

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В УГЛЕМЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С УЧЁТОМ ВЯЗКОСТИ ГАЗА

К. М. Моисеева^а, А. Ю. Крайнов^б, Р. Р. Тлеуленов^с

Томский государственный университет, Томск, Россия

^аMoiseeva_KM@t-sk.ru, ^бakrainov@ftf.tsu.ru, ^сtlensavage@gmail.com

Представлены результаты численного исследования закономерностей распространения пламени углеметановоздушной смеси в узком цилиндрическом канале при наличии сил вязкого трения. Постановка задачи основана на подходах механики двухфазных реагирующих сред. Метод решения задачи основан на алгоритме распада произвольного разрыва. Проведённое численное исследование позволило определить скорости распространения пламени углеметановоздушной смеси в осесимметричном канале. Показано, что на начальном этапе при достижении фронтом горения боковых стенок канала скорость пламени увеличивается. Этот эффект был получен ранее для невязкого газа. Получено, что фронт пламени газозвеси с малым содержанием угольной пыли по мере продвижения по открытому каналу стремится к плоскому, не зависящему от координаты вдоль радиуса канала.

Ключевые слова: газовая динамика, угольная пыль, численное моделирование, механика двухфазных реагирующих сред.

Введение

Горение углеметановоздушных смесей исследуется на протяжении многих лет. Задача является актуальной в связи с тем, что газозвеси угольной пыли могут образовываться в процессах угледобычи и углепереработки. В зависимости от состава газозвеси угольной пыли возможны различные режимы течения и химического реагирования. В предыдущих работах [1; 2] выполнено исследование закономерностей распространения пламени углеметановоздушной смеси в приближении одномерной постановки задачи. В реальности пространственные эффекты могут существенно влиять на скорость распространения пламени в газозвеси. В частности, в условиях цилиндрического канала с радиусом много меньше протяжённости канала на скорость распространения пламени большое влияние может оказать поджатие пламени стенками. В работе [3] было проведено экспериментальное исследование и сформулирована одномерная физико-математическая модель горения газозвеси угольной пыли в вертикальной ударной трубе. Продолжением работы являлось экспериментальное исследование [4], где объяснялись эффекты колебательного поведения скорости распространения пламени. В [4] указано, что эти эффекты связаны с акустическими колебаниями, возникающими в трубе. Действительно, наблюдаемые в численном исследовании [3] колебания по частоте соответствовали данным [4]

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2020-0036).

и объяснялись перемещением ударной волны по замкнутому каналу. В работе [5] была предложена физико-математическая модель горения газозвеси угольной пыли в условиях узкого цилиндрического канала, сформулированная в двумерной осесимметричной постановке. В работе было показано, что фронт горения перемещается по каналу колебательным образом, первый максимум скорости пламени связан с расширением пламени в сторону стенок канала. В [5] продемонстрировано влияние состава газозвеси на расчётную видимую скорость пламени. Было показано, что по мере перемещения фронта пламени по каналу форма фронта стремится к плоской, не зависящей от координаты по радиусу. В работе [5] было использовано допущение о том, что газ является невязким. Эффекты вязкости могут сказаться на характеристиках течения газозвеси, а значит, и на особенностях формирования фронта пламени. В связи с этим была поставлена задача определения скорости горения углекислородной смеси в условиях цилиндрического канала, установления влияния стенок канала на форму пламени и скорость распространения пламени в газозвеси.

1. Методическая часть

Задача формулировалась в двумерной осесимметричной постановке на основе подходов динамики многофазных реагирующих сред [6] при следующих допущениях. Коэффициенты вязкости, диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры. Учитывается тепловое расширение газа при повышении температуры и его движение. Газозвесь угольной пыли характеризуется размером и массовой концентрацией частиц, а также содержанием реагирующей компоненты в газе. Реакция в газовой фазе определяется законом Аррениуса со вторым порядком реакции (первым по метану и первым по окислителю). Горение частиц угольной пыли описывается гетерогенной реакцией на поверхности частиц с учётом массоотдачи. Прочие допущения, использованные в работе, более подробно описаны в работах [1–5].

