

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Семикопенко И.А., канд. техн. наук, проф.,  
Смирнов Д.В., аспирант,

Воронов В.П., канд. физ.-мат. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ МАТЕРИАЛА В ПАТРУБКЕ ВОЗВРАТА ДЕЗИНТЕГРАТОРА

DmSm1989@yandex.ru

Дано математическое описание движения частиц материала в патрубке возврата дезинтегратора. Получены соотношения, позволяющие произвести разделение двухфазного потока в возвратном патрубке дезинтегратора путем установки перегородки в направлении, перпендикулярном диаметру возвратного патрубка. Таким образом, можно регулировать максимальный размер частиц материала в готовом продукте на выходе из дезинтегратора.

**Ключевые слова:** частица, патрубков возврата, воздушный поток

Дезинтеграторы являются одним из эффективных видов помольного оборудования, реализующего высокоскоростное соударение частиц в камере помола [1].

Рассмотрим процесс движения частицы материала в возвратном патрубке дезинтегратора [2].

При работе дезинтегратора в возвратный патрубок частицы измельченного материала поступают из камеры помола вместе с воздушным потоком. В результате движения двухфазного потока внутри патрубка, имеющего постоянный радиус кривизны, под действием центробежной и стоксовской сил осуществляется разделение частиц материала по равновесным траекториям « $\tau_p$ » движения. В силу относительно небольших размеров частиц материала можно считать их сферическими с диаметром  $d_r$  и движущимися со скоростью потока  $u_\phi$ .

Если частица материала в возвратном патрубке движется по равновесной траектории, тогда для неё должно выполняться следующее равенство:

$$\frac{m_0 u_\phi^2}{R_1 + r} = 3\pi d_r \mu w_r, \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние, отсчитываемое вдоль диаметра возвратного патрубка, изменяющееся в пределах

$$R_1 \leq r \leq R_1 + d;$$

$w_r$  – скорость частицы материала вдоль диаметра возвратного патрубка, которая с радиальной координатой « $r$ » связана соотношением

$$w_r = \frac{dr}{dt}, \quad (2)$$

С учетом того, что  $m_0 = \frac{\pi d^3}{6} \gamma$ , формула (1) принимает вид:

$$\frac{d^2 \gamma}{6} \cdot u_\phi^2 \cdot \frac{1}{R_1 + r} = 3\mu \frac{dr}{dt}, \quad (3)$$

Введем следующее обозначение:

$$\tau_0 = \frac{\gamma \cdot d^2}{18\mu}. \quad (4)$$

Легко убедиться, что величина (4) имеет размерность времени. Поэтому величине (4) можно придать смысл времени перехода частицы материала при её движении в возвратном патрубке на равновесную траекторию движения, которая, в свою очередь, будет соответствовать величине геометрического размера (диаметра) частицы материала.

Подстановка (4) в (3) приводит к следующему дифференциальному уравнению:

$$\frac{u_\phi^2}{R_1 + r} = \frac{1}{\tau_0} \cdot \frac{dr}{dt}. \quad (5)$$

Разделение переменных интегрирования в (5) приведет к следующему результату:

$$u_\phi^2 \tau_0 dt = (R_1 + r) dr. \quad (6)$$

Интегрирование (6) позволяет получить соотношение:

$$u_\phi^2 \tau_0 t = \frac{(R_1 + r)^2}{2} + C_2. \quad (7)$$

Постоянную интегрирования  $C_2$  в (7) можно найти, исходя из следующего начального условия:

при

$$t = 0, r = 0. \quad (8)$$

Применив (8) к (7), можно получить:

$$C_2 = -\frac{R_1^2}{2}. \quad (9)$$

Подстановка (9) в (7) приводит к следующему результату:

$$u_\phi^2 \tau_0 t = \frac{(R_1 + r)^2}{2} - \frac{R_1^2}{2}. \quad (10)$$

На основании (10) можно найти радиус « $r_p$ » равновесной траектории движения частицы материала в возвратном патрубке для фиксированного значения диаметра частицы, для чего необходимо воспользоваться следующим условием: при

$$t = \tau_0, r = r_p. \quad (11)$$

Условие (11) означает, что за время  $\tau_0$  частица материала осуществляет переход на равновесную траекторию движения.

