

М. Р. Вахитов, Г. П. Шуваева, А. Н. Николаев

ОЧИСТКА ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ В АППАРАТАХ С ПОРИСТЫМ ВРАЩАЮЩИМСЯ РАСПЫЛИТЕЛЕМ

Ключевые слова: очистка, газовые выбросы, аппарат с распылителем.

Разработана конструкция аппарата с пористым вращающимся распылителем для очистки газов от пыли. Представлены результаты численного исследования закономерностей движения капель распыла в зоне очистки.

Keywords: cleaning, gas emissions, with a spray device.

The design of the apparatus with a porous rotating spray for cleaning gases from dust. The results of numerical studies of the laws of motion of drops in the spray area clean have been shown.

Значительная часть современных технологических процессов в различных отраслях промышленности связана с изготовлением, переработкой и применением порошкообразных материалов и сопровождается интенсивным выделением пыли.

Основными путями борьбы с пылевыми выбросами в атмосферу должны оставаться совершенствование технологических процессов с доведением до минимума вредных выбросов и создание безотходных, замкнутых технологических циклов. Однако, пока эти задачи не решены, необходимо применять наиболее эффективные и экономичные средства очистки воздуха и газов от пыли перед выбросом их в атмосферу [1].

Проблема пылевых выбросов при условии рациональной технологии и правильной эксплуатации пылеулавливающих устройств может быть решена, если для каждого конкретного случая можно будет обоснованно выбрать такой пылеуловитель, который с минимальными затратами и с учетом эффекта рассеивания пыли в атмосфере обеспечит уменьшение концентрации пыли в воздушном бассейне промплощадки и населенных мест до предельно допустимых величин [2].

Применяемые в настоящее время аппараты для очистки газов на основе распыливающих устройств имеют ряд недостатков, связанных с каплеобразованием: значительная полидисперсность капель в факеле распыла, неравномерность заполнения факела, в большинстве случаев коническая форма факела. Все это препятствует равномерному распределению дисперсной фазы в рабочей зоне аппаратов, приводит к снижению эффективности очистки и усложняет регулирование процесса. Избежать указанных выше недостатков позволяет пористый вращающийся распылитель, на основе абразивного материала.

Пористый вращающийся распылитель (ПВР) представляет собой полый цилиндр из пористого материала; вращающийся вокруг своей продольной оси. Во внутреннюю полость распылителя подается жидкость, которая под действием центробежной силы профильтровывается сквозь пористую стенку и распыливается с наружной поверхности ПВР [3]. Основным преимуществом ПВР перед другими распылителями является монодисперсность распыливаемых капель, что позволяет существенно упростить регулирование процесса пылеулавливания. Факел распы-

ла у ПВР представляет собой равномерно заполненный каплями цилиндр, что тоже является несомненным преимуществом, позволяющим повысить эффективность пылеулавливания.

Для очистки газовых выбросов на предприятиях легкой промышленности предлагается аппарат (рис. 1), представляющий собой полый цилиндрический вертикальный газоход, внутри которого коаксиально расположен пористый вращающийся распылитель из абразивного материала.

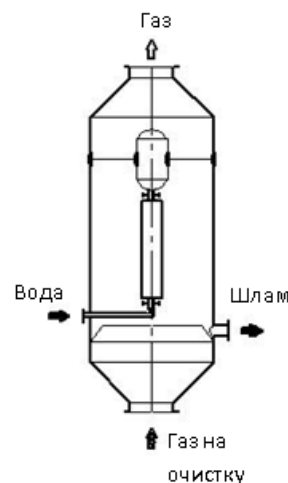


Рис. 1 - Аппарат для очистки

Газ на очистку подается в нижнюю часть аппарата и движется по аппарату вертикально вверх, проходя сквозь факел распыленной жидкости, капли которой летят радиально от оси аппарата к его периферии. Захваченные каплями жидкости частицы пыли увлекаются ими на стенку аппарата, затем стекают вместе с пленкой жидкости (шлам) в приемный карман, откуда насосом откачиваются для дальнейшего использования.

Аппарат не нашел до настоящего времени широкого применения из-за недостаточно изученной гидродинамики процесса, что не позволяет просто и эффективно рассчитывать и конструировать его элементы.

Эффективность работы аппарата во многом определяется гидродинамической структурой потоков газа и жидкости в рабочей области пылеочистителя, которая наиболее полно может быть описана в рамках представления о взаимопроникающих кон-

тинуумах с учетом взаимодействия капель между собой и с потоком газа [4, 5].

