

Д. И. Чиркун, аспирант; Э. И. Левданский, профессор;
А. В. Ширко, аспирант; С. В. Дубинин, студент

РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВОЗДУШНОГО ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОГО СЕПАРАТОРА

In work the description of a new design of an air centripetal separator is resulted. The principle of work of a separator is briefly stated. The major factors influencing process of separation are determined. Theoretical researches of process of division are lead and the engineering design procedure of an air centripetal separator is developed.

В настоящее время одним из перспективных направлений развития разделительной техники является использование устройств для классификации полидисперсных материалов на вращающихся проницаемых поверхностях. В них процесс разделения осуществляется за счет воздействия на разделяемый материал радиальных или закрученных потоков воздуха. В качестве проницаемых поверхностей используются сита, перфорированные листы, стержневые конструкции. Немногочисленные экспериментальные исследования таких сепараторов свидетельствуют об их высокой эффективности [1]. Подтверждается это также промышленной эксплуатацией на ОАО «Красносельскстройматериалы» сепараторов SD-80 бельгийской фирмы Magateaux, работающих по аналогичному принципу.

В то же время результатов теоретических исследований подобных конструкций сепараторов в литературе практически не встречается. Это усложняет проблему конструирования и внедрения данных разделительных устройств в различные производства.

Для решения данной проблемы авторами были проведены теоретические исследования процесса разделения в воздушном центростремителе с вращающимся стержневым барабаном. На основании их была разработана инженерная методика расчета разделительных устройств такого типа и подана заявка на изобретение [2].

Схематично устройство сепаратора показано на рисунке. Сепаратор состоит из спиралеобразного корпуса 1, закрытого сверху крышкой 2. По центру крышки крепится подшипниковый узел 3, вал которого одним концом опущен внутрь сепаратора, а второй конец его соединяется с приводным устройством. На валу подшипникового узла 3 жестко закреплен ротор 4, состоящий из верхнего 5 и нижнего 6 дисков, соединенных между собой по периметру вертикальными цилиндрическими стержнями 7, образующими так называемое «беличье» колесо. Под крышкой соосно корпусу крепится отбойное кольцо 8, направляющее сходящий с

поверхности диска ротора материал в кольцевой зазор между стержнями ротора и корпусом. Снизу корпус сепаратора переходит во внешний конус 9 для отвода крупной фракции, оканчивающийся патрубком 10. Отвод мелкой фракции и воздуха осуществляется по внутреннему конусу 11, оканчивающемуся патрубком 12. Подвод воздуха на сепарацию осуществляется через смонтированный на боковой поверхности корпуса тангенциальный патрубок 13. В крышке 2 вокруг подшипникового узла имеются отверстия 14, через которые в сепаратор поступает порошок. Лопатки 15, установленные вплотную друг к другу по периметру ротора, образуют концентрические конуса, служащие для направления материала, отлетающего от ротора в результате удара вращающихся стержней обратно в зону разделения.

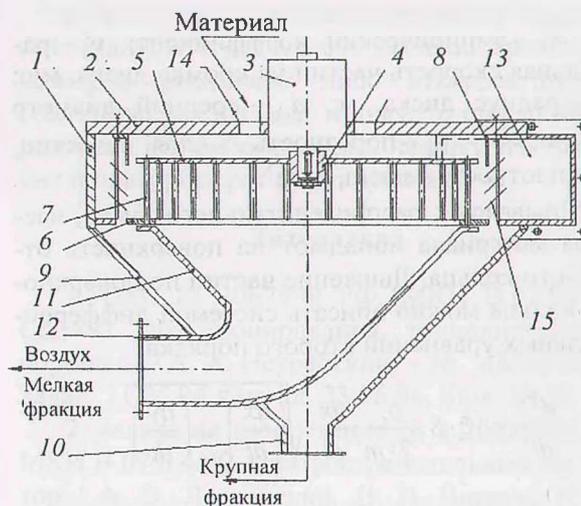


Рисунок. Центростремителе сепаратор:
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – подшипниковый узел;
4 – ротор; 5, 6 – диски; 7 – стержни; 8 – отбойное
кольцо; 9, 11 – конуса; 10, 12, 13, 14 – патрубки;
15 – лопатки

Сепаратор работает следующим образом. Исходный материал, попадая через патрубки 14 на вращающийся верхний диск 5 ротора 4, под действием центробежной силы начинает двигаться от центра диска к периферии. Достигая края диска 5, материал отбрасывается на от-

бойное кольцо 8 и равномерным закрученным потоком направляется в рабочее пространство сепаратора, выполненное в виде спиралеобразного зазора между корпусом 1 и ротором 4. Сюда же через тангенциальный патрубок 13 подается и воздух на разделение. Вращающийся воздушный поток, пронизывая слой падающего с диска 5 материала, подхватывает мелкие частицы, проходит вместе с ними через вертикальные стержни 7 ротора и через патрубок 12 отводится к циклону для отделения мелкой фракции. Крупные частицы отбрасываются от ротора 4 центробежной силой инерции или ударом вращающихся стержней 7 и попадают в грубый продукт.

