

УДК 536.46

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ АЭРОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов

Томский государственный университет, 634050 Томск, Moiseeva_KM@t-sk.ru

Разработана физико-математическая модель искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли, основанная на двухфазной двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды. Представлены результаты численного решения задачи об искровом зажигании аэровзвеси угольной пыли с учетом ее движения, обусловленного расширением газа при разогреве. Получены зависимости минимальной энергии искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли от массовой концентрации и размера частиц угольной пыли. С увеличением размера частиц минимальная энергия искрового зажигания повышается. Существует массовая концентрация частиц угольной пыли, при которой энергия искрового зажигания минимальна. Проведенное сравнение результатов расчетов минимальной энергии искрового зажигания угольной пыли с известными экспериментальными данными показало их удовлетворительное согласие.

Ключевые слова: аэровзвесь угольной пыли, минимальная энергия искрового зажигания, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV20180207

ВВЕДЕНИЕ

Задача об искровом зажигании аэровзвеси угольной пыли представляет практический интерес для области пожаро- и взрывобезопасности в угольной отрасли. Для решения этой задачи привлекаются как экспериментальные, так и аналитические методы. Цель исследований состоит в выявлении особенностей искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли в зависимости от состава взвеси с учетом перехода части энергии искры в кинетическую энергию движения аэровзвеси.

Влияние состава газозвеси на взрывоопасность смеси и скорость распространения пламени по газозвеси исследовалось в работах [1–9]. В [1] показано, что смесь реакционноспособного газа с воздухом и угольной пылью способна к взрыву при малых концентрациях угольных частиц. Согласно [1] аэровзвесь угольной пыли или метановоздушная смесь, взятые по отдельности, при исследованных концентрациях в воздухе не способны к взрыву, но их композиция становится взрывоопасной. В [2] для газозвеси воздух — уголь теоретически показано, что в нормаль-

ных условиях горение газозвеси становится возможным при добавлении небольшого количества метана или подогреве стенок сосуда. В работе [3] предложена физико-математическая модель воспламенения и детонационного горения газозвеси частиц угольной пыли, основанная на представлениях двухскоростного двухтемпературного континуума механики гетерогенных сред с учетом реакций пиролиза, горения летучих и коксового остатка в условиях высокого давления за ударной волной. Проведено исследование односкоростной и двухскоростной моделей, получено согласие результатов расчетов по указанным моделям. В работах [4–7] исследовалось влияние мелких частиц на скорость распространения пламени газозвеси. В [4] показано, что скорость распространения пламени метановоздушной смеси увеличивается в присутствии мелких частиц угольной пыли. Экспериментальное исследование влияния размера частиц угольной пыли на скорость горения гибридной смеси выполнено в [5]. Установлено, что для ламинарных пламен частицы малого размера снижают нормальную скорость распространения пламени. Противоречие между результатами [4] и [5] было объяснено в работах [6, 7], где показано, что в случае малых начальных концентраций горючего в газе присутствие в газовой смеси реагирующих частиц увеличивает скорость распространения фрон-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-33-60091 мол_а_дк).

© Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., 2018.

та горения. При концентрации горючего в газе, близкой к стехиометрической, частицы уменьшают скорость пламени. В работе [8] представлено экспериментальное исследование горения взвеси угольной пыли в 6.5%-й метановоздушной смеси в сферическом объеме. Авторы [8] указывают на существенное влияние наноразмерных частиц угольной пыли на характеристики горения реакционных газовых смесей. Показано, что скорость роста давления в объеме возрастает в присутствии взвеси частиц угольной пыли по сравнению со смесью без примеси угольной пыли.

В [9] описаны результаты исследования влияния характеристик угольной пыли (зольность, содержание летучих, калорийность и т. д.) на возможность зажигания аэровзвеси угольной пыли. В монографии [10] изложены результаты экспериментов по искровому зажиганию гибридных газовзвесей, определены значения минимальной энергии искрового зажигания и показано, что присутствие горючего газа в газовзвеси приводит к понижению этих значений. Минимальная энергия искрового зажигания углевоздушной смеси может отличаться на один-два порядка в большую сторону от энергии зажигания углеметановоздушной смеси. В [11] экспериментально установлено, что минимальная энергия искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли зависит от массовой концентрации пыли. На соответствующей зависимости имеется минимум, достигаемый при экстремальном значении массовой концентрации пыли, выше или ниже этой экстремальной величины минимальная энергия увеличивается [11].

Теоретическому моделированию искрового зажигания газов посвящены работы [12, 13]. В [12] приведено аналитическое решение этой задачи адиабатическим методом. В [13] на основе теплодиффузионной модели горения газов получены приближенные оценки минимальной энергии искрового зажигания газовой смеси и проведено их сравнение с численным решением задачи. В [14] на основе математической модели искрового зажигания горючей газовой смеси численно исследовалось влияние термического расширения на минимальную энергию искрового зажигания газа, показано, что теплодиффузионная модель искрового зажигания газа занижает значения минимальной энергии искры в два и более раза.

