

УДК 532.593

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ УГЛЕМЕТАНОВОЗДУШНОЙ ВЗВЕСИ В ДЛИННОМ ЗАКРЫТОМ КАНАЛЕ

К. М. Моисеева¹, А. В. Пинаев², А. А. Васильев²,
А. Ю. Крайнов¹, П. А. Пинаев²

¹Томский государственный университет, 634050 Томск, Moiseeva_KM@t-sk.ru

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены экспериментальные данные о скорости распространения волны горения углеметановоздушной смеси относительно стенок закрытого канала при различных массовых концентрациях угольной пыли. Разработана физико-математическая модель горения этой смеси на основе уравнений газовой динамики и механики дисперсных сред в односкоростном однотемпературном приближении. В предложенной модели скорость распространения волны горения относительно газовзвеси и скорость горения частицы угольной пыли являются параметрами модели и определяются путем согласования результатов расчетов с экспериментальными данными. Сопоставление результатов расчетов скорости распространения пламени относительно стенок канала в широком интервале массовых концентраций угольной пыли показало удовлетворительное согласие с опытами. Предложенный подход может быть использован для оценки влияния горения угольной пыли на интенсивность ударных волн в угольных шахтах при аварийных взрывах метана.

Ключевые слова: газовзвесь угольной пыли, метановоздушная смесь, скорость горения, экспериментальные измерения, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV20220507

ВВЕДЕНИЕ

При добыче угля на стенках угольных шахт постепенно осаждается угольная пыль, способная поддерживать или усиливать пламя и взрывную волну при аварийном взрыве метана. В шахте всегда существует вероятность внезапного выброса из породы угольного газа, содержащего преимущественно метан. После смешения угольного газа с воздухом возможно воспламенение горючей смеси от искры или источника зажигания с последующим образованием волны горения и взрывной волны. Поток газа за фронтом взрывной волны способен сорвать угольную пыль со стенок выработки и создать взвесь угольной пыли. Известно, что угольная пыль в воздухе становится взрывоопасной, если ее концентрация превышает нижний предел взрываемости $\rho^* \approx 30 \div 80 \text{ г/м}^3$ [1, 2].

Двухтопливные гетерогенные системы метан — воздух — угольная пыль изучены меньше, чем гомогенные смеси метан — воздух.

Некоторые экспериментальные результаты исследования волн горения, взрывных и детонационных волн в системах метан — воздух — угольная пыль, метан — кислород — угольная пыль содержатся в работах [3, 4]. В [5–12] представлены результаты экспериментальных и численных исследований распространения пламени в газовзвеси угольной пыли в зависимости от ее состава.

В [5] экспериментально исследовано распространение пламени в газовзвесах угольной пыли различной дисперсности при взрыве в трубе с поворотом (трубопроводе, соединенном с трубами под различными углами). Установлена возможность возникновения повторного взрыва в трубопроводе и показано [5], что взрыв газа может вызвать взрыв поднятой пыли. После поворота трубопровода всегда наблюдалось ускорение пламени, и чем больше был угол поворота, тем сильнее ускорялось пламя.

В [6] исследованы характеристики распространения пламени в углеметановоздушной смеси в условиях разветвленной сети труб. Исследовалось влияние дисперсности угольной пыли на избыточное давление и скорость рас-

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

© Моисеева К. М., Пинаев А. В., Васильев А. А.,
Крайнов А. Ю., Пинаев П. А., 2022.

пространения пламени в трубопроводе. Для эксперимента использовали угольную пыль с размером частиц $\delta = 20 \div 270$ мкм. Согласно результатам эксперимента максимальное избыточное давление и максимальная скорость распространения пламени достигались при размере частиц $\delta = 64 \div 106$ мкм. В работе [7] проведено исследование взрывоопасности угольной пыли различной дисперсности. Исследование выполнено в сферическом объеме. Проанализирована скорость роста давления в объеме. Показано, что мелкодисперсная пыль дает большую скорость роста давления по сравнению с крупнодисперсной. В [8] численно показано, что уменьшение радиуса частиц угольной пыли приводит к увеличению скорости нарастания давления в объеме. В работах [9, 10] проведены исследования взрывоопасности углеметановоздушной смеси в зависимости от массовой концентрации угольной пыли. Показано, что максимальное значение пикового давления ударной волны сначала возрастает, а затем уменьшается с увеличением концентрации угольной пыли.

Результаты исследований показывают сложный характер зависимости скорости распространения пламени газозвеси угольной пыли от ее состава и условий горения. Теоретические исследования горения газозвесей угольной пыли дают качественное соответствие расчетной скорости пламени с экспериментальными данными только для ламинарного режима распространения пламени [11–13]. Распространение пламени в газозвеси угольной пыли в широких каналах и в выработках угольных шахт носит турбулентный характер. Теоретические результаты определения скорости распространения пламени в газозвеси при турбулентном режиме отсутствуют. Для практических расчетов взрывов газа с угольной пылью, когда требуется быстрый анализ закономерностей распространения пламени и ударных волн, предлагается использовать скорость распространения пламени в качестве параметра в математической модели. При этом значения скорости пламени предлагается выбирать из эксперимента.

