

Богданов В.С., д-р техн. наук, проф.,
Семикопенко И.А., канд. техн. наук, доц.,
Логачев И.Н., д-р техн. наук, проф.,
Смирнов Д.В., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНОГО РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ИЗМЕЛЬЧЕННОГО В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ МАТЕРИАЛА*

semickopenko.i@yandex.ru

В данной статье из условий равенства аэродинамических сил витающих частиц по законам Стокса и Ньютона теоретически найден граничный диаметр частиц измельченного известняка, определяющий разделение потока материала в патрубке возврата на мелкую и крупную фракции. Представлены схемы скачкообразного движения частицы известняка в тороидальном вертикальном канале патрубка возврата при линейной и квадратичной аэродинамической силе. Численные исследования дифференциальных уравнений динамики движения частиц известняка в восходящем потоке показали на уменьшение максимальной величины отклонения частицы при ее столкновениях с внешней стенкой по всей высоте патрубка возврата.

Ключевые слова: дезинтегратор, поток, стенка, частица.

Среди мельниц центробежно-ударного действия особое место занимают дезинтеграторы, в которых сочетаются различные виды нагрузки на измельчаемый материал [1].

На рис. 1 представлен дезинтегратор с криволинейным патрубком возврата части материала на дополнительный помол.



Рис. 1. Дезинтегратор с криволинейным патрубком возврата материала

Принцип действия данной установки следующий. Предварительно измельченный материал из бункера через центральный вертикальный ка-

нал направляется в нижнюю часть камеры помола. Из камеры помола полидисперсный продукт вылетает в криволинейный патрубок возврата. Тонкие частицы посредством поворотной заслонки, находящейся в верхней части криволинейного патрубка возврата, направляются в патрубок готового продукта и в циклон. Крупные частицы вылетают через периферийную часть патрубка возврата во внешний вертикальный канал и направляются по спирали в верхнюю часть камеры помола.

Таким образом, с помощью поворотной заслонки осуществляется разделение материала, находящегося в патрубке возврата, на крупную и мелкую фракции.

Определим границу между мелкими частицами измельченного известняка, аэродинамические силы которых линейно зависят от разности скоростей воздуха и частиц, и крупными частицами, аэродинамические силы которых квадратично зависят от данной разности скоростей. Дифференциальные уравнения, описывающие динамику движения мелких и крупных частиц представлены в следующем векторном виде [2]: для мелких частиц:

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} + 3\pi v d_e \cdot (\vec{u} - \vec{v}); \quad (1)$$

для крупных частиц:

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} + c_0 \frac{\pi d_e^2}{4} \cdot \frac{\rho}{2} |\vec{u} - \vec{v}| \cdot (\vec{u} - \vec{v}), \quad (2)$$

где m – масса частицы, кг; ρ – плотность воздуха, кг/м³; \vec{g} – вектор ускорения силы тяжести; d_e – эквивалентный (по объему) диаметр частицы, м;

\vec{u} – вектор скорости воздушного потока в тороидальном канале патрубка возврата, вектор направлен перпендикулярно радиусу канала и равен, м/с; C_0 – коэффициент лобового сопротивления частицы; $|\vec{u} - \vec{v}|$ – абсолютная величина скорости воздуха относительно скорости частицы, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

При равенстве аэродинамических сил (последних членов правой части этой системы уравнений) [3]:

$$3\pi\nu d_e \cdot (\vec{u} - \vec{v}) \approx c_0 \frac{\pi d_e^2}{4} \cdot \frac{\rho}{2} |\vec{u} - \vec{v}| \cdot (\vec{u} - \vec{v}) \quad (3)$$

должна быть одна и та же траектория этих частиц или близкие друг к другу при одном и том же искомом диаметре: (4)

где d_r – средняя теоретическая граница между мелкими и крупными частицами измельченного известняка.

