического состава метано-воздушной смеси. Для каждого состава смеси проводилась серия параметрических расчетов, в которой определялась минимальная энергия искры Q_z , при которой было возможно возникновение зажигания МВС с последующим выходом на устойчивый режим горения. Минимальная энергия искры, аналогично работе [11], определялась в размерности Дж/м. Для нахождения величины минимальной энергии в размерности Дж необходимо умножать Q_z на величину межэлектродного расстояния, составляющую $r_{\text{sp}} = 3 - 6$ мм [8, 12, 13]. Результаты расчета представлены на рис. 1 – 4.

На рис. 1 представлена динамика зажигания и выхода на устойчивый режим горения метано-воздушной смеси с объемным содержанием метана 6 %. Температура газа показана на рис. 1, *a*, скорость газа представлена на рис. 1, *b*. Энергия искрового зажигания равнялась $Q_z = 0.05$ Дж/м и соответствовала минимальному значению, при котором было возможно инициирование искрового зажигания газа с последующим устойчивым распространением волны горения.

На рис. 2 представлена зависимость минимальной энергии искрового зажигания метано-воздушной смеси от коэффициента избытка горючего ϕ . Минимальная энергия зажигания, выраженная в [Дж/м], представлена на рис. 2, *a*. Минимальная энергия зажигания в размерности [Дж], для межэлектродного расстояния 4 мм (сплошная кривая) и 6 мм (пунктир) представлена на рис. 2, *b*.

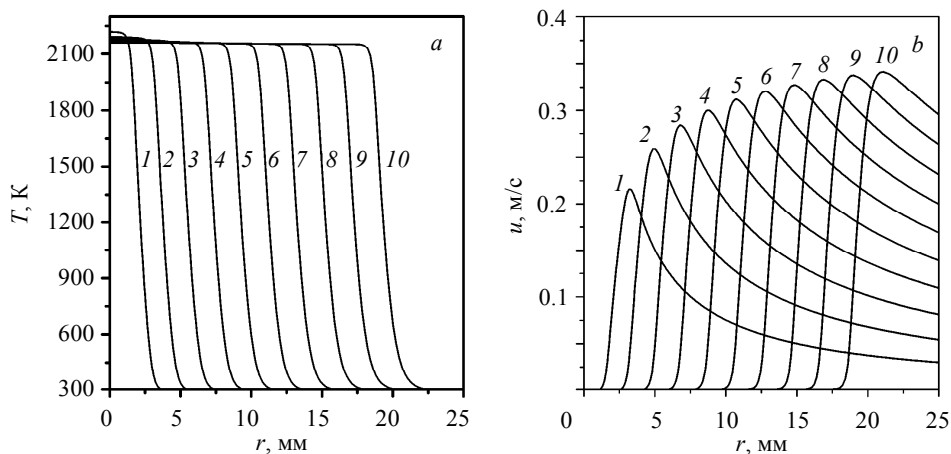


Рис. 1. Профили температуры (а) и скорости движения (b) 6 %-й метано-воздушной смеси при искровом зажигании с энергией искры $Q_z = 0.05$ Дж/м. Кривые: $t = 5 \cdot 10^{-3}$ с (1), 10^{-2} (2), $1.5 \cdot 10^{-2}$ (3), $2 \cdot 10^{-2}$ (4), $2.5 \cdot 10^{-2}$ (5), $3 \cdot 10^{-2}$ (6), $3.5 \cdot 10^{-2}$ (7), $4 \cdot 10^{-2}$ (8), $4.5 \cdot 10^{-2}$ (9), $5 \cdot 10^{-2}$ с (10)
Fig. 1. Profiles of the (a) temperature and (b) velocity of a 6% methane-air mixture at spark ignition with a spark energy $Q_z = 0.05$ J/m. Curves: $t = (1) 5 \cdot 10^{-3}$ s, (2) 10^{-2} s, (3) $1.5 \cdot 10^{-2}$ s, (4) $2 \cdot 10^{-2}$ s, (5) $2.5 \cdot 10^{-2}$ s, (6) $3 \cdot 10^{-2}$ s, (7) $3.5 \cdot 10^{-2}$ s, (8) $4 \cdot 10^{-2}$ s, (9) $4.5 \cdot 10^{-2}$ s, and (10) $5 \cdot 10^{-2}$ s

