

УДК 536.46+662.61

DOI 10.17223/19988621/71/11

К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов, Е.И. Рожкова**ГОРЕНИЕ АЭРОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ
В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ¹**

Представлены результаты численного моделирования горения аэровзвеси угольной пыли в закрученном потоке в канале с внезапным расширением. Исследуется влияние состава смеси и характеристик закрученного течения на форму фронта горения и степень догорания аэровзвеси угольной пыли. Математическая постановка задачи записана в двухмерном осесимметричном приближении. Представлены результаты исследования влияния интенсивности закрутки потока и дисперсности частиц угольной пыли на распределения полей температуры в канале. Показано, что при сильной закрутке потока имеет место неполное сгорание угольной пыли в канале.

Ключевые слова: угольная пыль, аэровзвесь, горение, закрученное течение.

Настоящая работа посвящена теме горения реакционноспособной аэровзвеси угольной пыли в канале с расширением при закрутке потока на входе в канал. В работах некоторых авторов полагается, что закрутка потока создает зоны завихрения и повышенной концентрации газовзвеси. Это приводит к интенсификации процессов теплообмена внутри канала. Расширение канала также может являться причиной возникновения зон с повышенной концентрацией пыли. Совокупное влияние закрутки потока и расширения канала на режим горения аэровзвеси угольной пыли может оказаться весьма существенным.

В работе [1] исследовано горение газовой смеси в камере сгорания с вихревым воспламенителем-стабилизатором. Показано, что высокотемпературный закрученный поток может оказывать достаточно существенное влияние на стабилизацию горения. В работе [2] приведены экспериментальные исследования горения пылевидного торфяного топлива в прямоточном вихревом горелочном устройстве. Исследованы характеристики горения пыли в закрученном потоке, определены эффективные условия организации процесса горения. Авторами [3] проведено исследование процессов теплообмена в закрученном реагирующем потоке газа. Показано, что течение закрученного потока с преобладанием центробежных сил позволяет интенсифицировать теплообмен в канале. В работе [4] выполнено исследование режимов горения пылеугольного топлива в закрученном потоке. Таким образом, задача горения реакционноспособных смесей в закрученном потоке представляет интерес для проблем малой энергетики в контексте разработки новых типов устройств по сжиганию газов.

В работах [1, 3–5] для моделирования закрученных течений использованы модели, учитывающие турбулентность потока через стандартные модели турбулентности. В частности, в работе [5] предложена физико-математическая модель и способ решения задачи о закрученном течении газа. В настоящей работе учет за-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования, номер проекта 0721-2020-0036.

крутки течения осуществляется опосредовано через коэффициенты взаимодействия частиц с газом. В коэффициенте теплообмена и в коэффициентах силы трения присутствуют слагаемые, учитывающие изменение числа Рейнольдса и появление турбулентности в потоке.

Целью работы является исследование режимов горения аэровзвеси угольной пыли в условиях закрученного потока в канале с расширением.

Построение математической модели

Схема канала с расширением представлена на рис. 1. На рисунке R_{out} – радиус выходного канала, r_{in} – радиус входного канала, l – протяженность входного канала, L – общая протяженность цилиндрического канала. До начала процесса канал заполнен холодным газом. В работе не решается задача о критических условиях воспламенения аэровзвеси. Выбран постоянный источник зажигания Q_v объемом, достаточным для воспламенения аэровзвеси. С левой границы канала подается аэровзвесь с заданной массовой долей частиц ρ_{pb} , радиусом частиц r_p , скоростью вдоль осевого направления u_b , нулевой скоростью вдоль радиального направления и скоростью u_ϕ вдоль тангенциального направления. Закрутка на входе в канал задается в виде угловой скорости, u_ϕ , линейно возрастающей от радиальной координаты канала (закрученный по закону твердого тела поток аэровзвеси). Правый торец канала открыт, выходит в окружающую среду.