Цель настоящего исследования — экспериментально определить скорость распространения пламени в системах метан — воздух — угольная пыль при различных концентрациях угольной взвеси; разработать математическую модель горения углеметановоздушной газозвеси

и провести проверку ее пригодности, используя экспериментальные данные.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводили в закрытой с торцов вертикальной ударной трубе длиной $L = 6.75$ м, диаметром $d = 70$ мм. Газовые смеси составляли по манометру класса 0.4 в баллонах емкостью 40 л с давлением $1 \div 1.5$ МПа. Газовые смеси использовали в опытах не менее чем через сутки. Трубу перед опытами вакуумировали, затем заполняли газовой смесью через редуктор до атмосферного давления. Для создания двухтопливных гетерогенных систем исследуемые смеси CH_4 — воздух равномерно подавали в трубу через контейнер с угольными частицами и расположенный сверху распылитель. Газовзвеси инициировали сверху электрической искрой с энергией около 1 Дж. В опытах среднемассовая концентрация частиц пыли в трубе составляла $\rho_3 \approx 0.10 \div 0.42$ кг/м³.

Для фиксации фронта пламени использовали систему фотоумножителей и пьезодатчиков. Профили свечения с трех фотоумножителей ФЭУ1 ÷ ФЭУ3 и сигналы с восемью пьезодатчиков Д1 ÷ Д8 регистрировали тремя 4-лучевыми осциллографами Tektronix TDS2014. Сигналы с пьезодатчиков Д1 ÷ Д8 поступали на осциллографы через истоковые повторители. Конструкция и методы тарировки датчиков описаны в [14, 15]. В опытах пьезодатчики использовали как индикаторы теплового воздействия для фиксации пламени. Датчики данной конструкции вырабатывают электрический сигнал за счет деформации поверхности при ее нагреве в пламени. Ошибки измерения скорости пламени с помощью ФЭУ и датчиков не превышали 5 %. Расстояния от начала трубы до датчиков Д1 ÷ Д8 $x = 79, 91, 182.5, 286, 298, 529, 549, 606.5$ см соответственно. ФЭУ1 расположен напротив датчика Д3, ФЭУ2 — на расстоянии $x = 248.5$ см. ФЭУ3 располагали напротив датчика Д7 либо Д6. В экспериментах с угольными взвесями после каждого опыта оставшийся в контейнере порошок взвешивали и определяли количество осевшей угольной пыли на нижнем фланце и на стенках трубы (путем взвешивания ветоши до и после протирки трубы). Эти измерения позволяли установить реальную среднемассовую концентрацию частиц пыли в опыте и долю сгоревшего угля.

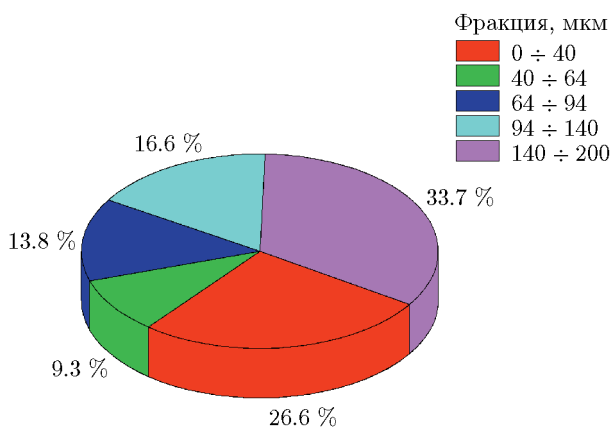


Рис. 1. Массовый состав частиц угля по фракциям

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве объекта исследований выбраны смеси $0.07 \text{ CH}_4 + 0.93$ воздух с угольной пылью при атмосферном давлении. Опыты проведены

с порошком частиц кузбасского угля размером $\delta = 0 \div 200$ мкм. Массовое распределение частиц угля по фракциям приведено на рис. 1. Данные о фракционном составе получены с использованием набора сит.

Наибольшее по массе количество частиц угля содержится в самой мелкой фракции $0 \div 40$ мкм ($\approx 26.6\%$) и в самой крупной фракции $140 \div 200$ мкм ($\approx 33.7\%$).

Трубу заполняли газозвесью, продувая равномерно газовую смесь через контейнер с порошком угля. Заполнение трубы прекращали, когда давление в трубе достигало 0.1 МПа. Массовая концентрация взвеси угольных частиц зависит от времени заполнения трубы. Систему ($0.07 \text{ CH}_4 + 0.93$ воздух)/угольная пыль инициировали искрой, после чего по трубе распространялось яркое пламя. На рис. 2 представлены зависимости средней скорости пламени $u_{m,exp}$ от координаты x для групп массовой концентрации угольной пыли в газозвеси. Пламя распространяется слева напра-

