

УДК 628.511

ИНЕРЦИОННАЯ СЕПАРАЦИЯ ПЫЛИ В КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОТОКАХ

О.В. КАРТАВЦЕВА

(Полоцкий государственный университет)

Исследована инерционная сепарация пыли в криволинейных потоках, проанализированы силы, оказывающие влияние на частицу при движении ее в циклонных пылеуловителях и в вихревых камерах. Определены условия, при которых происходит отделение частиц от потока и их осаждение.

Частицы аэродисперсных систем постоянно движутся относительно среды и друг друга. В зависимости от размеров частиц меняются законы, определяющие сопротивление движению частиц в покоящемся воздухе (сопротивление неподвижных частиц прямолинейному потоку воздуха).

При взаимодействии пылевых частиц с увлекающими их воздушными потоками при наличии внешних сил возникают силы инерции, имеющие большое значение в теории и практике обеспыливания.

Различают два класса сил инерции [1]:

1) ньютоновы силы инерции, действующие в инерциальных системах отсчета, т.е. в системах неподвижных или движущихся относительно неподвижных систем прямолинейно и равномерно;

2) силы инерции, действующие в неинерциальных системах отсчета, т.е. в системах, движущихся относительно неподвижных систем с ускорением.

Дифференциальное уравнение движения аэрозольной частицы в воздушном потоке в соответствии со вторым законом Ньютона записывается в виде:

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = 3\pi\mu_e d (\vec{v} - \vec{v}_p) \text{ или } \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \frac{1}{\tau} (\vec{v} - \vec{v}_p), \quad (1)$$

здесь m_p – масса частицы; \vec{v}_p – абсолютная скорость прямолинейного движения частицы относительно неподвижной системы координат; \vec{v} – средняя скорость воздушного потока на пути частицы (без учета распределения скорости вокруг частицы); $\tau = \frac{m_p}{3\pi\mu_e d}$ – время релаксации частицы; μ_e – динамическая

вязкость воздуха; d – диаметр частицы.

Уравнение движения частицы в криволинейном потоке имеет вид:

$$m_p \frac{d\vec{v}_r}{dt} + m_p \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times R) + m_p \left(\frac{d\vec{\omega}}{dt} \times R \right) + 2m_p (\vec{\omega} \times \vec{v}_r) = -3\pi\mu_e d \vec{v}_r, \quad (2)$$

здесь \vec{v}_r – относительная скорость движения частицы; $\vec{\omega}$ – угловая скорость вращения потока; R – радиус сечения.

Каждый из членов левой части уравнения представляет собой компонент силы $m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt}$, с которой частица действует на воздушный поток, стремящийся искривить траекторию частицы и изменить ее скорость. В правой части уравнения представлена аэродинамическая сила, действием которой объясняется указанный эффект, т.е. внешняя сила.

Первый член уравнения связан с ускорением сепарационного движения и может быть равен нулю только при $\vec{v}_r = const$, что невозможно. Направление этой силы зависит от начальных условий входа частицы в искривленную часть потока. При рассмотрении движения в циклоне принимается, что при входе потока на поворот скорости его отдельных слоев изменяются в соответствии с законом площадей:

$$vR = k = const. \quad (3)$$

По сравнению с начальной скоростью скорость периферийных слоев уменьшается, а центральных – увеличивается. В некоторой точке A скорость потока равна начальной скорости.

Перестройка потока происходит мгновенно, в то время как скорость пылевых частиц, равная до этого скорости потока ($v_{po} = v_o$), меняется медленно. Вследствие этого в начальный момент времени $t = 0$ $\vec{v}_r = \vec{v}_o - \vec{v}(R)$. В соответствии с указанным в правой части течения от точки A \vec{v}_r и $d\vec{v}_r/dt$ направлены к периферии течения. Слева от точки A эта сила направлена внутрь течения (рис. 1).