В [15] на основе двухтемпературной тепло-

диффузионной модели горения газовзвесей решена задача об искровом зажигании гибридной газовзвеси. Путем численного решения задачи получены зависимости минимальной энергии зажигания от параметров, характеризующих дисперсную фазу. В качестве горючей газовой смеси выбрана метановоздушная смесь, дисперсная фаза — угольная пыль. Выявлено неоднозначное влияние присутствия частиц экзотермически реагирующей дисперсной фазы на минимальную энергию искры, приводящую к зажиганию газовзвеси: мелкие частицы уменьшают минимальную энергию искры, частицы большего размера вблизи стехиометрического состава газовой смеси увеличивают ее, а вдали от стехиометрического состава — уменьшают. Крупные частицы практически не влияют на минимальную энергию искры, она равна энергии зажигания газовой смеси. Из численного решения системы уравнений, описывающей искровое воспламенение газа, получены значения нижнего и верхнего концентрационных пределов воспламенения метановоздушной смеси, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными; проведено исследование влияния экзотермически реагирующей дисперсной фазы, взвешенной в газовой смеси, на нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения. В [16] решена задача о влиянии лучистого теплопереноса на искровое зажигание газовзвеси частиц, гетерогенно реагирующих с газом. Математическая модель искрового зажигания газовзвеси строится на основе модели [15], лучистый теплоперенос моделируется в диффузионном приближении. Путем численного решения задачи получены зависимости минимальной энергии зажигания от параметров, характеризующих дисперсную фазу. Определена область параметров дисперсной фазы, где лучистый теплоперенос существенно влияет на минимальную энергию искрового зажигания. Получена аналитическая формула для определения критической энергии искрового зажигания газовзвеси, учитывающая лучистый теплоперенос в газовзвеси. Сравнение результатов численного и аналитического решения задачи с известными экспериментальными данными показало удовлетворительное согласие теоретически полученных значений с данными экспериментальных измерений.

Однако в [15, 16] не учитывается движение газовзвеси, обусловленное расширением газа при его разогреве. Целью настоящей рабо-

ты является численное решение задачи об искровом зажигании аэровзвеси угольной пыли с учетом ее движения, обусловленного расширением газа при его разогреве, и определение влияния массовой концентрации и размеров угольных частиц на минимальную энергию искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая постановка задачи формулируется при следующих допущениях. Предполагается, что монодисперсная взвесь угольной пыли с массовой концентрацией m_{dust} равномерно распределена в воздухе. Искровое тепловыделение моделируется мгновенным нитевидным источником тепловыделения, расположенным в центре. Правая граница области бесконечно удалена от источника зажигания. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры [17]. На поверхности частиц протекает гетерогенная реакция первого порядка по кислороду. Скорость гетерогенной химической реакции на частицах лимитируется коэффициентом массоотдачи [18]. Учитывается межфазное взаимодействие между частицами и газом. Потерями тепла на электроды пренебрегаем.

Математическая модель основана на двухфазной двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды [19, 3]. Математическая постановка задачи при заданных допущениях определяется системой уравнений, записанной в цилиндрической системе координат: уравнение неразрывности для газа

$$\frac{\partial r \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_g u_g}{\partial r} = rG, \quad (1)$$

уравнение сохранения импульса газа

$$\frac{\partial r(\rho_g u_g)}{\partial t} + \frac{\partial r(\rho_g u_g^2 + p)}{\partial r} = p - r\tau_{tr} + rG u_k, \quad (2)$$

уравнение энергии газа

$$\begin{aligned} & \frac{\partial r \rho_g (\varepsilon_g + 0.5 u_g^2)}{\partial t} + \\ & + \frac{\partial r [\rho_g u_g (\varepsilon_g + 0.5 u_g^2) + p u_g]}{\partial r} = \\ & = \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T_g) \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + r G c_{p,k} T_k - \end{aligned}$$

$$- r u_k \tau_{tr} + r G \frac{u_k^2}{2} + r \alpha_k n_k S_k (T_k - T_g), \quad (3)$$

уравнение баланса массы кислорода в смеси

$$\begin{aligned} & \frac{\partial r \rho_{O_2}}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{O_2} u_g}{\partial r} = \\ & = \frac{\partial}{\partial r} \left(r D(T_g) \frac{\partial \rho_{O_2}}{\partial r} \right) - r \alpha_1 G, \quad (4) \end{aligned}$$

уравнения баланса массы частиц

$$\frac{\partial r \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_k u_k}{\partial r} = -rG, \quad (5)$$

уравнение сохранения импульса частиц

$$\frac{\partial r(\rho_k u_k)}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_k u_k^2}{\partial r} = r \tau_{tr} - r G u_k, \quad (6)$$

уравнение энергии частиц

$$\begin{aligned} & \frac{\partial r \rho_k (\varepsilon_k + 0.5 u_k^2)}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_k u_k (\varepsilon_k + 0.5 u_k^2)}{\partial r} = \\ & = -r \alpha_k S_k n_k (T_k - T_g) + r Q G - r G c_{p,k} - \\ & - r G \frac{u_k^2}{2} + r \tau_{tr} u_k, \quad (7) \end{aligned}$$

уравнение счетной концентрации частиц

$$\frac{\partial r n_k}{\partial t} + \frac{\partial r n_k u_k}{\partial r} = 0, \quad (8)$$

уравнение состояния газа

$$p = \rho_g R_g T_g, \quad (9)$$

уравнение изменения радиуса частиц

$$r_k = \sqrt[3]{\frac{3 \rho_k}{4 \pi \rho_k^0 n_k}}. \quad (10)$$

Предполагается, что через малый промежуток времени t_z после электрического пробоя профиль температуры соответствует распределению температуры, которое вызвано мгновенным точечным источником тепла, при этом выгорание газа несущественно и им пренебрегают, газ неподвижен. Тогда начальные условия можно записать в виде [14]:

$$\begin{aligned} T_g(r, t_z) &= T_b + \frac{Q_z}{4 \pi \lambda_b t_z} \exp\left(-\frac{r^2}{4 \chi_b t_z}\right), \\ T_k(r, t_z) &= T_b, \quad \rho_{O_2}(r, t_z) = \rho_{O_2,b}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\rho_k(r, t_z) = \rho_{k,b}, \quad u_g(r, t_z) = u_k(r, t_z) = 0,$$

$$\rho(r, t_z) = \rho_b, \quad n_k(r, t_z) = n_{k,b}.$$

Распределение давления в момент времени t_z определяется из уравнения состояния (9).

