

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-82-86

Дмитриенко В.Г., Воронов В.П., Шеметов Е.Г., \*Шеметова О.М.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: olga95kizilova@gmail.com

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА НА ВЫХОДЕ ИЗ ВЕРТИКАЛЬНОЙ РАЗГОННОЙ ТРУБКИ СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ПЛОСКОЙ ПОМОЛЬНОЙ КАМЕРОЙ ТОРООБРАЗНОЙ ФОРМЫ

**Аннотация.** В настоящее время в промышленности строительных материалов и других отраслей промышленности возрос спрос на использование порошков высокой дисперсности. Для их производства используются струйные мельницы, поэтому разработка новых конструкций мельницы, повышение эффективности помола, снижение удельных энергозатрат при помоле являются актуальной задачей. В данной статье дается математическое описание движения двухфазного потока на выходе из разгонной трубки струйной мельницы с плоской помольной камерой торообразной формы. Высота разгонной трубки от отбойной плиты играет важную роль в процессе помола материала, так как на этом участке, в камере помола, происходит первичное измельчение частиц, от которого зависит размер частиц, которые будут доизмельчаться на периферии камеры помола. В результате теоретических расчетов получена формула, которая позволяет определить высоту разгонной трубки от отбойного элемента при заданных скоростных параметрах двухфазного потока. А также в статье был построен график зависимости изменения скорости движения частицы от текущей координаты высоты разгонной трубки, который показал, что размер частиц существенно влияет на характер их движения в помольной камере. Используя формулу можно определить расстояние эффективного пролета частиц в зависимости от их размера, из условия достижения максимальной их скорости.

**Ключевые слова:** Струйная мельница, камера помола, разгонная трубка, частица, двухфазный поток.

**Введение.** Известно, что для получения сверхтонких порошков используют мельницы струйной энергии с различным исполнением камер помола. [1–7] С целью увеличения эффективности помола материалов с различной плотностью в БГТУ им. В.Г. Шухова идет постоянный поиск новых технических решений помольных камер струйных мельниц. Так авторами [8] предложена конструкция плоской помольной камеры торообразной формы для получения пигмента, фармацевтических препаратов и порошков для сухих строительных смесей. [9–12]. Для расчета технологических и конструктивных параметров необходимо понимание аэродинамических процессов, происходящих в камере помола и харак-

тера движения двухфазного потока, вылета частиц из разгонной трубки, их взаимодействие с отбойным элементом и боковыми стенками камеры [13–15].

**Основная часть.** Рассмотрим теоретическое исследование движения двухфазного потока на выходе из разгонной трубки струйной мельницы с плоской помольной камерой торообразной формы.

Рассмотрим движение частицы материала «истекающего» с начальной скоростью  $U_0$  из разгонной трубки вертикального исполнения потоком газа (воздухом) с начальной скоростью  $U_0$  (рис. 1).

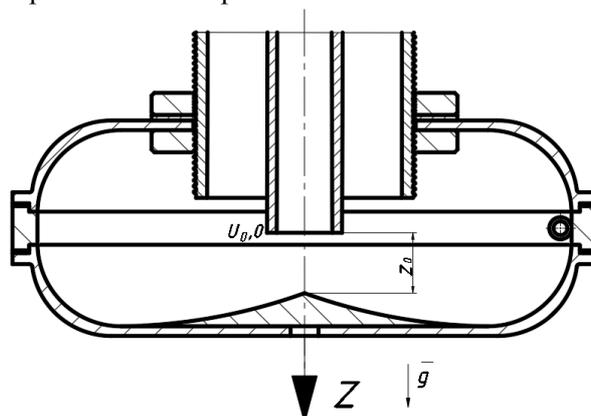


Рис. 1. Расчетная схема, для определения скорости газа (воздуха)

Изменение скорости частицы материала в двухфазном потоке можно описать в рамках уравнения, основанного на втором законе Ньютона:

$$m \frac{d\vartheta(z)}{dt} = P + f, \quad (1)$$

где,  $m$  – масса частицы материала;  $z$  – текущая координата, отсчитываемая от среза разгонной трубки;  $f$  – сила межфазного взаимодействия;  $P$  – сила тяжести частицы материала (Н).

