

ГИДРОДИНАМИКА ПОЛИДИСПЕРСНОГО ПОТОКА ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПО ФРАКЦИЯМ

С.Ю. Смык. Гідродинаміка полідисперсного потоку при розділі твердої фази по фракціях. Визначено критерії і приведено результати числового моделювання течії газового потоку в розділюючому апараті комбінованої системи очищення. Отримано кількісні залежності, необхідні для гідравлічного розрахунку системи.

С.Ю. Смык. Гидродинамика полидисперсного потока при разделении твердой фазы по фракциям. Определены критерии и приведены результаты численного моделирования течения газового потока в разделяющем аппарате комбинированной системы очистки. Получены количественные зависимости, необходимые для гидравлического расчета системы.

S.Yu. Smyk. Hydrodynamics of polydisperse flow in solid phase separation of fractions. The criteria are defined and the results of numerical simulation of the gas stream flow in the separator of the combined treatment system are given. These quantitative dependence are necessary for the hydraulic design of the system.

На многих предприятиях и производствах в системах газоочистки используются инерционные уловители (циклоны). Несмотря на ряд их бесспорных преимуществ, из-за невысокой степени очистки они не отвечают современным требованиям экологической безопасности. Замена таких уловителей более эффективными сдерживается главным образом экономическими факторами (высокая стоимость оборудования и его эксплуатации), а также технологическими особенностями производства и характеристиками пыли. Конструктивные возможности повышения степени улавливания циклонов практически исчерпаны. Вместе с тем, известно, что инерционные уловители очень чувствительны к фракционному составу пыли: крупные фракции в них улавливаются с эффективностью до 99 %[1]. Поэтому существует возможность повышения их эффективности за счет изменения фракционного состава полидисперсного потока, поступающего в аппарат. Такая возможность реализуется в комбинированной системе очистки (рис. 1).

Ее отличительной особенностью является то, что захваченная зонтом 3 масса пыли делится по фракционному признаку в разделителе 1. Поток с мелкими фракциями поступает в уловитель циркуляционного контура 4. После очистки в нем газ попадает в эжектор-смеситель 2, где смешивается с захваченным потоком из зонта. Поток с крупными фракциями — в основной уловитель 5. Поскольку коэффициент улавливания крупных фракций достаточно высокий, то проскок пыли в окружающую среду является незначительным. Это обеспечивает экологический эффект. Эффективность аппарата циркуляционного контура понижена. Мелкофракционная пыль циркуляционного потока улавливается за счет многократного прохождения через циклон.

Ключевым элементом в данной схеме является разделитель. При выборе его конструкции учитывались такие факторы, как простота и дешевизна изготовления, небольшой коэффициент сопротивления. Всем этим требованиям отвечает криволинейный канал (поворот на 180 °) (рис. 2). Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что в таких каналах за счет действия сил инерции траектории крупных частиц гораздо больше смещаются к внешней стенке, чем мелких (более легких) [2, 3]. Часть газа, отобранная у внешней стенки, содержит преимущественно пыль крупных фракций. Этот газ поступает в основной уловитель. Пыль мелких фракций направляется в циркуляционный контур.

Гидродинамические особенности течения в повороте-разделителе имеют определяющее влияние на показатели аппарата. Одной из основных его характеристик, определяемых гидродинамикой течения и необходимой для расчета комбинированной системы очистки, является распределение входящего в разделитель объема газа $Q_{вх}$ на основной поток, поступающий в уловитель грубой очистки $Q_о$, и циркулирующий поток, поступающий в уловитель тонкой очистки $Q_ц$. Для определения критериев моделирования гидродинамики разделителя использовалась π -теорема [4].