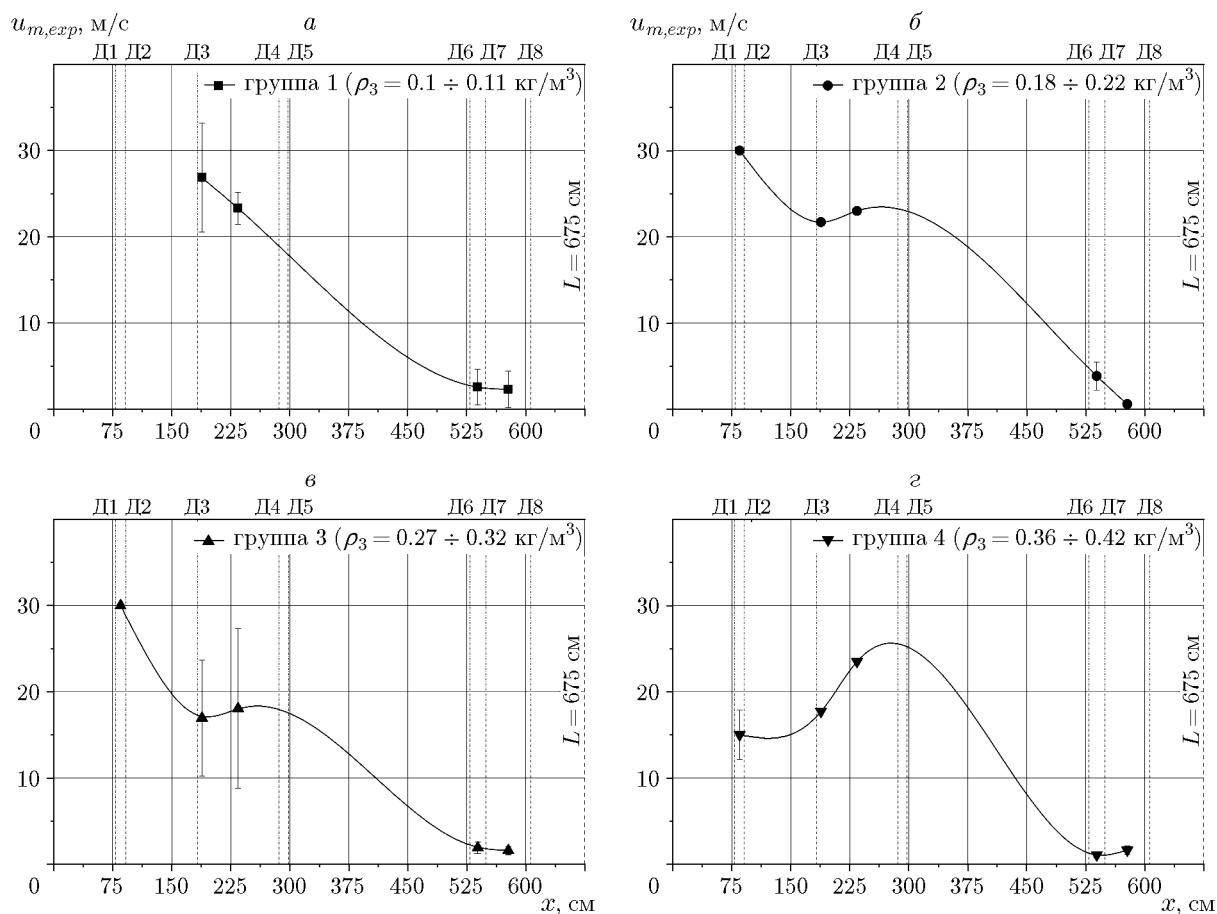


Рис. 2. Средняя по длине канала скорость пламени двухтопливных смесей ($0.07 \text{ CH}_4 + 0.93$ воздух)/угольная пыль с разной концентрацией пыли

во, и средняя его скорость всегда убывает к концу трубы. При увеличении концентрации угольной взвеси скорость пламени на участке трубы $1.75 < x < 2.50$ м либо временно стабилизируется (группы 2, 3 на рис. 2), либо возрастает (группа 4). После прохождения расстояния 2.5 м средняя скорость пламени начинает падать и вблизи правого закрытого конца канала равна $2 \div 4$ м/с. Высокое значение скорости $u_{m,exp}$ на начальном участке канала обусловлено расширением области продуктов сгорания при повышении температуры. Также наблюдается слабая зависимость скорости пламени относительно стенок от массовой концентрации угольной пыли.

Для определения скорости распространения пламени в углеметановоздушной газозвеси относительно стенок канала в других условиях (открытых каналах, каналах других размеров) требуется разработать математическую модель горения и проверить ее пригодность по приведенным экспериментальным данным.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Пусть прямолинейный, закрытый с торцов канал заданного сечения и заданной длины заполнен углеметановоздушной газозвесью. Взвесь поджигается у левого торца канала. Горение газозвеси сопровождается локальным повышением давления газа, что приводит к возникновению волн сжатия, распространяющихся в канале. В канале распространяются волна горения и волны сжатия из-за теплового расширения продуктов сгорания.

Математическая модель движения и горения газопылевой среды в канале строится на основе уравнений газовой динамики и механики дисперсных сред [16] 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. В продуктах сгорания частиц угольной пыли предполагается известной доля конденсированной фазы (зола). Скорость распространения волны горения относительно негорящей газопылевой среды предполагается известной.

