

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ВНЕЗАПНЫМ РАСШИРЕНИЕМ

К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов, Е.И. Рожкова

*Томский государственный университет
634050, Томск, Россия*

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей течения газозвеси в цилиндрическом канале с внезапным расширением при закрутке потока на входе в канал. Данная задача имеет практическую значимость, так как в зависимости от параметров взвеси частиц и параметров закрутки потока в цилиндрической трубе могут образовываться застойные зоны – места отсутствия или скопления частиц. Для энергетических установок, а также для зон горной выработки неравномерность распределения реагирующих частиц может существенным образом повлиять на скорость распространения пламени по каналу или трубе. Внезапное расширение цилиндрического канала может привести к изменению характеристик течения газозвеси. Закрутка газа на входе также существенно изменяет характер течения газозвеси.

В связи с этим была поставлена задача численного исследования особенностей течения аэрозвеси в цилиндрическом канале с внезапным расширением при заданной на входе в канал закрутке потока.

Решается задача о течении газозвеси в цилиндрическом канале с внезапным расширением. Для учета закрутки потока в постановке задачи задается начальная скорость газа по тангенциальному направлению. Полагается, что с левого торца трубы поступает газозвесь с заданной массовой долей частиц, радиусом частиц r_p , скоростью вдоль осевого направления u_{z0} , нулевой скоростью вдоль радиального направления и скоростью u_ϕ вдоль тангенциального направления. Схема канала представлена на рисунке 1. На рисунке 1 введены обозначения: R – радиус выходного канала, r – радиус входного канала, l – протяженность входного канала, L – общая протяженность цилиндрического канала. Стрелками изображено направление подачи газозвеси в цилиндрический канал.

Полагается, что течение газозвеси в канале описывается системой дифференциальных уравнений, записанных в двухмерной осесимметричной постановке с использованием подходов механики двухфазных реагирующих сред Р. И. Нигматуллина [1]. Учитывается динамическое и тепловое взаимодействие между газом и частицами. Задача решается в двухмерной постановке. Для сделанных допущений физико-математическая постановка задачи в цилиндрических координатах имела вид [2]:

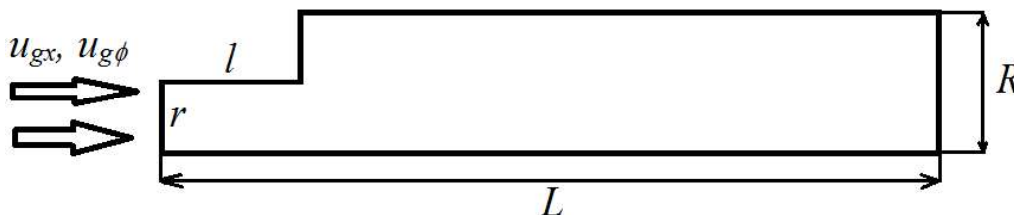


Рис.1. Схема цилиндрического канала.

$$\frac{\partial r \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_g u_g}{\partial x} + \frac{\partial r \rho_g v_g}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

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

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

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

$$\frac{\partial r \varepsilon_g}{\partial t} + \frac{\partial r u_g (\varepsilon_g + p_g)}{\partial x} + \frac{\partial r v_g (\varepsilon_g + p_g)}{\partial r} = -r \left[u_g \tau_x + v_g \tau_r + w_g \tau_\phi + n_p \alpha_p S_p (T_g - T_p) \right], \quad (5)$$

$$\frac{\partial r \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_p u_p}{\partial x} + \frac{\partial r \rho_p v_p}{\partial r} = 0, \quad (6)$$

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

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

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

$$\frac{\partial r \varepsilon_p}{\partial t} + \frac{\partial r u_p \varepsilon_p}{\partial x} + \frac{\partial r v_p \varepsilon_p}{\partial r} = r \left[u_p \tau_x + v_p \tau_r + w_p \tau_\phi + n_p \alpha_p S_p (T_g - T_p) \right], \quad (10)$$

$$\frac{\partial r n_p}{\partial t} + \frac{\partial r n_p u_p}{\partial x} + \frac{\partial r n_p v_p}{\partial r} = 0, \quad (11)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} u_g(x, r, 0) = v_g(x, r, 0) = w_g(x, r, 0) = u_p(x, r, 0) = v_p(x, r, 0) = w_p(x, r, 0) = 0, \\ n_p(x, r, 0) = \rho_p(x, r, 0) = T_p(x, r, 0) = 0, \quad T_g(x, r, 0) = T_b, \quad \rho_g(x, r, 0) = \rho_{gb}. \end{aligned} \quad (12)$$

