

УДК 532.593

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ АЭРОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ЗАМКНУТОМ СФЕРИЧЕСКОМ ОБЪЕМЕ

К. М. Моисеева¹, А. Ю. Крайнов¹, С. И. Голоскоков²,
М. С. Сазонов², О. Ю. Лукашов³

¹ Томский государственный университет, 634050 Томск, akrainov@ftf.tsu.ru

² НЦ ВостНИИ, 650065 Кемерово

³ ООО "Шахтэксперт-Системы", 650065 Кемерово

Представлены экспериментальные данные по скорости изменения давления при горении аэровзвеси угольной пыли в замкнутом сферическом объеме при различных массовых концентрациях угольной пыли. На основе уравнений механики дисперсных сред в односкоростном однотемпературном приближении сформулирована физико-математическая модель горения аэровзвеси угольной пыли в замкнутом сферическом объеме. Скорость распространения волны горения относительно газозвеси и скорость горения частицы угольной пыли являются параметрами модели и определяются путем согласования результатов расчетов с экспериментальными данными. Получено хорошее их согласие. Предложенный подход может быть использован для оценки влияния горения угольной пыли на интенсивность ударных волн в угольных шахтах при аварийных взрывах метана с участием угольной пыли.

Ключевые слова: газозвесь угольной пыли, сферический объем, скорость горения, экспериментальные измерения, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV2022.9281

ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов горения реакционноспособных смесей требует проведения экспериментов по определению особенностей горения в различных условиях, в частности в открытом канале либо в замкнутом сферическом объеме [1]. Сжигание аэровзвеси угольной пыли в сферическом объеме с источником зажигания в центре является стандартным методом определения пожаровзрывоопасности угольной пыли различных месторождений. Сферический объем используется в качестве инструмента для определения нормальной скорости распространения пламени, максимального давления после сгорания, скорости нарастания давления и других характеристик, важных для изучения пожаровзрывоопасности горючих сред.

В зависимости от массовой концентрации угольной пыли меняется максимальное давление в сферическом объеме после сгорания смеси. Дисперсный состав, содержание летучих

компонентов в частицах, а также массовая концентрация частиц определяют скорость роста давления в замкнутом сферическом объеме.

В работах [2–4] проанализировано влияние наноразмерных частиц угольной пыли в составе аэрозоля на скорость роста давления при сгорании угольной пыли в замкнутом сферическом объеме. В работе [5] исследованы закономерности ингибирования пламени газозвеси угольной пыли водяным паром. В [6] предложена физико-математическая модель горения метановоздушной смеси в замкнутом сферическом объеме. В [7] экспериментально исследовано влияние добавки водорода на ламинарную скорость горения метановоздушных и природных газоздушных смесей в бомбе постоянного объема. Выполненные в [8–10] исследования горения газозвеси угольной пыли в каналах, в том числе разветвленных, позволяют давать прогнозы по влиянию состава смеси на скорость распространения пламени. В работе [11] представлены результаты экспериментального исследования характеристик распространения пламени в вертикальной ударной трубе и выполнена проверка применимости физико-математической модели горения уголь-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-71-10034).

© Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Голоскоков С. И., Сазонов М. С., Лукашов О. Ю., 2023.

ной пыли [12] для прогнозирования параметров нестационарного процесса горения. Объединение результатов экспериментов по горению газозвеси угольной пыли в замкнутом сферическом объеме и в канале позволяет разработать методики расчета влияния горения газозвесей угольной пыли в выработках угольной шахты на интенсивность ударных волн [13].

Настоящее исследование направлено на определение характеристик горения аэрозвеси угольной пыли в замкнутом объеме в зависимости от состава смеси и на обоснование применимости физико-математической модели путем сравнения ее результатов с данными экспериментов по горению аэрозвеси угольной пыли в сферической бомбе постоянного объема.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерения проводились методами, изложенными в [14, 15]. В экспериментах использовалась 20-литровая манометрическая бомба. Максимальное давление и максимальная скорость роста давления определялись по результатам измерения от двух датчиков давления. Была проведена серия испытаний с использованием пыли угля марки Д АО «Разрез Инской». Содержание летучих компонентов в этом угле составляло 41.5 ± 1.0 %, зольность угля 4.2 ± 0.2 %. Дисперсный состав пыли, используемой в экспериментах, представлен на рис. 1 (d_{p0} — начальный диаметр частицы угля). Угольная пыль состояла из 76 фракций. По измеренному гранулометрическому составу пыли были определены среднемассовый диаметр $d_{43} = 27.9$ мкм, средний геометрический диаметр 18.7 мкм, средний квадратичный диа-

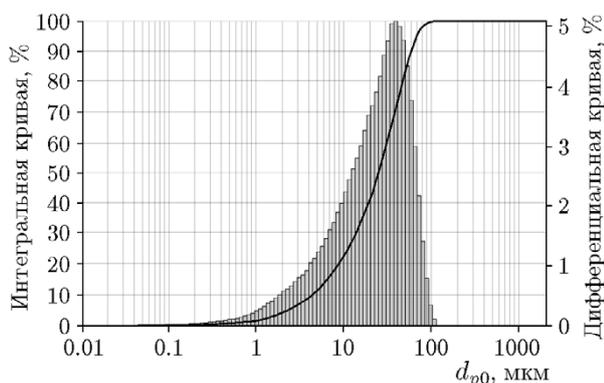


Рис. 1. Гранулометрический состав пыли

метр 34.8 мкм, средний гармонический диаметр 8.56 мкм.