Уравнения математической модели записаны в двухмерном осесимметричном приближении с учетом закрутки потока. Постановка задачи основана на подходах механики двухфазных реагирующих сред [6]. Система уравнений, описывающих движение аэровзвеси, учитывает изменение скорости потока по осевой и радиальной составляющей, производные по координате ϕ равны нулю.

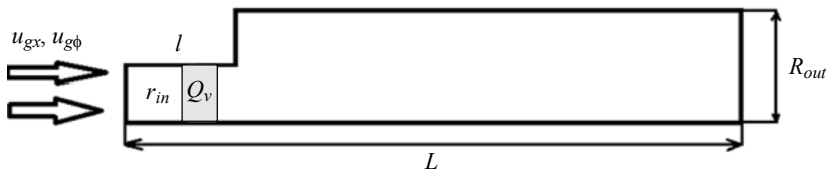


Рис. 1. Схема цилиндрической камеры сгорания с внезапным расширением

Fig. 1. Diagram of a cylindrical combustion chamber with a sudden expansion

Подробности, касающиеся механизма воспламенения и горения частиц, изложены в [7]. Постановка задачи определяется уравнениями

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

$$\frac{\partial \rho_g u_g}{\partial t} + \frac{\partial r(p_g + \rho_g u_g^2)}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g u_g v_g}{\partial r} = -r\tau_x + rGu_p; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_g v_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u_g v_g}{\partial x} + \frac{\partial r(p_g + \rho_g v_g^2)}{\partial r} = -r\tau_r + p_g + \rho w_g^2 + rGv_p; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_g w_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g w_g u_g}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g w_g v_g}{\partial r} = -r\tau_\phi - \rho_g w_g v_g + rGw_p; \quad (4)$$

$$\frac{\partial r \varepsilon_g}{\partial t} + \frac{\partial r u_g (\varepsilon_g + p_g)}{\partial x} + \frac{\partial r v_g (\varepsilon_g + p_g)}{\partial r} = -r \left[u_g \tau_x + v_g \tau_r + w_g \tau_\phi + n_p \alpha_p S_p (T_g - T_p) + 0.5 G (u_p^2 + v_p^2 + w_p^2) + G c_p T_p \right]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial r \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_p u_p}{\partial x} + \frac{\partial r \rho_p v_p}{\partial r} = -r G; \quad (6)$$

$$\frac{\partial r \rho_p u_p}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_p u_p^2}{\partial x} + \frac{\partial r \rho_p u_p v_p}{\partial r} = r \tau_x; \quad (7)$$

$$\frac{\partial r \rho_p v_p}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_p u_p v_p}{\partial x} + \frac{\partial r \rho_p v_p^2}{\partial r} = r \tau_r + \rho_p w_p^2 - r G v_p; \quad (8)$$

$$\frac{\partial r \rho_p w_p}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_p w_p u_p}{\partial x} + \frac{\partial r \rho_p w_p v_p}{\partial r} = r \tau_\phi - \rho_p w_p v_p - r G w_p; \quad (9)$$

$$\frac{\partial r \varepsilon_p}{\partial t} + \frac{\partial r u_p \varepsilon_p}{\partial x} + \frac{\partial r v_p \varepsilon_p}{\partial r} = r \left[u_p \tau_x + v_p \tau_r + w_p \tau_\phi + n_p \alpha_p S_p (T_g - T_p) + Q_{ch} G - G c_p T_p - 0.5 G (u_p^2 + v_p^2 + w_p^2) \right]; \quad (10)$$

$$\frac{\partial r \rho_{O_2}}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{O_2} u_g}{\partial x} + \frac{\partial r \rho_{O_2} v_g}{\partial r} = -r \alpha_{ch} G; \quad (11)$$

$$\frac{\partial r n_p}{\partial t} + \frac{\partial r n_p u_p}{\partial x} + \frac{\partial r n_p v_p}{\partial r} = 0; \quad (12)$$

