

## ПРОЦЕСС РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПОРОШКОВОЙ МАССЫ ПО РАЗМЕРАМ

*ВОВК А.В., ПОДГОРБУНСКИЙ Н.С.*

Рассматривается процесс измельчения твёрдых частиц в сепараторах. Исследуется способ распределения твёрдых частиц по размерам при помощи воздушно-центробежных сепараторов. Описывается процесс сепарации и определяются силы, действующие на мелкодисперсные частицы. Выводятся формулы для сил, действующих на частицы в зависимости от дисперсных характеристик рассматриваемых частиц. Определяются факторы, которые наиболее сильно влияют на точность процесса сепарации.

### 1. Введение и постановка задачи

Рассмотрим процесс распределения твёрдых мелкодисперсных частиц при помощи механических аппаратов. Измельчение крупных твёрдых частиц до частиц малых размеров обычно производится в целях ускорения процесса перемешивания порошковых масс. Так как на практике все материалы, применяемые в промышленных целях, обычно представлены в твёрдых крупнодисперсных состояниях, то измельчение является одним из основных способов их переработки. В работах [1-5] были рассмотрены различные способы измельчения твёрдых крупнодисперсных материалов. Эта статья является продолжением исследований, начатых в [1]. Далее механический способ измельчения будет рассмотрен как наиболее простой и экономичный из всех методов диспергирования.

Условия формирования порошковых масс зависят от физико-химических свойств исходного материала и дисперсных свойств частиц, физико-химических характеристик среды. Зачастую требуется получить мелкодисперсные порошковые смеси с заданными характеристиками (диаметр частиц, свойства поверхности и т.д.) при минимальных затратах энергии и времени. С этой целью изучается воздействие на различные виды материалов разных возмущений (механических, гидравлических, химических, энергетических [4,5]).

Технологический процесс измельчения твёрдых частиц в специальных аппаратах можно разделить на два этапа. Первый этап – измельчение частиц под действием возмущений, направленных из внешней среды на исходный материал. Второй этап – собственно формирование порошковой массы с заданными характеристиками. Задачей исследования процессов измельчения является, в частности, изучение физико-химических и поверхностных свойств материала (знание этих свойств необходимо для того, чтобы определить влияние воздействия частиц порошковой массы друг на друга). Знание физико-химических свойств поверхностей частиц в ряде случаев необходимо для опреде-

ления условий, при которых они могут быть применены на практике.

*Целью* работы является: а) исследование процесса измельчения твёрдых частиц порошковой смеси в различных частях сепаратора; б) исследование сил, действующих на частицы, в зависимости от дисперсных характеристик частиц; в) установление факторов, которые наиболее сильно влияют на процесс распределения частиц внутри сепаратора.

*Задача* работы состоит в построении математической модели процесса распределения мелкодисперсных частиц в воздушно-центробежных сепараторах.

### 2. Распределение частиц порошковой массы по их размерам

Принцип действия воздушно-центробежных сепараторов состоит в следующем: частицы исходного материала подвергаются одновременно действию двух сил – центробежной, которая создаётся вращением потока, и радиальной, создаваемой движением потока к центру сепарационной камеры. При рассмотрении стационарного случая можно прийти к выводу о равенстве двух указанных сил, которое определяется радиусом круговой траектории частиц порошковой массы заданных размеров. Если же частицы будут больших диаметров, чем расчётные, то они будут перемещаться по спирали к краям сепарационной камеры, а частицы с диаметрами меньше заданного – также по спирали к центру сепаратора.

Исследуем случай, когда выполняются условия:

1) Любую фиксированную частицу можно рассматривать как частицу сферической формы (или формы, которую можно привести к сферической при помощи использования определённого эквивалентного сферы ее размера и коэффициента формы) в контексте теории сепарации в центробежно-воздушных полях.

2) Предполагаем, что частицы порошковой массы не соприкасаются с движущимися деталями сепаратора, т.е. частица рассматривается как свободно подвешенная в потоке.

Рассмотрим основные силы, действующие на процесс.