Эксперимент проводился следующим образом. Сферический объем вакуумируется до давления 0.5 атм. Тестируемая пыль заданной массы подается из специальной емкости с повышенным давлением в сферический объем через специальное сопло с клапаном. Давление в емкости с пылью задается таким, чтобы после вдува угольной пыли в сферическом объеме создавалось давление 1 атм, начальная температура в сосуде 20 °С. При отличии давления в сферическом объеме от атмосферного после вдува угольной пыли оно выравнивается с атмосферным специальным клапаном. Через 60 мс после вдува пыли в сферическую емкость инициируется ее воспламенение с помощью двух химических воспламенителей, расположенных в центре сосуда, каждый из которых имел энергию 5 кДж. Максимальное давление взрывной волны и максимальная скорость роста давления взрыва в сфере определяются как средние арифметические в каждой серии испытаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Были проведены серии испытаний при массовых концентрациях угольной пыли 0.125, 0.250 и 0.5 кг/м³. В таблице приведены результаты двух серий испытаний: максимальное давление в объеме после сгорания взвеси угольной пыли, максимальная скорость роста давления в объеме. По результатам измерений избыточное давление взрывной волны изменяется в диапазоне $p_{\max} = 0.76 \div 0.946$ МПа, максимальная скорость роста давления взрывной волны — в диапазоне $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} = 16.22 \div 59.84$ МПа/с при концентрациях выбранной пыли угля в аэрозвеси $m = 0.125, 0.250, 0.500$ кг/м³. На рис. 2 представлены зависимости давления в объеме от времени при этих значениях массовой концентрации угольной пыли в одной серии испытаний.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПЛАМЕНИ

В [1] приведена методика определения нормальной скорости распространения фронта горения в горячем газе на основе экспериментальных данных о сгорании горячего газа в сферическом объеме. Воспользуемся формулами этого метода. Эксперименты с угольной

Результаты экспериментов

M, кг	m, кг/м ³	Первая серия испытаний				Вторая серия испытаний			
		p _{max} , МПа	(dp/dt) _{max} , МПа/с	t _f , мс	u _f , м/с*	p _{max} , МПа	(dp/dt) _{max} , МПа/с	t _f , мс	u _f , м/с*
0.0025	0.125	0.790	22.29	50	1.805	0.760	16.22	60	1.365
0.005	0.250	0.938	59.84	20	3.981	0.946	51.88	23	3.422
0.01	0.50	0.821	42.10	30	3.063	0.842	47.92	27	3.40

* Расчет по формуле (5). M — масса угольной пыли в эксперименте.

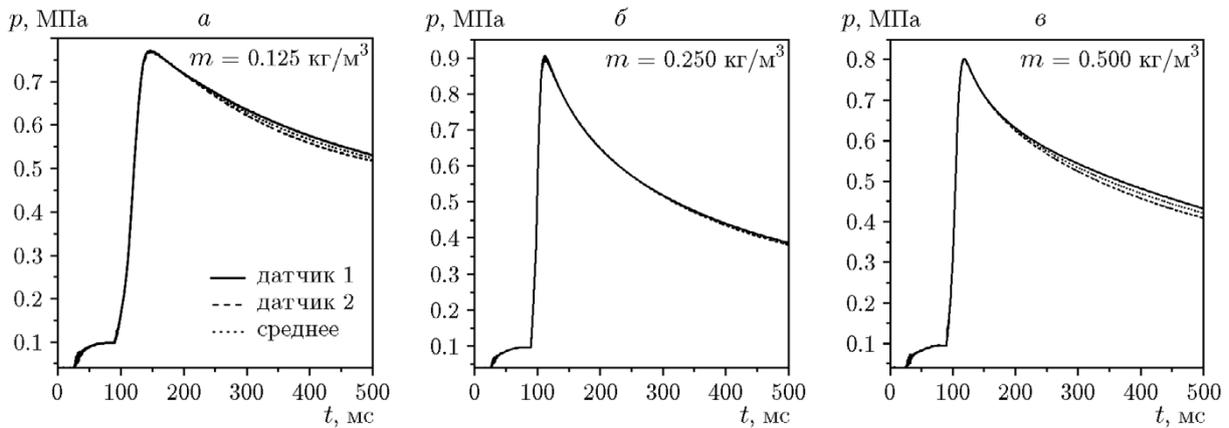


Рис. 2. Экспериментальные зависимости давления в объеме от времени при массовой концентрации угольной пыли 0.125 (а), 0.250 (б), 0.5 кг/м³ (в)

