

## ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПАДАЮЩЕМ ПОТОКЕ ПОЛИФРАКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА\*

evg-porov@yandex.ru

Данная работа направлена на изучение динамики свободно падающего потока полифракционного сыпучего материала. На основе изучения перемещения воздушных масс вблизи обтекаемого шарообразного тела сделан вывод о поперечном перемещении мелких, пылевых частиц, двигающихся со скоростью витания, при их опережении крупными частицами. Данное перемещение в условиях потока, двигающегося со значительными объемными концентрациями, способно вытеснить пылевую частицу в зону аэродинамической тени как опередившей частицы, так и соседних частиц. При попадании частицы в зону аэродинамического турбулентного следа соседних частиц, её собственное аэродинамическое действие на эжектируемый потоком воздух. Подобный эффект рассматривается в рамках предложенного автором статистического подхода к определению коэффициента аэродинамического сопротивления в свободном полифракционном потоке падающего материала.

**Ключевые слова:** аспирация, аэродинамика, полидисперсный материал, полифракционный материал, эжектирование воздуха, динамика частиц, обеспыливающая вентиляция.

**Введение.** Проблемам изучения динамики пылегазовых потоков посвящены труды множества отечественных [1, 2, 3] и зарубежных авторов [4, 5]. Нами был предложен вероятностно-статистический подход к определению коэффициента аэродинамического сопротивления частиц в свободном падающем потоке материала [6]. Свободные потоки сыпучего материала встречаются при загрузках бункеров силосного типа, в которых, в отличие от укрытий [7], стенки бункера находятся на удалении от загрузочного устройства [8].

В полифракционных материалах счетное количество мелких, пылевых частиц велико. Например, в гранулометрическом составе продукта мелкого дробления Михайловского горно-обогатительного комбината суммарная доля частиц трех младших фракций размером мельче 100 мкм составляет 12,6 %, однако оценочное количество таких частиц превышает 30 миллиардов, что в 50 раз больше количества частиц остальных фракций [9, 10]. Подобные частицы быстро достигают скорости витания "выпадая" из общего потока, но при значительных массовых долях не могут не оказывать влияния на аэродинамические свойства этого потока.

**Основная часть.** Рассмотрим некоторые аспекты взаимодействия пылевых частиц с частицами многократно более крупными, т.е. поперечный дрейф мелких частиц, при опережении.

Поперечный дрейф мелких частиц возможен за счет поперечного вектора аэродинамического сопротивления воздуха. Рассмотрим возможный перенос для случая двух частиц, падающих вдоль

параллельных вертикальных траекторий. Крупная частица с диаметром  $d_1$  пусть падает по оси ОХ (рисунок 1) со скоростью равноускоренного движения

$$\frac{dv_1}{dt} = g; v_1 = \sqrt{2g \cdot x + v_{1n}^2}; v_{1n} = \sqrt{2g \cdot \frac{d_1}{2}}, \quad (1)$$

где  $v_{1n}$  – начальная скорость падения (при  $x = 0$ ), м/с.

Мелкая частица с диаметром  $d_N$  падает по криволинейной траектории, приближаясь или удаляясь от нее в зависимости от того, находится она выше или ниже перегоняющей ее крупной частицы. Уравнение динамики мелкой частицы зависит как от силы тяжести, так и от аэродинамической силы стоксовского типа. В векторной форме она имеет вид:

$$m_N \frac{d\vec{v}_N}{dt} = m_N \cdot \vec{g} + 3\pi \cdot \mu \cdot \dot{a}_N (\vec{u} - \vec{v}_N), \quad (2)$$

где  $m_N = \frac{\pi d_N^3}{6} \rho_m$  – масса мелкой частицы, кг;

$\vec{u}$ ,  $\vec{v}_N$  – векторы, соответственно скорости воздуха и скорости частицы диаметром  $d_N$ , м/с;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с.

Проектируя это векторное уравнение на оси выбранной системы координат ХОУ, получим:

$$\frac{dv_x}{dt} = g + K(u_x - v_x); \quad (3)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = K(u_y - v_y), \quad (4)$$

$v_x, v_y$  – проекции вектора  $\vec{v}_N$  на оси OX и OY, м/с;  $u_x, u_y$  – проекции вектора  $\vec{u}$  на те же оси, м/с.