Сила потока, который переносит частицу:

$$F_f = \frac{1}{8} k\pi\theta d^2 \rho_{cp} v_r^2. \quad (1)$$

Центробежная сила, действующая на сферическую частицу диаметром  $d$ , равна:

$$F_c = \pi d^3 (\rho - \rho_{cp}) \frac{v_\tau}{6R}. \quad (2)$$

Здесь  $\rho$  и  $\rho_{cp}$  – соответственно плотность частицы и среды, в которой производится сепарация;  $R$  – радиус траектории;  $v_\tau$  и  $v_r$  – тангенциальная и радиальная составляющие скорости потока на расстоянии  $R$  от центра;  $\theta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий отклонение формы частицы от сферической,

$$k = 24 \operatorname{Re} \text{ при } 0 < \operatorname{Re} < 1, \quad (3)$$

$$k = 13 \operatorname{Re}^{\frac{1}{3}} \text{ при } 1 < \operatorname{Re} < 10, \quad (4)$$

где параметр  $\operatorname{Re}$  – число Рейнольдса.

Равенство сил  $\varphi_c$  и  $\varphi_f$  определяет граничный размер частиц  $d_O$ , находящихся на круговой траектории заданного радиуса.

Для частиц минимальных размеров и небольших скоростей в соответствии с условием (3) имеем

$$d_O = 4,24 \left( \frac{\rho}{\rho - \rho_{cp}} \theta \right)^{\frac{1}{2}} (Rv_\tau)^{\frac{1}{2}} v_\tau^{-1}. \quad (5)$$

В случае частиц средних размеров и достаточно больших скоростей  $v_\tau$  в соответствии с (4) имеем:

$$d_O = 4,54 \left[ \left( \frac{\rho}{\rho - \rho_{cp}} \theta \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \frac{R^{\frac{2}{3}} v_\tau}{v_\tau^{\frac{4}{3}}}, \quad (6)$$

$$v_r = \frac{V}{2\pi} R h, \quad v_\tau = v_{\tau 0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^\delta. \quad (7)$$

Здесь  $V$  – объемный расход воздуха;  $h$  – высота зоны разделения [6];  $v_{\tau 0}$  – тангенциальная составляющая у внешней границы зоны;  $R_0$  – расстояние внутренней границы зоны до центра. В зависимости от способа формирования потока величина  $\delta$  может изменяться в пределах  $-1 \leq \delta \leq 1$ .

При  $\delta = 0$  и  $h(R) = \text{const}$  для частиц наименьших размеров  $v_\tau = \text{const}$  и  $d_O$  не зависит от  $R$ . Следовательно, процесс сепарации обычно распределяет частицы только по одной из их характеристик, в зависимости от их дисперсности (т.е. по размеру в зависимости от величины диаметра). Круговые траектории движения частиц одинаковых размеров в пределах зоны сепарации являются устойчивыми, а значит частицы с достаточно близкими дисперсными характеристиками могут находиться в этой зоне достаточно долго. Этот случай является идеальным для работы сепаратора. Для такого процесса необходимым условием является следующее утверждение: угловая скорость потока увеличивается пропорционально  $\frac{1}{R}$  по мере приближения потока к центру. Любые частицы, размеры которых больше  $d_O$ , попадая в рассматриваемую нами зону, будут по спиралям удаляться к краям сепарационной зоны, а частицы диаметров мельче  $d_O$  – также по спиралям к центру.

Если  $0 < \delta \leq 1$ , то на круговых орбитах, приближающихся к центру, частицы с близкими дисперсными характеристиками будут больших размеров, а при

$-1 \leq \delta < 0$  – меньших. Отсюда получаем следующее утверждение: при  $\delta \neq 0$  в сепараторе существует несколько зон распределения частиц порошковой массы, а некоторая область, которую можно определить при помощи формул (5) и (6).

Движение частиц (одинаковых по своим дисперсным характеристикам) по круговым траекториям при  $\delta \neq 0$  является неустойчивым. Возмущения потока и случайные перемещения частиц будут переводить их на спиральные траектории и направлять в один из продуктов сепарации.