Горение частиц угля описывается геометрическим законом, линейная скорость горения частиц угольной пыли предполагается известной. Глубина выгорания частиц угля определяется количеством окислителя в газозвеси. Выгорание метана в волне горения учитывается через эффективный тепловой эффект реакции горения газозвеси в метановоздушной смеси. Собственный объем частиц угольной пыли и золы учитывается в уравнении состояния газа в форме Ван-дер-Ваальса.

Система уравнений при сделанных допущениях записывается в виде:

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho u S}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_3 S}{\partial t} + \frac{\partial \rho_3 u S}{\partial x} = -S G_\psi (1 - \zeta_1) \eta(x_z - x); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{G_\psi}{n \rho_p V_0} \eta(x_z - x); \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho u S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) S}{\partial x} = -\tau_{fr} \Pi + p \frac{\partial S}{\partial x}; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho E S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u + p u) S}{\partial x} = \\ = q \Pi + S Q_\psi G_\psi \eta(x_z - x); \end{aligned} \quad (5)$$

$$p(1/\rho - \alpha) = RT, \quad \alpha = \rho_3/(\rho \rho_p); \quad (6)$$

$$\tau_{fr} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad (7)$$

$$c_f = 0.0032 + \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}}, \quad \text{Re} = \frac{\rho u d}{\mu};$$

$$q = \alpha_T (T_0 - T), \quad \alpha_T = \frac{\text{Nu} \lambda_g}{d}, \quad (8)$$

$$\text{Nu} = 0.022 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.47}, \quad \text{Pr} = \frac{\mu c}{\lambda_g}.$$

Здесь t — время, x — координата, T — температура, $\rho = \rho_g + \rho_3$ — плотность газозвеси, ρ_g — плотность газовой фазы, ρ_3 — распределенная плотность дисперсной фазы, ρ_p — собственная плотность угля, p — давление, u —

скорость, ψ — объемная сгоревшая доля частицы пыли, c_3 , c_p , c_v — удельная теплоемкость соответственно угля и газа при постоянном давлении и объеме, $R = c_p(1 - \varepsilon) - c_v(1 - \varepsilon)$ — универсальная газовая постоянная, S , Π — площадь сечения канала и его периметр, $E = C_v T + u^2/2$ — полная энергия единицы объема двухфазной смеси, где $C_v = c_v(1 - \varepsilon) + c_3\varepsilon$ — удельная теплоемкость смеси, G_ψ — массовая скорость газоприхода от горения частиц угольной пыли, Q_ψ — теплота сгорания углеметано-воздушной смеси, α_T — коэффициент теплоотдачи, ζ_1 — доля золы в продуктах горения, n — число частиц угольной пыли в единице объема, V_0 — начальный объем частицы угля, x_z — координата фронта воспламенения газозвеси угольной пыли, τ_{fr} — напряжение трения потока о стенки, c_f — коэффициент сопротивления, q — удельный тепловой поток при теплообмене газа со стенками канала, d — диаметр канала, λ_g , μ — теплопроводность и вязкость, $\varepsilon = \rho_3/\rho$ — массовая доля частиц угля в газозвеси, Nu — число Нуссельта, Re — число Рейнольдса, Pr — число Прандтля, $\eta(x)$ — единичная функция Хевисайда.

Определим функцию массоприхода от горения частиц угля. Доля сгоревшего объема частицы угля $\psi = \Delta V/V_0$ ($V_0 = 4/3\pi r_0^3$, $\Delta V = V_0 - V$), тогда $\psi(t) = 1 - (r(t)/r_0)^3$, площадь горящей поверхности будет $s(t) = s_0(r(t)/r_0)^2$ ($s_0 = 4\pi r_0^2$) и относительная поверхность горения определится в виде $\sigma(\psi) = s(t)/s_0 = (1 - \psi)^{2/3}$. Число частиц в единице объема n связано с плотностью ρ_3 формулой $n = \frac{\rho_3}{\rho_p} \frac{1}{4\pi r_p^3/3} = \frac{\rho_3}{\rho_p} \frac{1}{V_0(1 - \psi)}$, r_p — радиус частицы. Тогда газоприход от горения частиц в единице объема при заданной массовой концентрации частиц некоторого среднего размера запишется в виде $G_\psi = n s_0 \sigma(\psi) \rho_p a_1$. В предположениях односкоростной модели горения угольной пыли в воздухе предельная начальная массовая концентрация угольной пыли, способная сгореть в воздухе, составляет $m_{3*} = 0.1 \text{ кг/м}^3$. 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 $\psi_* = m_{3*}/m_3$. Тогда газоприход от горения частиц угольной пыли при заданной начальной массовой концентрации частиц запишется в виде

$$G_\psi = \begin{cases} n s_0 \sigma(\psi) \rho_p a_1, & \psi < \psi_*, \\ 0, & \psi = \psi_* \text{ или } r_p = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где a_1 — линейная скорость горения частицы угля.