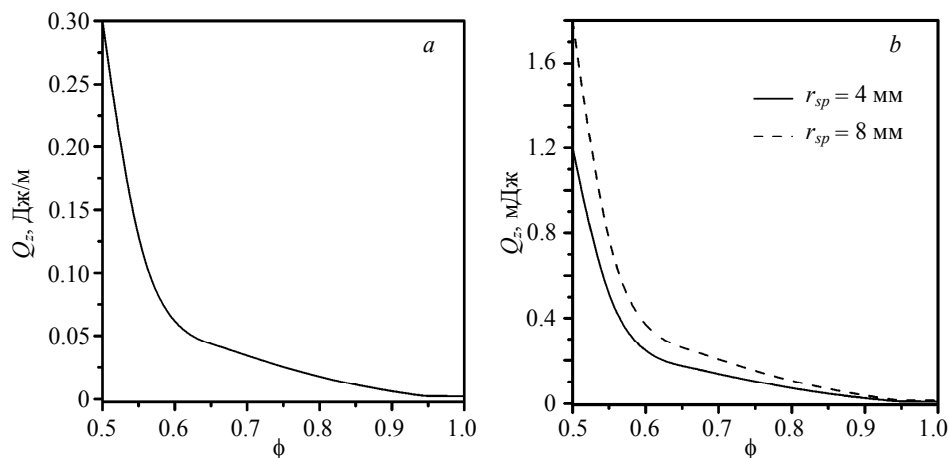


Рис. 2. Зависимость минимальной энергии искрового зажигания метано-воздушной смеси от коэффициента избытка горючего: а – энергия зажигания в размерности [Дж/м], б – энергия зажигания в размерности [мДж]

Fig. 2. Minimum energy of the spark ignition of methane-air mixture as a function of fuel-air equivalence ratio. Dimension of the ignition energy: (a) [J / m] and (b) [mJ]

Указанная в научной литературе величина минимальной энергии искрового зажигания для стехиометрического состава метано-воздушной смеси 0.28 мДж получена экспериментально и учитывает тепловые потери на электроды. Минимальная энергия искрового зажигания, приведенная на рис. 2, b, получена без учета тепловых потерь, но при этом для состава смеси $\phi = 0.65-1$ ($a_{vol} = 6.5-9.5\%$) минимальная энергия искрового зажигания близка к экспериментальному значе-

нию. Аналогично работе [5] для смеси, состав которой близок к стехиометрическому, минимальная энергия искрового зажигания практически не меняется с увеличением доли горючего в газе. Для смесей с содержанием горючего, близким к нижнему пределу воспламеняемости метано-воздушных смесей (эта величина по разным данным соответствует $a_{\text{vol}} = 3.8 - 5.4 \%$ [5]), наблюдается резкое увеличение минимальной энергии, необходимой для инициирования искрового зажигания с последующим устойчивым режимом распространения фронта горения. Это соответствует как работе [5], так и результатам экспериментов [8].

Полученные в ходе параметрического исследования результаты были использованы для определения нормальной и видимой скорости распространения фронта горения в зависимости от состава смеси. Видимая скорость горения определялась по скорости изменения координаты, соответствующей выгоранию с массовой концентрации метана до 0.1 от начального значения, $a_{\text{CH}_4} = 0.1 a_{\text{CH}_4, b}$. Нормальная скорость горения определялась как разность между видимой скоростью перемещения фронта горения и скоростью движения газа. Результаты расчета представлены на рис. 3. Согласно рисунку, видимая скорость горения зависит от коэффициента избытка горючего линейным образом, и для смесей с составом, близким к нижнему пределу воспламеняемости, видимая скорость горения МВС стремится к нулю. Зависимость нормальной скорости горения МВС от коэффициента избытка горючего близка к данным [8].