пылью проводились в непрозрачном сферическом объеме 20 л. Поэтому, как рекомендуется в [1], для определения скорости распространения пламени относительно свежей смеси (нормальной скорости пламени) используются данные о максимальной скорости роста давления в объеме и максимальном давлении в объеме в момент окончания горения. Согласно [1] скорость пламени определяется из уравнения

$$u_f = \frac{1}{1 + (p_{max}/p(t) - 1)k} \frac{dr_b}{dt}, \quad (1)$$

где $\frac{dr_b}{dt}$ — видимая скорость распространения волны горения, r_b — радиус сферического пламени, p_{max} — максимальное давление в сферическом объеме после окончания горения, $p(t)$ — изменение давления во времени, $k = \frac{c_v(1 - \varepsilon) + c_3\varepsilon}{c_p(1 - \varepsilon) + c_3\varepsilon}$ — показатель адиабаты газовзвеси, c_3 , c_p , c_v — удельные теплоемкости угля и газа соответственно при постоянных давлении и объеме, ε — относительная массовая доля частиц угля к аэровзвеси.

Радиус сферического объема продуктов сгорания связан с давлением и температурой формулой

$$\left(\frac{r_b}{a}\right)^3 = 1 - \frac{p_m}{p(t)} \frac{T_{um}}{T_m} \frac{p_{max} - p(t)}{p_{max} - p_m}, \quad (2)$$

$$T_{um} = T_m \left(\frac{p(t)}{p_m}\right)^{(k-1)/k},$$

где a — радиус сферического объема, p_m — давление в объеме перед сгоранием очередной порции горючего, T_m , T_{um} — температура свежей смеси соответственно до и после ее сжатия после сгорания очередной порции горючего (адиабатическое сжатие).

Из выражения (2) можно определить $\frac{dr_b}{dt}$:

$$\frac{dr_b}{dt} = \frac{a}{3} \left[-\frac{1}{k} \left(\frac{1}{p_m}\right)^{-1/k} (p(t))^{-1/k-1} \times \right. \\ \left. \times \frac{p_{max} - p(t)}{p_{max} - p_m} + \left(\frac{p(t)}{p_m}\right)^{-1/k} \frac{1}{p_{max} - p_m} \right] \frac{dp}{dt} /$$

$$\left/ \left[1 - \left(\frac{p(t)}{p_m} \right)^{-1/k} \frac{p_{\max} - p(t)}{p_{\max} - p_m} \right]^{2/3} \right. \quad (3)$$

Приняв в выражении (3) $p(t) = p(t_{\max}) = p_{\max}$, получим

$$\frac{dr_b}{dt} = \frac{a}{3} \left(\frac{p_m}{p_{\max}} \right)^{1/k} \frac{1}{p_{\max} - p_m} \frac{dp}{dt}. \quad (4)$$

После подстановки (4) в (1) будем иметь

$$u_f = \frac{a}{3} \left(\frac{p_m}{p_{\max}} \right)^{1/k} \frac{1}{p_{\max} - p_m} \frac{dp}{dt}.$$

Приняв скорость роста давления равной максимальной скорости, определяемой из эксперимента, $\frac{dp}{dt} = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max}$, и давление $p_m = p_{\max}/2$, получим аналитическую формулу для приближенного определения нормальной скорости распространения пламени по аэровзвеси:

$$u_f = \frac{a}{3} \frac{2^{1-1/k}}{p_{\max}} \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max}. \quad (5)$$

Результаты расчетов по формуле (5) представлены в таблице. Расчетная зависимость скорости горения от массовой концентрации угольной пыли m была аппроксимирована зависимостью

$$u_f(m) = 1.805 + 20.827(m - m_1) - 45.333(m - m_1)^2, \quad (6)$$

где $m_1 = 0.125 \text{ кг/м}^3$, а величина m изменяется в интервале $0.125 \leq m \leq 0.5 \text{ кг/м}^3$.

Согласно зависимости (6) максимум скорости распространения пламени соответствует массовой концентрации угольной пыли 0.355 кг/м^3 . Это согласуется с данными [16, 17].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В начальный момент времени в сферическом объеме радиусом 0.164 м (объем 20 л) находится аэровзвесь угольной пыли с известной массовой концентрацией m , однородной по объему. В центре объема от химического воспламенителя происходит воспламенение аэровзвеси, и начинается распространение пламени по аэровзвеси.

Горение аэровзвеси сопровождается локальным повышением давления газа, что приводит к возникновению волн сжатия. В сферическом объеме распространяются волна горения и волны сжатия (из-за теплового расширения продуктов сгорания).