Подробно физико-математическая модель без учёта вязкого трения газа представлена в работе [5]. Учёт вязкости газа менял вид уравнений сохранения импульса газа. С учётом вязкого трения уравнения принимали вид

$$\frac{\partial r \rho_g u_g}{\partial t} + \frac{\partial r (p_g + \rho_g u_g^2)}{\partial x} + \frac{\partial r \rho_g u_g v_g}{\partial r} = -r \tau_{fr,x} + r G_1 u_p + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \tau_{rx}}{\partial r}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial r \rho_g v_g}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_g u_g v_g}{\partial x} + \frac{\partial r (p_g + \rho_g v_g^2)}{\partial r} = p_g - r \tau_{fr,r} + r G_1 v_p + \frac{1}{r} \frac{\partial r \tau_{rr}}{\partial r} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rx}}{\partial x}. \quad (2)$$

Компоненты тензора вязких напряжений определялись по соотношениям [7–9]

$$\tau_{xx} = \mu \left(2 \frac{\partial u_g}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right), \quad \tau_{rr} = \mu \left(2 \frac{\partial v_g}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right),$$

$$\tau_{\theta\theta} = \mu \left(2 \frac{v_g}{r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right), \quad \tau_{rx} = \mu \left(\frac{\partial u_g}{\partial r} + \frac{\partial v_g}{\partial x} \right),$$

где

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{1}{r} \frac{\partial r v_g}{\partial r} + \frac{\partial u_g}{\partial x}, \quad \mu = \mu_b \left(\frac{T}{T_b} \right)^{3/2} \frac{T_b + T_S}{T + T_S}.$$

В уравнениях (1), (2) G_1 — скорость изменения массы частиц и компонентов газа при гетерогенном горении частиц, $\tau_{fr,x}$, $\tau_{fr,r}$ — сила трения между частицами и

газом вдоль осевого и радиального направлений, u, v — компоненты вектора скорости, t — время, r — координата в радиальном направлении, x — осевая координата, p — давление, ρ — плотность, μ — коэффициент динамической вязкости, T — температура. Индексы: b — начальные значения параметров состояния, p — параметры частиц, g — параметры газа, x, r, θ — осевое, радиальное и тангенциальное направление вектора.

Метод решения уравнений для газа соответствовал работе [5]. Для газа потоки на границах расчётных ячеек определялись согласно алгоритму из [10]. Для частиц на границах расчётных ячеек потоки определялись с использованием метода А. Н. Крайко [11]. Шаг по времени определялся из условия устойчивости Куранта — Фридрихса [12] $\frac{1}{\Delta t} < \frac{1}{\Delta t_x} + \frac{1}{\Delta t_r}$, где $\Delta t_x = \frac{h_x}{\max[|u_g| + c_g]}$, $\Delta t_r = \frac{h_r}{\max[|v_g| + c_g]}$, c_g — скорость звука в газе.