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{O_2}(0, t)}{\partial r} &= \frac{\partial T_g(0, t)}{\partial r} = \\ &= \frac{\partial \rho(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_k(0, t)}{\partial r} = 0, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial n_k(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_k(0, t)}{\partial r} = 0, \quad (12)$$

$$u_k(0, t) = u_g(0, t) = 0,$$

$$\frac{\partial \rho_{O_2}(\infty, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_g(\infty, t)}{\partial r} = 0.$$

При записи системы (1)–(12) использованы следующие обозначения: $\varepsilon_g = p/[\rho_g(\gamma - 1)]$ — внутренняя энергия газа, $\varepsilon_k = c_k T_k$ — внутренняя энергия частиц, c_k — удельная теплоемкость угля, $\lambda = \lambda_{st}(T/T_{st})^{2/3}$ — коэффициент теплопроводности газа [17], λ_{st} , T_{st} — теплопроводность и температура газа при «нормальных» условиях, T_g , T_k — температура газа и частиц, D — коэффициент диффузии газа, $\alpha_k = \text{Nu}_k \lambda_g / (2r_k)$ — коэффициент теплообмена газа с частицами, $\gamma = c_p/c_v$ — показатель адиабаты, c_p — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, c_v — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, $\beta_m = \lambda_g(T)\text{Nu}_D / (c_g \rho_g r_k)$ — коэффициент массоотдачи частиц [18], Nu_D — диффузионный аналог числа Нуссельта, $G = n_k S_k j_1 \rho_{O_2}$ — скорость изменения массы частиц, $j_1 = \frac{\beta_m k_0 \exp(-E_a/R_u T_k)}{\beta_m + k_0 \exp(-E_a/R_u T_k)}$ — скорость гетерогенной реакции на частицах, $\tau_{tr} = n_k F_{tr}$ — сила трения, $F_{tr} = C_r S_m \rho_g (u_g - u_k) |u_g - u_k|/2$ — сила взаимодействия одиночной частицы с газом, $C_r = 24(1 + 0.15\text{Re}^{0.682})/\text{Re}$ — коэффициент трения, $\text{Re} = 2\rho_g r_k |u_g - u_k|/\eta$ — число Рейнольдса, $\text{Nu}_k = 2 + (\text{Nu}_t^2 + \text{Nu}_t^2)^{1/2}$ — число Нуссельта, где $\text{Nu}_t = 0.664\text{Re}^{0.5}$, $\text{Nu}_t = 0.037\text{Re}^{0.8}$ [20], $\alpha_1 = \mu_{O_2} \nu_{O_2} / (\mu C)$ — коэффициент расхода кислорода в реакции

с частицами угольной пыли, μ — молярная масса, ν — стехиометрический коэффициент реакции, ρ — плотность, ρ_{O_2} — парциальная плотность кислорода, u — скорость, t — время, r — координата по радиусу, n_k , S_k , r_k — количество, площадь поверхности и радиус частиц, p — давление, Q — тепловой эффект реакции на поверхности частиц, Q_z — энергия искрового разряда, k_0 — константа скорости химической реакции, E_a — энергия активации, R_u — универсальная газовая постоянная, $\chi = \lambda/(c_v \rho)$ — коэффициент температуропроводности газа, S_m — площадь миделева сечения, η — коэффициент динамической вязкости газа. Индексом b отмечены начальные значения параметров состояния, z — характеристики искры, k — параметры частиц, g — параметры газа, O_2 — параметры кислорода, C — параметры угля.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Задача (1)–(12) решалась численно с использованием метода Годунова [21–23]. Слагаемые в правых частях уравнений, описывающие процессы переноса за счет теплопроводности и диффузии, аппроксимировались явно на трехточечном шаблоне. Решение уравнений (5)–(7) проводилось методом [24]. Шаг по пространству в области источника зажигания (до координаты $r = 10^{-3}$ м) задавался постоянным и равным $\Delta h_i = 10^{-6}$ м. После координаты $r = 10^{-3}$ м шаг по пространству увеличивался в направлении правой границы по правилу $\Delta h_{i+1} = 1.005 \cdot \Delta h_i$. Размер расчетной области выбирался таким, чтобы за время воспламенения и формирования волны горения ударная волна, возникающая при энергосвободении от искрового пробы, не успела дойти до границы расчетной области. Величина схемной диффузии при выбранном шаге Δh была много меньше коэффициента диффузии D . Шаг по времени определялся из условия устойчивости Куранта, $\Delta t < \Delta h_i / (\max[c] + \max[|u_g|])$, где c — скорость звука.

Проверка методики решения системы уравнений (1)–(12) и используемой программы на достоверность численного решения осуществлялась путем расчета адиабатической температуры горения и проверки закона сохранения массы. Проверка закона сохранения массы осуществлялась следующим образом. Предполагалось, что химическая реакция на частицах описывается уравнением $C + O_2 = CO_2$.

Так как молярные массы углерода и кислорода соотносятся как 12 : 32, то для полного сгорания 12 г угольной пыли требуется 32 г кислорода. При выбранных для расчета параметрах $T_{k,b} = 800$ К, $\rho_{k,b} = 0.063$ кг/м³, $\rho_{O_2,b} = 0.085$ кг/м³ имеет место недогорание частиц. Масса недогоревших частиц определяется соотношением $\rho_{k,end} = \rho_{k,b} - (12/32)\rho_{O_2,b} = 0.032$ кг/м³. Результат численного решения с высокой точностью согласуется с результатами аналитического расчета — $\rho_{k,end} = 0.032$ кг/м³. Адиабатическая температура сгорания аэрозвеси угольной пыли определялась из решения задачи о самовоспламенении угольной пыли в замкнутом объеме. Начальная температура газа и частиц задавалась равной $T_k = T_g = 800$ К. Конечную температуру в объеме после сгорания пыли можно получить из решения системы уравнений:

$$\frac{d\rho_g \varepsilon_g}{dt} = G c_{p,k} T_k + \alpha_k n_k S_k (T_k - T_g), \quad (13)$$

$$\frac{d\rho_k \varepsilon_k}{dt} = -\alpha_k S_k n_k (T_k - T_g) + QG - G c_{p,k} T_k.$$