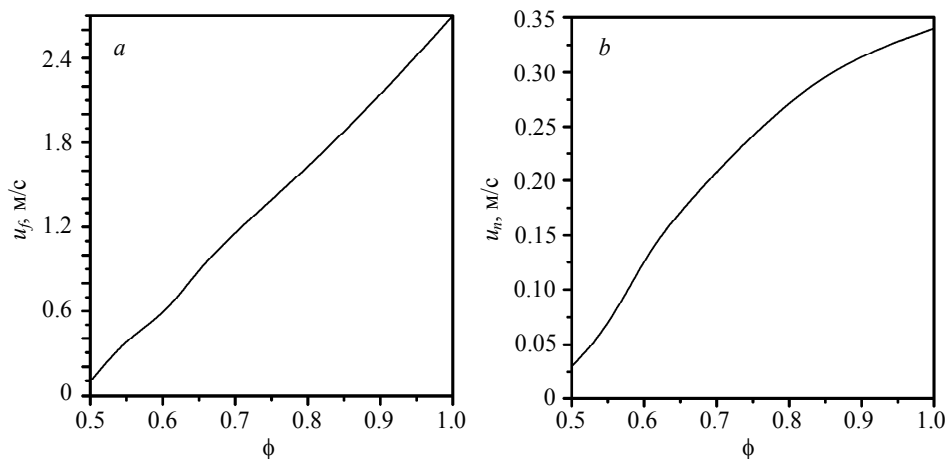


Рис. 3. Зависимость видимой (а) и нормальной (b) скорости горения метано-воздушной смеси от коэффициента избытка горючего

Fig. 3. Dependence of the (a) apparent and (b) normal burning velocity of methane-air mixture on fuel-air equivalence ratio

На рис. 4 для сравнения представлены результаты наших расчетов и результаты экспериментов [8] (точечная линия), а также результаты, взятые из работы [14] (сплошная линия и символы). Эксперимент [8] был воспроизведен нами с некоторой долей погрешности по рисунку, помещенному в книгу. Результаты работы [14] были скопированы из статьи с максимальным повторением масштабов рисунка. Результаты расчета [14] показаны сплошной кривой. Символами отмечены

экспериментальные точки из [15–18], описанные в работе [14]. Наши результаты на рис. 4 показаны жирной штриховой линией. Наблюдается хорошее согласие между данными наших расчетов и результатами [14].

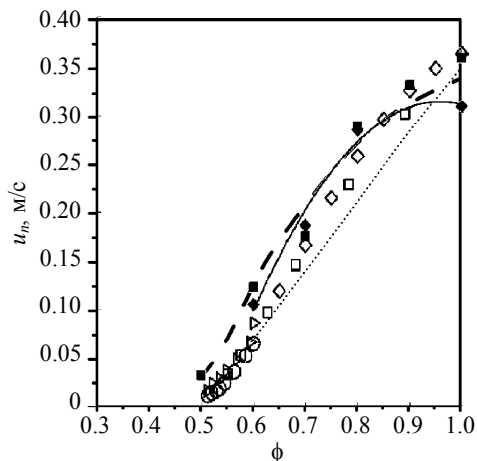


Рис. 4. Зависимость нормальной скорости распространения фронта горения метано-воздушной смеси от коэффициента избытка топлива. Пунктирная кривая – результаты расчета по модели (1) – (9), сплошная кривая – результаты [14], символы – результаты [15–18], точечная кривая – результаты [8]

Fig. 4. Normal velocity of the flame front of methane-air mixture as a function of fuel-air equivalence ratio. The dashed curve is the calculated results obtained using model (1) – (9), the solid curve is the results from [14], the symbols are the results from [15 – 18], and the dotted curve is the results from [8]