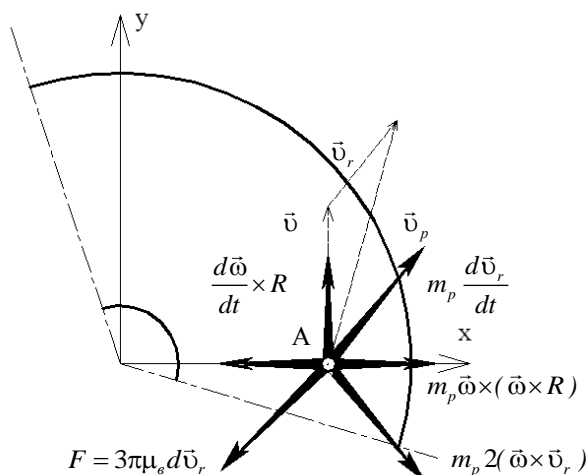


Рис. 1. Схема сил взаимодействия частицы и среды в криволинейном потоке

Второй член уравнения представляет собой центробежную силу, направленную по радиусу закругления потока. При исследованиях инерционной сепарации в циклонах часто учитывают только эту составляющую силы инерции, и тогда уравнение движения записывается в виде:

$$m_p \omega^2 R = 3\pi\mu_e d v_r. \quad (4)$$

Вектор, представленный третьим членом, всегда совпадает по направлению со скоростью воздушного потока ω . Он выражает реакцию частицы, переходящей во все более замедленные слои, не тормозящие влияние среды.

Четвертый член уравнения представляет собой силу Кориолиса.

При рассмотрении движения частиц в циклонных пылеуловителях учитывают влияние радиального стока [2 – 4], которое оказывается особо значимым для «легких» частиц, изменяя их траекторию и приближая частицы к оси вращения.

Таким образом, сепарационный процесс, происходящий в циклонных аппаратах, представляется так: при входе в циклон пылевые частицы в силу инерции вначале движутся по прямолинейным траекториям, затем увлекающее воздействие вращающегося воздушного потока искривляет их траекторию, причем тем больше, чем больше расстояние от места входа частиц до наружной стенки циклона. Начальный участок движения характеризуется энергичной сепарацией наиболее крупных частиц из периферийной части потока. При дальнейшем движении частиц тангенциальная составляющая их скорости приближается к скорости потока воздуха. Здесь сепарация частиц определяется непрерывным изменением вектора тангенциальной составляющей скорости воздуха и вследствие этого наличием радиальной составляющей скорости частицы относительно среды. При достаточной продолжительности движения из потока могли бы быть выделены частицы любого размера. Однако в циклонах с возвратным движением потока этому препятствует радиальный сток, который увлекает мелкие частицы в направлении восходящего потока. Те из частиц, для которых увлекающая сила стока уравновешивается силой инерции, движутся на стационарных орбитах, непрерывно подвергаясь влиянию турбулентных пульсаций потока.

При составлении моделей течения запыленного потока в вихревых камерах кроме рассмотренной силы аэродинамического сопротивления, действующую на частицу во вращающемся потоке, учитывают также силу тяжести частицы и силу, обусловленную изменением давления среды по поверхности [5]. Последняя определится как

$$\vec{F}_p = \int_{S_p} \vec{n} p dS = \int_{V_p} \text{grad } p dV, \quad (9)$$

здесь S_p, V_p – соответственно поверхность частицы и ее объем; \vec{n} – нормаль к элементу поверхности dS .

При малых размерах частицы изменением градиента давления по объему частицы пренебрегают и с учетом теоремы о среднем

$$\vec{F}_p = V_p \text{grad } p, \quad (10)$$

здесь $\text{grad } p$ – градиент давления среды, взятый в точке, совпадающей с центром объема частицы.

Для вращающейся среды в цилиндрической системе координат с направленной вверх осью Z силу (10) можно разбить на радиальную и осевую слагаемые:

$$\vec{F}_p = V_p \frac{\partial p}{\partial r} \vec{r}_o + V_p \rho g \vec{k}. \quad (11)$$

Так как во вращающейся жидкости преобладающим является изменение давления по радиусу, то осевым изменением, обусловленным движением жидкости, можно пренебречь.