С помощью формул (5)-(7) можно получить следующее соотношение:

$$\frac{d_{O1}}{d_{O2}} = \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^\delta. \quad (8)$$

Здесь  $R_1$  и  $R_2$  – граничные радиусы области сепарации;  $d_{O1}$  и  $d_{O2}$  – равнозначные размеры частиц на внешней и внутренней границах зоны распределения.

Частицы с размерами  $d_{O1} < d < d_{O2}$ , в зависимости от места их попадания в зону сепарации, могут попасть как в крупнодисперсный порошок, так и в мелкодисперсную порошковую смесь. Поэтому в мелкодисперсную смесь будут входить все частицы мельче  $d_{O2}$ , а в крупнодисперсную – все частицы, дисперсные характеристики которых больше  $d_{O1}$ .

Доля частиц заданного размера, попадающих в определенную зону сепарации, равновероятна (при условии, что попадание частицы в любую точку зоны пропорционально ширине этой зоны).

Из приведенных выше условий и на основании (8):

$$\frac{\pi R^2 - \pi R_1^2}{\pi R_2^2 - \pi R_1^2} = \frac{\left( \frac{R}{R_1} \right)^2 - 1}{\left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 - 1} = \frac{\left( \frac{d}{d_{O1}} \right)^\delta - 1}{\left( \frac{d_{O2}}{d_{O1}} \right)^\delta - 1}. \quad (9)$$

Состав мелкодисперсной части порошковой массы представляет собой:

$$J(d) = \int_0^{d_{O1}} F(d) dd + \int_{d_{O1}}^{d_{O2}} \frac{\left( \frac{d}{d_{O1}} \right)^\delta - 1}{\left( \frac{d_{O2}}{d_{O1}} \right)^\delta - 1} F(d) d(d). \quad (10)$$

На основании (9) и (10) можно вывести коэффициенты полезного действия сепаратора:

$$\eta_1 = \frac{J(d)}{\int_0^{d_{O2}} F(d) d(d)}, \quad (11)$$

$$\eta_2 = \frac{\int_0^{d_{O1}} F(d)d(d)}{J(d)}. \quad (11')$$

Если параметр  $\delta$  заметно отличается от нуля, а отношение  $\frac{R_2}{R_1}$  велико (порядка 2–5), то точность распределения частиц по их размерам и КПД классификации низкие (при условии, что на  $[d_{O1}, d_{O2}]$  приходится значительная часть порошковой массы).

В общем случае точность процесса сепарации при фиксированных параметрах распределения определяется изменениями сил, которые действуют на частицы критических размеров. Можно сделать вывод, что точность распределения частиц зависит от следующего условия: *чем быстрее изменяются действующие на компоненты порошковой массы возмущения, тем точнее будет конечное их распределение.* Это свойство также определяет предпочтительное использование воздушно-центробежных сепараторов в сравнении с гравитационными при распределении малых частиц.

Действительно, для гравитационной силы и противодействующей ей силы воздушного потока

$$\begin{aligned} \varphi_{af} &= \frac{1}{6} \pi(\rho - \rho_{cp})gd^3 - 3\mu d v_f = \\ &= \frac{1}{6} \pi(\rho - \rho_{cp})g(d^3 - dd_p^2), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость среды;  $v_f$  – скорость потока относительно частицы, а  $d_p$  – равновесное значение размера частиц для  $\varphi = 0$ :

$$d_p^2 = \frac{18\mu v_f}{(\rho - \rho_{cp})g}.$$

Величина производной и дифференциал  $d$  в точке  $d = d_p$  равны

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{af}}{d(d)} &= \frac{1}{6} \pi(\rho - \rho_{cp})g(3d^2 - d_p^2); \\ d(d)|_{d=d_p} &= \frac{3d\varphi}{\pi(\rho - \rho_{cp})gd_p^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для центробежных полей

$$\begin{aligned} \varphi_c &= \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho - \rho_{cp}) \omega^2 R - \frac{13}{8} \pi \rho_{cp} v^2 d^2 v^2 = \\ &= \frac{1}{6} \pi (\rho - \rho_{cp}) \omega^2 R (d^3 - d^2 d_0^2), \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения на расстоянии  $R$  от центра. Равновесное значение размера частиц на расстоянии  $R$  от центра вращения равно

$$d_p = \left( \frac{39 v_f^2 \rho_{cp} v^2}{4 \omega^2 R (\rho - \rho_{cp})} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Величина производной и дифференциал в точке  $d = d_p$  для центробежных полей равны