2. Результаты вычислений и обсуждение

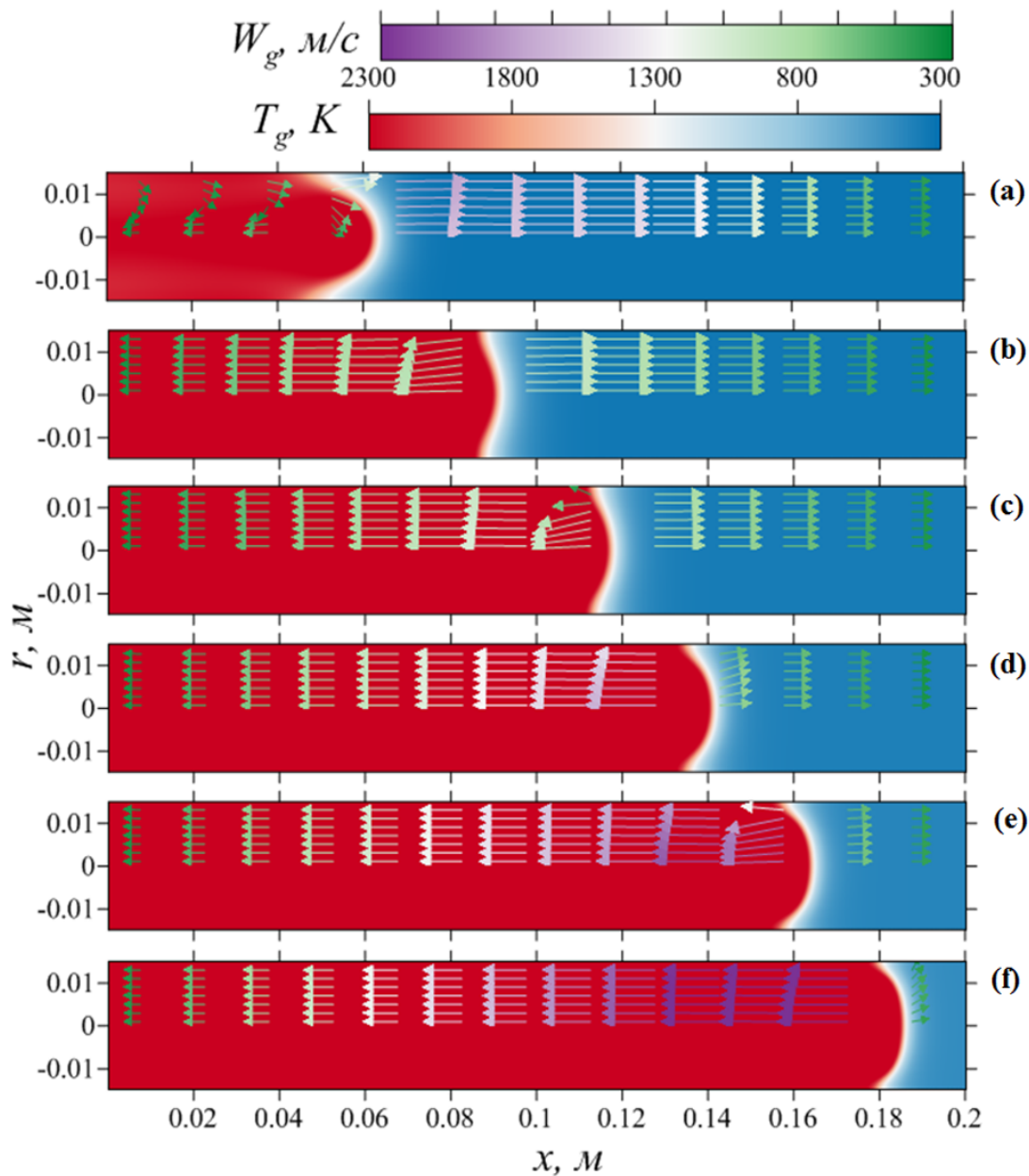


Рис. 1. Распределения температуры и вектора скорости газа по пространству: $t = 5 \text{ мс}$ (а), 10 мс (б), 15 мс (в), 20 мс (д), 25 мс (е), 30 мс (ф)

Расчёты выполнены для углекислородо-воздушной смеси с теплофизическими и кинетическими параметрами: $k_{0,1} = 79 \cdot 10^3$ м/с, $E_1 = 135$ кДж/моль, $Q_1 = 20$ МДж/кг, $\alpha_1 = 2.67$, $k_{0,2} = 1.125 \cdot 10^{12}$ м/с, $E_2 = 239$ кДж/моль, $Q_2 = 55.6$ МДж/кг, $\alpha_2 = 4$, $\rho_p^0 = 1400$, $T_b = 300$ К, $c_p = 1350$ Дж/(кг·К), $c_{p,g} = 1090$ Дж/(кг·К), $c_{v,g} = 780$ Дж/(кг·К), $R_u = 8.31$ Дж/(моль·К), $r_p = 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-5}$ м, $p_{gb} = 0.1$ МПа, $a_{ox,b} = 0.22$, $a_{f,b} = 0.04$, $\lambda_0 = 0.025$ Вт/(м·К), $\eta = 2 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $T_b = 293$ К, $T_s = 114$ К, $T_h = 3000$ К, $x_0 = r_0 = 7 \cdot 10^{-3}$, $m_{dust} = 0.1 \div 0.3$ кг/м³. Результаты исследования представлены на рис. 1–3.

На рис. 1 представлены распределения температуры и вектора скорости движения газа по пространству, построенные через интервалы времени 5 мс, начиная с 5 мс. На рис. 2 представлены распределения массовой концентрации метана и частиц по пространству, соответствующие моментам времени рис. 1. Рис. 1, 2 построены для углекислородо-воздушной смеси с содержанием метана 7%, массовой концентрацией частиц 0.25 кг/м³, радиусом частиц 5 мкм.