$$p_g = \rho_g R_g T_g. \quad (13)$$

Начальные условия для уравнений (1) – (13) имеют вид

$$\begin{aligned} u_g(x, r, 0) = v_g(x, r, 0) = w_g(x, r, 0) = u_p(x, r, 0) = v_p(x, r, 0) = w_p(x, r, 0) = 0, \\ n_p(x, r, 0) = \rho_p(x, r, 0) = 0, \quad T_p(x, r, 0) = T_g(x, r, 0) = T_b, \\ \rho_g(x, r, 0) = \rho_{gb}, \quad \rho_{O_2}(x, r, 0) = \rho_{O_{2,b}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Граничные условия на входе в канал, $x = 0$:

$$\begin{aligned} u_g(0, r, t) = u_p(0, r, t) = u_b, \quad v_g(0, r, t) = v_p(0, r, t) = 0, \\ w_g(0, r, t) = w_p(0, r, t) = \omega r = A_z r u_b, \\ n_p(0, r, t) = n_{pb}, \quad \rho_p(0, r, t) = \Delta_p \rho_{gb}, \\ T_p(0, r, t) = T_g(0, r, t) = T_{st}, \quad \rho_g(0, r, t) = \rho_{gb}, \quad \rho_{O_2}(0, r, t) = \rho_{O_{2,b}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Граничные условия вдоль оси симметрии, $r = 0$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial u_p(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial v_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial v_p(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial w_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial w_p(x, 0, t)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial n_p(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_p(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_p(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{O_2}(x, 0, t)}{\partial r} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

На выходе из канала при $x = L$ задается атмосферное давление. На стенке канала при $y = r_{in}$ (для входной части канала) и $y = R_{out}$ (для расширенной части канала) задаются условия непротекания.

В уравнениях (1) – (16) $\varepsilon_g = p_g / (\gamma - 1) + 0.5 \rho_g (u_g^2 + v_g^2 + w_g^2)$ – полная энергия газа, $\varepsilon_p = c_p T_p \rho_p + 0.5 \rho_p (u_p^2 + v_p^2 + w_p^2)$ – полная энергия частиц; $\alpha_p = Nu_p \lambda_g / (2r_p)$ – коэффициент теплообмена газа с частицами; $\gamma = c_p / c_v$ – показатель адиабаты; $\tau_{x,r,\phi}$ – сила трения вдоль осевого, радиального и тангенциального направлений соответственно; ρ – плотность; u, v, w – скорость; t – время; r – координата по радиусу; p – давление; T – температура; A_z – коэффициент закрутки потока вдоль радиуса; Δ_p – доля массовой концентрации частиц; Q_{ch} – тепловой эффект реакции; k_0 – константа скорости химической реакции; $\alpha_{ch} = \mu_{O_2} \nu_{O_2} / \mu_C \nu_C$ – коэффициент расхода кислорода в реакции с частицами угольной пыли; μ_{O_2}, μ_C – молярные массы кислорода и углерода; ν_{O_2}, ν_C – стехиометрические коэффициенты реакции. Индексом b отмечены начальные значения параметров состояния; p – параметры частиц; g – параметры газа; st – параметры на входе в цилиндрический канал.

Источник G из уравнений (1) – (16) определяется аналогично [7]:

$$G = \frac{n_p S_p \rho_{O_2} \beta_m k_0 \exp(-E_a / R_u T_p)}{\beta_m + k_0 \exp(-E_a / R_u T_p)},$$

где $\beta_m = \lambda_g(T_g) Nu_D / (c_g \rho_g r_g)$ – коэффициент массоотдачи частиц; E_a – энергия активации химической реакции.