Суммируя уравнения (13), получаем

$$\frac{d\rho_g \varepsilon_g}{dt} + \frac{d\rho_k \varepsilon_k}{dt} = QG.$$

Величину G определяем из уравнения (4): $\frac{d\rho_{O_2}}{dt} = -\alpha_1 G$ — или из уравнения (5): $\frac{d\rho_k}{dt} = -G$. Конечная температура в случае избытка окислителя находится из уравнения

$$\frac{d\rho_g c_g T_g}{dt} + \frac{d\rho_k c_k T_k}{dt} = -\frac{Q}{\alpha_1} \frac{d\rho_{O_2}}{dt},$$

в случае избытка горючего — из уравнения

$$\frac{d\rho_g c_g T_g}{dt} + \frac{d\rho_k c_k T_k}{dt} = -Q \frac{d\rho_k}{dt}.$$

При равенстве начальных температур и установлении равенства конечных температур газа и частиц имеем два уравнения для определения конечной температуры:

при избытке кислорода

$$T_{k,end} = \frac{(\rho_g c_{g,v} + \rho_k c_k)_b}{(\rho_g c_{g,v} + \rho_k c_k)_{end}} T_{k,b} + \frac{Q(\rho_{O_2,b} - \rho_{O_2,end})}{\alpha_1(\rho_g c_{g,v} + \rho_k c_k)_{end}}, \quad (14)$$

при избытке горючего

$$T_{k,end} = \frac{(\rho_g c_{g,v} + \rho_k c_k)_b}{(\rho_g c_{g,v} + \rho_k c_k)_{end}} T_{k,b} + \frac{Q(\rho_{k,b} - \rho_{k,end})}{(\rho_g c_{g,v} + \rho_k c_k)_{end}}. \quad (15)$$

Здесь индексом *end* обозначены значения параметров после установления адиабатической температуры. Из расчетов при $T_{k,b} = 800$ К, $\rho_{g,b} = 0.42$ кг/м³, $c_{v,g} = 768.21$ Дж/(кг·К), $\rho_{k,b} = 0.063$ кг/м³, $c_k = 1464$ Дж/(кг·К), $Q = 29$ МДж/кг, $\alpha_1 = 2.67$, $\rho_{O_2,b} = 0.08542$ кг/м³ получены конечные значения плотностей $\rho_{g,end} = 0.453$ кг/м³, $\rho_{k,end} = 0.032$ кг/м³, $\rho_{O_2,end} = 0$. Расчет по формуле (14) дает значение конечной температуры $T_{k,end} = 3206$ К, из численного решения — $T_{k,end} = 3207$ К. Погрешность расчета составляет 0.03 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Решение задачи об искровом зажигании аэрозвеси угольной пыли выполнено при следующих теплофизических и кинетических параметрах угольной пыли [9, 23]: $\alpha_1 = 2.67$, $k_0 = 79 \cdot 10^3$ м/с, $E_a = 135$ кДж/моль, $Q = 20$ МДж/кг, $c_{p,g} = 1065$ Дж/(кг·К), $c_{v,g} = 768.2$ Дж/(кг·К), $c_k = 1464.4$ Дж/(кг·К), $\rho_k^0 = 1400$ кг/м³, $\eta = 2 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\lambda_{st} = 0.025$ Вт/(м·К), $R_u = 8.31$ Дж/(моль·К), $R_g = 290$ Дж/(кг·К), $\gamma = 1.39$, $T_b = 300$ К, $\rho_{O_2,b} = 0.264$ кг/м³, $\rho_b = p_b/R_g T_b$, $p_b = 0.1$ МПа. Начальные значения параметров газа соответствуют параметрам атмосферного воздуха при температуре 300 К и давлении 751 мм рт. ст. В соответствии с граничными условиями (12) такие же параметры атмосферы сохраняются на внешней границе расчетной области. Размер частиц угольной пыли варьировался в диапазоне $r_k = 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$ м, массовая концентрация — в диапазоне $m_{dust} = \rho_{k,b} = 0.1 \div 1$ кг/м³. В расчетах время t_z задавалось таким, чтобы за этот промежуток времени t_z температура в центре энерговыделения от мгновенного искрового пробыа повысилась не более чем до 20000 К. Из расчетов определялась минимальная энергия искрового разряда Q_z , при которой формируется фронт горения в аэрозвеси угольной пыли.