Выразив радиальный градиент давления в вихревой камере через тангенциальную скорость, радиальная составляющая этой силы запишется в виде:

$$F_{pr} = -\frac{\rho v}{r} V_p, \quad (12)$$

где v – тангенциальная скорость потока; r – радиальная координата.

Значение этой силы возрастает, и она становится сопоставимой с центробежной силой для больших частиц при малых соотношениях их относительных скоростей и плотности жидкости, сравнимой с плотностью частицы.

Ускорение, приобретенное частицей под действием рассмотренных сил, в проекциях на оси цилиндрической системы координат запишется в следующем виде:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3\pi\mu_g d}{m_p} (u - u_p) + \frac{1}{r} \left(v_p^2 - \frac{\rho}{\rho_p} v^2 \right); \quad (13)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{3\pi\mu_g d}{m_p} (v - v_p) - \frac{u_p v_p}{r}; \quad (14)$$

$$\frac{d\omega_p}{dt} = \frac{3\pi\mu_g d}{m_p} (\omega - \omega_p) + g \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right), \quad (15)$$

где u_p, v_p, ω_p – радиальная, тангенциальная и осевая составляющая скорости частицы соответственно; ρ – плотность воздуха; ρ_p – плотность частицы.

Первые слагаемые в правых частях уравнений (13) – (15) обусловлены аэродинамической силой, второе слагаемое в уравнении (13) – радиальной составляющей силы F_p и центробежным ускорением частицы. Второе слагаемое в уравнении (14) вызвано ускорением Кориолиса, а в уравнении (15) – осевой составляющей силы F_p и силой веса частицы.

Для сферической частицы диаметром d из уравнений (13) и (14) при $\omega_p = 0$, $u_p = 0$ и $du_p/dt = 0$ соотношение параметров на стационарной орбите будет иметь вид:

$$\frac{18\mu_g u}{\rho_p d^2} + \frac{1}{r} \left(v_p^2 - \frac{\rho}{\rho_p} v^2 \right) = 0; \quad (16)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{18\mu_g}{\rho_p d^2} (v - v_p). \quad (17)$$

Согласно (16) стационарная орбита может существовать при тангенциальной скорости частицы v_p , отличающейся от тангенциальной скорости потока v .

По уравнению (17) движение частицы будет ускоряться в тангенциальном направлении, скорость ее, а следовательно, и центробежное ускорение возрастут. Поэтому она сойдет со стационарной орбиты и уйдет на периферию.

Отделение частиц от потока в циклонных пылеуловителях может произойти, если радиус стационарной орбиты частицы будет не больше диаметра выходного отверстия.

Некоторыми авторами в зависимости от исходных теоретических положений приводятся разные соотношения для критического диаметра такой частицы [6]. Эти выражения позволяют определить пре-

дельный диаметр отделяемой частицы в зависимости от геометрических размеров сепаратора, свойств газа, частицы и скорости во входном сечении сепаратора.

Однако надо отметить, что уменьшением критического диаметра частицы за счет уменьшения выходного сечения пылеуловителя можно пользоваться только в некоторых пределах. На устойчивых орбитах частиц вдали от стенки камеры в условиях непрерывного пополнения частицами они неэффективно отделяются от потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
2. Кисилев Н.В., Нагорский И.С., Волкус С.П. О применении аналоговой модели для анализа движения частиц в криволинейном потоке / Изв. высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1969. – № 12. – С. 28 – 33.
3. Пирумов А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. – М.: Госстройиздат, 1961. – 260 с.
4. Жуков Н.И., Шилов В.А. Влияние конструкции циклона на эффективность пылеулавливания // Модернизация систем отопления и вентиляции в реконструируемых зданиях: Межвуз. сб. – Ростов н/Д: РИСИ, 1986. – С. 136 – 140.
5. Смутьский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. – Новосибирск: Наука, 1992. – 301 с.
6. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др. – М.: Химия, 1981. – 390 с.