УДК 533

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В УПАКОВКЕ ЦИЛИНДРОВ

Т.Ш. Зарипов[1]***, А.Г. Егоров***[2]***, Д.Е. Демидов***[1]

[1]НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева Казанского федерального университета
[2]Казанский федеральный университет

zaript@gmail.com

Поступила в редакцию 16.06.2011

Решена задача о движении электрически заряженных малых аэрозольных частиц в периодической полосе упорядоченной упаковки цилиндров. Поле скоростей ламинарного течения несжимаемого газа внутри пористой структуры находится на основе численного решения стационарных уравнений Навье–Стокса методом конечных объемов в программе FLUENT. Уравнение переноса для заряженных частиц с учетом влияния электростатической силы решается совместно с уравнением для электрического потенциала в найденном поле скоростей несущей среды. Рассчитаны поля концентраций заряженных частиц и распределения электрического потенциала при различных значениях величины заряда, начальной концентрации и диаметра частиц, пористости упаковки и числа Рейнольдса потока.

Ключевые слова: заряженные аэрозольные частицы, электростатическая сила, электрический потенциал, пористость.

Вклад диффузионного и инерционного механизмов в осаждение аэрозольных частиц в газовых потоках становится незначительным в переходной области размеров частиц ~0.1–1 мкм. Для более эффективного улавливания частиц в этом диапазоне размеров используется предварительная электрическая зарядка, в результате которой осаждение заряженных частиц обеспечивается влиянием электростатической силы [1, 2]. В приближении электростатического поля и малости электрогазодинамического взаимодействия рассматривается задача о движении электрически заряженных частиц в периодической полосе упорядоченной упаковки цилиндров диаметром d_f (фильтрация заряженных аэрозольных частиц). Скорости течения газа внутри пористой структуры столь малы, что сжимаемостью газа можно пренебречь. Поле скоростей ламинарного течения несжимаемого газа, находится на основе численного решения стационарных уравнений Навье – Стокса методом конечных объемов в программе FLUENT.

При известном распределении концентрации C заряженных частиц в пространстве потенциал F электрического поля, формируемого движущимися частицами, выражается уравнением

$$\Delta F = -\frac{qC}{\varepsilon_0}, \qquad (1)$$

где q – величина заряда частицы, ε_0 – диэлектрическая проницаемость среды. Поток частиц через единицу площади в результате конвективного переноса, диффузии и миграции под воздействием электростатической силы может быть представлен в виде

$$\mathbf{J} = -D\nabla C + \mathbf{U}C + qb\mathbf{E}C, \qquad (2)$$

где D – коэффициент диффузии, $\mathbf{U}$ – вектор скорости газа, $b = C_c/3\pi\mu d$ – подвижность частицы, C_c – эмпирическая поправка Каннингема, учитывающая отклонение закона сопротивления от формулы Стокса при конечных числах Кнудсена. Уравнение неразрывности для потока частиц в стационарном случае имеет вид:

$$\nabla \cdot J = \mathbf{U} \cdot \nabla C - D\nabla C + qb\nabla \cdot (C\nabla F) = 0. \qquad (3)$$

Перепишем уравнения (1), (3) в безразмерном виде

$$\mathbf{u} \cdot \nabla c - \mathrm{Pe}^{-1}\nabla c + \alpha\nabla \cdot (c\nabla\varphi) = 0, \qquad (4)$$

$$\Delta\varphi = -c, \qquad (5)$$

где $\mathbf{u} = \mathbf{U}/U_0$, $\mathrm{Pe} = hU_0/D$, $\varphi = F\varepsilon_0/qC_0$, $c = C/C_0$, $\alpha = q^2C_0b/hU_0\varepsilon_0$; h и U_0 – масштабы длины и скорости, C_0 – начальная концентрация частиц. Уравнения (4), (5) представляют собой систему уравнений, совместное решение которых дает самосогласованные распределения электрического потенциала и концентрации заряженных частиц в известном поле скоростей несущей среды [3]. Для рассматриваемой плоской задачи соответствующая система уравнений запишется в виде

$$u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} = \mathrm{Pe}^{-1}\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}\right) - \alpha\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(c\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(c\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)\right], \qquad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -c, \qquad (7)$$

где u_x, u_y – безразмерные составляющие скорости газа. Программа FLUENT допускает решение стационарных уравнений конвекции-диффузии для произвольных скалярных функций ϕ_k с помощью дополнительных модулей UDF:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i \phi_k - \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i}\right) = S_{\phi_k}, \quad k = 1, \ldots, N, \quad (8)$$