Сила тяжести частицы определяется вторым законом Ньютона по формуле:

$$P = mg. \quad (2)$$

Учитывая форму частицы, значение ее массы связано с плотностью частицы соотношением:

$$m = \psi d^3 \rho, \quad (3)$$

где,  $\psi$  – коэффициент учитывающий форму частицы (для кубовидной формы частицы  $\psi = 1$ , для частицы сферической формы  $\psi = \frac{\pi}{6}$ ).

Силу межфазного взаимодействия « $f$ » запишем в следующем виде:

$$\frac{d\vartheta(z)}{dt} = g + \frac{4\pi\rho_0 v}{\psi \cdot d^2 \cdot \rho} (U(z) - \vartheta(z)) + \frac{\pi\rho_0 v^{\frac{1}{3}}}{2\psi \cdot \rho \cdot d^{\frac{5}{3}}} (U(z) - \vartheta(z))^{\frac{5}{3}}. \quad (7)$$

В левой части уравнения (7) перейдем от дифференцирования по времени к дифференцированию по координате согласно соотношению:

$$\frac{d\vartheta(z)}{dt} = \frac{d\vartheta(z)}{dz} \cdot \frac{dz}{dt}, \quad (8)$$

и учитывая, что

$$\frac{dz}{dt} = \vartheta(z), \quad (9)$$

уравнение (7) принимает вид:

$$\vartheta(z) \frac{d\vartheta(z)}{dz} = A + B(U(z) - \vartheta(z)) + C(U(z) - \vartheta(z))^{\frac{5}{3}}, \quad (10)$$

В уравнение (10) введены следующие обозначения:

$$A = g, \quad (11)$$

$$B = \frac{4\pi\rho_0 v}{\psi \cdot d^2 \cdot \rho}, \quad (12)$$

$$C = \frac{\pi\rho_0 v^{\frac{1}{3}}}{2\psi \cdot \rho \cdot d^{\frac{5}{3}}}. \quad (13)$$

Будем предполагать, что изменение скорости газа (воздуха) после выхода из разгонной трубки носит линейный характер:

$$\vartheta(z) \frac{d\vartheta(z)}{dz} = A + B(U_0(1 - \frac{z}{z_0}) - \vartheta(z)) + C(U_0(1 - \frac{z}{z_0}) - \vartheta(z))^{\frac{5}{3}}. \quad (21)$$

Полученное уравнение (21) может быть использовано для определения изменения скорости частиц, измельчаемого материала в помольной камере, на участке от среза разгонной трубки вертикального исполнения до отбойной плиты.

Интегрирование полученной формулы производили в программном продукте Maple путем применения численных методов. Результаты чис-

$$f = f_0 \cdot \frac{\rho_0 \cdot S}{2} (U(z) - \vartheta(z))^2, \quad (4)$$

где,  $f_0$  – коэффициент лобового сопротивления частицы;  $\rho_0$  – плотность газа (воздуха), кг/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь поперечного сечения частицы материала, м<sup>2</sup>;  $U(z)$  – изменение скорости газа (воздуха) в направлении оси «OZ»;  $\vartheta(z)$  – изменение скорости частицы в направлении оси «OZ».

Коэффициент лобового сопротивления в соотношении (4) зависит от режима движения, который в свою очередь определяется числом Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{(U(z) - \vartheta(z)) \cdot d}{v}, \quad (5)$$

где,  $d$  – диаметр частицы;  $v$  – кинематическая вязкость газа (воздуха).

В теоретических расчетах будем использовать зависимость коэффициента лобового сопротивления в виде формулы Клячко [15]:

$$f_0 = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}. \quad (6)$$

Подстановка соотношений (2) – (6) в уравнение (1) приводит к следующему результату:

$$U(z) = a \cdot z + b. \quad (14)$$

Согласно расчетной схеме, представленной на рисунке 1, определяем неизвестные параметры  $a$  и  $b$ :

$$\text{при } z = z_0 \quad U(z) = 0; \quad (15)$$

$$\text{при } z = 0 \quad U(0) = U_0; \quad (16)$$

Применив (15) к (14) получаем:

$$0 = a \cdot z_0 + b, \quad (17)$$

аналогично применив (16) к (14) имеем:

$$U_0 = b. \quad (18)$$

Подставив  $U_0$  вместо  $b$  из (18) в выражение (17) определим неизвестный параметр:

$$a = -\frac{U_0}{z_0}. \quad (19)$$

Подставив в выражения (18) и (19) в выражение (14) получим следующее выражение:

$$U(z) = U_0(1 - \frac{z}{z_0}). \quad (20)$$

С учетом выражение (20), уравнение (10) примет окончательный вид:

ленного интегрирования формулы (21) для размеров частиц от 0,5 до 4 мм представлены как графические зависимости изменения скорости частиц измельчаемого материала от среза разгонной трубки до встречи с отбойной плитой (рис. 2).

Результаты интегрирования указывают на то, что размер частиц существенно влияет на характер их движения в помольной камере.

Практически все частицы, независимо от их размеров на начальном участке помольной камеры продолжают разгоняться энергоносителем до того момента пока скорость энергоносителя

выше скорости самих частиц. Так частицы диаметром  $d_v=2\div4$  мм достигают максимальной своей скорости на расстоянии от 10 до 16 мм от среза разгонной трубки, а частицы  $d_v=0,5\div1$  на расстояние от 16 до 20 мм (рис. 2).

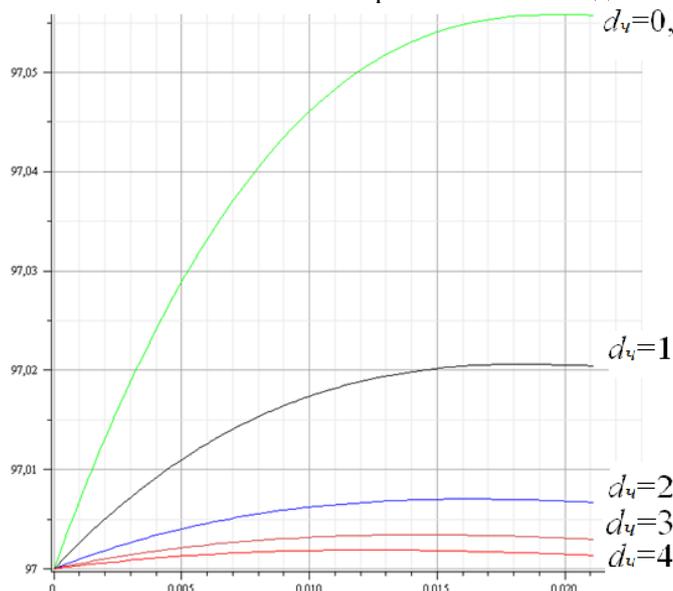


Рис. 2. График зависимости изменения скорости движения частицы от текущей координаты высоты разгонной трубки.

**Выводы.** Выше изложенное, позволяет использовать формулу (21) для моделирования поведения частиц измельчаемого материала в струйной мельнице с плоской помольной камерой торообразной формы. По графику (рис. 2) можно определить расстояние эффективного пролета частиц в зависимости от их размера, из условия достижения максимальной их скорости, что положительно скажется на определении длины от среза вертикальной разгонной трубки до отбойного элемента.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акунов В.И. Экспериментальные исследования установок для тонкого измельчения с противоточными струйными мельницами. Автореферат. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М: ВНИИНСМ, 1961. 229с.
2. Бараковских Д.С., Шишкин С.Ф. Движение двухфазного потока в разгонной трубке струйной мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 82–88.
3. Уваров В.А. Разработка, исследование, методика расчёта конструктивно-технологических параметров противоточных струйных мельниц: автореф. дисс. канд. техн. наук. БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 1996. 22 с.
4. Старчик Ю.Ю. Струйная мельница с цилиндрической камерой помола: автореф. дисс. канд. техн. наук. БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2009. 22 с.

