

УДК 537.291

ТЕЧЕНИЕ ГАЗОВЗВЕСИ С ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ В УПАКОВКЕ СФЕР

Т.Ш. Зарипов, В. Холландер, Ш.Х. Зарипов, Е.А. Костерина

Аннотация

Решена задача о течении газозвеси с заряженными частицами в плотной периодической упаковке сфер. Гидродинамическое поле скоростей несущей фазы находилось решением уравнений Навье–Стокса в пакете ANSYS Fluent и использовалось для расчета траекторий движения взвешенных частиц с учетом аэродинамического сопротивления в стоксовом приближении, силы тяжести и электростатической индукционной силы для одиночного заряда. Проведены параметрические исследования эффективности осаждения заряженных взвешенных частиц, получено качественное согласие с экспериментальными данными.

Ключевые слова: фильтрация аэрозолей, заряженные частицы, эффективность осаждения.

Введение

Течения газозвеси в пористых средах встречаются в разных технических и природных системах, например в устройствах очистки воздуха. Улавливание взвешенных частиц в пористых структурах обеспечивается различными механизмами оседания: для частиц малых размеров основным механизмом является диффузионное оседание, для больших – инерционная и гравитационная импакции [1]. Для сепарации частиц размеров переходного диапазона используется предварительная электрическая зарядка, обеспечивающая осаждение заряженных частиц действием электростатических сил [2].

В настоящей работе решается задача моделирования течения газозвеси и осаждения аэрозольных частиц в фильтре [3], представляющем собой плотную упаковку шаров радиуса $R = 500$ мкм (рис. 1).

Делается допущение об отсутствии влияния дисперсной фазы на газовое течение в предположении о малости концентраций взвешенных частиц, что позволяет свести моделирование двухфазного течения к двум отдельным задачам: гидродинамической задаче и задаче расчета переноса дисперсной фазы, причем первая может быть решена независимо от второй.

1. Модель фильтра

В качестве модели фильтра принимается плотная упорядоченная трехмерная упаковка сфер одинакового радиуса R с центрами в узлах кубической сетки с ребром $2R$ (рис. 2, *a*). Пористость рассматриваемой структуры ε , определяемая как отношение пространства, занятого средой, ко всему объему пористой структуры, равна 0.26. С учетом симметрии и периодичности течения в пространстве между сферами выделяется наименьший периодический элемент области, занятой воздухом (рис. 2, *b*). Размерность этого элемента – $R \times 2R \times \sqrt{2}R$. В связи со сложностью разбиения расчетной области вблизи точек соприкосновения сфер из рассмотрения исключаются небольшие цилиндрические области.



Рис. 1. Фото аэрозольного фильтра [3]

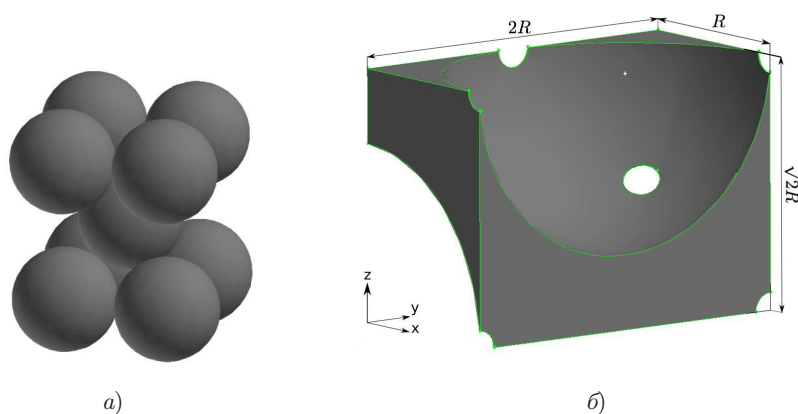


Рис. 2. Упаковка сфер (а) и периодический элемент пространства между ними (б)

2. Движение несущей фазы

В предположении о малости скоростей течения газа внутри фильтра в качестве модели несущей среды принимается ламинарное течение несжимаемой жидкости, которое описывается системой уравнений Навье – Стокса [4], включающей в себя уравнения неразрывности

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

и уравнение движения

$$\mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{U}, \quad (2)$$

где \mathbf{U} – вектор скорости газа, p – давление, ν и ρ – кинематический коэффициент вязкости газа и плотность воздуха соответственно.

На верхней, нижней и боковых гранях периодического элемента ставятся условия симметрии, на торцевых границах – условие периодичности

$$\mathbf{u}(x, y, z) = \mathbf{u}(x, y + L, z), \quad (3)$$

где $L = 2R$ – длина периодического элемента вдоль потока (вдоль оси y). Величины давлений на торцевых границах элемента связаны формулой

$$p(x, y, z) = -\frac{\Delta P}{L} + p(x, y + L, z), \quad (4)$$

где ΔP – перепад давления в пределах элемента. На сферических поверхностях задаются условия прилипания.