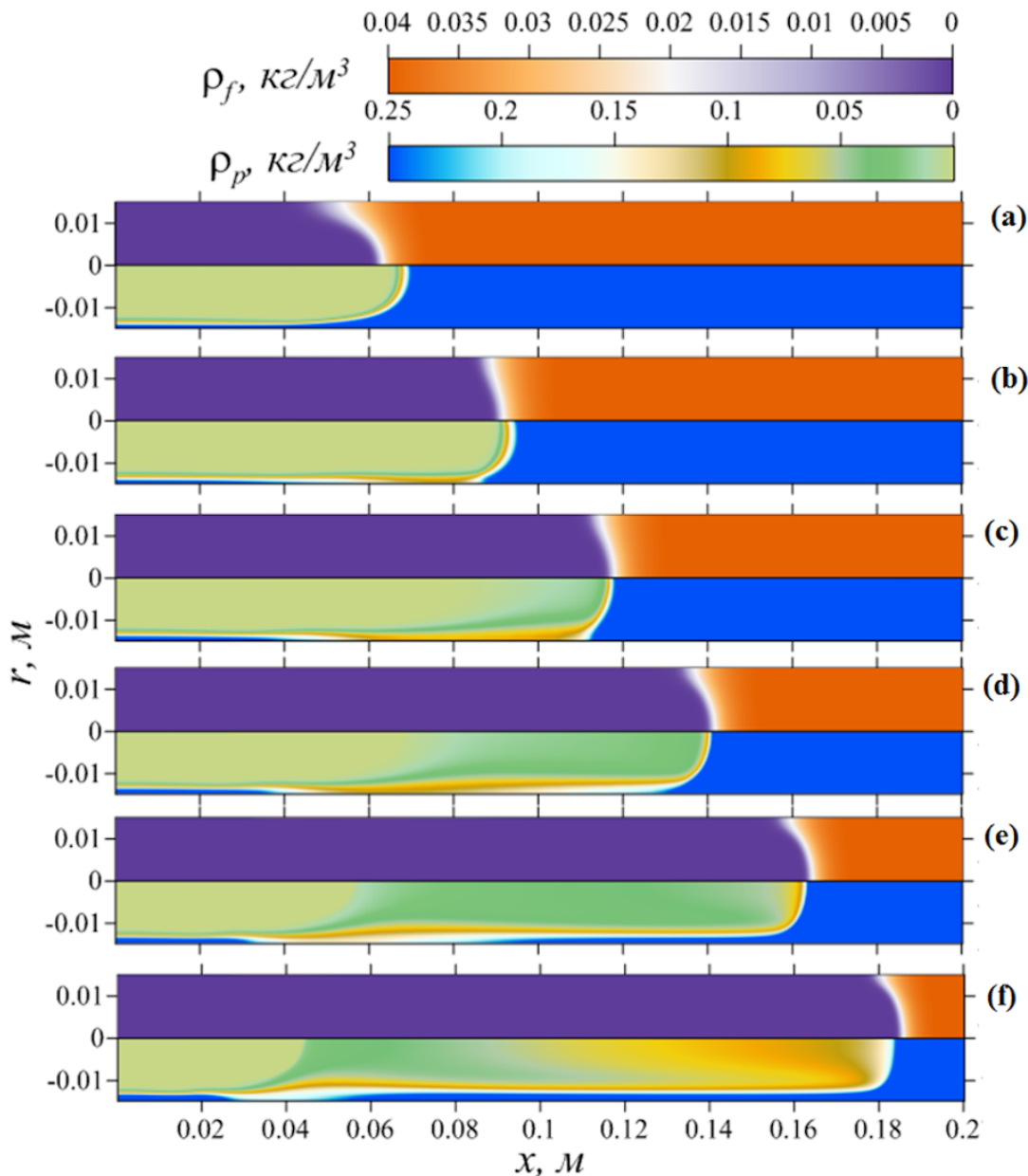


Рис. 2. Распределения массовой концентрации метана и частиц угольной пыли по пространству: $t = 5$ мс (а), 10 мс (б), 15 мс (с), 20 мс (д), 25 мс (е), 30 мс (ф)