где

$$v_x = \frac{dx}{dt}; v_y = \frac{dy}{dt}; K = \frac{3\pi \cdot \mu \cdot d_N}{m_N}, \quad (5)$$

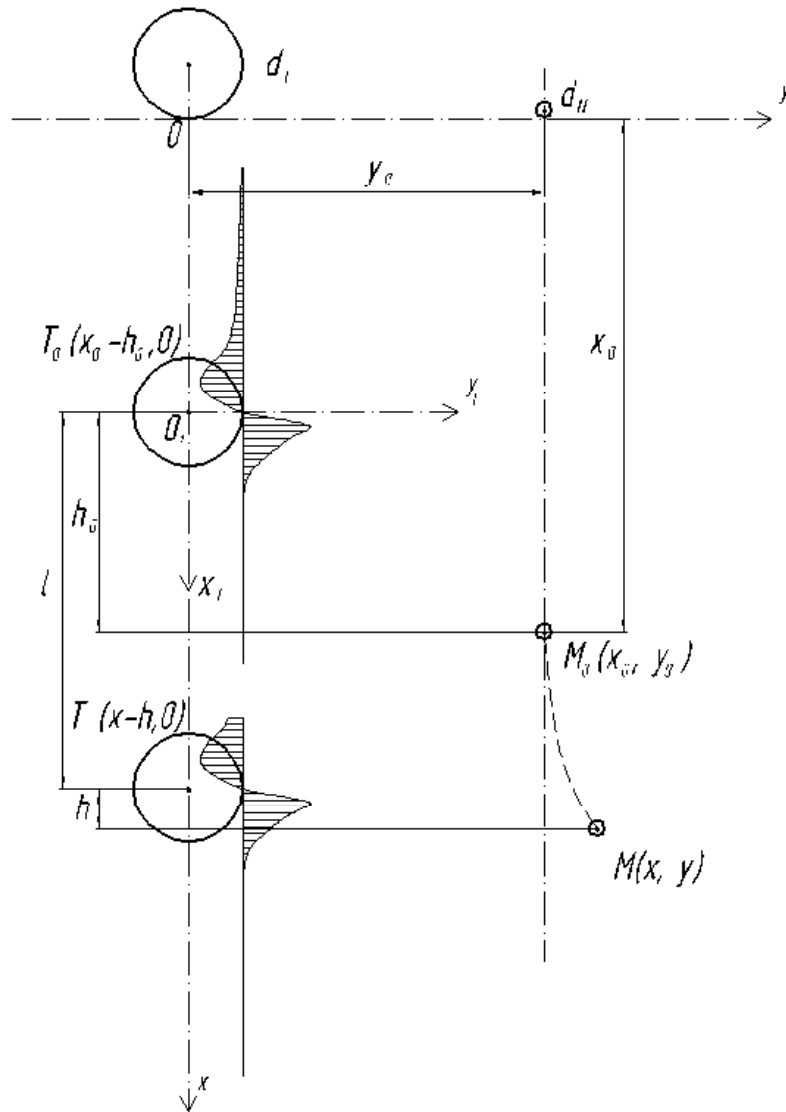


Рис. 1. Схема дрейфа мелкой частицы диаметром  $d_N$  при ее падении параллельным курсом относительно вертикального перемещения равноускоренно падающей круглой (тяжелой) частицы диаметром  $d_1 \gg d_N$

Будем полагать, что вертикальная составляющая вектора скорости воздуха равна нулю  $u_x = 0$ , а горизонтальная составляющая изменяется по закону линейного источника (стока), размещенного в точках оси абсцисс:

$$u_y = \frac{q}{2\pi \cdot y}, \quad q = \pi \cdot d_1 \cdot u_{1y}, \quad (6)$$

где  $q$  – мощность (расход) источника или стока,  $m^3/c$ ;  $u_{1y}$  – скорость выдавливания ("всасывания")

воздуха на боковой поверхности вертикального цилиндра диаметром  $d_1$ , м/с.