Сила трения вдоль осевого направления определяется из выражения [8]

$$\tau_{tr,x} = n_p F_{tr,x},$$

где $F_{tr,x} = C_{rx} S_m \rho_g (u_g - u_p) |u_g - u_p| / 2$ – сила взаимодействия одиночной частицы с газом относительно осевой составляющей скорости потока; $C_{rx} = 24(1 + 0.15 Re_x^{0.682}) / Re_x$ – коэффициент трения; $Re_x = 2 \rho_g r_p |u_g - u_p| / \eta$ – число Рейнольдса относительно осевой составляющей скорости потока; S_m – площадь миделевого сечения; η – коэффициент динамической вязкости газа. Компоненты силы трения вдоль радиального и тангенциального направлений определялись аналогичным образом:

$$\tau_{tr,r} = n_p F_{tr,r}, \quad \tau_{tr,\phi} = n_p F_{tr,\phi},$$

где $F_{tr,r} = C_{rr} S_m \rho_g (v_g - v_p) |v_g - v_p| / 2$, $C_{rr} = 24(1 + 0.15 Re_r^{0.682}) / Re_r$,

$$Re_r = 2 \rho_g r_p |v_g - v_p| / \eta; \quad F_{tr,\phi} = C_{r\phi} S_m \rho_g (w_g - w_p) |w_g - w_p| / 2,$$

$$C_{r\phi} = 24(1 + 0.15 Re_\phi^{0.682}) / Re_\phi, \quad Re_\phi = 2 \rho_g r_p |w_g - w_p| / \eta.$$

Метод решения задачи

Подробности, касающиеся метода решения поставленной задачи приведены в работе [7]. Численный алгоритм основан на методе распада произвольного разрыва [8 и 9]. Шаг по времени определялся из условия устойчивости Куранта [9],

$$\frac{1}{\Delta t} < \frac{1}{\Delta t_x} + \frac{1}{\Delta t_r},$$

где

$$\Delta t_x = \frac{h_x}{\max[u_g] + c_g}, \quad \Delta t_r = \frac{h_r}{\max[v_g] + c_g},$$

c_g – скорость звука в газе.

Проверка методики решения системы уравнений и программы, реализующей методику решения, на достоверность численного решения осуществлялась путем расчета адиабатической температуры горения и проверки законов сохранения массы и полной энергии газа. Выполнимость законов сохранения массы и полной энергии в численном решении соблюдается с точностью 99.93 %. Выбор шага по пространству был обоснован предварительным расчетом задачи на сетках с шагом $2 \cdot 10^{-3}$ м, 10^{-3} м, $5 \cdot 10^{-4}$ м. Расчет на разных сетках показал удовлетворительную сходимость результатов при шаге 10^{-3} м.

Результаты

Основные теплофизические и кинетические параметры, используемые в расчетах, были взяты из [7]. Геометрические параметры канала задавались равными $r_{in} = 0.02$ м, $R = 0.05$ м, $L = 0.4$ м, $l = 0.04$ м. В расчетах варьировался состав смеси (массовая концентрация частиц угольной пыли и радиус частиц), а также величина осевой и угловой скорости подачи частиц в канал. Результаты расчетов представлены на рис. 2 – 6.

На рис. 2 представлено установившееся распределение температуры газа при $\rho_{pb} = 0.04$ кг/м³, $r_p = 10^{-5}$ м, $u_b = 1$ м/с, $A_z = 10$. Согласно рис. 2, высокая температура устанавливается вдоль направления подачи аэрозвеси. В области за внезапным расширением канала, в расширяющейся его части температура остается равной начальной температуре. Это связано с тем, что частицы угля практически не попадают в эту область. Масса частиц в аэрозвеси мала, проходя через источник зажигания, частицы практически полностью сгорают. Нагретый поток продолжает двигаться в осевом направлении с шириной нагретой зоны, равной ширине входного канала.