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_c}{d(d)} &= \frac{1}{6} \pi (\rho - \rho_{cp}) \omega^2 R (3d^2 - \frac{3}{2} d_p^2 d^{\frac{1}{2}}); \\ d(d)|_{d=d_p} &= \frac{4d\varphi}{(\rho - \rho_{cp}) \omega^2 R d_p^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Сравнивая формулы (13) и (15), можно видеть, что величина дифференциала  $dd$  при равных значениях  $d\varphi$  в случае центробежных полей меньше, чем в случае гравитационного поля.

Из формул (13) и (15) следует, что с уменьшением граничного размера величина случайного отклонения размеров частиц по обе стороны границы их разделения увеличивается достаточно быстро. Следовательно, точность сепарации с ростом дисперсности резко падает, а экспериментальные трудности реализации процесса распределения возрастают.

На качестве сепарации сказывается также значение разности плотностей сепарируемых частиц и среды. Очевидно, качество сепарации тем лучше, чем плотность частиц выше и чем менее плотной является сепарационная среда.

### 3. Заключение

*Научная новизна.* Исследован процесс распределения твёрдых частиц порошковых смесей в воздушно-центробежных сепараторах. Рассмотрен процесс движения частиц в сепараторе с течением времени. Выведены формулы для сил, действующих на частицы в зависимости от их дисперсных характеристик. Установлены факторы, которые наиболее существенно влияют на процесс распределения частиц внутри сепаратора.

*Практическая ценность* такого метода обработки мелкодисперсных частиц состоит в том, что мы можем получить порошковую смесь с определённым распределением частиц по их размерам.

Результаты исследований могут быть применены для получения массивов частиц, используемых на производстве. Следует учитывать, что рассматривался идеальный случай движения частиц в сепараторе. Поэтому полученные результаты следует предварительно опробовать в лабораторных условиях.

**Литература:** 1. Вовк А.В., Дикарев В.А., Подгорбунский Н.С. Управление процессом формирования порошковых смесей // АСУ и приборы автоматики, 2008. №147. 2. Агапова И.С., Дикарев В.А., Подгорбунский Н.С. Эволюция скачков и изломов импульсов при их распространении в информационном канале. 3. Коузов П.А. Основы

анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1987, 264с. **4.** *Гора Н.Н., Вовк А.В.* Вывод системы дифференциальных уравнений, описывающей процесс обработки многокомпонентной смеси // Вестник НТУ ХПИ, тематический выпуск «Информатика и моделирование», В23, 2006. С. 19-28. **5.** *Вовк А.В.* Процесс формирования порошковых масс в объеме активной смеси // Радиоэлектроника и информатика, 2007. С. 141-144. **6.** *Авдеев Н.Я.* Расчёт гранулометрических характеристик полидисперсных систем. Ростов н/Д: ростовское книжн. Изд-во, 1966. 54с.

Поступила в редколлегию 21.04.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Кривуля Г.Ф.

**Вовк Александр Владимирович**, старший преподаватель кафедры «Медиасистемы и технологии» ХНУРЭ. Научные интересы: теория вероятностей, случайные процессы. Адрес: Украина, 61100, Харьков, пр. Маршала Жукова, 45, кв. 16, тел. 716-16-88.

**Подгорбунский Никита Сергеевич**, аспирант кафедры «Прикладная математика» ХНУРЭ. Научные интересы: теория вероятностей, случайные процессы. Адрес: Украина, 61195, Харьков, ул. Метростроителей, 15, кв. 23, тел. 716-02-70.