Применив условие (11) к соотношению (9), получим следующее соотношение:

$$r_p^2 + 2R_1 r_p - 2u_\varphi^2 \tau_0^2 = 0. \quad (12)$$

С математической точки зрения (12) представляет собой квадратное уравнение относительно неизвестной величины « $r_p$ ». В силу положительности искомой величины « $r_p$ » решение уравнения (12) будет иметь следующий вид:

$$r_p = -R_1 + \sqrt{R_1^2 + 2u_\varphi^2 \tau_0^2}. \quad (13)$$

После несложных математических преобразований формулу (13) можно привести к следующему виду:

$$r_p = R_1 \left( \sqrt{1 + \frac{2u_\varphi^2 \tau_0^2}{R_1^2}} - 1 \right). \quad (14)$$

Подстановка (4) в (14) позволяет получить следующее соотношение:

$$r_p = R_1 \left( \sqrt{1 + \frac{2d^4}{d_*^4}} - 1 \right), \quad (15)$$

где введено следующее обозначение:

$$d_* = \sqrt{\frac{18R_1 \mu}{u_\varphi \gamma}}. \quad (16)$$

На основании полученных соотношений (15) и (16) можно произвести разделение двухфазного потока в возвратном патрубке путем установки перегородки в направлении, перпендикулярном диаметру возвратного патрубка.

В результате установки такой перегородки двухфазный поток в конце своего движения разделяется на два канала. В канале, геометрические размеры которого изменяются в пределах, от  $R_1$  до  $R_1 + r_k$ ,

где

$$r_k = \frac{R_1}{n}, \quad (17)$$

здесь  $n$  – число задающего граничный размер канала для выхода готового продукта.

Канал, геометрические размеры которого варьируются в пределах от  $R_1 + r_k$ , до  $R_1 + d$ , осуществляет подачу крупки в камеру помола дезинтегратора (рисунок 1).

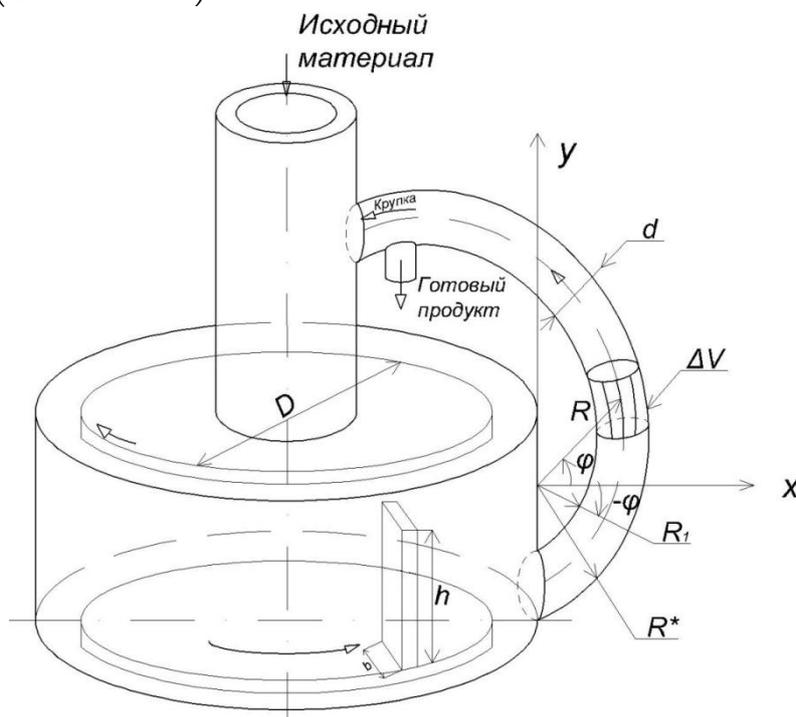


Рис. 1. Расчетная схема для описания движения частиц материала в патрубке возврата дезинтегратора

Если в выражении (15) положить  $r_p = r_k$ , тогда можно получить функциональную зависимость, определяющую максимальный размер частиц готового продукта от числа  $n$ :

$$d_{max}(n) = d_* \sqrt[4]{\frac{(1 + \frac{1}{n})^2 - 1}{2}}. \quad (18)$$

Таким образом, согласно полученному соотношению (18) можно с помощью установки перегородки в возвратном патрубке с радиусом (17) регулировать максимальный размер частиц материала в готовом продукте на выходе из дезинтегратора.