Упростим это условие, полагая абсолютную разность скоростей равной скорости витания w_B :

$$|\vec{u} - \vec{v}| \approx w_B. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) условие равенства аэродинамических сил (3) представим в следующем виде (после упрощений):

$$24\nu = d_r c_0 w_B, \quad (6)$$

откуда найдем (зная скорость витания w_B) искомый граничный диаметр:

$$d_r = \frac{24\nu}{c_0 w_B}, \quad (7)$$

или учитывая, что коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре 20°C и атмосферном давлении 101,325 кПа равен $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, а скорость витания имеет размерность м/с, получим

$$d_r = \frac{360}{c_0} \cdot \frac{1}{w_B} \cdot 10^{-6}, \text{ м}. \quad (8)$$

Скорость витания частицы определим по закону Стокса [4]:

$$w_B = \frac{g d_r^2 \rho_m}{18\nu\rho} = \frac{9.81 \cdot 2000}{18 \cdot 15 \cdot 10^{-6} \cdot 1.2} \cdot d_r^2 = 60,6 \cdot d_r^2 \cdot 10^{-6}, \text{ м/с}. \quad (9)$$

где ρ_m – плотность твердой частицы, кг/м³.

Подставляя полученный результат в (8), получаем:

$$d_r^3 = \frac{360}{c_0} \cdot \frac{10^{-6}}{60,6 \cdot 10^6}, \text{ м}$$

или

$$d_r = \sqrt[3]{\frac{5,941}{c_0}} \cdot 10^{-4}, \text{ м}$$

или

$$d_r = \sqrt[3]{\frac{5,941}{c_0}} \cdot 10^2, \text{ мкм}. \quad (10)$$

Для автомодельной области $2 \cdot 10^3 < \text{Re}_T < 2 \cdot 10^5$ коэффициент лобового сопротивления c_0 определяется по эмпирической формуле Петтиджона и Христиансона:

$$c_0 = 5,31 - \frac{4,88}{f}, \quad (11)$$

где f – коэффициент геометрической формы частиц.

Так как для измельчения частиц минералов коэффициент геометрической формы $f = 1,4 \div 1,7$ и поэтому по формуле (11) $c_0 = 1,82 \div 2,44$, в нашем случае имеем:

$$d_r = 134,5 \div 150 \text{ мкм}.$$

Если скорость витания определяется по закону Ньютона, при таких же исходных данных имеем:

$$w_B = \sqrt{\frac{4 \cdot d_r \cdot \rho_m \cdot g}{3 \cdot c_0 \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{4 \cdot d_r \cdot 2000 \cdot 9,81}{3 \cdot c_0 \cdot 1.2}} = 147,6 \sqrt{\frac{d_r}{c_0}}, \text{ м/с}. \quad (12)$$

Подставляя полученный результат в (4), получим:

$$d_r^{1,5} = \frac{360}{c_0} \cdot \frac{\sqrt{c_0}}{147,6} \cdot 10^{-6} = \frac{2,44 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{c_0}}, \text{ м}$$

или

$$d_r = \sqrt[3]{\frac{5,95}{c_0}} \cdot 10^{-4}, \text{ м}$$

или

$$d_r = \sqrt[3]{\frac{5,95}{c_0}} \cdot 10^2, \text{ мкм}. \quad (13)$$

т.е. при $c_0 = 1,82 \div 2,44$

$$d_r = 135 \div 150 \text{ мкм}.$$

Таким образом, средняя теоретическая граница между мелкими и крупными частицами измельченного известняка составляет $d_r \approx 140$ мкм. С точки зрения качества готового продукта средний диаметр принимается:

$$d_r \leq 100 \text{ мкм}. \quad (14)$$

Сопоставляем траектории движения частиц диаметром $d_r = 80$ мкм. Причем аэродинамическая сила принималась по закону Стокса (рис. 2), т.е. по линейной зависимости от разности скоростей, и по закону Ньютона – по квадратичной зависимости от этой разности (рис.3), как видно из

этих графиков, кинематическая схема и траектории достаточно близки. Наглядно это видно при сопоставлении траекторий движения частиц в полярной системе координат в патрубке возврата

(рис. 4).