Математическая модель движения и горения газопылевой среды в сферическом объеме строится на основе уравнений газовой динамики и механики дисперсных сред [18] в односкоростном и однотемпературном приближении при следующих предположениях. Движение газа описывается уравнениями газовой динамики. Частицы угольной пыли предполагаются сферической формы и одинакового размера. Изменение массовой концентрации угольной пыли описывается уравнением сохранения массы дисперсной фазы с учетом массообмена при горении. При нагревании частиц угольной пыли происходит газификация летучих компонентов. Скорость разложения летучих компонентов угля описывается законом Аррениуса с первым порядком реакции по концентрации летучих компонентов в угле. В продуктах сгорания частиц угольной пыли предполагается известная доля конденсированной фазы (золы). Скорость распространения волны горения относительно негорящей газопылевой среды (нормальная скорость горения) предполагается известной. Горение частиц угля описывается геометрическим законом, линейная скорость горения частиц угольной пыли предполагается известной. Полнота сгорания частиц угля определяется количеством окислителя в аэровзвеси. Тепловой эффект от сгорания газифицированных летучих компонентов в волне горения учитывается в величине теплоты сгорания углеметановоздушной смеси. Собственный объем частиц угольной пыли и золы учитывается в уравнении состояния газа в форме Ван-дер-Ваальса.

Уравнения при сделанных допущениях записываются в сферической системе координат в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho r^2}{\partial t} + \frac{\partial \rho u r^2}{\partial r} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho_3 r^2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_3 u r^2}{\partial r} =$$

$$= -r^2 G_\psi (1 - \zeta_1) \eta (r_z - r) - r^2 G_v, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho_v r^2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_v u r^2}{\partial r} = -r^2 G_v, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + u \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{G_\psi}{n \rho_p V_0} \eta(r_z - r), \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho u r^2}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) r^2}{\partial r} = 2rp, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho E r^2}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u + p u) r^2}{\partial r} = \\ = r^2 Q_\psi G_\psi \eta(r_z - r) + r^2 c_p T G_v, \end{aligned} \quad (12)$$

$$p(1/\rho - \alpha) = RT, \quad (13)$$

$$R = c_p(1 - \varepsilon) - c_v(1 - \varepsilon), \quad \alpha = \rho_3/(\rho \rho_p),$$

$$\rho = \rho_g + \rho_3, \quad \varepsilon = \rho_3/\rho,$$

$$E = C_v T + u^2/2, \quad C_v = c_v(1 - \varepsilon) + c_3 \varepsilon,$$

$$k = \frac{c_v(1 - \varepsilon) + c_3 \varepsilon}{c_p(1 - \varepsilon) + c_3 \varepsilon}.$$

Обозначения: t — время, r — радиальная координата, T — температура, ρ — плотность аэровзвеси, ρ_g — плотность газовой фазы, ρ_3 — распределенная плотность дисперсной фазы, ρ_v — распределенная плотность летучих компонентов в составе дисперсной фазы, ρ_p — собственная плотность угля, p — давление, u — скорость, ψ — объемная сгоревшая доля частицы пыли, R — газовая постоянная, E — полная энергия единицы объема двухфазной смеси, G_v — массовая скорость выделения летучих компонентов из частиц угольной пыли, G_ψ — массовая скорость газопритока от горения частиц угольной пыли, Q_ψ — теплота сгорания углеметановоздушной смеси, ζ_1 — доля золы в продуктах горения, n — число частиц угольной пыли в единице объема, V_0 — начальный объем частицы угля, r_z — координата фронта воспламенения аэровзвеси угольной пыли, ε — относительная массовая доля частиц угля к аэровзвеси, $\eta(r)$ — единичная функция Хевисайда. Индексы: g — газ, 3 — угольная пыль, v — летучие компоненты, 0 — начальные условия.

Определим функцию массоприхода от горения частиц угля. Доля сгоревшего объема частицы угля $\psi = \Delta V/V_0$, где $V_0 = \pi d_{p0}^3/6$, $\Delta V = V_0 - V(t)$, тогда $\psi(t) = 1 - (d(t)/d_{p0})^3$. Площадь горячей поверхности $s(t) = s_0(d(t)/d_{p0})^2$, $s_0 = \pi d_{p0}^2$. Относительная поверхность горения определяется в виде $\sigma(\psi) = s(t)/s_0 = (1 - \psi)^{2/3}$. Число частиц в единице объема n связано с ρ_3 формулой

$$n = \frac{\rho_3}{\rho_p} \frac{1}{\pi d_{p0}^3/6} = \frac{\rho_3}{\rho_p} \frac{1}{V_0(1 - \psi)}.$$

Газоприток от горения частиц в единице объема при заданной массовой концентрации частиц и диаметре частиц, равном среднемассовому диаметру, $d_{p0} = d_{43}$, запишется в виде $G_\psi = n s_0 \sigma(\psi) \rho_p a_1$. В предположениях однокоростной модели горения угольной пыли в воздухе предельная начальная массовая концентрация угольной пыли, способная сгореть в воздухе, составляет $m_* = 0.1$ кг/м³. В случае недостатка кислорода в смеси частицы угольной пыли не догорают. Массовая доля сгоревшего объема частиц угля при избытке угольной пыли в воздухе определяется как $\psi_* = m_*/m$. Тогда газоприток от горения частиц угольной пыли при их заданной начальной массовой концентрации запишется в виде

$$G_\psi = \begin{cases} n s_0 \sigma(\psi) \rho_p a_1, & \psi < \psi_*, \\ 0, & \psi = \psi_* \text{ или } r_p = 0, \end{cases} \quad (14)$$

где a_1 — линейная скорость горения частицы угля.