Согласно сделанным предположениям фронт горения в газозвеси движется относительно газозвеси с известной скоростью u_f . Перемещения границы между областями, занятыми горящими и негорящими частицами, определяются кинематическим уравнением

$$\frac{dx_z}{dt} = u + u_f, \quad x_z(0) = X_{z0}. \quad (10)$$

Начальные условия:

$$p(x, 0) = p_0, \quad T(x, 0) = T_0, \quad u(x, 0) = 0, \quad (11)$$

$$\rho_3(x, 0) = m_3, \quad \psi(x, 0) = 0,$$

где p_0 , T_0 , m_3 — начальные давление, температура и массовая концентрация пыли в канале. На границах канала ставятся граничные условия непротекания:

$$u(0, t) = u(L, t) = 0. \quad (12)$$

Система уравнений и соотношения для правых частей (1)–(12) описывают движение пылегазовой смеси вдоль канала с учетом того, что в запыленной среде распространяется волна горения по газозвеси.

МЕТОД РЕШЕНИЯ И ВЫБОР ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ

Для численного решения системы уравнений (1)–(12) используется метод Годунова [17], 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 (3) применяется схема с использованием разностей против потока. Уравнение (10) решается методом Эйлера.

Тестирование методики и программы проведено на решении модельных задач. Была решена задача о сгорании угольной пыли в постоянном объеме. В этом модельном случае

задавалось равномерное распределение угольной пыли, поэтому движение газопылевой смеси не возникало. После сгорания заданной массы угольной пыли получена равновесная температура, которая отличается от температуры, определенной из термодинамического соотношения, на 0.2 %.

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

В [18] показано, что линейная скорость горения частиц угольной пыли a_1 в диффузионном режиме — это квазистационарная величина. Согласно исследованиям горения газовзвесей [19–22] скорость распространения ламинарного пламени в покоящейся газовзвеси угольных частиц находится в интервале $0.5 \div 2.0$ м/с. Наличие турбулентности в газовом потоке увеличивает скорость распространения пламени в газовзвеси до десятков метров в секунду. В некоторых условиях (для газовзвесей с высокой температурой горения при дисперсности и массовой концентрации частиц в определенных интервалах значений [20, 21]) возможен режим горения газовзвеси, скорость которого определяется прогревом и воспламенением частиц за счет лучистого потока тепла из зоны горения. В представленной модели (1)–(12) скорость распространения волны горения по газовзвеси и скорость горения частицы угольной пыли являются параметрами согласования расчетов с экспериментальными измерениями.

Расчеты проводились при следующих исходных данных: $p_0 = 0.10132$ МПа, $T_0 = 300$ К, $\lambda_g = 0.024$ Дж/(м·с·К), $\mu = 1.92 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\rho_p = 1400$ кг/м³, $c_p = 1015$ Дж/(кг·К), $c_v = 725$ Дж/(кг·К), $c_z = 1400$ Дж/(кг·К), $Q_\psi = 2.6 \cdot 10^7$ Дж/кг, $\zeta_1 = 0.3$, $d = 0.07$ м, $L = 6.75$ м, $S = 3.85 \cdot 10^{-3}$ м², $\Pi = 0.22$ м, $r_{p0} = 5 \cdot 10^{-6}$ м.

Для того, чтобы согласовать результаты расчетов по модели (1)–(12) с экспериментальными данными, в расчетах значения скорости распространения волны горения по взвеси частиц пыли (u_{f*}) и скорости горения частицы пыли (a_{1*}) при $m_{z*} = 0.1$ кг/м³ подбирались такими, чтобы расчетная зависимость средней скорости распространения фронта горения относительно стенок канала совпала с экспериментальными данными $u_{m,exp}(x)$ (см. рис. 2).

Затем с подобранными значениями проводились расчеты распространения фронта горения относительно стенок канала для $m_z = 0.2, 0.3, 0.4$ кг/м³, принятыми в качестве средних значений по группам массовых концентраций угольной пыли, указанных на рис. 2. При подборе величины u_f было учтено влияние массовой концентрации угольной пыли на скорость распространения пламени в виде зависимости $u_f = u_{f*} \left(1 + 0.524 \frac{m_z - m_{z*}}{m_{z*}} \right)$. Такая зависимость обеспечивает соответствие результатов расчетов экспериментальным данным при $m_z = 0.2, 0.3, 0.4$ кг/м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены распределения параметров газовзвеси в канале при распространении фронта пламени в фиксированные моменты времени. Фронт горения распространяется слева направо. После начала горения по каналу начинают распространяться волны давления, возникающие из-за теплового расширения продуктов сгорания. При этом волны давления распространяются со скоростью звука и отражаются от закрытого правого торца канала. В канале возникает возвратно-поступательное движение газовзвеси. Поэтому скорость распространения фронта горения относительно стенок канала (u_c) имеет неравномерный характер (рис. 4, а). На начальной стадии скорость распространения фронта пламени относительно стенок канала большая, так как происходит быстрое расширение продуктов сгорания за фронтом горения и фронт продвигается расширяющимися продуктами. По мере продвижения фронта горения по каналу скорость уменьшается из-за уменьшения скорости движения газовзвеси в окрестности фронта горения. Температура в волне горения возрастает, затем за фронтом пламени уменьшается из-за теплообмена со стенками канала (см. рис. 3, б). Часть угольной пыли не догорает ввиду недостатка кислорода (см. рис. 3, в). Предельная начальная массовая концентрация угольной пыли, способная сгореть в воздухе, принята равной $m_{z*} = 0.1$ кг/м³. В приведенном на рис. 3 расчете $m_z = 0.125$ кг/м³, соответственно определению (9) $\psi_* = m_{z*}/m_z = 0.8$, т. е. 20 % начальной массы угольной пыли не сгорело (см. рис. 3, в).