Выводы

Разработана физико-математическая постановка задачи искрового зажигания бедной метано-воздушной смеси, проведено численное исследование зависимости критических условий инициирования искрового зажигания метано-воздушной смеси с выходом на устойчивый режим распространения горения. Определены зависимости видимой и нормальной скорости распространения фронта горения метано-воздушной смеси в зависимости от коэффициента избытка горючего в газе. Показано, что для смесей с содержанием метана, близким к нижней границе воспламеняемости метано-воздушных смесей, энергия искрового зажигания на 1–2 порядка превышает энергию искрового зажигания смесей с составом, близким к стехиометрическому значению. Нормальная и видимая скорость горения таких смесей стремится к нулю и на порядок меньше нормальной и видимой скоростей горения стехиометрической газовой смеси. Полученные результаты хорошо согласуются с известными работами других авторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бесчастнов М.В., Соколов В.М., Кац М.И. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения. М.: Химия, 1976. 368 с.
2. Крайнов А.Ю., Баймлер В.А. Критические условия воспламенения искрой смеси газообразных окислителя и горючего с реагирующими частицами // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 3. С. 30–36.
3. Крайнов А.Ю., Баймлер В.А. Влияние термического расширения на минимальную энергию искрового зажигания газа// Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 4. С. 9–13.
4. Крайнов А.Ю. Влияние лучистого теплопереноса на минимальную энергию искрового зажигания газовзвесей // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37. № 3. С. 16–24.
5. Васильев А.А. Оценка критических условий перехода горения в детонацию // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42. № 2. С. 91–96.
6. Васильев А.А., Васильев В.А. Расчетные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе метана и угольной пыли // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 2. С. 8–39.

7. Ведерников М.И. Техника безопасности при производстве, хранении и транспортировании аммиака. М.: Химия, 1977. 128 с.
8. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах / пер. с англ. под ред. К.И. Щелкина, А.А. Борисова. М.: Мир, 1968.
9. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Моделирование горения метано-воздушной смеси в замкнутом сферическом объеме // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 4. С. 977–983.
10. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
11. Моисеева К.М., Крайнов А.Ю. Численное моделирование искрового зажигания аэрозвеси угольной пыли // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 2. С. 61–70.
12. Корольченко А.Я. Пожаровзрывобезопасность промышленной пыли. М.: Химия, 1986.
13. Шетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
14. Трошин К.Я., Борисов А.А., Рахметов А.Н., Арутюнов В.С., Политенкова В.С. Скорость горения метанводородных смесей при повышенных давлениях и температурах // Химическая физика. 2013. Т. 32. № 5. С. 76–87.
15. Hassan M.I., Aung K.T., Faeth G.M. Measured and predicted properties of laminar premixed methane/air flames at various pressures// Combust. and Flame. 1998. V. 115. No. 4. P. 539–550.
16. Ronney P.D., Wachman H.Y. Effect of gravity on laminar premixed gas combustion I: Flammability limits and burning velocities // Combust. and Flame. 1985. V. 62. P. 107.
17. Taylor S.C. Burning Velocity and the Influence of Flame Stretch. Ph.D. Thesis. University of Leeds, 1991.
18. Hermanns R.T.E. Laminar Burning Velocities of Methane-Hydrogen-Air Mixtures. Proefschrift. Technische Universiteit Eindhoven, 2007. ISBN: 978-90-386-1127-3.

Статья поступила 30.08.2018 г.

Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. (2018) A NUMERICAL DETERMINING OF THE CRITICAL CONDITIONS FOR SPARK IGNITION AND YIELDING OF A STABLE COMBUSTION OF A LEAN METHANE-AIR MIXTURE. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 56. pp. 79–87

DOI 10.17223/19988621/56/7

Keywords: combustion rate, spark ignition, lean methane-air mixture, stable combustion, mathematical modeling.

A mathematical model and solution to the problem of spark ignition of a lean methane-air mixture are presented. The work is aimed to find a minimum value of the spark ignition energy which makes it possible to initiate a combustion of the lean methane-air mixture followed by a stable mode of flame front propagation. The problem is numerically solved using the algorithm of the decay of an arbitrary discontinuity by Godunov's method. Based on the problem solution, the dependence of a minimum energy of spark ignition on the content of a combustible component in the gas is determined. The apparent and normal velocity of flame front of methane-air mixture are obtained as functions of fuel-air equivalence ratio. The calculated results are in a good agreement with data from scientific literature.