где Γ_k и S_{ϕ_k} – коэффициенты диффузии и источниковые члены для k-й скалярной функции, ρ – плотность газовой среды, u_i – компоненты скорости среды. В пренебрежении конвективным переносом уравнение (8) примет вид уравнения Пуассона

$$-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i}\right) = S_{\phi_k}, \quad k = 1, \ldots, N. \qquad (9)$$

С учетом (7) уравнение (6) представим в форме

$$\left(u_x - \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)\frac{\partial c}{\partial x} + \left(u_y - \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)\frac{\partial c}{\partial y} = \mathrm{Pe}^{-1}\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}\right) - \alpha c^2. \qquad (10)$$

Полагая $\phi_1 = c$, $\Gamma_1 = \mathrm{Pe}^{-1}$, $u_1 = u_x - \partial\varphi/\partial x$, $u_2 = u_y - \partial\varphi/\partial y$, $S_{\phi_1} = -\alpha c^2$ и $\phi_2 = \varphi$, $\Gamma_2 = 1$, $S_{\phi_2} = -c$, напишем процедуру UDF для программы FLUENT.

В качестве граничных условий выберем равенство нулю на поверхности цилиндров потенциала и концентраций частиц

$$r = d_f/2; \quad c(r) = 0, \quad \varphi(r) = 0.$$

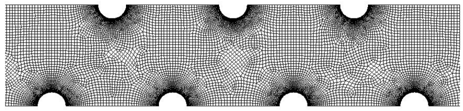
На верхней и нижней границах полосы задаются условия симметрии

$$y = 0; h; \quad \frac{\partial c}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0.$$

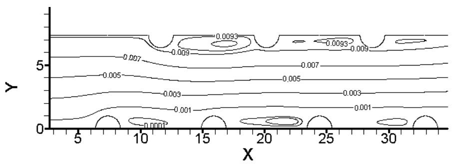
Распределение концентрации частиц на входе в полосу принимается равным единице

$$c(0, y) = 1.$$

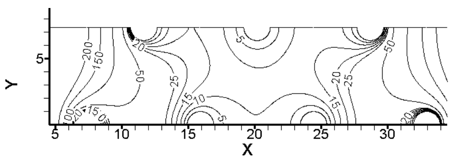
Проведены параметрические исследования полей концентраций частиц, распределения электрического потенциала и эффективности осаждения частиц при различных значениях начальной концентрации и диаметра частиц, величины заряда, пористости упаковки и числа Рейнольдса потока.



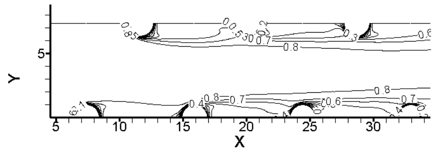
а)



б)



в)



г)

Рис. 1

На рис. 1 для значений параметров $\varepsilon = 0.95$ (ε – пористость упаковки), Re = 50 (Re – число Рейнольдса), Pe = 100, $\alpha = 0.001$ приведены пример сеточного разбиения расчетной области (*а*), линии тока газа (*б*), изолинии безразмерного потенциала электрического поля (*в*) и изоконцентрации частиц *c* (*г*).

Список литературы

1. Yu C.P., Chandra K. // J. of Aerosol Science. 1977. V. 9. P. 175–180.

2. Alonso M., Alguacil F.J. // J. of Aerosol Science. 2007. V. 38. P. 481–493.

3. Ватажин А.Б., Улыбышев К.Е. // Изв. РАН. МЖГ. 2006. №1. С. 68–75.

THE MOTION OF CHARGED AEROSOL PARTICLES IN A CYLINDER ARRAY

T.Sh. Zaripov, A.G. Egorov, D.E. Demidov

The motion of charged aerosol particles in an array of circular cylinders is theoretically studied. In the assumption of steady incompressible fluid flow, the gas velocity field is found by numerical solution of the Navier – Stokes equations using code FLUENT. The equations of particle transport taking into account the electrostatic force influence and the equations for an electric potential are solved in the found velocity field. The particle concentration and electric potential distributions at the various values of particle charge, initial particle concentration, array porosity and Reynolds number are studied.

Keywords: charged aerosol particles, electrostatic force, electric potential, porosity.