На рис. 4 представлены расчетная (u_m) и экспериментальная ($u_{m,exp}$) средняя скорость

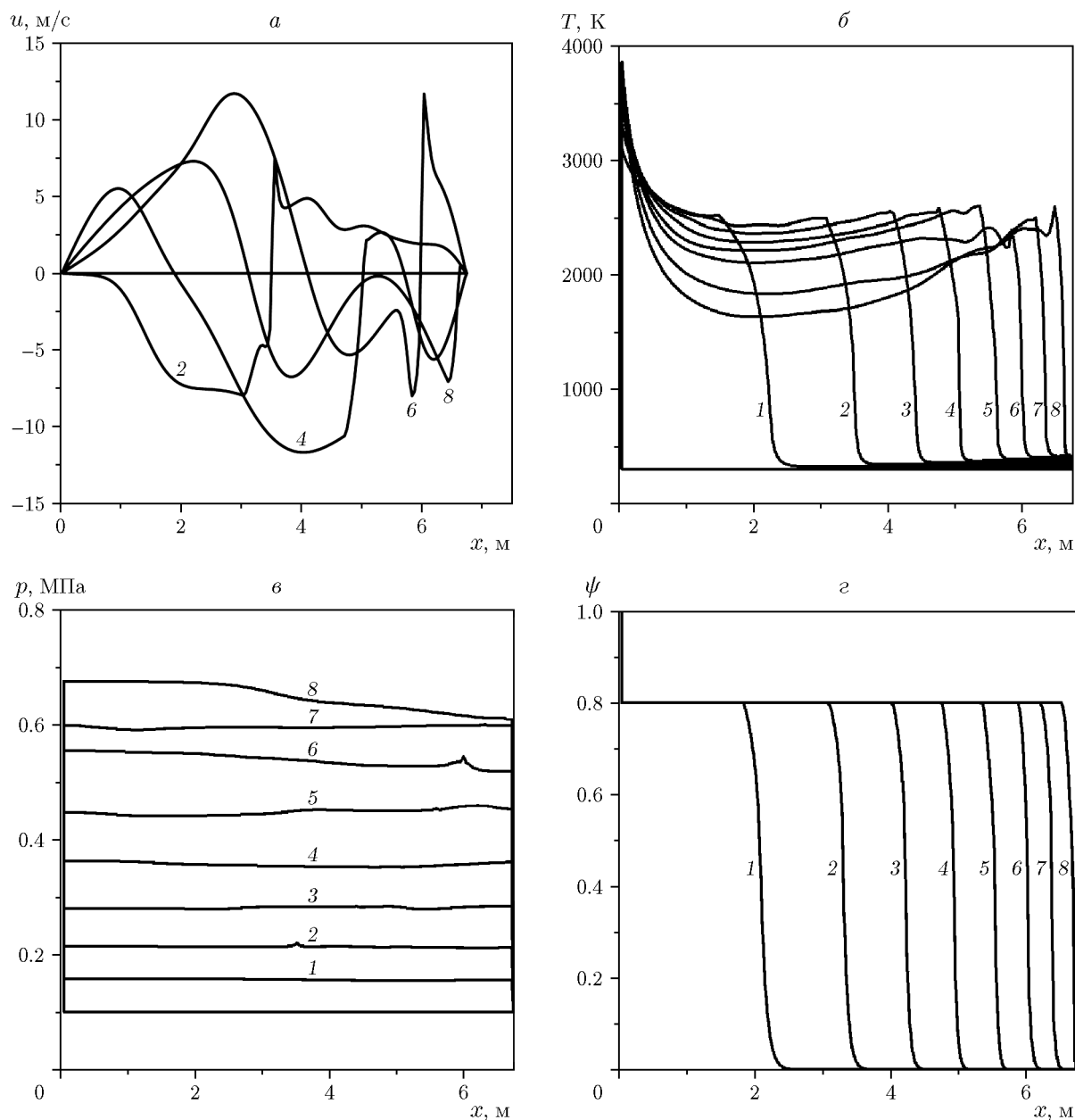


Рис. 3. Распределение параметров газозвеси в канале при распространении фронта пламени в фиксированные моменты времени:

a — скорость, b — температура, c — давление, d — доля сгоревшего объема частиц угля; линии 1–8 построены через период времени 0.1 с; $u_{f*} = 3.2$ м/с, $a_{1*} = 2 \cdot 10^{-4}$ м/с, $m_3 = 0.125$ кг/м³

распространения фронта пламени относительно стенок канала. Видно, что расчетная средняя скорость u_m по мере продвижения по каналу ведет себя немонотонно при начальной массовой концентрации угольной пыли, большей 0.1 кг/м³. Такой характер распространения фронта соответствует экспериментальным данным на рис. 2, а также экспериментальным значениям скорости распространения пламени

относительно стенок канала.

