

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-108-113

*Семикопенко И.А., Беляев Д.А., Воронов В.П.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: semickopenko.i@yandex.ru

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ ИЗ КАМЕРЫ ПОМОЛА ДЕЗИНТЕГРАТОРА В ПЛОСКОСТИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ ОСИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРОВ В ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЙ ПОЛУБЕСКОНЕЧНЫЙ ПАТРУБОК

Аннотация. В последние десятилетия мельницы дезинтеграторного типа получили широкое распространение при измельчении, активации и смешении строительных материалов. На эффективность работы данных мельниц в значительной степени влияют конструктивные параметры рабочей камеры, загрузочного и разгрузочного узлов, а также некоторые технологические параметры, такие как частота вращения роторов. В данной статье предпринята попытка определить условия вылета частиц материала из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок и геометрические параметры данного патрубка, исходя из условий истечения двухфазной среды от внешнего ряда ударных элементов в зону разгрузки. Дана схема процесса истечения двухфазной среды из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок. При этом предполагается, что скорость движения двухфазной среды на данном участке не изменяется по модулю и длина тангенциального патрубка значительно больше его ширины.

В результате теоретических расчетов полученная формула, которая позволяет определить диаметр частиц, выходящих в тангенциальный разгрузочный патрубок с круговой траектории, а формулы, описывающие процесс поворота вектора скорости двухфазной среды при истечении в тангенциальный разгрузочный патрубок дезинтегратора.

Ключевые слова: дезинтегратор, камера помола, двухфазная среда, частица.

Дезинтеграторы являются эффективными машинами для помола, смешения и активации твердых сыпучих материалов [1]. Положительными факторами применения дезинтеграторов являются их компактность; гибкость переналадки; возможность автоматизации процесса; возможность варьирования параметров среды, введения функциональных добавок в момент измельчения, использования создаваемого роторами вентиляционного потока; относительно малая установленная мощность [6].

Однако ведущие производители данного типа оборудования продолжают поиски новых конструктивно-технических решений, что в свою очередь требует дополнений к существующей теории расчёта конструктивных и технологических параметров дезинтеграторов.

В данной статье поставлены задачи определения условия вылета частиц материала из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок и геометрических параметров данного патрубка, исходя из условий истечения воздушно-материальной среды от внешнего ряда ударных элементов в зону разгрузки.

На рис. 1 представлена схема процесса истечения двухфазной среды из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок.

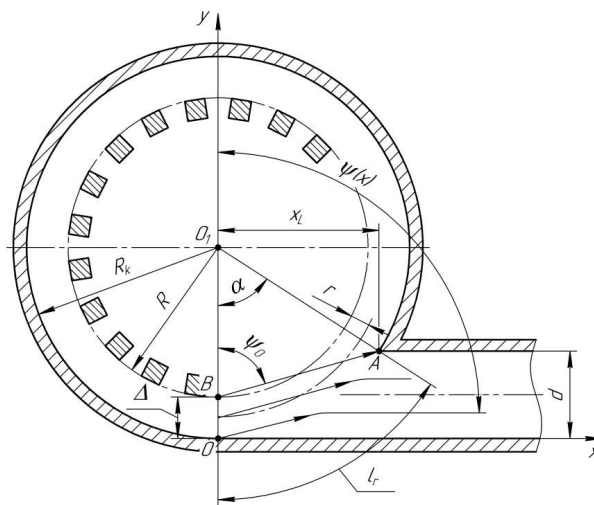


Рис. 1. Расчетная схема процесса истечения двухфазной среды из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок

Определим условия вылета частиц материала из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок в зависимости от конструктивных и технологических параметров.

Согласно расчётной схеме (рис. 1) для установившегося движения частиц материала в зазоре Δ между внутренней стенкой камеры помола дезинтегратора и внешним рядом ударных элементов запишем зависимость значения длины

участка l_r , соответствующее равновесной траектории движения частиц материала вблизи тангенциального разгрузочного патрубка:

$$l_r = (R+r) \cdot \alpha, \quad (1)$$

где α – угловой размер тангенциального разгрузочного патрубка, рад.

Здесь d – геометрический размер тангенциального патрубка в плоскости, перпендикулярной оси вращения роторов; Δ – радиальный зазор между внешним рядом ударных элементов и внутренней поверхностью корпуса; R – радиус внешнего ряда ударных элементов, R_k – внутренний радиус цилиндрического корпуса.

Угловой размер α связан с частотой вращения ω роторов дезинтегратора следующим соотношением:

$$\alpha = \omega \cdot t, \quad (2)$$

где t – время, за которое частица материала преодолевает участок длиной l_r , с.

Подстановка выражения (2) в (1) позволяет записать следующее выражение:

$$t = \frac{l_r}{(R+r) \cdot \omega}. \quad (3)$$

Для определения зависимости между радиальной скоростью \mathcal{G}_r частиц материала и их диаметром d_r во время движения по равновесной траектории радиусом « $R+r$ » воспользуемся известным выражением [7]:

$$\frac{m_r \mathcal{G}_r^2}{r+R} \leq 3\pi\mu d_r \mathcal{G}_r, \quad (4)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости запыленного воздуха в зазоре Δ , Па·с [8]; d_r – диаметр частицы, м; m_r – масса частицы, движущейся по траектории радиусом « $R+r$ », кг:

$$m_r = \frac{\pi \cdot d_r^3}{6} \cdot \gamma, \quad (5)$$

где γ – плотность частицы материала, кг/м³.