Массовая скорость образования летучих компонентов из угольной пыли определяется законом Аррениуса:

$$G_v = \rho_v k_{0v} \exp\left(-\frac{E_v}{R_u T}\right), \quad (15)$$

где E_v — энергия активации химической реакции, k_{0v} — предэкспоненциальный множитель, R_u — универсальная газовая постоянная.

Согласно сделанным предположениям фронт горения в аэровзвеси движется относительно аэровзвеси с известной нормальной скоростью u_f . Перемещения границы между областями, занятыми горящими и негорящими частицами (фронт зажигания частиц угольной пыли), определяются кинематическим уравнением

$$\frac{dr_z}{dt} = u + u_f, \quad r_z(0) = r_{z0}. \quad (16)$$

Начальные условия:

$$p(r, 0) = p_0, \quad T(r, 0) = \begin{cases} T_0, & r > r_b, \\ T_b, & r \leq r_b, \end{cases}$$

$$u(r, 0) = 0, \quad \rho_3(r, 0) = m,$$

$$\rho_v(r, 0) = m\eta_v, \quad \psi(r, 0) = 0,$$

где η_v — массовая доля летучих компонентов в угле.

В центре сферы ставятся условия симметрии. На внутренней поверхности сферы ставятся граничные условия непротекания:

$$u(0, t) = u(R_{sf}, t) = 0, \quad (18)$$

где R_{sf} — радиус сферы.

Система уравнений и соотношения для правых частей (7)–(18) описывают движение пылегазовой смеси с учетом того, что в ней распространяется волна горения.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для численного решения системы уравнений (7)–(13) используется метод Годунова [19], в котором при определении потоков массы, импульса и энергии на границах расчетных ячеек решается задача о распаде произвольного разрыва в параметрах состояния пылегазовой смеси. Учитывается различие значений показателя адиабаты k и собственного объема частиц дисперсной фазы α в соседних расчетных ячейках. Для решения уравнения (10) применяется схема с использованием разностей против потока. Уравнение (16) решается методом Эйлера.

Тестирование методики и программы проведено на решении модельных задач. Была решена задача о сгорании угольной пыли в постоянном объеме. В этом случае задавалось равномерное распределение угольной пыли, поэтому движение газопылевой смеси не возникает. После сгорания заданной массы угольной пыли получена равновесная температура, которая отличается на 0.2 % от температуры, определенной из термодинамического соотношения.

Решена задача о распространении ударной волны в канале. В процессе расчетов контролировалась выполнимость законов сохранения массы газа, массы угольной пыли и полной энергии с точностью не хуже 99.8 %.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ АЭРОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

В [20] показано, что линейная скорость горения частиц угольной пыли a_1 в диффузионном режиме — квазистационарная величина. По данным [21–24] скорость распространения ламинарного пламени в покоящейся аэровзвеси угольных частиц составляет $0.5 \div 2.0$ м/с. Наличие турбулентности в газовом потоке увеличивает скорость распространения пламени в аэровзвеси до десятков метров в секунду. В представленной модели (7)–(18) скорость распространения пламени относительно свежей смеси определяется зависимостью (6). Линейная скорость горения частицы угольной пыли a_1 является параметром согласования расчетов с измерениями времени сгорания аэровзвеси в объеме.

Расчеты проводились при следующих исходных данных: $p_0 = 0.10132$ МПа, $T_0 = 300$ К, $T_b = 2000$ К, $\rho_p = 1460$ кг/м³, $c_p = 1095$ Дж/(кг·К), $c_v = 805$ Дж/(кг·К), $c_3 = 1465$ Дж/(кг·К), $Q_\psi = 29$ МДж/кг, $\zeta_1 = 0.045$, $E_v = 209$ кДж/моль, $k_{0v} = 3.85 \cdot 10^{15}$ с⁻¹, $R_{sf} = 0.164$ м, $d_{p0} = 28 \cdot 10^{-6}$ м.