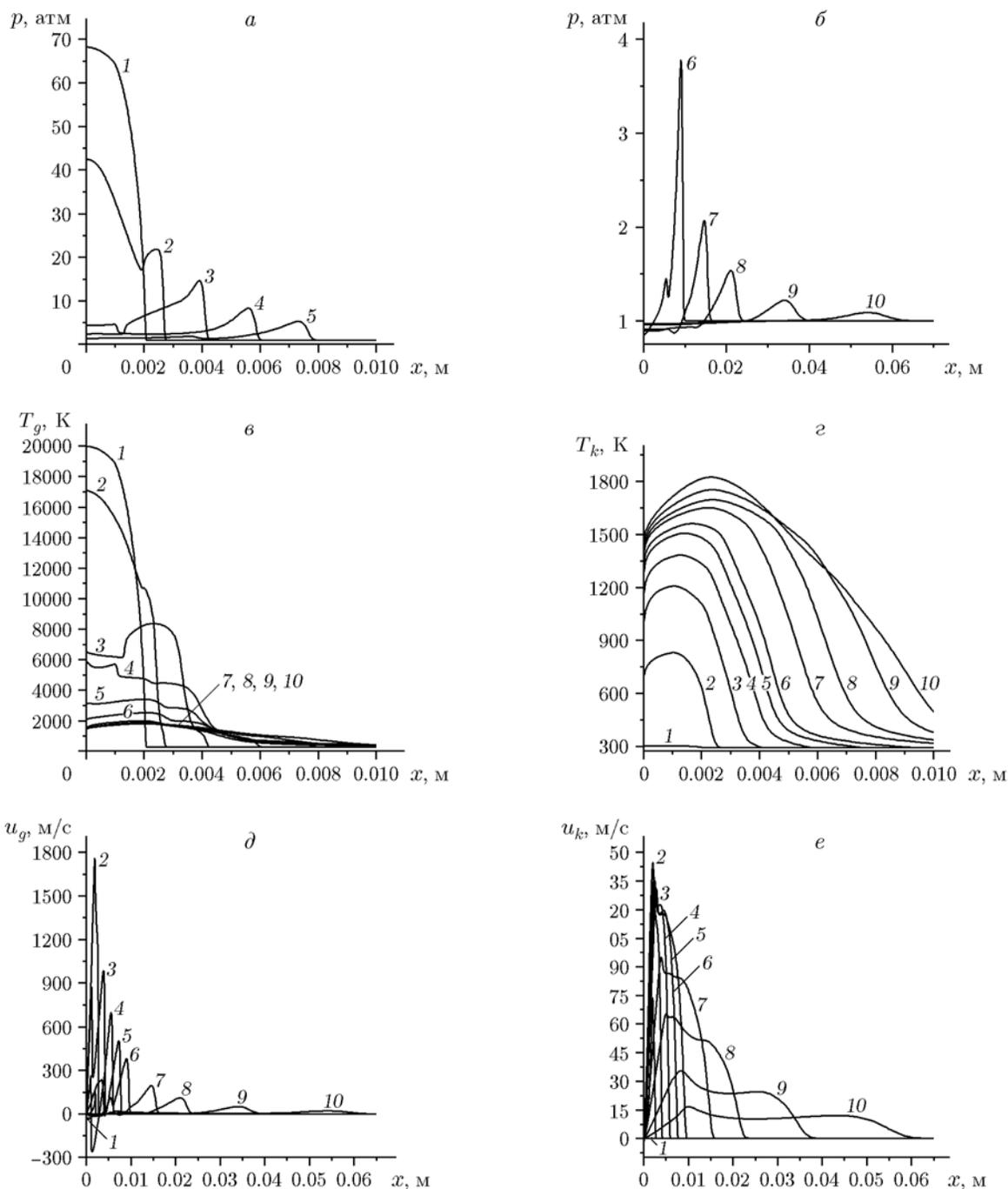


Рис. 1. Распределения давления газа (а, б), температур газа (в) и частиц (г), скоростей газа (д) и частиц (е) по пространству в различные моменты времени ($m_{dust} = 0.5 \text{ кг/м}^3$, $r_k = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $Q_z = 600 \text{ Дж/м}$):

1 — 10^{-8} с , 2 — $5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, 3 — $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, 4 — $3 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, 5 — $5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, 6 — $7.5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, 7 — $1.8 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, 8 — $3.3 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, 9 — $6.8 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, 10 — $1.3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$