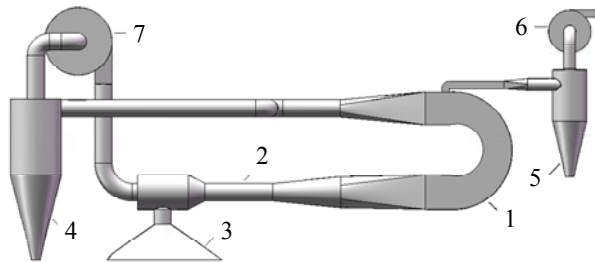


Рис. 1. Схема системы комбинированной очистки газового потока: 1 — разделитель, 2 — эжекто-смеситель, 3 — зонт, 4 — циклон циркуляционного контура, 5 — циклон основного канала, 6, 7 — тягодутьевое оборудование

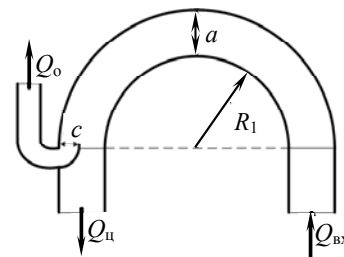


Рис. 2. Схема разделителя

Исходя из общих представлений о напорном течении в канале, можно предположить, что относительный расход основного потока $q = Q_o / Q_{вх}$ зависит от геометрических параметров канала, а именно — длин сторон a и b , одного из радиусов (пусть это будет R_1), толщины щели c , расхода газа на входе в поворот $Q_{вх}$, его вязкости и плотности. Считается, что давление на выходе из разделителя для основного и циркуляционного контура одинаково. Таким образом,

$$Q_o = f_1(Q_{вх}; Q_{ц}; R_1; a; b; c; \mu; \rho)$$

или

$$f_2(Q_o; Q_{вх}; Q_{ц}; R_1; a; b; c; \mu; \rho) = 0.$$

Следовательно, процесс определяется шестью критериями подобия

$$f_3(\pi_1; \pi_2; \pi_3; \pi_4; \pi_5; \pi_6) = 0.$$

$$\pi_1 = Q_{вх}^{x_1} a^{y_1} \rho^{z_1} Q_{тр}.$$

$$\dim \pi_1 = (L^3 T^{-1})^{x_1} L^{y_1} (ML^{-3})^{z_1} L^3 T^{-1} = L^{3x_1 + y_1 - 3z_1 + 3} T^{-x_1 - 1} M^{z_1}.$$

Тогда

$$\begin{cases} 3x_1 + y_1 - 3z_1 + 3 = 0 \\ -x_1 - 1 = 0 \\ z_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y_1 = 0 \\ x_1 = -1 \\ z_1 = 0 \end{cases}$$

Откуда

$$\pi_1 = \frac{Q_o}{Q_{вх}}.$$

Аналогично $\pi_2 = Q_{вх}^{x_2} a^{y_2} \rho^{z_2} Q_{т}.$

$$\pi_2 = \frac{Q_{ц}}{Q_{вх}}.$$

$$\pi_3 = Q_{вх}^{x_3} a^{y_3} \rho^{z_3} R_1.$$

$$\dim \pi_3 = (L^3 T^{-1})^{x_3} L^{y_3} (ML^{-3})^{z_3} L = L^{3x_3 + y_3 - 3z_3 + 1} T^{-x_3} M^{z_3}.$$

$$\begin{cases} 3x_3 + y_3 - 3z_3 + 1 = 0 \\ x_3 = 0 \\ z_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y_3 = -1 \\ x_3 = 0 \\ z_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \pi_3 = \frac{R_1}{a}.$$