Согласно полученным соотношениям (16) и (18), максимальный размер частицы готового продукта пропорционален величине коэффициента динамической вязкости запыленного воздуха  $\mu$ , значение которого можно определить, если воспользоваться формулой Эйнштейна [3]:

$$\mu = \mu_0 \left( 1 + \frac{5}{2} \alpha_0 \right), \quad (19)$$

где  $\mu_0$  – коэффициент динамической вязкости чистого воздуха, значение которого для комнатных температур равно  $1,85 \cdot 10^{-5}$  Па·с;  $\alpha_0$  – объемная доля частиц материала в воздушной среде возвратного патрубка, которая равна:

$$\alpha_0 = \frac{V_{\text{ч}}}{V_{\text{в}}}, \quad (20)$$

здесь  $V_{\text{ч}}$  – объем частиц материала в рассматриваемом объеме  $\Delta V$  возвратного патрубка;  $V_{\text{в}}$  – объем воздуха.

Соотношение (20) приведем к следующему виду:

$$\alpha_0 = \frac{V_{\text{ч}/t}}{V_{\text{в}/t}} = \frac{q_{\text{ч}}}{Q}, \quad (21)$$

где  $q_{\text{ч}}$  – объемный расход частиц готового материала в возвратном патрубке;  $Q$  – расход воздуха, определяемый по формуле [4]:

$$Q = \frac{\pi \omega b D h \sqrt{\frac{D}{h} - 1} \sqrt{1 + 4 \frac{h}{D} - 4 \frac{h^2}{D^2}}}{\sqrt{1 + 8 \frac{h}{D} - 8 \frac{h^2}{D^2}}}. \quad (22)$$

Для установившегося режима работы дезинтегратора с возвратным патрубком очевидно должен выполняться баланс материала:

$$q_0 + q_{\text{кп}} = q_{\text{кв}} + q_{\text{г}}, \quad (23)$$

здесь  $q_0$  – объемный расход материала, поступающего из загрузочного бункера в дезинтегратор;  $q_{\text{кп}}$  – объемный расход крупки, поступающей через возвратный патрубок в камеру помо-

ла;  $q_{\text{кв}}$  – объемный расход крупки, поступающей из камеры помола дезинтегратора в возвратный патрубок;  $q_{\text{г}}$  – объемный расход готового материала.

Если предположить, что для установившегося режима работы дезинтегратора выполняется равенство

$$q_{\text{кп}} = q_{\text{кв}}, \quad (24)$$

тогда, согласно (23) имеем:

$$q_0 = q_{\text{г}}. \quad (25)$$

С учетом (20), (21) и (25) выражение (19) принимает окончательно следующий вид:

$$\mu = \mu_0 \left( 1 + \frac{5}{2} \cdot \frac{q_0}{Q} \right). \quad (26)$$

Таким образом, приведенное математическое описание позволяет описать процесс движения двухфазной среды (воздух, частицы материала) в возвратном патрубке дезинтегратора.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хинт И.А. Основы производства силикалитных изделий. М.-Л.: 1962. 636с.
2. Воронов В.П., Семикопенко И.А., Смирнов Д.В. Математическое описание движения вязкой среды в патрубке возврата дезинтегратора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 113-117.
3. Бретишнайдер С. Свойства газов и жидкостей. М.: Химия, 1966, 537с.
4. Блиничев В.Н., Бобков С.П., Пискунов А.В. Клочков Н.В. Методика расчета расхода воздуха в центробежно-ударной мельнице // Известия вузов. Химия и химическая технология. 1982. №2. С. 230-232.