Однако использование указанных моделей требует привлечения дополнительных гипотез о вероятности столкновений, начальной скорости и размерах вторичных образований, справедливость которых в большинстве случаев невозможно подтвердить. В данной работе рассматривается монодисперсная система капель, объемная концентрация которых мала, что позволяет при решении прикладных задач исходить из упрощенной их постановки, пренебрегая взаимодействием капель между собой. При таком подходе рассматривается движение одиночной капли жидкости в поперечном потоке газа. Такое приближение вводится в большинстве работ, посвященных исследованию движения системы капель в потоке газа при малой и умеренной объемных концентрациях капель.

Уравнение движения одиночной капли в цилиндрической системе координат, жестко связанной с аппаратом (так, что его ось совпадает с осью z системы координат), имеет вид:

$$\begin{cases} m \left(\frac{dV_r}{dt} - \frac{V_\varphi^2}{r} \right) = F_r; \frac{dr}{dt} = V_r \\ m \left(\frac{dV_\varphi}{dt} - \frac{V_r V_\varphi}{r} \right) = F_\varphi; \frac{d\varphi}{dt} = \frac{V_\varphi}{r} \\ m \frac{dV_z}{dt} = F_z; \frac{dz}{dt} = V_z \end{cases} \quad (1)$$

где F_r , F_φ , F_z - составляющие суммы внешних сил. В потоке газа на движущуюся каплю могут действовать следующие внешние силы: сила аэродинамического сопротивления среды, сила инерции присоединенной массы, сила тяжести, сила Архимеда, сила Басе-Буссинеска, силы, вызванные градиентами скорости потока и давления. Из указанных сил основное влияние на движение капли оказывает сила аэродинамического сопротивления, направленная в сторону, противоположную направлению вектора относительной скорости капли V^* . Для расчета этой силы необходимы сведения о значениях коэффициента лобового сопротивления капель C_d . В литературе представлено большое число аппроксимаций кривой Рэлея в различных диапазонах изменения числа Рейнольдса. Наибольший интерес представляет формула Вахрушева, справедливая в большом диапазоне чисел Рейнольдса для частиц различной формы. Для сферических частиц в интервале значений $Re = 0 \div 2000$ зависимость принимает вид:

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{4,565}{Re^{1/3}} - \frac{0,491}{Re^{1/2}} \quad (2)$$

Анализ величины сил, действующих на капли при их движении в потоке газа, показал, что при расчете траекторий и скоростей движения капель в аппарате следует учитывать силу аэродинамического сопротивления среды и силу тяжести. Остальные из перечисленных сил имеют величину, пренебрежимо малую по сравнению с этими двумя силами. Система уравнений движения капли с учетом действующих на нее сил запишется в виде:

$$\begin{cases} \frac{dV_r}{dt} = \frac{V_\varphi^2}{r} + \frac{\rho_G}{\rho_L} \left[0,75 \cdot C_d \frac{V^*}{d_k} (W_r - V_r) \right]; \frac{dr}{dt} = V_r; \\ \frac{dV_\varphi}{dt} = -\frac{V_r V_\varphi}{r} + \frac{\rho_G}{\rho_L} \left[0,75 \cdot C_d \frac{V^*}{d_k} (W_\varphi - V_\varphi) \right]; \frac{d\varphi}{dt} = \frac{V_\varphi}{r} \\ \frac{dV_z}{dt} = -g + \frac{\rho_G}{\rho_L} \left[0,75 \cdot C_d \frac{V^*}{d_k} (W_z - V_z) \right]; \frac{dz}{dt} = V_z \end{cases}$$

Система решалась численно методом Рунге-Кутты с начальными условиями: $\tau=0$; $V_r=0$; $V_z=0$; $V_\varphi=\omega \cdot R_0$; $r=R_0$; $\varphi=0$; $z=0$. В расчетах для описания профилей окружной и осевой составляющих скорости газа были использованы выражения, полученные в результате аналитического решения уравнения Навье-Стокса в кольцевом канале с вращающимся центральным телом

$$\begin{aligned} V_\varphi &= \frac{\omega}{r} \frac{R^2 R_0^2}{(R^2 - R_0^2)} - \frac{\omega r R_0^2}{(R^2 - R_0^2)} = \frac{\omega R_0^2}{(R^2 - R_0^2)} \left(\frac{R^2 - r^2}{r} \right); \\ V_z &= \frac{P_0 - P_L}{4\mu L} \left(\frac{R^2 - R_0^2}{\ln(R_0/R)} \ln\left(\frac{r}{R_0}\right) - (r^2 - R_0^2) \right). \end{aligned}$$

Расчеты проводились для различных радиусов аппарата R , угловой скорости вращения распылителя ω и среднерасходной скорости газа $\langle V \rangle$.