Согласно рис. 1, 2 на начальном этапе распространения пламени наблюдаются эффекты, аналогичные описаниям из работы [2] для невязкого газа. Пламя углекислотной смеси расширяется в сторону стенок канала, что приводит к ускорению пламени в осевом направлении. В результате расширения пламени в сторону стенок канала видимая скорость горения на начальном этапе достигает 10 м/с, далее скорость снижается. Скорость выгорания частиц в начальные моменты времени выше скорости горения метана в газе (рис. 2, а). По мере продвижения пламени углекислотной смеси по каналу наблюдается выравнивание скорости изменения массовой концентрации метана и угольной пыли по каналу (рис. 2, b). Далее метан выгорает на фронте пламени и скорость выгорания соответствует скорости перемещения фронта (рис. 1, c–f; 2, c–f). При этом наблюдается недогорание частиц (рис. 2, c–f). В отличие от работы [2] фронт пламени остаётся искривлённым вдоль радиуса канала.

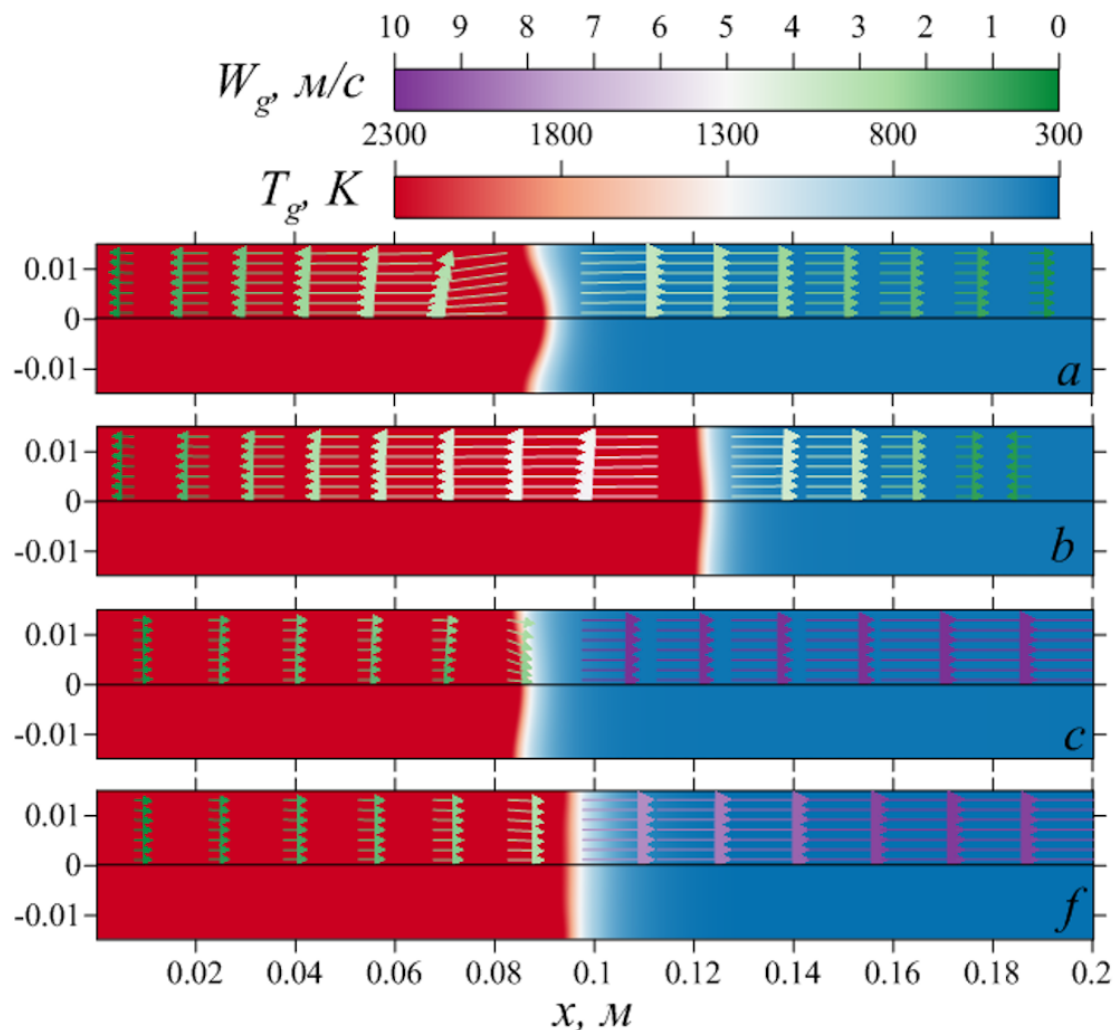


Рис. 3. Распределения температуры газа по пространству. Содержание метана в газе 7% по объёму: $t = 10$ мс, (а) $r_p = 5$ мкм, $m_{dust} = 0.25$ кг/м³, закрытый канал; (б) $r_p = 5$ мкм, $m_{dust} = 0.1$ кг/м³, закрытый канал; (в) $r_p = 10$ мкм, $m_{dust} = 0.1$ кг/м³, закрытый канал; (г) $r_p = 5$ мкм, $m_{dust} = 0.1$ кг/м³, открытый канал, без учёта вязкости газа

На рис. 3 представлено сравнение результатов исследования закономерностей распространения пламени в узком цилиндрическом канале в случае горения углекислотной смеси: 1) с массовой концентрацией частиц 0.25 кг/м³, радиусом частиц 5 мкм в закрытом канале, 2) с массовой концентрацией частиц 0.1 кг/м³, радиусом частиц 5 мкм в закрытом канале, 3) с массовой концентрацией частиц

0.1 кг/м³, радиусом частиц 10 мкм в закрытом канале, 4) с массовой концентрацией частиц 0.1 кг/м³, радиусом частиц 5 мкм в открытом канале. Вариант расчёта 4 соответствует допущениям работы [5].

Согласно рис. 3 пламя распространяется вдоль радиального направления с меньшей скоростью, чем вдоль осевого. После того как волна горения достигает стенок канала, наблюдается ускорение пламени за счёт эффекта поджатия. Далее имеет место уменьшение скорости распространения пламени. Представленные результаты соответствуют горению в недостатке окислителя.