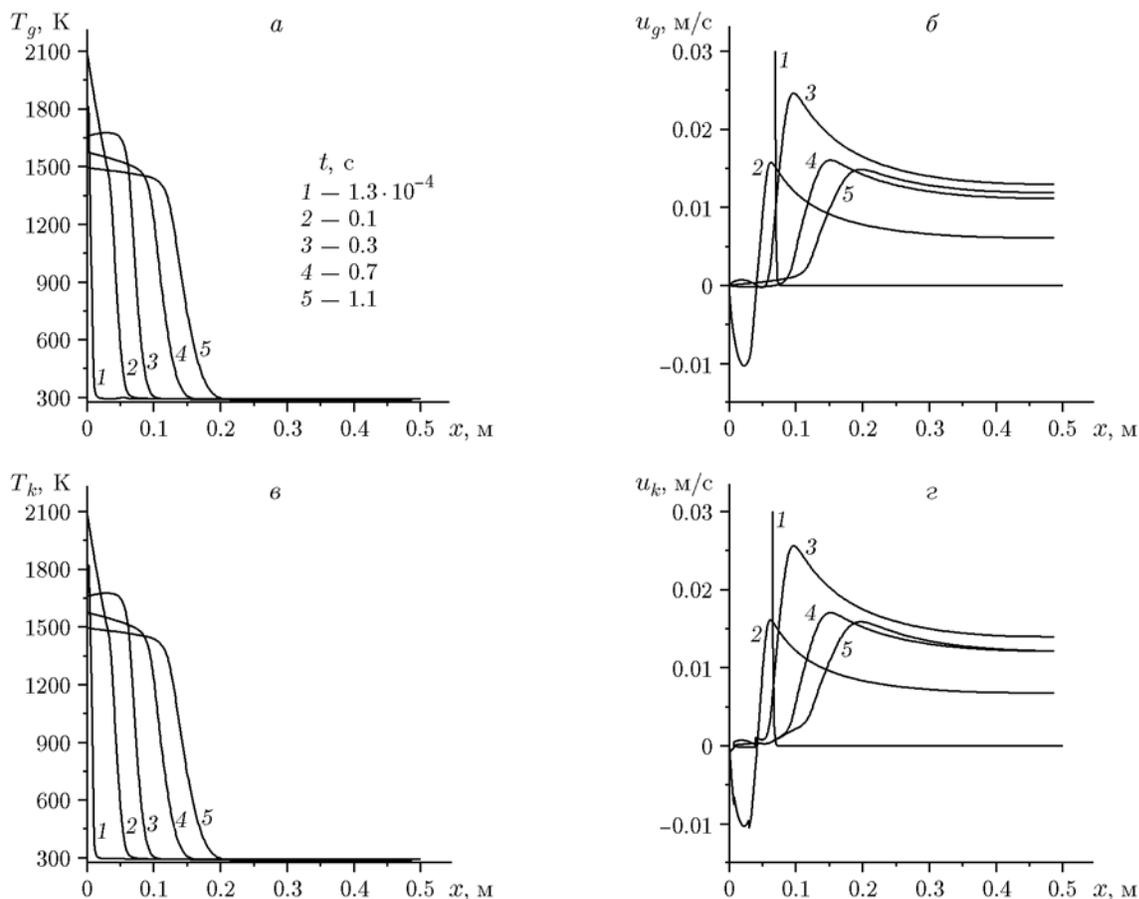


Рис. 2. Распределения температуры (*a*) и скорости (*б*) газа, температуры (*в*) и скорости (*г*) частиц по пространству в различные моменты времени ($m_{dust} = 0.5 \text{ кг/м}^3$, $r_k = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $Q_z = 600 \text{ Дж/м}$)

На рис. 1 представлена динамика изменения параметров аэродисперсной среды в окрестности энерговыделения от искры при зажигании ($Q_z = 600 \text{ Дж/м}$). Кривые построены в фиксированные моменты времени в интервале от начала процесса до $1.3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$. Энерговыделение при искровом пробое в газе приводит к повышению температуры и давления. От зоны искрового пробоя начинает распространяться ударная волна цилиндрической формы. Интенсивность ударной волны по мере ее продвижения от центра убывает (рис. 1,*a,б*). К моменту времени $1.3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ударная волна проходит расстояние 0.06 м, давление газа в ней опускается до 1.1 атм (рис. 1,*б*, кривая 10). Температура газа уменьшается за счет адиабатического расширения начальной разогретой области и теплообмена газа с частицами; температура частиц возрастает (рис. 1,*в,г*). Скорость газа за ударной волной также уменьшается по ме-

ре ее распространения (рис. 1,*д*). Скорость частиц в потоке газа сначала меньше скорости газа, частицы ускоряются за счет аэродинамического взаимодействия с потоком воздуха и движутся вместе с потоком со скоростью, мало отличающейся от скорости газа (рис. 1,*е*). Рис. 2 иллюстрирует динамику изменения параметров аэродисперсной среды в промежуток времени от $1.3 \cdot 10^{-4}$ до 1.1 с, в течение которого волна горения аэровзвеси угольной пыли формируется и выходит на стационарный режим распространения. При стационарном распространении фронта горения скорость движения газа и частиц не превышает 2 см/с и определяется расширением газа за счет его разогрева при горении частиц (кривые 4, 5). Скорость частиц мало отличается от скорости газа, их температура немного выше температуры газа.

Представленный на рис. 1, 2 случай искрового зажигания соответствует успешному

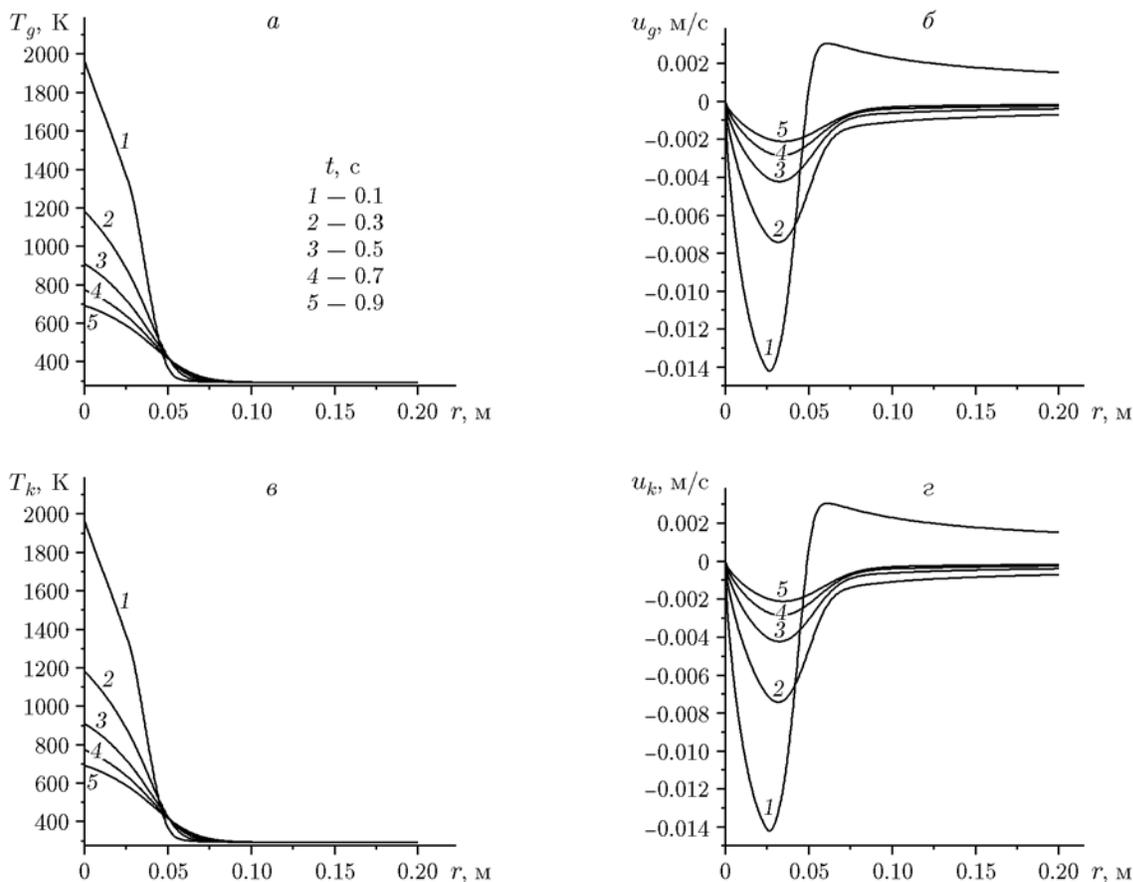


Рис. 3. Распределения температуры (а) и скорости (б) газа, температуры (в) и скорости (г) частиц по пространству в различные моменты времени ($m_{dust} = 0.5 \text{ кг/м}^3$, $r_k = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $Q_z = 500 \text{ Дж/м}$)