Положим, что величина этой скорости пропорциональна скорости падения тяжелой частицы  $v_1$  и изменяется экспоненциально относительно перемещаемого центра тяжести этой частицы в подвижной системе координат  $X_1OY_1$ :

$$u_{1y} = K_1 \cdot v_1 \cdot h \cdot e^{-c \cdot h}, \quad (7)$$

Расчеты обтекания шара (рисунок 2) диаметром  $d_1 = 10$  мм при  $v_1 = 10$  м/с показали, что максимальное (в передней части падающей частицы) и минимальное (в задней части этой частицы) значение скорости  $u_{1y}$  составляет:

$$\left. \begin{aligned} u_{1y}^{\max} &= 2,1 \text{ м/с при } h^{\max} = 0,25d_1 \\ u_{1y}^{\min} &= -4,1 \text{ м/с при } h^{\min} = 0,3d_1 \end{aligned} \right\}$$

Расчетное значение скорости выдавливания и всасывания на боковой поверхности цилиндра образованной падающей шарообразной частицей диаметром  $d_1$ , при этом описывается следующей функцией:

$$u_{1y} = \begin{cases} 190,3 \cdot v_1 \cdot d_1 \cdot s \cdot e^{-\frac{10}{3}s} & \text{при } s > 0; \\ 0 & \text{при } s = 0; \\ 445,8 \cdot v_1 \cdot d_1 \cdot s \cdot e^{-4|s|} & \text{при } s < 0; \end{cases} \quad (8)$$

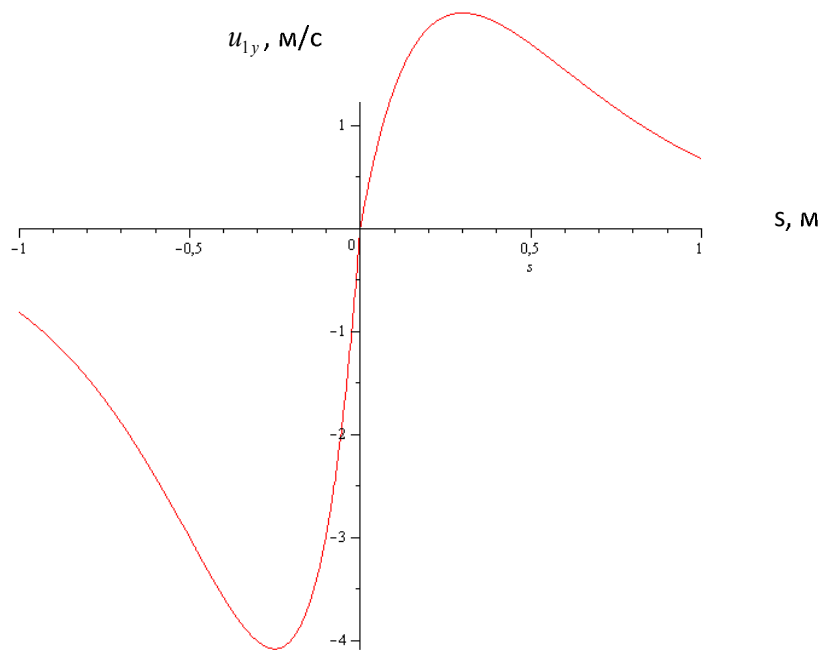


Рис. 2. Изменение скорости выдавливания (левый нижний квадрант) и всасывания (правый верхний квадрант) воздуха при  $d_1 = 0,01$  м и  $v_1 = 10$  м/с

Сносящая скорость воздуха, обусловленная эффектом "выдавливания" или эффектом "всасывания" при обгоне тяжелой частицы в точке  $M_0$  в силу (6), (7) и (8) определяется следующим соотношением:

$$u_y(x_0, y_0) = \frac{d_1}{2} \frac{u_{1y0}}{y_0}, \quad (12)$$

а в точке  $M(x, y)$ :

где  $s/d_1$  – относительное расстояние между центрами частиц.