При учёте вязкости газа при горении газовозвеси угольной пыли с массой концентрацией 0.25 кг/м³ развивается искривлённое пламя. Для газовозвеси с меньшим содержанием угольной пыли форма пламени по мере перемещения по каналу стремится к плоской.

Заключение

Показано, что при горении углекислородной смеси в цилиндрическом канале на начальном этапе при достижении фронтом горения боковых стенок канала скорость пламени увеличивается. Получено, что форма фронта пламени газовозвеси с малым содержанием угольной пыли по мере продвижения по открытому каналу стремится к плоской, не зависящей от координаты вдоль радиуса канала. Для высоких массовых концентраций угольной пыли при горении газовозвеси в закрытом канале фронт пламени имеет выгнутую форму.

Список литературы

1. **Крайнов А. Ю., Моисеева К. М.** Моделирование искрового зажигания бидисперсной аэрозвеси угольной пыли // Инж.-физ. журн. 2018. Т. 91, № 5. С. 1328–1334.
2. **Моисеева К. М., Крайнов А. Ю.** Искровое зажигание горючих газов и газовозвесей. Томск : STT, 2020.
3. **Моисеева К. М., Пинаев А. В., Васильев А. А. и др.** Исследование горения углекислородной взвеси в длинном закрытом канале // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58, № 5. С. 54–63.
4. **Пинаев А. В., Пинаев П. А.** Пламена со знакопеременной скоростью в смесях метан/воздух, метан/воздух/взвесь угля в вертикальной закрытой трубе // Физика горения и взрыва. 2023. Т. 59, № 5. С. 3–12.
5. **Моисеева К. М., Крайнов А. Ю.** Особенности распространения пламени углекислородной смеси в цилиндрическом канале // Инж.-физ. журн. 2023. Т. 96, № 4. С. 912–920.
6. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. М. : Наука, 1987.
7. **Липанов А. М.** Теоретическая гидромеханика ньютоновских сред. М. : Наука, 2011.
8. **Куо К. К.** Principles of Combustion. Wiley-Interscience, 2005.
9. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. М. : Дрофа, 2003.
10. **Van Leer B.** Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's method // Journal of Computational Physics. 1979. Vol. 32, no. 1. P. 101–136.
11. **Крайко А. Н.** О поверхностях разрыва в среде, лишённой «собственного» давления // Приклад. математика и механика. 1979. Т. 43, № 3. С. 500–510.
12. **Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др.** Численное решение многомерных задач газовой динамики. М. : Наука, 1976.