Расчеты к построению кинематической схемы рисунка 2 выполнены по следующим формулам:

$$\beta_1 = \arctg\left(\frac{\vartheta'_{1x}}{\vartheta'_{1y}}\right); \varphi_1 = \arctg\frac{|y_1|}{x_1}; \alpha_1 = \beta_1 - \varphi_1; \gamma_1 = \beta_1 - 2\alpha_1 = 2\varphi_1 - \beta_1; \quad (15)$$

$$\beta_2 = \arctg\left(\frac{\vartheta'_{2x}}{\vartheta'_{2y}}\right); \varphi_2 = \arctg\frac{|y_2|}{x_2}; \alpha_2 = \beta_2 - \varphi_2; \gamma_2 = 2\alpha_2 - \beta_2 = \beta_2 - 2\varphi_2; \quad (16)$$

$$\beta_3 = \arctg\left(\frac{|\vartheta'_{3x}|}{\vartheta'_{3y}}\right); \varphi_3 = \arctg\left(\frac{y_3}{x_3}\right); \alpha_3 = |\beta_3| + \varphi_3; \gamma_3 = \frac{\pi}{2} - (|\beta_3| + 2\varphi_3); \quad (17)$$

$$\beta_4 = \arctg\left(\frac{|\vartheta'_{4x}|}{\vartheta'_{4y}}\right); \varphi_4 = \arctg\left(\frac{y_4}{x_4}\right); \alpha_4 = \varphi_4 - \beta_4; \gamma_4 = \frac{\pi}{2} - (2\alpha_4 + \beta_4) = \frac{\pi}{2} - (2\varphi_4 - \beta_4). \quad (18)$$

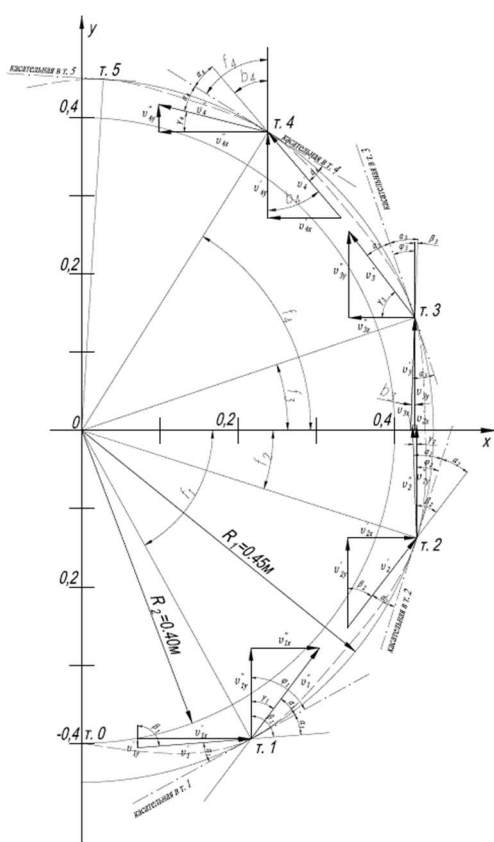


Рис. 2. Кинематическая схема скачкообразного движения частицы известняка ($d_c = 80 \text{ мкм}$; $\rho_m = 2000 \text{ кг/м}^3$) в торoidalном вертикальном канале патрубка возврата при линейной аэродинамической силе

Расчеты к построению кинематической схемы рисунка 3 выполняются по следующим формулам:

$$\beta_1 = \arctg\left(\frac{\vartheta'_{1x}}{\vartheta'_{1y}}\right); \varphi_1 = \arctg\frac{|y_1|}{x_1}; \alpha_1 = \beta_1 - \varphi_1; \gamma_1 = \beta_1 - 2\alpha_1 = 2\varphi_1 - \beta_1; \quad (19)$$

$$\beta_2 = \arctg\left(\frac{\vartheta'_{2x}}{\vartheta'_{2y}}\right); \varphi_2 = \arctg\frac{|y_2|}{x_2}; \alpha_2 = \beta_2 - \varphi_2; \gamma_2 = \beta_2 - 2\alpha_2 = 2\varphi_2 - \beta_2; \quad (20)$$

