

Шарапов Р.Р., д-р техн. наук, проф.,
Бойчук И.П., канд. техн. наук, доц.,
Агарков А.М., аспирант,
Прокопенко В.С., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВЗВЕШЕННОЙ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА ЧАСТИЦЫ В КОНЦЕНТРАТОРЕ

ptdm_zavkaf@mail.ru

В пылеосадительных камерах используют гравитационное осаждение частиц из потока газа. Для достижения необходимой эффективности очистки газов необходимо, чтобы частицы как можно более длительное время находились в пылеосадительной камере. Для повышения эффективности камер применяются различные устройства. Изменение направления течения и введение в камеру направляющих перегородок позволяют наряду с гравитационным использовать еще и инерционный эффект осаждения частиц при обтекании потоком газа различных препятствий. При отклонении потока газа от прямолинейного направления следует ожидать выпадения наиболее крупных частиц. В этом случае благодаря инерционным силам пылевые частицы, стремясь сохранить направление своего движения после поворота потока газа, будут выпадать в бункер. Кроме того удар частицы о препятствие приводит к изменению скорости и, соответственно, кинетической энергии, что тоже будет способствовать выпадению крупных частиц.

Ключевые слова: концентратор, частица, газовый поток, перегородки.

Введение. При сильно запыленных газовых потоках процесс очистки происходит в несколько этапов [1]. Концентраторы, предназначенные для первичного удаления грубых частиц газового потока, можно использовать как предварительные осадители, располагая их последовательно с устройствами других типов, чтобы уменьшить нагрузку на последние [2].

В концентраторе осаждение частиц происходит, в основном, под действием сил тяжести [3]. Для увеличения осадительного действия концентратор можно снабдить отражательными перегородками, которые изменяют направления движения газа. В этом случае на частицы действуют и силы инерции.

Конструирование концентраторов проводится на подсчете скорости вертикального движения частицы вниз под действием сил, приложенных к частице.

Основная часть. Движение частицы в газовой среде описывается вторым законом Ньютона:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i, \quad (1)$$

где m – масса частицы, v – скорость частицы, $\sum_i \vec{F}_i$ – главный вектор действующих на частицу в газовом потоке сил. В общем случае главный вектор сил равен векторной сумме силы тяжести \vec{G} , силы сопротивления \vec{F}_x и подъемной (архимедовой) силы \vec{F}_A .

Сила сопротивления задается выражением:

$$F_x = C_x S \frac{\rho(U-v)^2}{2}, \quad (2)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления среды, S – площадь миделевого сечения частицы, ρ – плотность воздуха, U – скорость воздуха, v – скорость частицы. Эта сила направлена противоположно вектору скорости среды.

Коэффициент сопротивления среды C_x поставлен в зависимость от режима осаждения, т.е. является функцией числа Рейнольдса Re :

$$C_x = f(Re), \quad (3)$$

где $Re = \frac{v_p d}{\nu}$, $v_p = |U - v|$ – относительная скорость частицы, ν – коэффициент кинематической вязкости. Вычисляют коэффициент сопротивления следующим образом [4]:

$$C_x = \frac{24}{Re}, \quad Re < 2; \quad (4)$$

$$C_x = \frac{18,5}{Re^{0,6}}, \quad 2 < Re < 500; \quad (5)$$

$$C_x = 0,44, \quad Re > 500. \quad (6)$$

Удачной считается зависимость [5]:

$$C_x = 8 \left(\frac{3}{Re} + \frac{0,45}{Re^{4/9}} + 0,042 \right). \quad (7)$$

В [6] указывается, что в диапазоне $1 < Re < 10^3$ наиболее точно коэффициент лобового сопротивления задается формулой Клячко:

$$C_x = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}. \quad (8)$$

Подъемная сила принимается пропорциональной массе среды, вытесненной частицей:

$$F_A = m \frac{\rho}{\rho_p} g, \quad (9)$$

где ρ_p – плотность материала частицы. Направлена эта сила вертикально вверх.

Движение частицы будет определяться тем, какое движение совершает поток воздуха в камере концентратора. В случае, когда частица опускается вертикально вниз под действием направленного вниз потока, уравнение (1) с учетом (2), (9) будет следующим:

$$m \frac{dv}{dt} = -C_x S \frac{\rho(U-v)^2}{2} + mg - mg \frac{\rho}{\rho_p}. \quad (10)$$

Данное уравнение осаждения справедливо для любых режимов осаждения при известной скорости движения среды $U = f(z, t)$.

Подставляя в (10) формулу (8), получим:

$$-\frac{dv}{dt} = (U-v) \left(A + B(U-v)^{2/3} \right) + C, \quad (11)$$

где

$$A = 12S\rho \frac{v}{d}, \quad B = 2S\rho \left(\frac{v}{d} \right)^{1/3}, \quad C = -g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right). \quad (12)$$

Уравнение (11) представляет собой неоднородное обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка относительно скорости. Решение этого уравнения представимо в виде суммы решения общего однородного v_1 и частного неоднородного решения v_2 .