Поступила в редакцию 11.12.2023.

После переработки 31.03.2024.

Сведения об авторах

Моисеева Ксения Михайловна, доктор физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математической физики, Томский государственный университет, Томск, Россия; e-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru.

Крайнов Алексей Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математической физики, Томский государственный университет, Томск, Россия; e-mail: akrainov@ftf.tsu.ru.

Тлеуленов Руслан Рустемович, младший научный сотрудник, аспирант кафедры математической физики, Томский государственный университет, Томск, Россия; e-mail: tlensavage@gmail.com.

SIMULATION OF FLAME PROPAGATION IN A COAL-METHANE-AIR MIXTURE IN A CYLINDRICAL CHANNEL TAKEN INTO ACCOUNT OF GAS VISCOSITY

K.M. Moiseeva^a, A.Yu. Krainov, R.R. Tleulenov

Tomsk State University, Tomsk, Russia

^aMoiseeva_KM@t-sk.ru, ^bakrainov@ftf.tsu.ru, ^ctlensavage@gmail.com

The paper presents the results of a numerical study of the patterns of flame propagation of a coal-methane-air mixture in a narrow cylindrical channel in the presence of viscous friction forces. The formulation of the problem is based on the approaches of the mechanics of two-phase reacting media. The method for solving the problem is based on an arbitrary discontinuity decay algorithm. The numerical study carried out made it possible to determine the speed of flame propagation of a coal-methane-air mixture in an axisymmetric channel. It is shown that at the initial stage, when the combustion front reaches the side walls of the channel, the flame speed increases. This effect was obtained previously for an inviscid gas. It was found that the flame front of a gas suspension with a low content of coal dust, as it moves along an open channel, tends to be flat, independent of the coordinate along the radius of the channel.

Keywords: *gas dynamics, coal dust, numerical modeling, mechanics of two-phase reacting media.*

References

1. Krainov A.Y., Moiseeva K.M. Modeling of the spark ignition of a bidispersed air suspension of coal dust. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 5, pp. 1260–1266.
2. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. *Iskrovoye zazhiganiye goryuchikh gazov i gazovzvesey* [Spark ignition of combustible gases and gas suspensions]. Tomsk, STT Publ., 2020. (In Russ.).
3. Moiseeva K.M., Pinaev A.V., Vasil'ev A.A., etc. Investigation of combustion of a coal-methane-air suspension in a long closed channel. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2022, vol. 58, no. 5, pp. 555–563.
4. Pinaev A.V., Pinaev P.A. Flames with sign-alternate speed in methane-air and methane-air-coal suspension mixtures in a vertical closed pipe. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2023, vol. 59, no. 5, pp. 3–12.
5. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. Distinctive features of propagation of the flame of a coal-methane-air mixture in a cylindrical channel. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2023, vol. 96, pp. 913–921.
6. Nigmatulin R.I. *Dynamics of Multiphase Media*. Vol. 1, 2. CRC Press, 1990.
7. Lipanov A.M. *Teoreticheskaya gidromekhanika n'yutonovskikh sred* [Theoretical hydromechanics of Newtonian media]. Moscow, Nauka Publ., 2011. (In Russ.).
8. Kuo K.K. *Principles of Combustion 2nd Edition*. Wiley-Interscience, 2005.
9. Loitsyanskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquids and gases]. Moscow, Drofa Publ., 2003. (In Russ.).
10. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's method. *Journal of Computational Physics*, 1979, vol. 32, no. 1, pp. 101–136.

11. **Kraiko A.N.** On discontinuity surfaces in a medium devoid of “proper” pressure. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1979, vol. 43, no. 3, pp. 539–549.
12. **Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., etc.** *Chislennoye resheniye mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solution of multidimensional gas dynamics problems]. Moscow, Nauka Publ., 1976. (In Russ.).

Article received 11.12.2023.

Corrections received 31.03.2024.