Для согласования результатов расчетов по модели (7)–(18) с экспериментальными данными подобрано значение скорости горения частицы пыли $a_1 = 0.56 \cdot 10^{-3}$ м/с при $m = 0.125$ кг/м³. Величина a_1 подбиралась, исходя из согласования расчетного и экспериментального интервалов времени от начала горения до достижения максимального давления в объеме в момент времени t_f — конец горения аэровзвеси в объеме. Экспериментальные значения t_f приведены в таблице. Расчеты при других значениях массовой концентрации угольной пыли проводились с фиксированным подобранным значением a_1 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены распределения параметров аэровзвеси угольной пыли по радиусу сферического объема с шагом по времени 2 мс от момента зажигания. Распределение давления по радиусу объема во времени практически однородное с небольшими колебаниями (рис. 3,а). За фронтом зажигания частиц газозвеси температура повышается, холодная свежая аэровзвесь оттесняется к периферии сосуда (рис. 3,б), где повышаются плотность газа

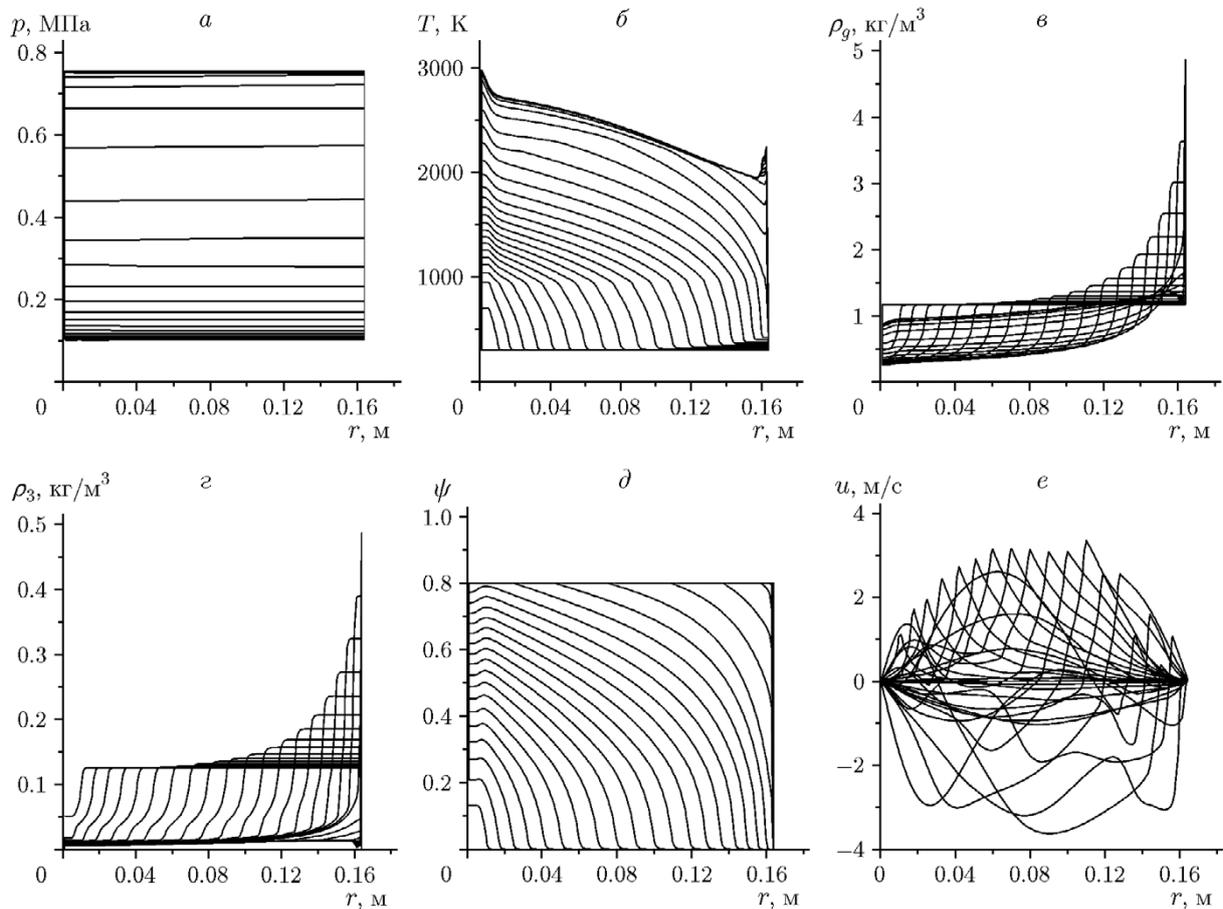


Рис. 3. Распределения параметров аэровзвеси угольной пыли по радиусу сферического объема при распространении пламени от его центра после зажигания в последовательные моменты времени с шагом 2 мс ($m = 0.125 \text{ кг/м}^3$):

a — давление, *б* — температура, *в* — плотность газа, *г* — распределенная плотность угольной пыли, *д* — объемная сгоревшая доля частицы пыли, *е* — скорости движения газозвеси

и аэровзвеси (рис. 3,в,г) и ее температура за счет адиабатического сжатия газа (рис. 3,б). По мере продвижения фронта горения к стенке сферического объема температура в этой области растет, возникает отток продуктов сгорания в направлении от стенки к центру сосуда (рис. 3,е). Температура вблизи стенки увеличивается по мере выгорания исходной смеси, одновременно повышается температура в области позади фронта горения из-за адиабатического сжатия (эффект Махе) (рис. 3,б).