Разработанная модель имеет в качестве параметров согласования с экспериментом две величины — скорость распространения волны горения и скорость горения частицы пыли. Как показывают расчеты по этой модели, а также данные [23, 24], скорость горения частицы a_1 слабо влияет на скорость распространения пламени относительно стенок ка-

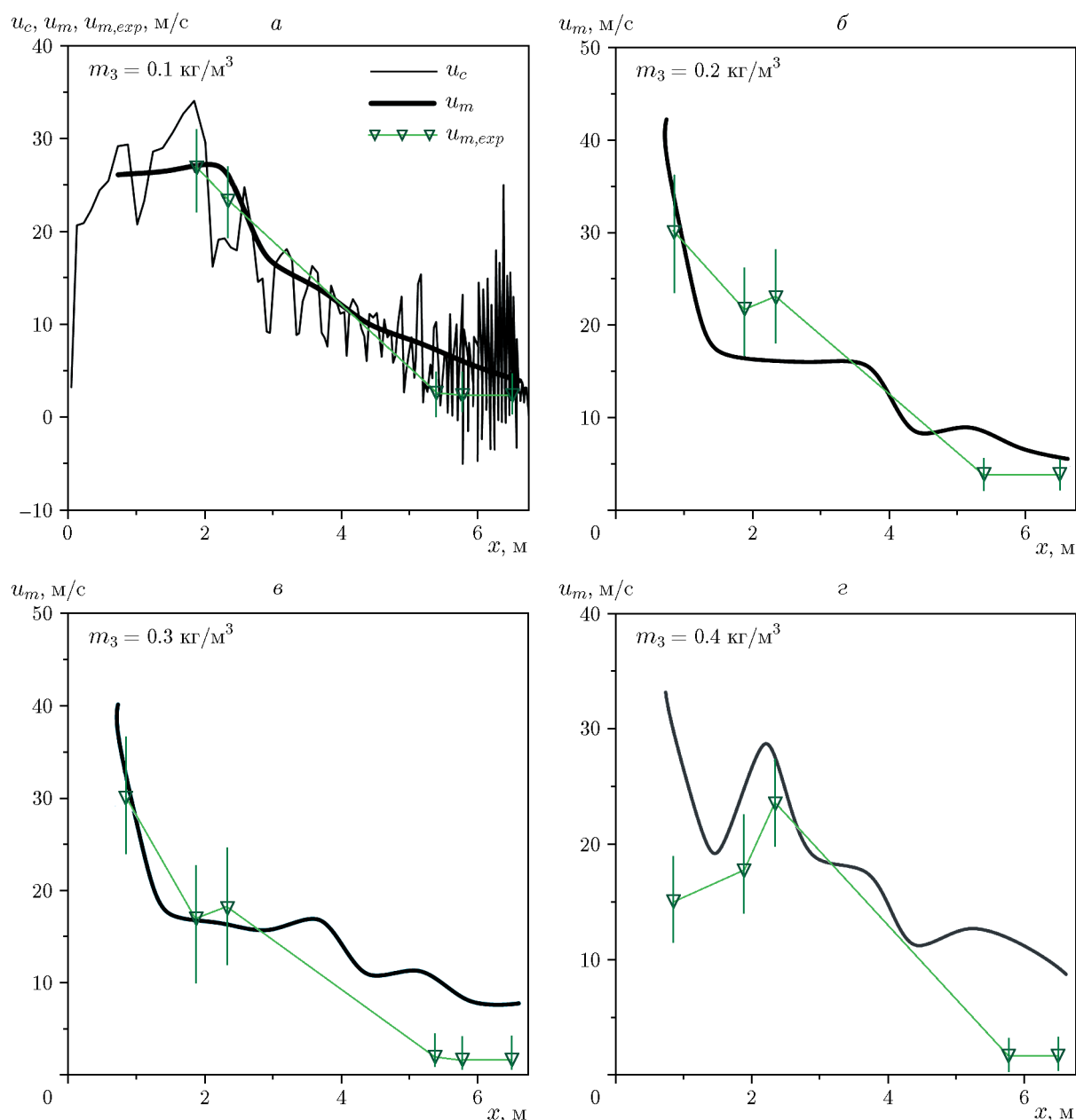


Рис. 4. Расчетная и экспериментальная средняя скорость распространения фронта пламени относительно стенок канала ($u_{f*} = 3.2 \text{ м/с}$, $a_{1*} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$)

нала u_c . Основным параметром является скорость распространения волны горения по взвеси u_f . Имеются математические модели, позволяющие в рамках двухфазной двухскоростной среды определить ламинарную скорость распространения пламени в углеметановоздушной газовой смеси и скорость распространения пламени относительно стенок канала (видимую скорость распространения пламени) [12, 13]. В этих моделях учитываются теплопроводность,