Пусть скорость среды постоянна и направлена вертикально вниз ($U = U_0 = const$). Тогда однородное уравнение:

$$-\frac{dv}{dt} = (U-v) \left(A + B(U-v)^{2/3} \right). \quad (13)$$

может быть решено аналитически. Такое решение представляется в виде [6]:

$$v_1 = U_0 - U_0 e^{-At} \left[1 + \frac{B}{A} U_0^{2/3} \left(1 - e^{-\frac{2}{3}At} \right) \right]^{-3/2}. \quad (14)$$

График решения общего однородного уравнения при различных скоростях входящего потока представлен на рис. 1.

Рис. 1 показывает, что достижение частицей скорости стационарного движения происходит тем быстрее, чем выше скорость потока. Аналогично на скорости достижения влияет и размер частицы (рис. 2): чем больше частица, тем быстрее она достигает стационарной скоро-

сти. Мелкие же частицы на стационарную скорость не выходят – они продолжают движение вместе с воздухом.

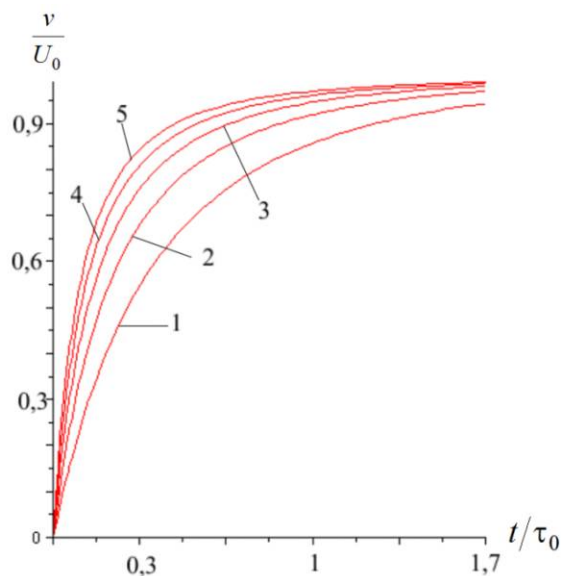


Рис. 1. Изменение скорости частицы при различной скорости U_0 :
1 – 5, 2 – 10, 3 – 15, 4 – 20, 5 – 25 м/с

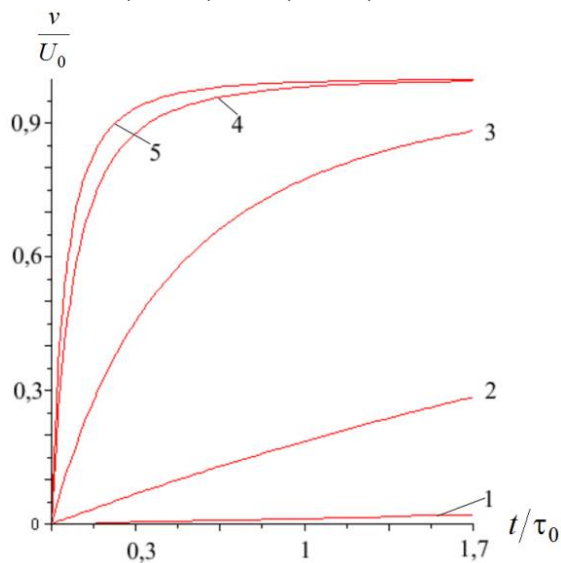


Рис. 2. Изменение скорости частицы при различном диаметре d :
1 – 1; 2 – 10; 3 – 50; 4 – 100; 5 – 150 мкм

Частное неоднородное решение может быть найдено либо специальными методами, либо подбором. Найдем частное неоднородное решение v_2 , предполагая, что оно равно константе:

$$v_2 = const = D. \quad (15)$$

Учитывая, что частное неоднородное решение должно удовлетворять исходному уравнению, подставляем его в (13) и получаем для нахождения константы D следующее уравнение:

$$(U-D) \left(A + B(U-D)^{2/3} \right) + C = 0. \quad (16)$$

Решение этого уравнения зависит от постоянных A, B, C, U и в общем случае зависимость между этими константами получить не удастся. Но можно исследовать это решение. Для этого сделаем замену $U - D = x$. Тогда уравнение (16) примет вид:

$$x(A + Bx^{2/3}) + C = 0. \quad (17)$$

Так как $A, B > 0$, $C < 0$, то функция $f(x) = x(A + Bx^{2/3}) + C$ при $x \rightarrow -\infty$ стремится к $-\infty$, а при $x \rightarrow +\infty$ $f(x) \rightarrow +\infty$. Это значит, что уравнение имеет хотя бы один корень. Переписав уравнение в следующем виде:

$$A + Bx^{2/3} = -\frac{C}{x}, \quad (18)$$

получим, что левая часть – это функция, график которой лежит в первом и втором квадранте, а правая – гипербола, график которой лежит в первом и третьем квадранте. Следовательно, данное уравнение имеет один корень на промежутке $(0; +\infty)$, т.е. лежит в первой четверти декартовой плоскости.