Процесс разделения в сепараторе состоит из нескольких стадий, основными из которых являются: распределение исходного материала по диску ротора, движение его по отбойному кольцу, взаимодействие материала с воздушным потоком и вращающимся ротором. Теоретические исследования проводились последовательно для каждой из этих стадий.

Изучение движения частиц материала по распределительному диску ротора позволило получить зависимость для определения производительности сепаратора Q , кг/с:

$$Q = k_1 \cdot v_{\tau}^r \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_d \cdot d_{cp} \cdot (1 - \varepsilon_c) \cdot \rho_{\tau}, \quad (1)$$

где k_1 – эмпирический коэффициент; v_{τ}^r – радиальная скорость частиц на кромке диска, м/с; R_d – радиус диска, м; d_{cp} – средний диаметр частиц, м; ε_c – порозность слоя частиц, ρ_{τ} – плотность частиц, кг/м³.

Срываясь с распределительного диска, частицы материала попадают на поверхность отбойного кольца. Движение частиц по поверхности кольца можно описать системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\xi \cdot S \cdot \frac{\rho_{\tau}}{2 \cdot m} \cdot \frac{dx}{dt} \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} - \frac{f}{r_k} \cdot \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = g - \xi \cdot S \cdot \frac{\rho_{\tau}}{2 \cdot m} \cdot \frac{dy}{dt} \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} - \frac{f}{r_k} \cdot \left(\frac{dx}{dt}\right) \cdot \left(\frac{dy}{dt}\right)$$

где ξ – коэффициент сопротивления; S – миделево сечение частицы, м²; ρ_{τ} – плотность воздуха, кг/м³; m – масса частицы, кг; g – ускоре-

ние свободного падения, м/с²; f – коэффициент трения; r_k – радиус кольца, м.

Решение системы дифференциальных уравнений (2) в дальнейшем позволяло определять начальные условия движения частиц материала в воздушном закрученном потоке между ротором и корпусом сепаратора, т. е. уже непосредственно в зоне классификации.

Исследованиями движения частиц в воздушных закрученных потоках занимались многие исследователи. Глубоко теорию этих процессов изучили С. Г. Ушаков и Н. И. Зверев [3]. Однако разработанная ими математическая модель имеет недостаток: в уравнениях движения частиц не учтена сила тяжести. Это обусловлено тем, что исследователи занимались сепарацией пыли. Кроме того, движение частиц пыли рассматривается как сложное, что приводит к появлению в уравнениях инерционных сил.

Для упрощения уравнений движение материала в закрученном потоке рассмотрим в неподвижной системе отсчета. Тогда на частицу, согласно второму закону динамики [4], будут действовать две основные силы: сила тяжести и сила воздушного сопротивления.

Профили тангенциальных и радиальных скоростей закрученного центростремительного потока можно описать уравнениями [5]:

$$W_{\tau} \cdot r^k = \text{const}; \quad W_r \cdot r = \text{const} = Q_v / 2\pi h_c, \quad (3)$$

где W_{τ} , W_r – тангенциальная и радиальная скорость воздуха, м/с; r – радиус вращения, м; k – коэффициент, изменяющийся от 1 (потенциальное вращение) до -1 (квазитвердое вращение); Q_v – расход воздуха, м³/с; h_c – высота зоны сепарации, м.

Тангенциальную и радиальную скорость воздуха из уравнений (3) выражаем в виде:

$$W_{\tau} = \frac{\text{const}}{r^k} = \frac{U_1}{r^k};$$

$$W_r = \frac{\text{const}}{r} = \frac{Q_v}{2 \cdot \pi \cdot h_c \cdot r} = \frac{U_2}{r}. \quad (4)$$

В декартовой системе координат, с учетом того, что $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, система уравнений (4) примет вид:

$$W_x = -\frac{U_2 \cdot x}{x^2 + y^2} + \frac{U_1 \cdot y}{(x^2 + y^2)^{0.5k+0.5}};$$

$$W_y = -\frac{U_2 \cdot y}{x^2 + y^2} - \frac{U_1 \cdot x}{(x^2 + y^2)^{0.5k+0.5}}. \quad (5)$$

На частицу материала, движущуюся в закрученном воздушном потоке, действуют сила тяжести и сила воздушного сопротивления:

$$G = m \cdot g; F_{в.с} = \xi \cdot S \cdot \frac{\rho_r \cdot v_{отн}^2}{2}, \quad (6)$$

где $v_{отн}$ – скорость частицы относительно среды, м/с.