зажиганию аэровзвеси, когда внесенной энергии достаточно для формирования устойчивой волны горения. На рис. 3 приведены результаты расчета для такой же аэровзвеси угольной пыли, как на рис. 1, 2, при $Q_z = 500 \text{ Дж/м}$. В этом случае внесенной энергии недостаточно для устойчивого зажигания и спустя некоторое время горение затухает. При этом температуры газа и частиц уменьшаются, движение смеси, возникшее из-за внесенной энергии, прекращается, скорости газа и частиц со временем стремятся к нулю.

Были выполнены параметрические расчеты задачи (1)–(12) для определения зависимости минимальной энергии искрового зажигания от размера и массовой концентрации частиц. На рис. 4 представлена зависимость минимальной энергии зажигания аэровзвеси угольной пыли от массовой концентрации частиц заданных размеров. Зависимость имеет U-образную форму и качественно согласуется

с экспериментальными данными [11]. Области ниже кривых соответствует затухание, области выше кривых — зажигание и выход на режим распространения волны горения. Из сравнения рис. 4, а и 4, б следует, что с увеличением размера частиц нижняя часть U-образной кривой растягивается, а сама кривая сдвигается вправо. Для аэровзвеси с мелкими частицами радиуса 10^{-7} м кривая имеет минимум при массовой концентрации угольной пыли 0.4 кг/м^3 . Увеличение радиуса частиц в пять раз, от 10^{-7} до $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, приводит к увеличению минимальной энергии искрового зажигания на порядок.

На рис. 5 представлена зависимость минимальной энергии искрового зажигания от размера частиц при массовой концентрации частиц $m_{dust} = 0.3$ и 0.8 кг/м^3 . Ось ординат представлена в логарифмическом виде. Из рис. 5 видно, что с увеличением размера частиц ми-

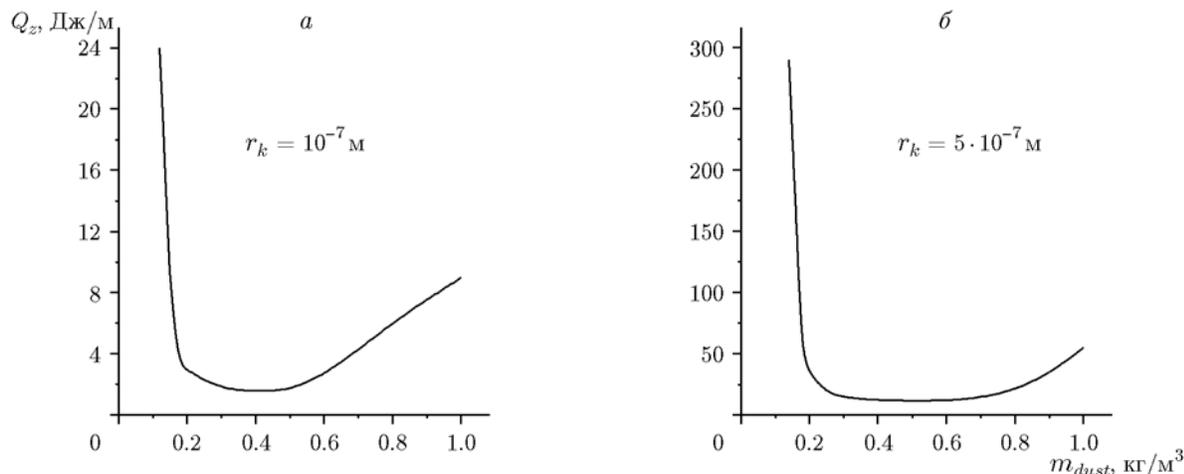


Рис. 4. Зависимость минимальной энергии зажигания аэровзвеси угольной пыли от массовой концентрации частиц разного размера

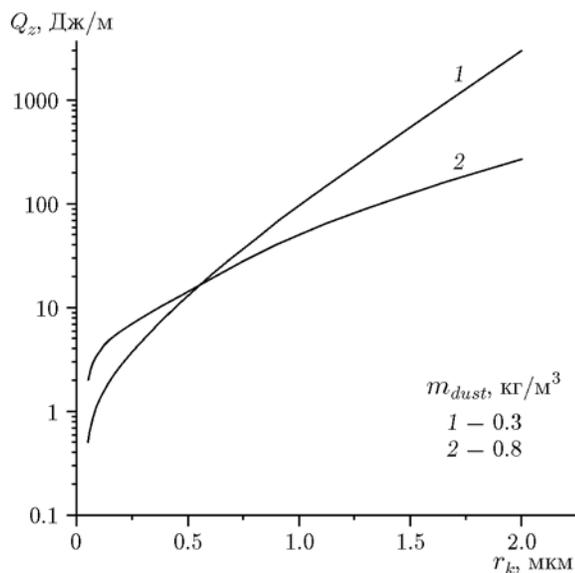


Рис. 5. Зависимость минимальной энергии зажигания аэровзвеси угольной пыли от размера частиц

нимальная энергия искрового зажигания повышается. Это объясняется увеличением времени реагирования частиц с окислителем и большей шириной фронта горения для более крупных частиц. Например, аэровзвесь угольной пыли с частицами радиуса 10^{-6} м при $m_{dust} = 0.3$ кг/м³ воспламеняется при $Q_z \approx 105$ Дж/м. Увеличение размера частиц от 10^{-6} до $2 \cdot 10^{-6}$ м при $m_{dust} = 0.3$ кг/м³ приводит к возрастанию минимальной энергии искрового зажигания до 275 Дж/м.

Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными [10] по минимальной энергии искрового зажигания для трех длиннопламенных углей из различных месторождений при $m_{dust} = 0.4$ кг/м³. Минимальные энергии искрового зажигания аэровзвесей угольной пыли разных месторождений различаются и лежат в диапазоне $4 \div 80$ мДж. Расчеты по модели (1)–(12) при массовой концентрации угольной пыли 0.4 кг/м³ и радиусе частиц $5 \cdot 10^{-8} \div 10^{-6}$ м дают значения в интервале $0.5 \div 70$ Дж/м. При межэлектродном расстоянии $3 \cdot 10^{-3}$ м [10] минимальная энергия искрового зажигания составляет $1.5 \div 210$ мДж. Полученный результат удовлетворительно совпадает с результатами экспериментов, представленными в [10]. Превышение минимальной энергии зажигания по сравнению с [10] объясняется отсутствием данных о размерах частиц угольной пыли, используемой в экспериментах [10].

ВЫВОДЫ

Проведенное численное исследование искрового зажигания монодисперсной аэровзвеси угольной пыли показало, что минимальная энергия искрового зажигания существенно зависит от массовой концентрации и размера частиц угольной пыли, при этом массовая концентрация оказывает неоднозначное влияние. Существует значение массовой концентрации частиц угольной пыли, при которой энергия искрового зажигания минимальна. При увеличе-

нии или уменьшении массовой концентрации частиц по сравнению с экстремальным значением минимальная энергия искрового зажигания возрастает. При увеличении размера частиц также наблюдаются ее рост и сдвиг вправо U-образной кривой этой зависимости. Сопоставление полученных результатов расчета с данными экспериментов [10] показало их удовлетворительное согласие.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Калякин С., Костенко В., Завьялова Е., Штрох Л.** Влияние примесей шахтных горючих газов на взрывоопасность угольных аэрозолей // Aktualne problemy zwalczania zagrożeń górnictwowych: II konferencja naukowo-techniczna, Brenna. — 2012. — N 7-9. — С. 176–184.
2. **Bradley D., Lawes M., Scott M. J., Usta N.** The structure of coal-air-CH₄ laminar flames in a low-pressure burner: CARS measurements and modeling studies // Combust. Flame. — 2001. — V. 124, N 1-2. — P. 82–105.
3. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Математическое моделирование гетерогенной детонации угольной пыли в кислороде с учетом стадии воспламенения // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 1. — С. 89–99.
4. **Крайнов А. Ю.** Моделирование распространения пламени в смеси горючих газов и частиц // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 2. — С. 3–9.
5. **Rockwell S. R., Rangwala A. S.** Influence of coal dust on premixed turbulent methane-air flames // Combust. Flame. — 2013. — V. 160. — P. 635–640.
6. **Дементьев А. А., Крайнов А. Ю., Моисеева К. М.** О влиянии концентрации горючего в гибридной газозвеси на скорость распространения фронта горения // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. — 2015. — № 4 (36). — С. 55–64.
7. **Дементьев А. А., Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Палеев Д. Ю.** Сопоставление результатов моделирования распространения пламени в гибридной газозвеси с экспериментальными данными // Инж.-физ. журн. — 2016. — Т. 89, № 6. — С. 1538–1546.
8. **Бакланов А. М., Валиулин С. В., Дубцов С. Н., Замачиков В. В., Клишин В. И., Конторович А. Э., Коржавин А. А., Онищук А. А., Палеев Д. Ю., Пуртов П. А.** Наноаэрозольная фракция в техногенной угольной пыли и ее влияние на взрывоопасность пылеметановоздушных смесей // Докл. АН. — 2015. — Т. 461, № 3. — С. 295–299.
9. **Померанцев В. В., Арефьев К. М., Ахмедов Д. Б. и др.** Основы практической теории горения: учеб. пособие для вузов / под ред. В. В. Померанцева. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
10. **Корольченко А. Я.** Пожаровзрывобезопасность промышленной пыли. — М.: Химия, 1986.
11. **Нецепляев М. И., Любимова А. И., Петрухин П. М. и др.** Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. — М.: Недра, 1992.
12. **Виллюнов В. Н.** Искровое воспламенение газовых смесей // Докл. АН СССР. — 1973. — Т. 208. — С. 66–69.
13. **Виллюнов 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.
14. **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.
15. **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.
16. **Крайнов А. Ю.** Влияние лучистого теплопереноса на минимальную энергию искрового зажигания газозвесей // Физика горения и взрыва. — 2001. — Т. 37, № 3. — С. 16–24.
17. **Шкадинский К. Г., Барзыкин В. В.** Закономерности зажигания газов накаленной поверхностью с учетом диффузии и гидродинамики // Физика горения и взрыва. — 1968. — Т. 4, № 2. — С. 176–181.
18. **Франк-Каменецкий Д. А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987.
19. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987.
20. **Справочник по теплообменникам:** в 2 т. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — Т. 1.
21. **Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П.** Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976.
22. **Липанов А. М., Бобрышев В. П., Алиев А. В., Спиридонов Ф. Ф., Лисица В. Д.** Численный эксперимент в теории РДТТ. — Екатеринбург: Наука, 1994.
23. **Krainov A. Yu., Moiseeva K. M.** Modeling of the flame propagation in coal-dust — methane-air mixture in an enclosed sphere volume // J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — V. 754. — 052003.
24. **Крайко А. Н.** О поверхностях разрыва в среде, лишенной «собственного» давления // Прикл. математика и механика. — 1979. — Т. 43, № 3. — С. 500–510.

Поступила в редакцию 27/I 2017 г.,
в окончательном варианте — 8/IX 2017 г.