Изменение давления во времени в центре объема имеет колебательный характер (рис. 4,а). Изменение давления на стенке объема также носит колебательный характер, но менее выраженный. Скорость распространения пламени по радиусу объема неравномерна (рис. 4,б) и обусловлена колебательным движе-

нием аэровзвеси в объеме (см. рис. 3,е).

Полученные результаты с хорошей точностью соответствуют приведенным в таблице экспериментальным данным по максимальному давлению после сгорания газозвеси и времени ее сгорания. Получено хорошее количественное согласие расчетных и экспериментальных значений давления во времени при горении аэровзвеси угольной пыли в сферическом объеме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены экспериментальные данные по скорости давления при горении аэровзвеси угольной пыли в замкнутом сферическом объеме при различных массовых концентрациях угольной пыли. Разработана физико-математическая модель горения аэровзвеси

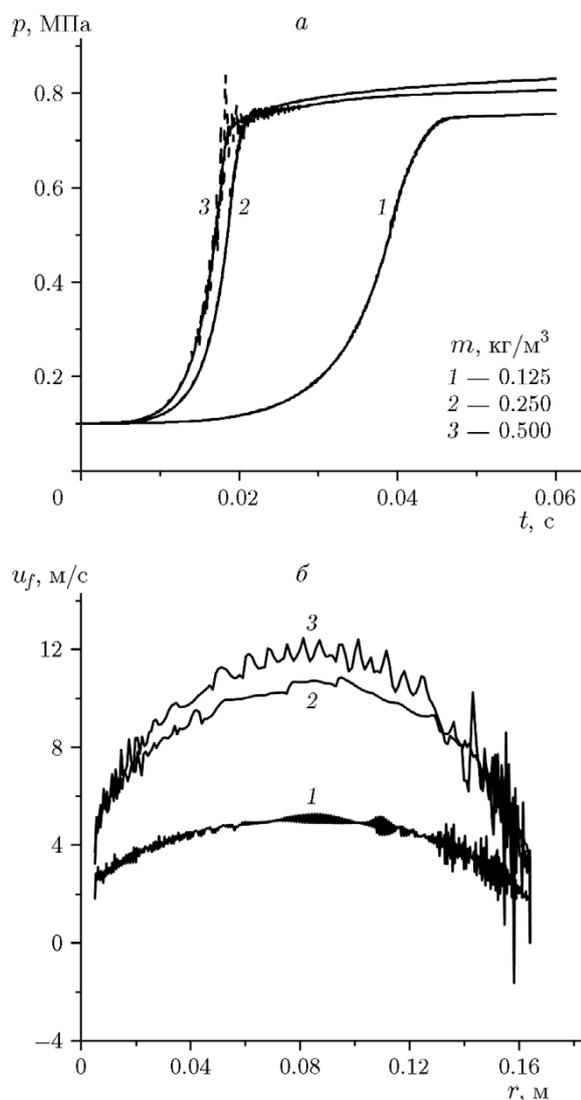


Рис. 4. Изменение давления в центре сферического объема и на его стенке во времени (а), зависимость видимой скорости фронта горения от координаты (б) при распространении фронта от центра сферического объема

угольной пыли в замкнутом сферическом объеме. Параметрами модели являются скорость распространения волны горения относительно газозвеси и скорость горения частицы угольной пыли. Скорость распространения волны горения относительно газозвеси определяется из данных экспериментов по сгоранию аэрозвеси угольной пыли в замкнутом сферическом объеме. Скорость горения частицы угольной пыли определяется путем согласования результатов расчета времени сгорания аэрозвеси угольной пыли в замкнутом сферическом объеме с экспериментальными данными. Пред-