Тогда уравнения движения частицы имеют вид:

$$\begin{aligned} m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} &= 0,5 \cdot \xi \cdot S \cdot \rho_r \cdot v_{отн} \cdot (v_{отн})_x; \\ m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} &= 0,5 \cdot \xi \cdot S \cdot \rho_r \cdot v_{отн} \cdot (v_{отн})_y; \\ m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} &= 0,5 \cdot \xi \cdot S \cdot \rho_r \cdot v_{отн} \cdot (v_{отн})_z - m \cdot g. \end{aligned} \quad (7)$$

где $(v_{отн})_x, (v_{отн})_y, (v_{отн})_z$ – проекции относительной скорости на оси координат.

Проекции относительной скорости определяются из зависимостей:

$$\begin{aligned} (v_{отн})_x &= -\frac{U_2 \cdot x}{x^2 + y^2} + \frac{U_1 \cdot y}{(x^2 + y^2)^{0,5 \cdot k + 0,5}} - \frac{dx}{dt}; \\ (v_{отн})_y &= -\frac{U_2 \cdot y}{x^2 + y^2} - \frac{U_1 \cdot x}{(x^2 + y^2)^{0,5 \cdot k + 0,5}} - \frac{dy}{dt}; \\ (v_{отн})_z &= \frac{dz}{dt}. \end{aligned} \quad (8)$$

Величина относительной скорости $v_{отн}$ находится как геометрическая сумма трех проекций.

Двигаясь в закрученном потоке согласно уравнениям (7), частицы могут подходить к вращающимся стержням ротора и проходить через промежутки между ними в мелкий продукт. Условия прохождения частиц между вращающимися стержнями ротора были получены в виде:

$$\frac{v_{ч}^r - v_c}{v_{ч}^r} > 1; \left(\frac{v_c - v_{ч}^r}{v_{ч}^r} + 1 \right) \cdot \frac{d_c}{2} \leq h_c, \quad (9)$$

где $v_{ч}^r, v_{ч}^r$ – тангенциальная и радиальная скорость частицы, м/с; v_c – линейная скорость стержней, м/с; d_c, h_c – диаметр и шаг стержней, м.

Проведенные исследования процесса классификации в воздушном центробежном сепараторе позволили разработать инженерную

методику их расчета, сущность которой заключается в следующем:

1) по выражению (1), в зависимости от требуемой производительности по исходному материалу и задавая скоростью вращения ротора в пределах 150–200 об/мин, предварительно рассчитать диаметр распределительного диска ротора;

2) принять диаметр отбойного кольца на 50–100 мм больше диаметра распределительного диска, что вытекает из условия пропускной способности зазора между ними;

3) по системе уравнений (2) рассчитать кинематические характеристики частиц при сходе с отбойного кольца, определив, таким образом, начальные условия для системы уравнений (7);

4) задавая расходом воздуха, проходящего через сепаратор и обеспечивающего концентрацию твердой фазы в пределах 1–1,5 кг/кг, рассчитать траектории и кинематические характеристики частиц различных размеров по системе уравнений (7), при этом высоту камеры разделения принять такой, чтобы за время падения частица имела бы возможность многократного контакта с ротором;

5) задавая геометрией стержней (диаметр и шаг), по условиям (9) проверить каждую узкую фракцию частиц на возможность прохождения через межстержневое пространство ротора, определив граничный размер разделения;

6) в случае неудовлетворительной сходимости заданного и расчетного значений граничных размеров разделения либо откорректировать геометрию ротора (шаг и диаметр стержней) по условиям (9), либо изменить частоту его вращения и повторить расчет по пунктам 1–5.

Литература

1. Пат. № 2067899 РФ, МКИ В 07 б 4/00. Способ фракционирования тонкодисперсных порошков / А. А. Нетребский. – № 4894529/03; Заявл. 21.05.94; Опубл. 23.06.96, Бюл. № 29.
2. Заявка на изобретение № а 20030888 РФ, МКИ В 07 б 4/00. Центробежный сепаратор / А. Э. Левданский, Д. И. Чиркун, И. М. Плехов, Э. И. Левданский. – Заявл. 23.09.2003; Опубл. 30.03.2005, Бюл. № 1.
3. Ушаков С. Г., Зверев Н. И. Инерционная сепарация пыли. – М.: Энергия, 1974. – 168 с.
4. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Высш. шк., 1998. – 416 с.
5. Мизонов В. Е., Ушаков С. Г. Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия, 1989. – 158 с.