Система уравнений (1), (2) с граничными условиями (3), (4) решается с помощью алгоритма SIMPLE метода конечных объемов в среде пакета ANSYS Fluent [5]. Для расчетной области используется нерегулярное тетраэдральное сеточное разбиение. Расчеты проводятся на вычислительном кластере, составленном из восьми серверов. Подробный анализ особенностей расчетов поля течения несущей среды в параллельном режиме проводится в статье [6].

3. Движение взвешенных частиц

С учетом аэродинамического сопротивления в стоксовом приближении, силы тяжести и электростатической силы безразмерные уравнения движения заряженных частиц записываются в виде

$$\gamma \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = (\mathbf{u} - \mathbf{v}_p) + \mathbf{v}_g + \mathbf{f}_e, \quad (5)$$

$$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \mathbf{v}_p, \quad (6)$$

где $\gamma = \tau U_0/L$ – число Стокса, $\mathbf{v}_p = \mathbf{V}_p/U_0$ – скорость частицы, $\mathbf{u} = \mathbf{U}/U_0$ – скорость несущей среды, $\mathbf{v}_g = \tau \mathbf{g}/U_0$ – относительная скорость седиментации, $\tau = \rho_p d_p^2/(18\mu)$ – время релаксации частицы, ρ_p и d_p – плотность и диаметр частицы соответственно, μ – вязкость несущей среды, \mathbf{f}_e – электростатическая сила, действующая на частицу, $\mathbf{x}_p = \mathbf{x}_p/L$ – радиус-вектор частицы, U_0 и L – характерные скорость и длина. Диффузионный механизм осаждения исключается из рассмотрения, так как для исследуемого диапазона размеров частиц ($R \sim 0.5\text{--}3$ мкм) его влияние пренебрежимо мало [1].

Полагается, что все частицы несут одинаковый заряд q . Кулоновским взаимодействием заряженных частиц между собой, а также их влиянием на несущую фазу пренебрегаем в предположении о малости концентраций.

Уравнения движения частиц (5),(6) для трехмерной задачи принимают вид

$$\begin{aligned} \gamma \frac{dv_x}{dt} &= u_x - v_x + \alpha_{im} \sum_{i=1}^{N_s} \frac{x_i}{r_i} \left(\frac{1}{r_i^3} - \frac{r_i}{(r_i^2 - 1)^2} \right), \\ \gamma \frac{dv_y}{dt} &= u_y - v_y + \alpha_{im} \sum_{i=1}^{N_s} \frac{y_i}{r_i} \left(\frac{1}{r_i^3} - \frac{r_i}{(r_i^2 - 1)^2} \right), \\ \gamma \frac{dv_z}{dt} &= u_z - v_z - v_g + \alpha_{im} \sum_{i=1}^{N_s} \frac{z_i}{r_i} \left(\frac{1}{r_i^3} - \frac{r_i}{(r_i^2 - 1)^2} \right), \\ \frac{dx}{dt} &= v_x, \quad \frac{dy}{dt} = v_y, \quad \frac{dz}{dt} = v_z, \end{aligned} \quad (7)$$

где $x_i = x_0 - x_i^c$, $y_i = y_0 - y_i^c$, $z_i = z_0 - z_i^c$, $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$, x_i^c , y_i^c , z_i^c – координаты центров i -й сферы в упаковке, x_0 , y_0 , z_0 – координаты центра первой сферы в упаковке (для определенности $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $z_0 = 0$), N_s – общее число сфер в фильтре. Действующая на частицу электростатическая сила находится как сумма сил, порожденных зарядами, индуцированными на поверхности сфер полем самой частицы. Выражения для индукционных сил получены применением метода изображений. Два безразмерных параметра – число Стокса $\gamma = \tau U_0/R_c$ и $\alpha_{im} = q^2/12\pi^2\mu U_0 \varepsilon_0 R_c^2 d_p$ – характеризуют инерционность частиц и их подверженность влиянию электростатических сил ($q = Ne$ – величина заряда частицы, e – элементарный электрический заряд, N – число элементарных зарядов, ε_0 – диэлектрическая проницаемость).