ложенная модель и методика численного решения системы уравнений математической модели характеризуются высокой скоростью численного решения, что важно при проведении параметрических расчетов. Разработанная модель может быть использована для исследования закономерностей распространения пламени в аэрозвеси угольной пыли в сети выработок угольных шахт при аварийном взрыве метана с участием угольной пыли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах / пер. с англ. под ред. К. И. Щелкина, А. А. Борисова. — М.: Мир, 1968.
2. Валиулин С. В., Онищук А. А., Палеев Д. Ю., Замащиков В. В., Коржавин А. А., Фомин В. М. Влияние органического аэрозоля в угольных шахтах на предел воспламенения метановоздушной смеси // Хим. физика. — 2021. — Т. 40, № 4. — С. 41–48. — DOI: 10.31857/S0207401X21040130.
3. Валиулин С. В., Бакланов А. М., Дубцов С. Н., Замащиков В. В., Клишин В. И., Конторович А. Э., Коржавин А. А., Онищук А. А., Палеев Д. Ю., Пуртов П. А., Куйбида Л. В. Влияние наноаэрозольной фракции техногенной угольной пыли на горение метановоздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 4. — С. 36–50. — DOI: 10.15372/FGV20160404.
4. Бакланов А. М., Валиулин С. В., Дубцов С. Н., Замащиков 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 пыле-метано-воздушных смесей // Докл. АН. — 2015. — Т. 461, № 3. — С. 295.
5. Cao X., Wei H., Wang Z., Fan L., Zhou Y., Wang Z. Experimental research on the inhibition of methane/coal dust hybrid explosions by the ultrafine water mist // Fuel. — 2023. — V. 331, Pt 2. — 125937. — DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125937.
6. Крайнов А. Ю., Моисеева К. М. Моделирование горения метано-воздушной смеси в замкнутом сферическом объеме // Инж.-физ. журн. — 2018. — Т. 91, № 4. — С. 977–983.
7. Mitu M., Razus D., Schroeder V. Laminar burning velocities of hydrogen-blended methane-air and natural gas-air mixtures, calculated from the early stage of $p(t)$ records in a spherical vessel // Energies. — 2021. — V. 14, N 22. — 7556. — DOI: 10.3390/en14227556.
8. Zhang L., Yang Q., Shi B., Niu Y., Zhong Z. Influences of a pipeline's bending angle on the propagation law of coal dust explosion induced

- by gas explosion // *Combust. Sci. Technol.* — 2021. — V. 193, N 5. — P. 798–811. — DOI: 10.1080/00102202.2019.1673381.
9. **Niu Y., Zhang L., Shi B., Yang Q., Zhong Z.** Methane–coal dust mixed explosion in transversal pipe networks // *Combust. Sci. Technol.* — 2021. — V. 193, N 10. — P. 1734–1746. — DOI: 10.1080/00102202.2019.1711071.
 10. **Guo C., Shao H., Jiang S., Wang Y., Wang K., Wu Z.** Effect of low-concentration coal dust on gas explosion propagation law // *Powder Technol.* — 2020. — V. 367. — P. 243–252. — DOI: 10.1016/j.powtec.2020.03.045.
 11. **Моисеева К. М., Пинаев А. В., Васильев А. А., Крайнов А. Ю., Пинаев П. А.** Исследование горения углеметановоздушной взвеси в длинном закрытом канале // *Физика горения и взрыва.* — 2022. — Т. 58, № 5. — С. 54–63. — DOI: 10.15372/FGV20220507.
 12. **Моисеева К. М., Крайнов А. Ю.** Численное моделирование искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли // *Физика горения и взрыва.* — 2018. — Т. 54, № 2. — С. 61–70. — DOI: 10.15372/FGV20180207.
 13. **Крайнов А. Ю., Лукашов О. Ю., Моисеева К. М., Колегов Г. А.** Влияние горения угольной пыли на интенсивность ударной волны от аварийного взрыва метана в шахте // *Уголь.* — 2022. — № 9. — С. 73–78. — DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-73-78.
 14. **Standard EN 14034-1-2011:2004+A1:2011** Determination of explosion characteristics of dust clouds. — Part 1: Determination of the maximum explosion pressure p_{max} of dust clouds. — Published 12.01.2011.
 15. **Standard EN 14034-2:2006+A1:2011.** Determination of explosion characteristics of dust clouds. — Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dp/dt)_{max}$ of dust clouds. — Published 12.01.2011.
 16. **Eckhoff R. K.** *Dust Explosions in the Process Industries.* — 3d ed. — Gulf Professional Publishing. — 2003.
 17. **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.
 18. **Нигматулин Р. И.** *Динамика многофазных сред.* — М.: Наука, 1987. — Ч. 1.
 19. **Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П.** Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976.
 20. **Основы** практической теории горения: учеб. пособие для вузов / под ред. В. В. Померанцева. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
 21. **Вайнштейн П. Б., Нигматулин Р. И.** Горение смесей газа с частицами // *ПМТФ.* — 1971. — Т. 12, № 4. — С. 19–33.
 22. **Вайнштейн П. Б.** Радиационный фронт пламени в смеси газа с твердыми частицами // *ПМТФ.* — 1973. — Т. 14, № 3. — С. 83–91.
 23. **Озерова Г. Е., Степанов А. М.** К расчету распространения радиационного пламени по газозвеси частиц твердого горючего // *Физика горения и взрыва.* — 1979. — Т. 15, № 2. — С. 66–73.
 24. **Krishenik P. M., Rumanov E. N., Shkadinskii K. G.** Modeling of combustion wave propagation in a carbon dust/gas mixture // *Combust. Flame.* — 1994. — V. 99, N 3-4. — P. 713–722. — DOI: 10.1016/0010-2180(94)90066-3.

*Поступила в редакцию 14.12.2022.
Принята к публикации 01.02.2023.*