Предыдущими исследователями было показано [3], что d_k является функцией ω , свойств материала и свойств жидкости:

$$d_k = K_2 \left(\frac{6d_3\sigma}{\rho R \omega_p^2} \right)^{1/3} \quad (3)$$

Поэтому каждому расчетному значению ω соответствовал определенный d_k . Расчеты показали, что радиальная скорость капли после отрыва от поверхности распылителя возрастает до некоторого предела, который характеризуется отношением силы инерции к силе сопротивления, а затем начинает убывать. Установлено, что капли с диаметром больше некоторого диаметра $d_{кр}$, являющегося функцией ω , $\langle V \rangle$ и R достигают стенки аппарата, а радиальная скорость меньших капель принимает значения близкие к нулю на радиусе, меньшем радиуса аппарата. Последние не достигают стенки и уносятся с потоком газа. Для характеристики сепарационной способности капель различного диаметра можно ввести критический радиус R^* , на котором радиальная компонента скорости капли достигает значения меньшего некоторой малой величины ϵ . Эта величина выбирается с учетом соотношений радиальной и осевой компонент скорости капли, высоты и радиуса аппарата. Соответственно, те капли, критический радиус которых меньше радиуса аппарата, не сепарируются. Расчеты показали, что критический радиус слабо зависит от скорости газа и очень сильно зависит от диаметра капли и ее начальной радиальной скорости (т.е. частоты вращения распылителя).

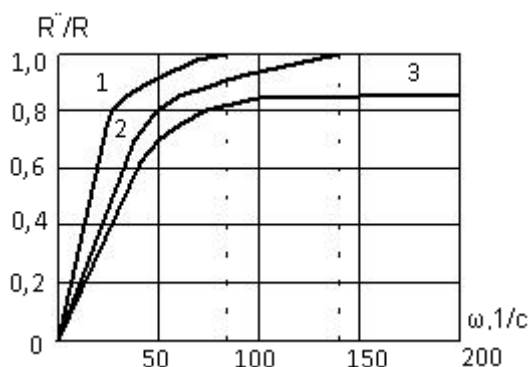


Рис. 2 - Зависимость относительного критического радиуса от скорости вращения распылителя, $\langle V \rangle = 3$ м/с, $R = 0,5$ м. 1- $K=400$; 2- $K=300$; 3- $K=200$

На рис. 2 представлена зависимость относительного критического радиуса от частоты оборотов распылителя для различных типов материала распылителя. Из рисунка видно, что каждому материалу распылителя соответствует некоторое минимальное значение угловой скорости вращения распылителя, ниже которой не достигается сепарация капель в очистном аппарате.

Условные обозначения

r, φ, z - полярные координаты; V_r, V_φ, V_z - составляющие скорости капли в полярных координатах; W_r, W_φ, W_z - составляющие скорости газа в полярных координатах; ρ_g - плотность газа; ρ_L - плотность жидкости; g - ускорение свободного падения; μ - динамическая вязкость жидкости; d_k - диаметр капли; d_z - диаметр зерна распылителя; K_2 - геометрический коэффициент формы пор; σ - коэффициент поверхностного натяжения; R - радиус аппарата; ω - угловая скорость вращения распылителя; τ - время; $V^* = [(W_r - V_r)^2 + (W_\varphi - V_\varphi)^2 + (W_z - V_z)^2]^{1/2}$ - относительная скорость капли.

Литература

1. М.Р. Вахитов, Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев, *Вестн. Казанского технологического ун-та*, 8, 130-134 (2011)
2. А.Н. Николаев, О.В. Козулина, Р.Р. Фатыхов, *Вестн. Казанского технологического ун-та*, 3, 155-160 (2011)
3. А.А. Колесник. Автореф. дисс. канд. техн. наук, Казанский химико-технологический институт, Казань, 1983. 17с.
4. А.М. Подвысоцкий, А.А. Шрайбер, *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа*, 2, 71-72 (1975)
5. Г.Л. Бабуха, А.А. Шрайбер, *Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках*. Наук. думка, Киев, 1972. 212 с.

© М. Р. Вахитов - мл. науч. сотр. каф. оборудования пищевых производств КНИТУ, opp-srv@rambler.ru; Г. П. Шуваева - канд. пед. наук, доц. той же кафедры; А. Н. Николаев - д-р техн. наук, проф., зав. каф. оборудования пищевых производств КНИТУ.