Аналогично $\pi_4 = Q_{вх}^{x_4} a^{y_4} \rho^{z_4} b,$

$$\pi_4 = \frac{b}{a}$$

и

$$\pi_5 = Q_{\text{вх}}^{x_5} a^{y_5} \rho^{z_5} c, \text{ или } \pi_5 = \frac{c}{a}.$$

$$\pi_6 = Q_{\text{вх}}^{x_6} a^{y_6} \rho^{z_6} \mu.$$

$$\dim \pi_6 = (L^3 T^{-1})^{x_6} L^{y_6} (ML^{-3})^{z_6} ML^1 T^{-1} = L^{3x_6+y_6-3z_6-1} T^{-x_6-1} M^{z_6+1}.$$

$$\begin{cases} 3x_6 + y_6 - 3z_6 - 1 = 0 \\ -x_6 - 1 = 0 \\ z_6 + 1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y_6 = 1 \\ x_6 = -1 \\ z_6 = -1 \end{cases} \Rightarrow \pi_6 = \frac{\mu a}{\rho Q_{\text{вх}}} = \frac{\mu}{\rho v_{\text{вх}} b} = \frac{1}{\text{Re}}.$$

Поскольку течение в аппарате заведомо дозвуковое и изотермическое, то свойства газа являются величинами неизменными, поэтому критерий Рейнольдса при постоянных геометрических параметрах определяется скоростью потока на входе. Кроме того, $Q_{\text{ц}} = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{о}}$, следовательно, критерий π_2 по существу дублирует π_1 , поэтому его следует исключить из рассмотрения. Таким образом, зависимость безразмерных комплексов можно представить в виде

$$\pi_1 = \frac{Q_{\text{о}}}{Q_{\text{вх}}} = q = f_3\left(\frac{R_1}{a}; \frac{b}{a}; \frac{c}{a}; \text{Re}\right).$$

Численное моделирование проводилось с помощью лицензионного прикладного пакета COSMOS FLOWWORKS [7]. Для сокращения вычислительных работ принимались $\pi_1 = \pi_2 = \text{const}$ ($a=200$ мм, $b=400$ мм). Числа подобия $\pi_5=0,1; 0,2; 0,3$ ($c=20; 40; 60$ мм), $1/\pi_4 = 8,5 \cdot 10^{-6}; 5,31 \cdot 10^{-6}; 4,25 \cdot 10^{-6}; 3,54 \cdot 10^{-6}$ ($v_{\text{вх}} = 5; 8; 10; 12$ м/с). В качестве граничных условий задавалась указанная скорость на входе в аппарат и давление на выходе из него (одинаковое для основного и циркуляционного тракта).

Расчеты показали, что деление газа – носителя в аппарате на основной расход $Q_{\text{о}}$ и расход циркуляционного контура $Q_{\text{ц}}$ зависит от π_5 (рис. 3). При $\text{Re} > 1,88 \cdot 10^5 q$ больше не зависит от скорости течения, т.е. наступает зона автомодельности. Легко заметить, что $Q_{\text{о}}/Q_{\text{вх}} < \pi_5$. Это объясняется смещением максимума скорости течения газа в сторону внутренней стенки криволинейного канала (рис. 4).

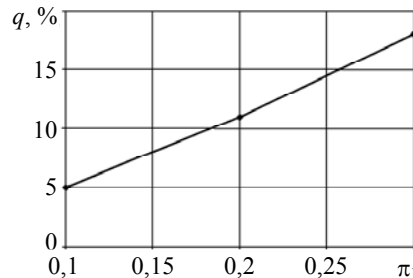


Рис. 3. Зависимость относительного объема расхода от относительной толщины щели в зоне автомодельности по Re

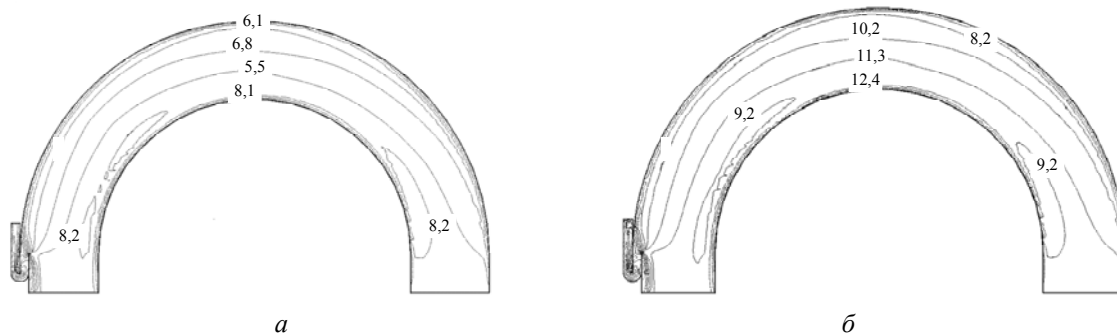


Рис. 4. Поля скоростей в разделителе при начальной скорости 5 (а) и 8 м/с (б)