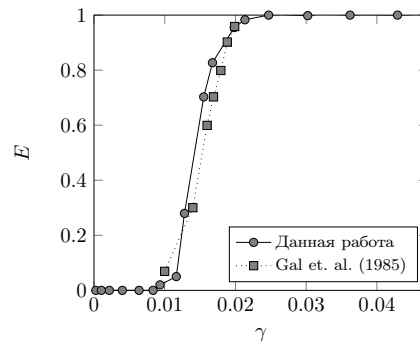


Рис. 3. Зависимость эффективности инерционного осаждения частиц от числа Стокса

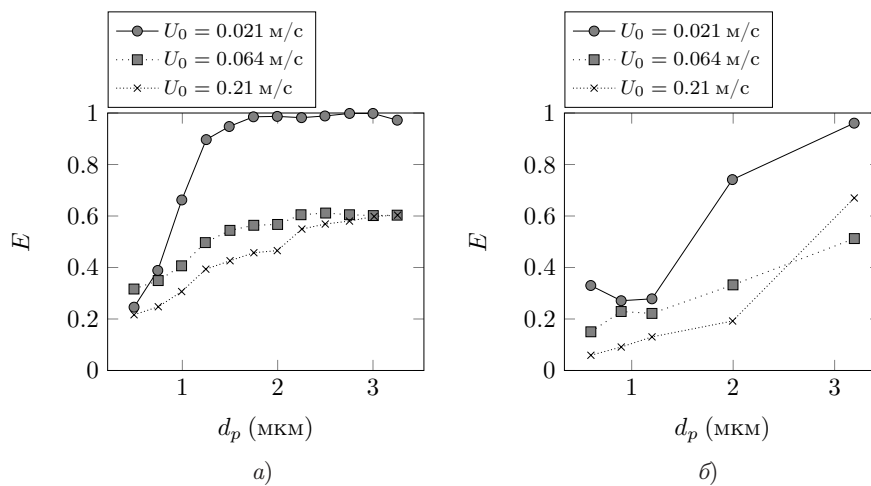


Рис. 4. Рассчитанные (а) и экспериментальные (б) зависимости эффективности осаждения нейтральных частиц от их диаметра

На основе численного решения уравнений (7) с начальными условиями $\mathbf{v}_p(0) = \mathbf{v}_{p0}$, $\mathbf{x}_p(0) = \mathbf{x}_{p0}$ методом Рунге–Кутты рассчитываются траектории движения взвешенных частиц в газе. Значения составляющих скорости газа \mathbf{u} в текущей точке траектории находятся интерполированием в поле скоростей, полученном при решении гидродинамической задачи для несущей среды.

Эффективность осаждения частиц E определяется как отношение числа осевших на данный момент времени частиц к общему числу стартовавших. Частица считается осевшей, когда ее траектория пересекает границу одной из сфер. Таким образом, для определения E необходимо рассчитывать траектории множества частиц, стартовых сечения входного начального элемента упаковки.

Зависимость эффективности инерционного оседания незаряженных взвешенных частиц от числа Стокса приведена на рис. 3. Наблюдается хорошее согласие рассчитанной кривой $E(\gamma)$ с результатами расчетов [7] в рамках модели течения Стокса для несущей среды ($Re = 0$).

Расчетные и экспериментальные зависимости эффективности инерционного и гравитационного оседания от диаметра частиц показаны на рис. 4. Кривые соответствуют трем скоростям течения газа: $U_0 = 0.021, 0.064, 0.21$ м/с. Наблюдается качественное согласие данных.

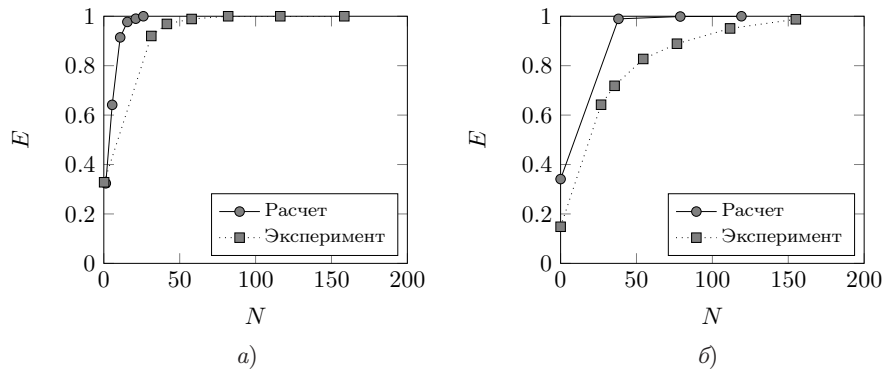


Рис. 5. Зависимость эффективности осаждения заряженных частиц с $d_p = 0.6$ мкм от числа зарядов: а) $U_0 = 0.021$ м/с, б) $U_0 = 0.064$ м/с

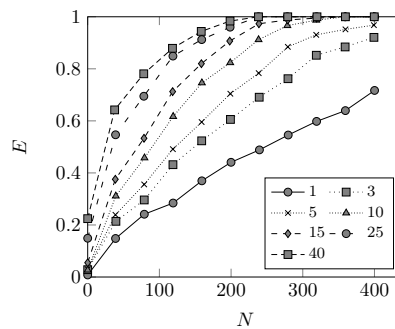


Рис. 6. Зависимость эффективности осаждения заряженных частиц с $d_p = 0.6$ мкм от числа зарядов N для различных глубин упаковки

Расчетные и экспериментальные зависимости эффективности осаждения заряженных частиц от величины заряда для частиц фиксированного диаметра при двух скоростях течения газа приведены на рис. 5. На графиках N – это величина q в элементарных зарядах. Видно, что полное осаждение частиц для течения газовой среды с $U_0 = 0.021$ м/с достигается при $N > 50$, а для $U_0 = 0.064$ м/с – при $N > 150$. Наблюдается качественное согласие расчетных и экспериментальных данных.