Граничные условия задавались в виде:

$$\begin{aligned} u_g(0, r, t) = u_p(0, r, t) = u_b, \quad v_g(0, r, t) = v_p(0, r, t) = 0, \quad w_g(0, r, t) = w_p(0, r, t) = A_z(r/R), \\ n_p(0, r, t) = n_{pb}, \quad \rho_p(0, r, t) = \Delta_p \rho_{gb}, \quad T_p(0, r, t) = T_g(0, r, t) = T_{st}, \quad \rho_g(0, r, t) = \rho_{gb}. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial u_p(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial v_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial v_p(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial w_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial w_p(x, 0, t)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial n_p(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_p(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_p(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_g(x, 0, t)}{\partial r} = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

В уравнениях (1) – (14) $\varepsilon_g = p_g / (\gamma - 1) + 0.5 \rho_g (u_g^2 + v_g^2 + w_g^2)$ – 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, $\alpha_p = Nu_p \lambda_g / (2r_p)$ – коэф-

коэффициент теплообмена газа с частицами, $\gamma = c_p/c_v$ – показатель адиабаты, $\tau_{x,r,\phi}$ – сила трения вдоль осевого, радиального и тангенциального направления, соответственно, ρ – плотность, u, v, w – скорость, t – время, r – координата по радиусу, p – давление, T – температура, A_z – максимальная скорость закрутки потока вдоль радиуса, Δ_p – доля массовой концентрации частиц. Индексом b отмечены начальные значения параметров состояния, p – параметры частиц, g – параметры газа, st – параметры на входе в цилиндрический канал,

Система уравнения (1) – (14) решалась численно с использованием алгоритма распада произвольного разрыва [2] и распада разрыва в среде, лишенной собственного давления [3]. Шаги расчетной сетки вдоль осевого и радиального направления задавались постоянными и равными 10^{-3} м, шаг по времени определялся из условия устойчивости Куранта [2]. Примеры полученных результатов приведены на рисунках 2 - 3.

На рисунках сплошная линия, пунктир с точкой и пунктирная линии соответствуют массовой концентрации частиц $\rho_p = 10^{-4}$, 0.01 и 0.025 кг/м³. Рисунки построены для смеси частиц радиуса 0.5 мкм, осевой составляющей скорости потока на входе 3.7 м/с, максимального значения скорости закрутки $A_z = 4$ м/с (рисунок 2) и 10 м/с (рисунок 3). Для рисунка 2 максимальная скорость закрутки сопоставима с осевой скоростью подачи смеси в канал. Согласно рисунку имеет место небольшое искривление профиля массовой концентрации частиц. При большей скорости закрутки профиль концентрации меняется сильнее. Из расчета для заданных радиуса и массовой концентрации частиц было получено, что при максимальной скорости закрутки 8 м/с частицы «выбрасывает» на стенки широкого канала. Указанный эффект может существенным образом повлиять на тепловые и химические процессы в энергетических устройствах, рабочим телом которых является газозвесь.

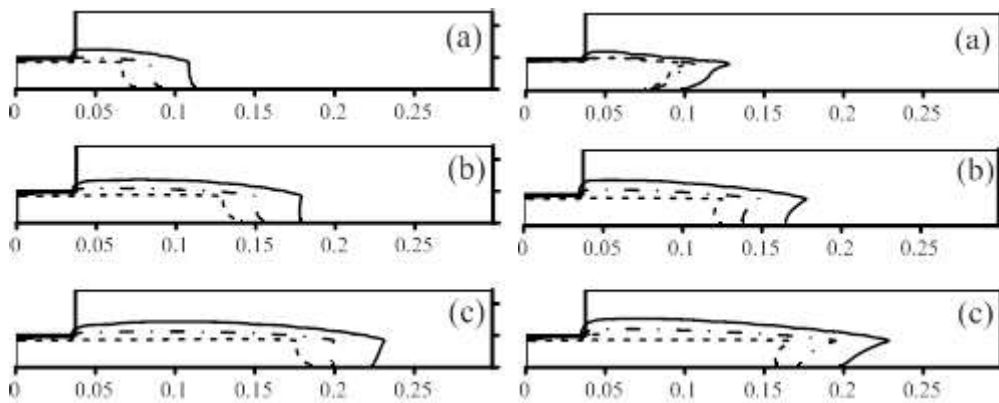


Рис.2. Изолинии массовой концентрации частиц в моменты времени $t = 0.01$ с (а), 0.02 с (б), 0.028 с (с).

Рис.3. Изолинии массовой концентрации частиц в моменты времени $t = 0.01$ с (а), 0.02 с (б), 0.028 с (с).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нигматуллин Р. И. Динамика многофазных сред, Москва: Наука, 1987.
2. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики, Москва: Наука, 1976.
3. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной 'собственного' давления// Прикладная математика и механика. 1979. Т. 43. № 3. С. 500–510.