Рассмотрим случай, когда мелкая частица в начальном положении (при  $t = 0$ ) находится в точке  $M_0(x_0, y_0)$  и проекции вектора скорости ее падения составляют:

$$v_x|_{t=0} = v_{Nc} = const, \quad (9)$$

$$v_y|_{t=0} = 0, \quad (10)$$

а тяжелая частица, падающая равноускоренно, находится при  $t = 0$  в точке  $T_0(x_0 - h, 0)$ , т.е. догоняет мелкую.

Составляющие вектора скорости тяжелой частицы:

$$\left. \begin{aligned} v_{1x}|_{t=0} &= v_{10} = \sqrt{2g(x_0 - h_0) + v_{1n}^2} > v_{Nc}; \\ v_{1y}|_{t=0} &= 0 \\ v_{1y}|_{t=0} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$u_y(x, y) = \frac{d_1}{2} \frac{u_{1y}}{y_0}, \quad (13)$$

$$v_1 = \sqrt{2g \cdot l + v_{10}^2}, \quad (14)$$

где в силу равноускоренного падения тяжелой частицы и равномерного падения мелкой частицы:

$$l = v_{10} \cdot t + \frac{g}{2} t^2; \quad t = \frac{x - x_0}{v_{Nc}}, \quad (15)$$

$$h = t(v_{Nc} - v_{10}) - \frac{g}{2}t^2 + h_0. \quad (16)$$

Таким образом уравнение динамики мелкой частицы с учетом принятых допущений можем записать в виде:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = 0; & \frac{dx}{t} = v_{Nc} = const \\ \frac{dv_y}{dt} = K(u_y - v_y); & \frac{dy}{t} = v_y \end{cases}, \quad (17)$$

где  $v_{Nc}$  – скорость седиментации частицы.

$$v_{Nc} = \frac{g}{K} = \frac{g \cdot d_N^2 \cdot \rho}{18\mu}, \quad (18)$$

$\rho$  – плотность частицы,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха (в расчетах принимается равной  $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$  Па·с).

Поперечная скорость воздуха определялась по формуле

$$u_y = \frac{d_1}{2} \frac{u_{1y}}{y}.$$

Здесь скорость вытеснения  $u_{1y}$  определялась по кусочно-гладкой функции (8).

Решение системы четырех уравнений (17) с учетом принятых начальных условий (9) – (11) осуществлялось численно в универсальной математической системе Maple (рисунок 3).

Расчеты показали, что при пролете "крупной" частицы диаметром  $d_1 = 0,01$  м вблизи пылевой частицы,двигающейся с постоянной скоростью витания, последнюю относит вначале от "крупной" частицы, а затем в сторону теневого следа "крупной" частицы. Причем с увеличением отношения диаметров этих частиц эффект усиливается и ускоряется.

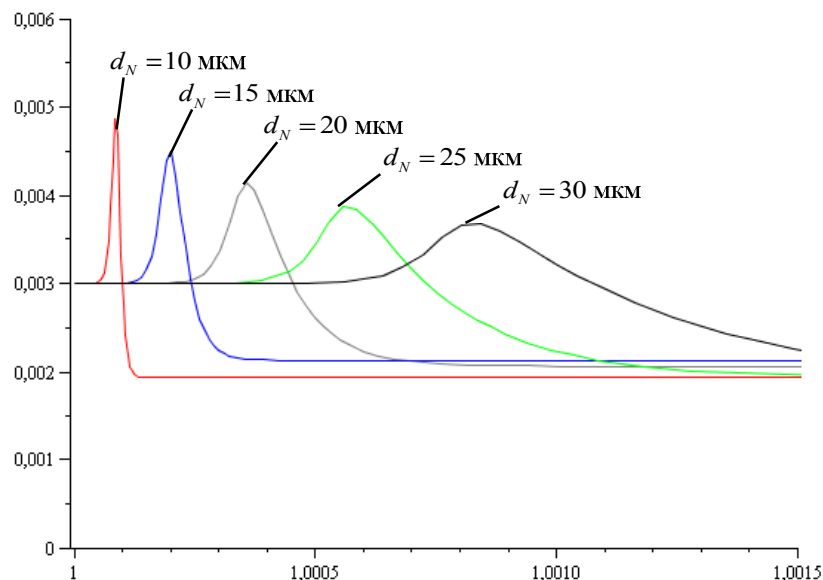


Рис. 3. Траектории частиц диаметром  $d_N$  при пролете вблизи частицы диаметром  $d_1 = 0,01$  м