Зависимость эффективности осаждения частиц от числа зарядов для различных глубин упаковки (1, 3, 5, 10, 15, 25 и 40 слоев сфер) приведена на рис. 6. Видно, что увеличение заряда на частицах ведет к монотонному росту E , при этом более глубокие упаковки обеспечивают лучшее осаждение для одинаковых значений N .

Осаждение под действием электростатической силы по характеру отличается от действия инерционного и гравитационного механизмов, обеспечивающих улавливание взвешенных частиц в основном на нескольких первых сферах. Даже при слабой зарядности частиц их движение к поверхности будет продолжаться до края упаковки. Можно сделать вывод, что полное осаждение заряженных частиц может быть достигнуто увеличением как заряда частицы, так и глубины пористого слоя.

Заключение

Решена задача о движении заряженных взвешенных частиц в периодической упаковке сфер с учетом аэродинамического сопротивления, силы тяжести и электростатической силы. Проведены параметрические исследования эффективности

осаждения заряженных взвешенных частиц, получено качественное согласие с экспериментальными данными. Показано, что, в отличие от инерционного и гравитационного механизмов, приводящих к улавливанию частиц в начальных слоях упаковки, движение заряженных взвешенных частиц к поверхностям элементов упаковки будет продолжаться до конца слоя сфер. Полное осаждение заряженных частиц в глубокой упаковке может быть обеспечено увеличением числа зарядов частицы или глубины пористого слоя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-01-06135, 14-01-31118) и Совета по грантам Президента Российской Федерации (МК-6235.2015.1), а также за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Summary

T.Sh. Zaripov, W. Holländer, Sh.Kh. Zaripov, E.A. Kosterina. Aerosol Flow with Charged Particles in Dense Array of Spheres.

The problem of aerosol flow with charged particles in a dense array of spheres is solved. Velocity field of the carrier phase flow is found by solving the Navier–Stokes equations using CFD code ANSYS Fluent. Particle trajectories are calculated taking into account aerodynamic drag, gravity force and electrostatic force for single charge. The deposition efficiency of charged particles has been studied parametrically. Fair agreement with experimental data has been obtained.

Keywords: aerosol filtration, charged particles, deposition efficiency.

Литература

1. *Hinds W.C.* Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles. – Wiley-Interscience, 1999. – 504 p.
2. *Alonso M., Alguacil F.J.* Penetration of aerosol undergoing combined electrostatic dispersion and diffusion in a cylindrical tube // *J. Aerosol Sci.* – 2007. – V. 38, No 5. – P. 481–493.
3. *Hollander W., Zaripov T.* Deposition of aerosol particles in dense array of spheres // *European Aerosol Conference.* – Karlsruhe, 2009. – Abstr. T077A13, 1 p. – URL: <http://www.gaef.de/eac2009/eac2009abstracts/T07%20Fundamentals/T077A13.pdf>.
4. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.-Л.: Гостехиздат, 1950. – 676 с.
5. *Ansys.* – Ansys, Inc., 2014. – URL: <http://ansys.com/>.
6. *Гильфанов А.К., Зарипов Т.Ш.* Возможности параллельных вычислений при решении задач газовой динамики в среде CFD программы FLUENT // *Изв. вузов. Авиац. техника.* – 2009. – №. 1. – С. 40–44.
7. *Gal E., Tardos G., Pfeffer R.* A study of inertial effects in granular bed filtration // *AIChE J.* – 1985. – V. 31, No 7. – P. 1093–1104.

Поступила в редакцию
09.07.15

Зарипов Тимур Шамилевич – инженер-проектировщик НИЦ НИИММ имени Н.Г. Чеботарева, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия; научный сотрудник Школы информатики, инженерии и математики, Университет Брайтона, г. Брайтон, Великобритания.

E-mail: zaript@gmail.com

Холландер Вернер (Holländer Werner) – доктор наук, Институт токсикологии и экспериментальной медицины, г. Ганновер, Германия.

E-mail: *werner.hollaender@gmx.de*

Зарипов Шамиль Хузеевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой моделирования экологических систем, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *Shamil.Zaripov@kpfu.ru*

Костерина Екатерина Александровна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры моделирования экологических систем, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *eco_geo_site@rambler.ru*