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

MOISEEVA Kseniya Mikhaylovna (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

REFERENCES

1. Beschastnov M.V., Sokolov V.M., Kats M.I. (1976) *Avarii v khimicheskikh proizvodstvakh i mery ikh preduprezhdeniya* [Accidents at chemical plants and their prevention]. Moscow: Khimiya.
2. Krainov A.Yu., Baimler V.A. (2002) Critical conditions of spark ignition of a mixture of gases (oxidizer and fuel) and reactive particles. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 38(3). pp. 278–283. DOI: 10.1023/A:1015645601538.
3. Krainov A.Yu., Baimler V.A. (2002) Effect of thermal expansion on the minimum energy of gas spark ignition. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 38 (4). pp. 387–390. DOI: 10.1023/A:1016294712346.
4. Krainov A.Yu. (2001) Effect of radiant heat transfer on the minimum spark-ignition energy of gas suspensions. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 37(3). pp. 259–266. DOI: 10.1023/A:1017515720961.
5. Vasil'ev A.A. (2006) Estimation of critical conditions for the detonation-to-deflagration transition. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 42(2). pp. 205–209. DOI: 10.1007/s10573-006-0039-1.
6. Vasil'ev A.A. Vasil'ev V.A. (2016) Raschetnye i eksperimental'nye parametry gorenii i detonatsii smesey na osnove metana i ugol'noy pyli [Calculated and experimental parameters of combustion and detonation of mixtures based on methane and coal dust]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti – Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry*. 2. pp. 8–39.
7. Vedernikov M.I. (1977) *Tekhnika bezopasnosti pri proizvodstve, khranении i transportirovanii ammiaka* [Safety arrangements for production, storage, and transportation of ammonia]. Moscow: Khimiya.
8. Lewis B., Von Elbe G. (1987) *Combustion, Flames, and Explosions of Gases*. Academic Press.
9. Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. (2018) Modeling of the combustion of a methane–air mixture in an enclosed spherical volume. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 91(4). pp. 918–924. DOI 10.1007/s10891-018-1817-9.
10. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya. (1976) *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics]. Moscow: Nauka.
11. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. (2018) Numerical simulation of spark ignition of a coal dust–air mixture. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 54(2). pp. 179–188. DOI: 10.1134/S0010508218020077.
12. Korolchenko A.Ya. (1986) *Pozharovzryvbezopasnost' promyshlennoy pyli* [Fire and explosion hazard of industrial dusts]. Moscow: Khimiya.
13. Shchetnikov E.S. (1965) *Fizika goreniiya gazov* [Physics of gase combustion]. Moscow: Nauka.
14. Troshin K.Ya., Borisov A.A., Rakhmetov A.N., Arutyunov V.S., Politenkova G.G. (2013) Burning velocity of methane-hydrogen mixtures at elevated pressures and temperatures. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 7(3). pp. 290–301. DOI: 10.1134/S1990793113050102.
15. Hassan M.I., Aung K.T., Faeth G.M. (1998) Measured and predicted properties of laminar premixed methane/air flames at various pressures. *Combustion and Flame*. 115 (4). pp. 539–550. DOI: 10.1016/S0010-2180(98)00025-X.
16. Ronney P.D., Wachman H.Y. (1985) Effect of gravity on laminar premixed gas combustion I: Flammability limits and burning velocities. *Combustion and Flame*. 62(2). pp. 107–119. DOI: 10.1016/0010-2180(85)90139-7.
17. Taylor S.C. (1991) *Burning Velocity and the Influence of Flame Stretch*. Ph.D. Thesis. University of Leeds.
18. Hermanns R.T.E. (2007) *Laminar Burning Velocities of Methane-Hydrogen-Air Mixtures*. Ph.D. Thesis Eindhoven University of Technology.