5. Патент РФ на полезную модель № 2020119726, 08.06.2020. Струйная противоточная мельница с дополнительной помольной камерой // Патент России № 199423. 2020 / Фадин Ю.М., Булгаков С.Б., Шеметов О.М., Шеметов Е.Г.
6. Шеремет Е.О. Исследование пневмоструйной мельницы для получения микроцемента: автореф. дисс. канд. техн. наук. БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2019. 22 с.
7. Энциклопедия по машиностроению. Общезаводское оборудование. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Web-browser (Internet Explorer). URL: <https://studfile.net/preview/7493544/page:15/> (дата обращения 20.10.2020)
8. Патент РФ на полезную модель № 2019115765, 22.05.2019. Струйная мельница для сверхтонкого помола // Патент России № 190985. 2019. Бюл. № 20. / Дмитриенко В. Г., Логачев И. Н., Логачев К. И., Шеметов Е. Г., Шеметова О. М., Чередниченко Е. С.
9. Hegazy K. North America's expanding markets // World Cement. Emerging Markets. 2008. Pp. 65–70.
10. Stoiber W. Comminutoin technology and energy consumption // Cement International Vol. 2. 2003. Pp. 44–52.
11. Старчик Ю.Ю., Дмитриенко В.Г., Шеметов Е.Г. Математическая модель определения скоростей энергоносителя в струйной мельнице с цилиндрической камерой помола // Механизация строительства. 2016. Том 77. № 5. С. 47-52.
12. Yang D. Grinding innovation // World Cement. 2008. Vol. 3. Pp. 43–44.

13. Reinhardt Y. Effective Finish Grinding // World Cement. 2008. Vol. 3. Pp. 93–95.

14. Ludwig, H. Influence of the Process Technology on the manufacture of the market oriented cement // Cement International. 2003. Vol. 6. Pp. 74–88.

15. Клячко Л.С. Уравнения движения пылевых частиц в пылеприёмных устройствах // Отопление и вентиляция. №4. 1934. С. 27–29.

#### Информация об авторах

**Дмитриенко Виктор Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: v\_dmitrienko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Воронов Виталий Павлович**, кандидат технических наук, профессор кафедры механического оборудования. E-mail: v.p.voronov2018@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Шеметов Евгений Геннадьевич**, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: zshemetov@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Шеметова Ольга Михайловна**, аспирантка кафедры механического оборудования. E-mail: olga95kizilova@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 01.02.2021 г.

© Дмитриенко В.Г., Воронов В.П., Шеметов Е.Г., Шеметова О.М., 2021

**Dmitrienko V.G., Voronov V.P., Shemetov E.G., \*Shemetova O.M.**

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

*\*E-mail: olga95kizilova@gmail.com*

## MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE TWO-PHASE FLOW MOTION AT THE OUTLET OF THE VERTICAL ACCELERATION TUBE OF A JET MILL WITH A PLANE GRINDING CHAMBER OF TORUS FORM

**Abstract.** Nowadays building material industry as well as other industry branches exercise bigger demand to use powders with high dispersion. Jet mills are used to produce such powders that is why development of new jet mill designs, increase of grind efficiency, reduction of specific energy consumption is an important objective. This article provides a mathematic description of the two-phase flow motion at the outlet of the vertical acceleration tube of a jet mill with a plane grinding chamber of torus shape. The part of the acceleration tube above the impact plate is essential for grinding, as the initial particle grind occurs at this very section, in the grind chamber. Moreover, the initial grind defines the size of particles, that are further reground at the mill chamber. As a result of theoretical calculations, a formula is obtained that allows to determine the height of the acceleration tube from the bump element at the specified speed parameters of the two-phase flow. The article also contains the graph, that shows how particle velocity depends on the current (specific) height point (value) of the acceleration tube. This graph demonstrates that particle size strongly affects the way they move in the grind chamber. The formula allows to calculate the effective propulsion range of particles, depending on theirs' size, by presuming they have the maximum velocity.

**Keywords:** jet mill, grinding chamber, acceleration tube, particle, two-phase flow.

### REFERENCES

1. Akunov V.I. Experimental studies of installations for fine grinding with countercurrent jet mills. [Eksperimental'nyye issledovaniya ustanovok dlya tonkogo izmel'cheniya s protivotochnymi struynymi mel'nitsami]. Abstract. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. M: VNIINSM, 1961. 229 p. (rus)

2. Barakovskikh D.S., Shishkin S.F. The movement of a two-phase flow in the accelerating tube of a jet mill [Dvizheniye dvukhfaznogo potoka v razgonnoy trubke struynoy mel'nitsy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 5. Pp. 82–88. (rus)