**Выводы.** Изучена динамика пылевых частиц в потоке свободно падающего полифракционного сыпучего материала. Доказано наличие поперечных перемещений мелких, пылевых частиц,двигающихся со скоростью витания, при их опережении крупными частицами. Данный эффект необходимо учитывать при рассмотрении влияния фракционного состава перегружаемого им воздуха, и, как следствие, при определении объемов аспирации на предприятиях горноперерабатывающей отрасли.

*\*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-08-0007а и программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нейков О.Д., Логачев И.Н. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков. М.: Металлургия, 1981. 192 с.
2. Обеспыливающая вентиляция: монография / В.А. Минко, И.Н. Логачев, К.И. Логачев и др.; под общ. ред. В.А. Минко. Белгород: изд-во БГТУ, 2010. 565 с.
3. Logachev K.I., Averkova O.A., Tolmacheva E.I., Logachev A.K., Dmitrienko V.G., Modeling of Air and Dust Flows in the Range of Action of a Round Suction Funnel Above an Impermeable Plane. Refractories and Industrial Ceramics. 2016. Vol. 57: Pp. 103–107.

4. Liu Ze Qin, 2003. Air entrainment in free falling bulk materials, Doctor of Philosophy thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong.

5. Koichiro Ogata, Katsuya Funatsu, Yuji Tomita. Experimental investigation of a free falling powder jet and the air entrainment // Powder Technology. 2001. Vol. 115. Pp. 90–95.

6. Логачев И.Н., Попов Е.Н. Вероятностно-статистический подход к описанию аэродинамического взаимодействия коллектива падающих частиц с воздухом: случай полифракционного материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №12. С. 95–99.

7. Гольцов А.Б., Киреев В.М., Попов Е.Н. Проблемы комплексного обеспыливания при переработке рудных материалов // Сборник трудов № 4. Воронеж: Изд-во ВГАСУ, 2007. С. 123–129.

8. Попов Е.Н., Семиненко А.С. Определение объемов аспирационного воздуха при обеспыливании бункеров // Наука и молодежь в начале нового столетия: Материалы III Международной науч.-практ. конф. Губкин: ИП Уваров В.М. 2010. С. 71–75.

9. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. СПб: Химиздат, 2005. 659 с.

10. Альбом унифицированного и нестандартного оборудования систем аспирации для предприятий по производству силикатного кирпича. Белгород: БТИСМ, 1989. 78 с.

#### Информация об авторах

**Попов Евгений Николаевич**, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции.

E-mail: evg-popov@yandex.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

*Поступила в декабре 2017 г.*

© Попов Е.Н., 2018

---

#### E.N. Popov

#### MOVING DUST PARTICLES IN A FALLING FLOW OF POLYFRACTION MATERIAL

*This work is aimed at studying the dynamics of a free-falling flow of a polyfraction bulk material. On the basis of the study of the movement of air masses near the streamlined spherical body, a conclusion has been made about the transverse displacement of small, dust particles moving at the speed of winding, when they are advanced by large particles. This displacement under conditions of a flow moving with significant volumetric concentrations, is able to displace the dust particle into the zone of the aerodynamic shadow, which has outstripped the particle and neighboring particles. When a particle hits the zone of the aerodynamic turbulent wake of neighboring particles, its own aerodynamic effect on the air being ejected by the flow. A similar effect is considered within the framework of the statistical approach proposed by the author to determine the coefficient of aerodynamic drag in a free polyfraction flow of the incident material.*

**Keywords:** aspiration, aerodynamics, polydisperse material, polyfractional material, ejection of air, dynamics of particles, the removing dust ventilation.

---

#### Information about the authors

**Evgeny N. Popov**, Senior lecturer.

E-mail: evg-popov@yandex.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in December 2017*