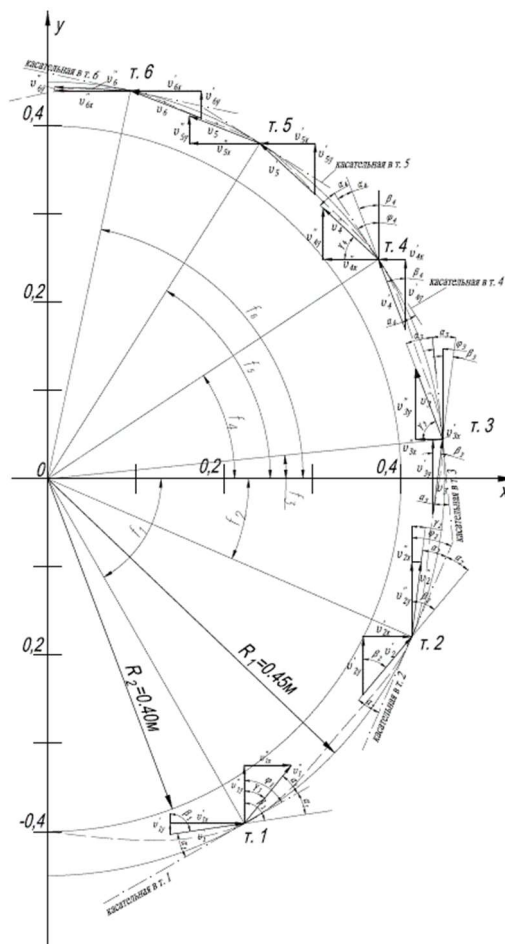


Рис. 3. Кинематическая схема скачкообразного движения частицы известняка ($d_c = 80 \text{ мкм}$; $\rho_m = 2000 \text{ кг/м}^3$) в торoidalном вертикальном канале патрубка возврата при квадратичной аэродинамической силе

$$\beta_3 = \arctg\left(\frac{\vartheta'_{3x}}{\vartheta'_{3y}}\right); \varphi_3 = \arctg\left(\frac{y_3}{x_3}\right); \alpha_3 = \beta_3 + \varphi_3; \gamma_3 = \frac{\pi}{2} - (\beta_3 + 2\varphi_3); \quad (21)$$

$$\beta_4 = \arctg\left(\frac{|\vartheta'_{4x}|}{\vartheta'_{4y}}\right); \varphi_4 = \arctg\left(\frac{y_4}{x_4}\right); \alpha_4 = \varphi_4 - \beta_4; \gamma_4 = \frac{\pi}{2} - (2\alpha_4 + \beta_4) = \frac{\pi}{2} - (2\varphi_4 - \beta_4); \quad (22)$$

$$\beta_5 = \arctg\left(\frac{|\vartheta'_{5x}|}{\vartheta'_{5y}}\right); \varphi_5 = \arctg\left(\frac{y_5}{x_5}\right); \alpha_5 = \varphi_5 - \beta_5; \gamma_5 = \frac{\pi}{2} - (2\alpha_5 + \beta_5) = \frac{\pi}{2} - (2\varphi_5 - \beta_5); \quad (23)$$

$$\beta_6 = \arctg\left(\frac{|\vartheta'_{6x}|}{\vartheta'_{6y}}\right); \varphi_6 = \arctg\left(\frac{y_6}{x_6}\right); \alpha_6 = \varphi_6 - \beta_6; \gamma_6 = \frac{\pi}{2} - (2\alpha_6 + \beta_6) = \frac{\pi}{2} - (2\varphi_6 - \beta_6). \quad (24)$$