3. Uvarov V.A. Development, research, methodology for calculating the design and technological parameters of countercurrent jet mills [Razrabotka,

issledovaniye, metodika raschota konstruktivno–tehnologicheskikh parametrov protivotochnykh struynykh mel'nits]. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Belgorod, 1961. 22 p. (rus)

4. Starchik Yu.Yu. A jet mill with a cylindrical grinding chamber [Struynaya mel'nitsa s tsilindricheskoy kameroy pomola]. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Belgorod, 2009. 22 p. (rus)

5. RF patent for invention No. 2000128608/03, 16.11.2000. Device for vortex grinding of materials [Ustroystvo dlya vikhrevogo izmel'cheniya materialov]. Patent of Russia No. 2000128608. 2001. Bogdanov V.S., Shopina E.V., Bulgakov S.B., Galushko R.V. (rus)

6. Sheremet E.O. Investigation of a pneumatic jet mill for obtaining microcement [Issledovaniye pnevmostruynoy mel'nitsy dlya polucheniya mikrotsementa]. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Belgorod, 2019. 22 p. (rus)

7. Encyclopedia of Mechanical Engineering. General plant equipment [Enciklopediya po mashinostroeniyu/Obschezavodskoe oborudovanie. System. demands: Web-browser (Internet Explorer). URL: <https://studfile.net/preview/7493544/page:15/> (date of the application 20.10.2020) (rus)

8. RF patent for invention No. 2019115765, 22.05.2019. Jet mill for ultrafine grinding [Struynaya

mel'nitsa dlya sverkh-tonkogo pomola]. Patent of Russia. No. 190985. 2019. Bul. No. 20. Dmitrienko V.G., Logachev I.N., Logachev K.I., Shemetov E.G., Shemetova O.M., Cherednichenko E.S. (rus)

9. Hegazy K. North America's expanding markets. World Cement. Emerging Markets. 2008. Pp. 65–70.

10. Stoiber W. Comminutoin technology and energy consumption. Cement International Vol. 2. 2003. Pp. 44–52.

11. Starchik Yu.Yu., Dmitrienko V.G., Shemetov E.G. Mathematical model for determining the velocities of an energy carrier in a jet mill with a cylindrical grinding chamber [Matematicheskaya model' opredeleniya skorostey energonositelya v struynoy mel'nitse s tsilindricheskoy kameroy pomola]. Mechanization in construction. 2016. Vol. 77. No. 5. Pp. 47–52. (rus)

12. Yang D. Grinding innovation. World Cement. 2008. Vol. 3. Pp. 43–44.

13. Reinhardt Y. Effective Finish Grinding. World Cement. 2008. Vol. 3. Pp. 93–95.

14. Ludwig, H. Influence of the Process Technology on the manufacture of the market oriented cement. Cement International. 2003. Vol. 6. Pp. 74–88.

15. Klyachko L.S. Equations of motion of dust particles in dust collection devices [Uraveniya dvizheniya pylevykh chastits v pylepriyomnykh ustroystvakh]. Heating and ventilation. No. 4. 1934. Pp. 27–29. (rus)

#### Information about the authors

**Dmitrienko Victor G.** PhD, E-mail: [v\\_dmitrienko@mail.ru](mailto:v_dmitrienko@mail.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Voronov Vitaly P.** PhD, Professor E-mail: [v.p.voronov2018@gmail.com](mailto:v.p.voronov2018@gmail.com). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Shemetov Evgeny G.** Postgraduate student. E-mail: [zshemetov@yandex.ru](mailto:zshemetov@yandex.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Shemetova, Olga M.** Postgraduate student. E-mail: [olga95kizilova@gmail.com](mailto:olga95kizilova@gmail.com). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

Received 01.02.2021

#### Для цитирования:

Дмитриенко В.Г., Воронов В.П., Шеметов Е.Г., Шеметова О.М. Математическое описание движения двухфазного потока на выходе из вертикальной разгонной трубки струйной мельницы с плоской полевой камерой торообразной формы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 82–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-82-86

#### For citation:

Dmitrienko V.G., Voronov V.P., Shemetov E.G., Shemetova O.M. Mathematical description of the two-phase flow motion at the outlet of the vertical acceleration tube of a jet mill with a plane grinding chamber of torus form. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 82–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-82-86