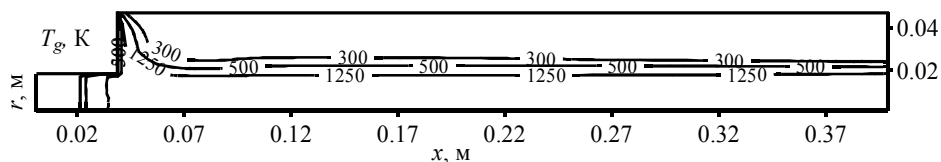


Рис. 2. Изолинии температуры газа: $\rho_{pb} = 0.04$ кг/м³, $r_p = 10^{-5}$ м, $u_b = 1$ м/с, $A_z = 10$

Fig. 2. Isolines of gas temperature: $\rho_{pb} = 0.04$ kg/m³, $r_p = 10^{-5}$ m, $u_b = 1$ m/s, $A_z = 10$

Увеличение радиуса частиц приводит к появлению достаточно существенного отставания частиц от газа, а также к догоранию частиц за источником зажигания. Частицы, проходя через источник, нагреваются и воспламеняются. Нагретые частицы закрученным потоком затягиваются в расширяющуюся часть канала, где они догорают. На рис. 3 представлен вариант расчета горения аэровзвеси угольной пыли при значениях параметров $\rho_{pb} = 0.04 \text{ кг/м}^3$, $r_p = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $u_b = 1 \text{ м/с}$, $A_z = 10$. Видно, что фронт пламени формируется выше радиуса входного канала. В области верхней стенки канала газ остается холодным, так как масса частиц мала и сгорание аэровзвеси происходит до возможного выбрасывания частиц на стенки.

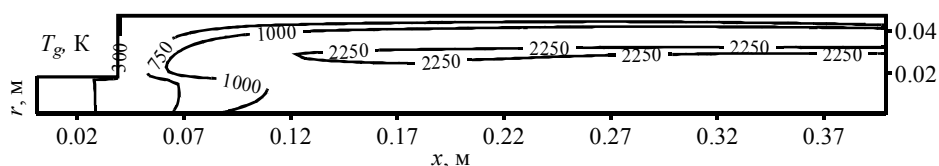


Рис. 3. Изолинии температуры газа: $\rho_{pb} = 0.04 \text{ кг/м}^3$, $r_p = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $u_b = 1 \text{ м/с}$, $A_z = 10$

Fig. 3. Isolines of gas temperature: $\rho_{pb} = 0.04 \text{ кг/м}^3$, $r_p = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $u_b = 1 \text{ м/с}$, $A_z = 10$

Увеличение скорости подачи аэровзвеси в осевом направлении приводит к увеличению температуры газа в окрестностях стенки канала за счет частичного выброса частиц на стенку. Указанный вариант показан на рис. 4.

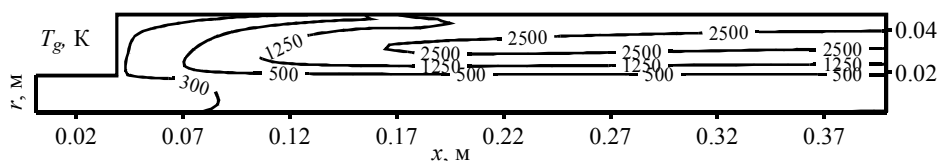


Рис. 4. Изолинии температуры газа: $\rho_{pb} = 0.04 \text{ кг/м}^3$, $r_p = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $u_b = 5 \text{ м/с}$, $A_z = 10$

Fig. 4. Isolines of gas temperature: $\rho_{pb} = 0.04 \text{ кг/м}^3$, $r_p = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $u_b = 5 \text{ м/с}$, $A_z = 10$

Увеличение массовой концентрации частиц приводит к появлению высокотемпературной зоны практически сразу после расширения канала. Фронт горения меньше растянут по каналу. Указанный вариант показан на рис. 5.