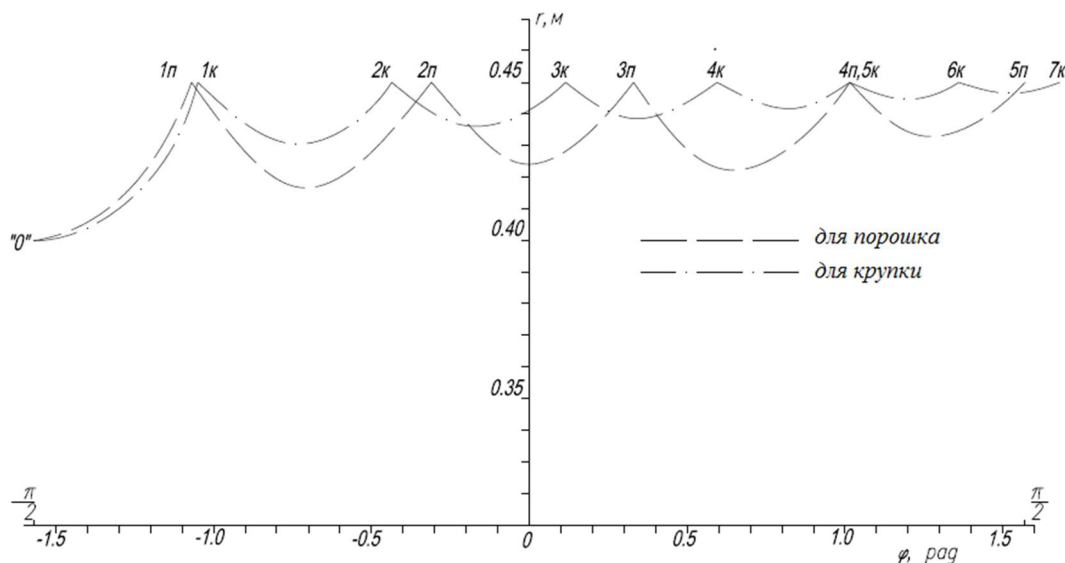


Рис. 4. Траектория движения частицы известняка ($d_c = 80$ мкм; $\rho_m = 2000$ кг/м³) в полярной системе координат в патрубке возврата

Таким образом, можно сделать вывод, что из условий равенства аэродинамических сил витающих частиц по законам Стокса и Ньютона теоретически найден граничный диаметр частиц измельченного известняка $d_r \approx 100$ мкм, определяющий разделение потока материала в патрубке возврата на мелкие и крупные частицы. Мелкие частицы имеют тенденцию к равномерному их распределению в тороидальном канале патрубка возврата без столкновения со стенками (при $d_e \approx 10$ мкм), а крупные частицы $100 \geq d_e \geq 400$ мкм под действием инерционных сил прижимаются к стенкам большего радиуса патрубка возврата более 5 раз и сталкиваются с этими стенками.

Численные исследования дифференциальных уравнений динамики движения частиц в патрубке возврата измельченного в дезинтеграторе известняка ($\rho_m = 2000$ кг/м³, $u_0 = 15$ м/с), показали, несмотря на множественные столкновения крупных частиц со стенками, на уменьшение максимальной величины отклонения частицы от

внешней стенки по всей высоте патрубка, а также уменьшение длины хорды дуг траектории и небольшого роста скорости частиц.

**Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хинт И.А. Основы производства силикалитных изделий. М.: Стройиздат, 1962. 636 с.
2. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. СПб.: Химиздат, 2005. 658 с.
3. Логачев И.Н., Логачев К.И., Минко В.А. Обеспыливающая вентиляция. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2010. 564 с.
4. Клочков Н.В., Блиничев В.Н., Бобков С.П., Пискунов А.В. Методика расчета воздуха в центробежно-ударной мельнице // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. 1982. №2. С. 230–232.

Информация об авторах

Богданов Василий Степанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механического оборудования

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Семикопенко Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования.

E-mail: semickopenko.i@yandex.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Логачев Иван Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Смирнов Дмитрий Владимирович, аспирант, кафедры механического оборудования.

E-mail: DmSm1989@yandex.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в июле 2017 г.

© Богданов В.С., Логачев И.Н., Семикопенко И.А., Смирнов Д.В., 2017

Bogdanov V.S., Semikopenko I.A., Logachev I.N., Smirnov D.V.
**DETERMINATION OF THE BOUNDARY SIZE OF PARTICLES OF GRINDING MATERIAL
IN THE DISINTEGRATOR**

In this paper, from the conditions for the equality of the aerodynamic forces of the spinning particles according to the laws of Stokes and Newton, the limiting diameter of the particles of crushed limestone is determined theoretically, which determined the separation of the material flow in the return pipe to the fine and coarse fractions. Given the schematic diagrams for the hopping of a limestone particle in a toroidal vertical channel of a return branch with a linear and quadratic aerodynamic force. Numerical studies of the differential equations of motion dynamics of limestone particles in ascending perspiration were shown to reduce the maximum value of the deviation of the particle in its collisions with the outer wall along the entire height of the return pipe

Keywords: *disintegrator, flow, wall, particle.*

Information about the author

Bogdanov Vasily Stepanovich, Ph.D., Professor.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Semikopenko Igor Aleksandrovich, PhD, Assistant professor.

E-mail: semickopenko.i@yandex.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Logachev Ivan Nikolaevich, Ph.D., Professor.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Smirnov Dmitry Vladimirovich, Postgraduate student.

E-mail: DmSm1989@yandex.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in July 2017

© Bogdanov V.S., Semikopenko I.A., Logachev I. N., Smirnov D.V., 2017