Гидравлическое сопротивление разделителя характеризуют коэффициенты местных потерь по основному ζ_0 и по циркуляционному $\zeta_{\text{ц}}$ направлениям. Согласно уравнению Бернулли и формуле Вейсбаха

$$\zeta_0 = \frac{2(P_{\text{вх}} - P_0) + \alpha \rho (v_{\text{вх}}^2 - v_0^2)}{\rho v_0^2},$$

$$\zeta_{\text{ц}} = \frac{2(P_{\text{вх}} - P_{\text{ц}}) + \alpha \rho (v_{\text{вх}}^2 - v_{\text{ц}}^2)}{\rho v_{\text{ц}}^2},$$

где α — коэффициент Кориолиса (для обоих сечений принимался равным 1);

$$v_o = \frac{Q_o}{bc} \text{ и } v_{\text{ц}} = \frac{Q_{\text{ц}}}{b(a-c)}.$$

Из графиков видно, что при прочих равных условиях гидравлическое сопротивление основного канала превышает сопротивление циркуляционного. Сопоставляя это с графиком $q=f(\pi_5)$, можно заключить, что неравенство $Q_o/Q_{\text{вх}} < \pi_5$ обусловлено не только характером распределения скоростей в канале, но и значениями коэффициентов местных потерь.

Таким образом, численное моделирование течения в криволинейном канале прямоугольного поперечного сечения с периферийным отбором позволило получить количественные зависимости для относительного расхода и коэффициентов потерь основного и циркуляционного каналов. Зависимости позволят провести гидравлический расчет системы и обоснованный подбор нагнетательного оборудования.

Литература

1. Страус, В. Промышленная очистка газов / В. Страус: пер. с англ. — М.: Химия, 1981. — 616 с.
2. Маслов, В.Е., Пылеконцентраторы в топочной технике / В.Е. Маслов. — М.: Энергия, 1977. — 207 с.
3. Певнев, А.О. Экспериментальное исследование распределения угольной пыли в криволинейных воздушно-пылевых потоках / А.О. Певнев // Обогащение неметаллических полезных ископаемых. — Свердловск, 1976. — Вып. 2. — С. 101—105.
4. Дейч, М.Е. Техническая газодинамика / М.Е. Дейч. — 3-е изд., перераб. — М.: Энергия, 1974. — 592 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Буров А.И.

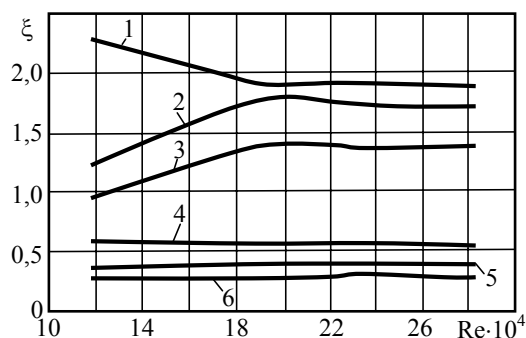


Рис. 5. Зависимость коэффициента потерь от числа Рейнольдса: $\zeta_{\text{ц}}$ при $\pi_5=0,2$ (1); ζ_o при $\pi_5=0,2$ (2); ζ_o при $\pi_5=0,1$ (3); $\zeta_{\text{ц}}$ при $\pi_5=0,3$ (4); ζ_o при $\pi_5=0,3$ (5); $\zeta_{\text{ц}}$ при $\pi_5=0,1$ (6)