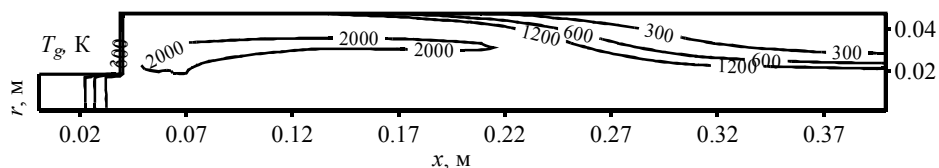


Рис. 5. Изолинии температуры газа: $\rho_{pb} = 0.08 \text{ кг/м}^3$, $r_p = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $u_b = 1 \text{ м/с}$, $A_z = 10$

Fig. 5. Isolines of gas temperature: $\rho_{pb} = 0.08 \text{ кг/м}^3$, $r_p = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $u_b = 1 \text{ м/с}$, $A_z = 10$

Увеличение коэффициента закрутки приводит к выбросу частиц на стенки канала и формированию высокотемпературной области вдоль стенок. На рис. 6 представлен вариант расчета задачи при параметрах $\rho_{pb} = 0.08 \text{ кг/м}^3$, $r_p = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$,

$u_b = 1$ м/с, $A_z = 50$. Видно, что фронт пламени достаточно близко расположен к стенкам канала.

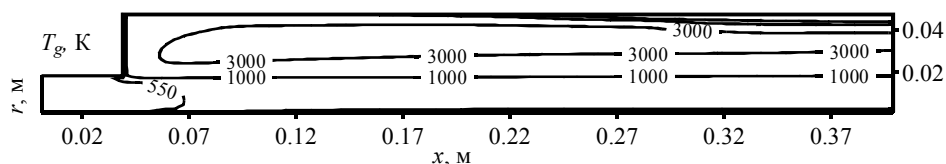


Рис. 6. Изолинии температуры газа. $\rho_{pb} = 0.08$ кг/м³, $r_p = 5 \cdot 10^{-5}$ м, $u_b = 1$ м/с, $A_z = 50$

Fig. 6. Isolines of gas temperature. $\rho_{pb} = 0.08$ kg/m³, $r_p = 5 \cdot 10^{-5}$ m, $u_b = 1$ m/s, $A_z = 50$

Из решения задачи о горении аэровзвеси угольной пыли в закрученном потоке получено, что скорость закрутки существенным образом сказывается на форме пламени. Показано, что при высоких скоростях закрутки фронт горения растягивается до границы со стенками канала. В отличие от случая горения аэровзвеси порошка алюминия не формируются зоны с избыточным содержанием сгоревших частиц (механизм горения частиц угольной пыли таков, что продуктом реакции являются газы), но возможно возникновение перегретых зон вдоль стенки канала в силу выноса горящих частиц на нее. Указанный процесс может достаточно сильно повлиять на режим работы энергетического устройства.

Выводы

Разработана физико-математические модели горения аэровзвеси угольной пыли в канале с внезапным расширением при закрутке потока. Показано, что в зависимости от угловой составляющей скорости подачи смеси на входе в канал фронт горения может быть вытянутым вдоль оси канала или расширяться по поперечному сечению канала. Показано, что при высоких скоростях закрутки горящие частицы забрасывает в расширенную часть канала, к стенкам канала, что приводит к формированию нагретых зон в газе и изменению формы пламени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пиралишвили Ш.А., Маркович Д.М., Лобасов А.С., Верещагин И.М. Моделирование рабочего процесса сверхзвуковой камеры сгорания с вихревым воспламенителем-стабилизатором // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 5. С. 1339–1346.
2. Михайлов А.С., Пиралишвили Ш.А., Степанов Е.Г., Евдокимов О.А., Спесивцева Н.С. Особенности сжигания пылевидного торфяного топлива в вихревом горелочном устройстве // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 4. С. 984–991.
3. Матвиенко О.В., Бубенчиков А.М. Математическое моделирование теплообмена и химического реагирования закрученного потока диссоциирующего газа // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 1. С. 118–126.
4. Кузнецов В.А., Дектерев А.А., Сентябов А.В., Чернецкий М.Ю. Расчетное исследование влияния моделей выхода летучих веществ на процессы горения пылеугольного топлива при закрутке потока // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 1. С. 15–23.
5. Гаврилов А.А., Дектерёв А.А., Сентябов А.В. Моделирование закрученных течений с когерентными структурами с помощью нестационарной модели переноса Рейнольдсовых напряжений // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 4. С. 11–24.
6. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
7. Моисеева К.М., Крайнов А.Ю. Численное моделирование искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 2. С. 61–70.

8. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
9. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной 'собственного' давления // Прикладная математика и механика. 1979. Т. 43. № 3. С. 500–510.

Статья поступила 13.01.2021

Moiseeva K.M., Krainov A.Yu., Rozhkova E.I. (2021) COMBUSTION OF A GAS SUSPENSION OF COAL DUST IN A SWIRLING FLOW. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 71. pp. 139–147

DOI 10.17223/19988621/71/11

Swirling combustion is currently one of the most important engineering problems in physics of combustion. There is a hypothesis on the increase in the combustion efficiency of reacting gas mixtures in combustion chambers with swirling flows, as well as on the increase in the efficiency of fuel combustion devices. In this paper, it is proposed to simulate a swirling flow by taking into account the angular component of the flow velocity. The aim of the study is to determine the effect of the angular component of the flow velocity on the characteristics of the flow and combustion of an air suspension of coal dust in a pipe. The problem is solved in a two-dimensional axisymmetric approximation with allowance for a swirling flow. A physical and mathematical model is based on the approaches of the mechanics of multiphase reacting media. A solution method involves the arbitrary discontinuity decay algorithm. The impact of the flow swirl and the size of coal dust particles on the gas temperature distribution along the pipe is determined.

Keywords: coal dust, air suspension, combustion, swirling flow.

Financial support. This work was carried out with a financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of State Assignment No. 0721-2020-0036.

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

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

Ekaterina I. ROZHKOVA (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: katushar2801@mail.ru

REFERENCES

1. Piralishvili S.A., Markovich D.M., Lobasov A.S., Vereshchagin I.M. (2016) Simulation of the working process of a supersonic combustor with a vortex igniter-stabilizer. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 89(5). pp. 1325–1332. DOI: 10.1007/s10891-016-1495-4.
2. Mikhailov A.S., Piralishvili S.A., Stepanov E.G., Evdokimov O.A., Spesivtseva N.S. (2018) Features of burning of pulverized peat fuel in a vortex burner device. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 91(4). pp. 925–932. DOI: 10.1007/s10891-018-1818-8.
3. Matvienko O.V., Bubenchikov A.M. (2016) Mathematical modeling of the heat transfer and chemical reaction of a swirling flow of a dissociative gas. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 89(1). pp. 127–134. DOI: 10.1007/s10891-016-1359-y.
4. Kuznetsov V.A., Dekterev A.A., Sentyabov A.V. (2016) Numerical study of devolatilization models on the combustion process of pulverized fuel flow swirling. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 9(1). pp. 15–23. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-1-15-23.

5. Gavrilov A.A., Dekterev A.A., Sentyabov A.V. (2015) Modeling of swirling flows with coherent structures using the unsteady reynolds stress transport model. *Fluid Dynamics*. 50(4). pp. 471–482. DOI: 10.1134/S001546281504002X.
6. Nigmatulin R.I. (1987) *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow: Nauka.
7. Moiseeva K.M., Krainov A.Y., Dement'ev A.A. (2019) Critical conditions of spark ignition of a bidisperse aluminum powder in air. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 55(4). pp. 395–401. DOI: 10.1134/S001050821904004X.
8. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.I., Krayko A.N., Prokopov G.P. (1976) *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics]. Moscow: Nauka.
9. Kraiko A.N. (1979) On discontinuity surfaces in a medium devoid of "proper" pressure. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 43(3). pp. 539–549. DOI: 10.1016/0021-8928(79)90102-3.

Received: January 13, 2021