диффузия компонентов горючей газовой смеси, гетерогенные реакции на поверхности частиц. Скорость химических реакций определяется законом Аррениуса с соответствующими константами скорости реакции. Для численного решения математической модели используются специально разработанные алгоритмы. Причем для обеспечения разрешимости процессов диффузии и теплопроводности величина шага разностной сетки по пространству долж-

на быть не больше 0.0001 м. Для получения решения задачи о распространении пламени в канале длиной 6.75 м в рамках модели [12, 13] потребуется несколько десятков суток процессорного времени. В связи с этим модель (1)–(12), согласованная с экспериментальными данными, может быть использована при анализе влияния горения угольной пыли на интенсивность ударных волн в угольных шахтах при аварийных взрывах метана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментально-теоретическое исследование закономерностей распространения пламени углеметановоздушной смеси в вертикальном канале с закрытыми торцами. Предложена физико-математическая модель горения этой смеси, использующая в качестве входного параметра скорость распространения пламени как характеристику состава газозвеси. Показано, что предложенная физико-математическая модель позволяет с хорошей точностью предсказывать скорость распространения пламени углеметановоздушной смеси на этапе продвижения пламени по каналу. Модель может быть применима для расчетов процесса распространения пламени углеметановоздушных смесей на больших масштабах, в том числе на масштабах выработок угольных шахт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айруни А. Т., Клебанов Ф. С., Смирнов О. В. Взрывоопасность угольных шахт. — М.: Горное дело; ООО «Киммерийский центр», 2011.
2. Лебецки К. А., Романченко С. Б. Пылевая взрывоопасность горного производства. — М.: Горное дело; ООО «Киммерийский центр», 2012.
3. Пинаев А. В., Пинаев П. А. Изучение сравнительной химической активности метана и взвесей частиц угля при горении, взрывах и детонации // Вест. науч. центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2019. — № 4. — С. 5–16.
4. Пинаев А. В., Пинаев П. А. Волны горения и детонации в смесях газов CH_4/Air , CH_4/O_2 , O_2 с взвесями каменного угля // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 6. — С. 56–68. — DOI: 10.15372/FGV20200606.
5. Zhang L. L., Yang Q., Shi B. M., Niu Y. H., 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.
6. Niu Y. H., Zhang L. L., Shi B. M., 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.
7. Liu S.-H., Cheng Y.-F., Meng X.-R., Ma H.-H., Song S.-X., Liu W.-J., Shen Z.-W. Influence of particle size polydispersity on coal dust explosibility // J. Loss Prev. Process Ind. — 2018. — V. 56. — P. 444–450. — DOI: 10.1016/j.jlp.2018.10.005.
8. Krainov A. Yu., Moiseeva K. M. Influence of mixture content on the minimum spark-plug ignition energy of a coal dust suspension in the air // J. Phys.: Conf. Ser. — 2017. — V. 899. — 042005. — DOI: 10.1088/1742-6596/899/4/042005.
9. Wei C. J., Tan Y. X., Hu S. Q., Hou W. B. Experimental study on gas explosion-induced secondary explosion of gas and coal dust // Chin. Saf. Sci. J. — 2014. — V. 24, N 12. — P. 29–32.
10. Hu S. Q., Wei C. J., Tan Y. X. Experimental study on secondary explosion of deposited coal dust caused by gas explosion in pipeline // J. Basic Sci. Eng. — 2010. — V. 18, N 6. — P. 895–899.
11. 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.
12. 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.
13. Крайнов А. Ю., Моисеева К. М. Моделирование искрового зажигания бидисперсной аэрозвеси угольной пыли // Инж.-физ. журн. — 2018. — Т. 91, № 5. — С. 1328–1334.
14. Лямин Г. А., Пинаев А. В., Лебедев А. С. Пьезоэлектрики для измерения импульсных и статических давлений // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 3. — С. 94–103.
15. Пинаев А. В., Лямин Г. А. Пьезоэлектрические датчики давления, методы их тарирования // ПТЭ. — 1992. — № 2. — С. 236–239.
16. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. — М.: Наука, 1987.
17. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976.

18. **Основы** практической теории горения: учеб. пособие для вузов / под ред. В. В. Померанцева. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
19. **Вайнштейн П. Б., Нигматулин Р. И.** Горение смесей газа с частицами // ПМТФ. — 1971. — Т. 12, № 4. — С. 19–33.
20. **Вайнштейн П. Б.** Радиационный фронт пламени в смеси газа с твердыми частицами // ПМТФ. — 1973. — Т. 14, № 3. — С. 83–91.
21. **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.
22. **Krishenik P. M., Rumanov E. N., Shkadinskii K. G.** Modeling of combustion wave propagation in a carbon dust/gas mixture // Combust. Flame. — 1994. — N 99. — P. 713–722.
23. **Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю., Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю., Костеренко В. Н.** Моделирование распространения ударных волн от взрыва и горения газопылевой смеси в угольных шахтах // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2017. — № 3. — С. 371–377.
24. **Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю., Лукашов О. Ю., Палеев Д. Ю. и др.** Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2006.

*Поступила в редакцию 26.04.2022.
Принята к публикации 25.05.2022.*