Сделаем замену переменных $x^{1/3} = y$. Тогда $x = y^3$ и уравнение (17) примет вид:

$$y^3(A + By^2) + C = 0. \quad (19)$$

Согласно теореме Виета [7], это уравнение будет иметь корень при следующем соотношении между постоянными:

$$\left(\frac{A}{10}\right)^5 \frac{1}{B^3} = C^2. \quad (20)$$

Будем рассматривать сферическую частицу. Для такой частицы площадь миделевого сечения $S = \frac{\pi d^2}{4}$. Тогда коэффициенты A, B примут вид:

$$A = 3\pi d \rho v, \quad B = \frac{1}{2} \pi d^3 \rho v^{1/3}. \quad (21)$$

Соотношение (20) с учетом (21) даст связь между кинематической вязкостью и плотностью, при которой справедливо уравнение (16):

$$v^4 = 51,44 \left[\frac{g}{\pi} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_p} \right) \right]^2. \quad (22)$$

Общее решение уравнения (11):

$$v = U_0 - U_0 e^{-At} \left[1 + \frac{B}{A} U_0^{2/3} \left(1 - e^{-\frac{2}{3}At} \right) \right]^{3/2} + D. \quad (23)$$

График общего решения в безразмерном виде представлен на рис. 3.

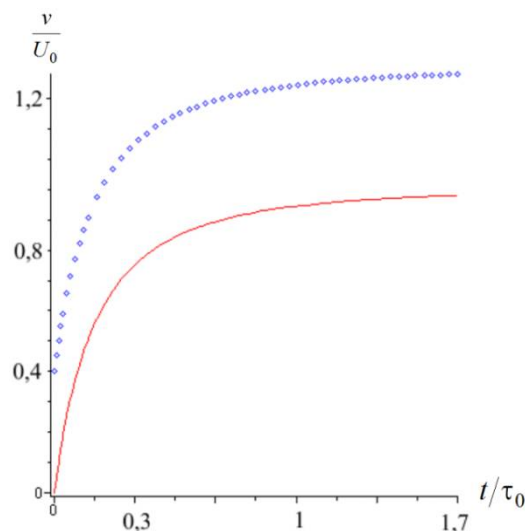


Рис. 3. График изменения скорости частицы со временем: линия – однородное решение, \circ – общее неоднородное решение

Решение (23) показывает, что скорость частицы возрастает благодаря массовым силам, действующим на частицу. Если скорость потока равна нулю ($U_0 = 0$), то скорость движения частицы будет $v = D$.

Выводы. В работе представлено решение задачи о вертикальном движении частицы вниз в газовом потоке под действием силы тяжести, силы сопротивления, подъемной силы и силы инерции. Показано влияние различных сил на скорость движение частицы. А также получено соотношение между вязкостью и плотностью, при котором справедливо уравнение движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прокопенко В.С., Шарапов Р.Р., Агарков А.М., Шарапов Р.Р. Оптимизация работы оборудования для получения тонкодисперсных порошков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. №1. С. 80–83.
2. Уваров В.А., Орехова Т.Н. Использование пневмосмесителя при производстве дорожно-строительных материалов / Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений: сб. докладов Междунар. наун.-практ. конф. // Белгор. гос. технол. ун-т, Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. Т. II. С. 161–165.
3. Харламов Е.В., Шарапов Р.Р., Шаптала В.Г., Шаптала В.В. Моделирование процесса разделения в магнитно-аэродинамическом сепараторе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С. 91–95.
4. Островский Г.М. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты хими-

ческих технологий. Часть 2. СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2006. 916 с.

5. Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб.: Наука, 2000. 359 с.

6. Орехова Т.Н., Уваров В.А. Теория и расчет пневмосмесителей непрерывного действия. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 114 с.

7. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат.лит, 1986. 544 с.

Sharapov R.R., Boychuk I.P., Agarkov A.M., Prokopenko V.S.

THE EQUATIONS OF MOTION THE PARTICLE IN THE AERIAL DUST

In duster uses the gravitational settling of particles from the gas stream. To achieve the necessary efficiency of gas cleaning is necessary that the particle as much as possible for a long time were in a duster. To increase the effectiveness of duster used different devices. Changing the direction of flow and the introduction into the duster baffles allow along with gravity and still use inertial effect of particle deposition at a flow of gas various impediments. When a deviation from the straight gas flow direction to be expected deposition of the largest particles. In this case, due to the inertial forces of the dust particles in order to maintain its direction after turning the gas flow will fall into the hopper. Furthermore obstacle shot particles leads to a change in velocity and consequently of kinetic energy, which will also contribute to the precipitation of coarse particles.

Key words: *duster, particle, gas stream, baffle.*