Также в выражении (4) введено следующее обозначение:

$$v_\varphi = \omega \cdot (r+R). \quad (6)$$

Подставив выражения (5) и (6) в (4) получим соотношение следующего вида:

$$\gamma \cdot \frac{d_r^2}{6} \cdot \omega^2 \cdot (r+R) \leq 3 \cdot \mu \cdot \mathcal{G}_r, \quad (7)$$

из которого выразим радиальную скорость частицы материала \mathcal{G}_r :

$$\mathcal{G}_r \geq \gamma \cdot \frac{\omega^2 \cdot d_r^2}{18 \cdot \mu} \cdot (r+R). \quad (8)$$

Известно, что для перехода частиц материала из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок необходимо, чтобы за время t (3) частица, двигаясь в радиальном направлении, прошла не меньшее расстояние, чем расстояние Δ_1 [9]:

$$\mathcal{G}_r \cdot t \geq \Delta_1, \quad (9)$$

где Δ_1 – значение минимального расстояния, необходимого для выхода частицы материала в тангенциальный разгрузочный патрубок с круговой траектории, м.

Подставив выражения (3) и (8) в (9) получим соотношение следующего вида:

$$\gamma \frac{\omega d_r^2}{18\mu} l_r \geq \Delta_1. \quad (10)$$

Для круговой траектории, равной:

$$r = \frac{d_1}{2}, \quad (11)$$

зададимся следующим условием перехода с неё частиц материала:

$$\Delta_1 = \Delta. \quad (12)$$

В соотношении (11) d_1 – диаметр частиц, совершающих переход из камеры помола в тангенциальный разгрузочный патрубок, м.

Применив выражения (11) и (12) к формулам (1) и (10) получим следующее соотношение:

$$\gamma \frac{\omega d_1^2}{18\mu} \left(R + \frac{d_1}{2} \right) \alpha \geq \Delta. \quad (13)$$

Заметим, что отношение:

$$\frac{d_1}{2 \cdot R} = 1, \quad (14)$$

является малой величиной первого порядка малости, которой можно пренебречь. Тогда на основании соотношения (13) определим диаметр частицы, выходящей в тангенциальный разгрузочный патрубок с круговой траектории (11):

$$d_1 \geq \sqrt{\frac{18\mu\Delta}{\gamma\omega\alpha R}}. \quad (15)$$

На рис. 2 представлена графическая зависимость, построенная на основании соотношения (15).

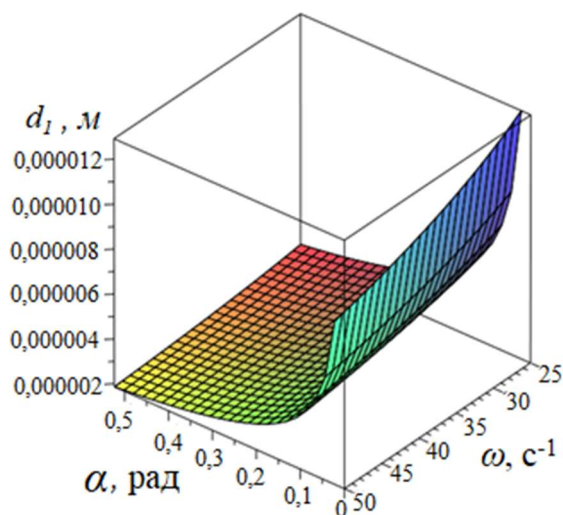


Рис. 2. График изменения диаметра частиц материала, выходящих в тангенциальный разгрузочный патрубок для следующих параметров: $R = 0,6 \text{ м}$, $\Delta = 0,1 \text{ м}$

Исходя из анализа графика, представленного на рисунке 2, делаем вывод, что при заданных условиях и конструктивно-технологических параметрах диапазон диаметров частиц, выходящих в тангенциальный разгрузочный патрубок из камеры помола дезинтегратора, находится в пределах от $8 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ до $12 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Так же из графика видно, что при увеличении частоты вращения роторов и углового размера тангенциального разгрузочного патрубка диаметр рассматриваемых частиц нелинейно уменьшается.

Далее рассмотрим процесс разворота скорости двухфазной среды при выходе последней из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный полубесконечный патрубок в плоскости, перпендикулярной оси вращения роторов.

Естественно предположить, что при установившемся движении двухфазной среды из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок происходит с постоянной по модулю скоростью движения среды:

$$\vec{v}^2 = const. \tag{16}$$

При этом происходит только разворот вектора скорости.

На основании расчетной схемы, представленной на рисунке 1, разворот вектора скорости \vec{v} будет описываться с помощью изменения угла $\psi(x)$ вдоль оси « ox ».

В силу сделанных выше предположений вектор скорости « xoy » можно представить в следующем виде:

$$\vec{v} = \{v_x, v_y, 0\}, \tag{17}$$

$$v_x = \sqrt{\vec{v}^2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi(x)\right) = \sqrt{\vec{v}^2} \cdot \sin \psi(x), \tag{18}$$

$$v_y = \sqrt{\vec{v}^2} \cos \psi(x). \tag{19}$$

Для нахождения координаты точки $A(X_L, d)$ рассмотрим уравнение окружности радиусом R_k в системе координат « xoy », представленной на рисунке 1:

$$x^2 + (y - R_k)^2 = R_k^2, \tag{20}$$

совместно с уравнением вертикальной прямой:

$$y = d. \tag{21}$$

Подстановка (21) в (20) приводит к следующему выражению:

$$x^2 + d^2 - 2dR_k = 0. \tag{22}$$

На основании (22) находим:

$$x_L = \sqrt{2d \cdot R_k - d^2}, \tag{23}$$

где d – размер тангенциального патрубка по оси « y ».

Уравнение прямой, соединяющей точки A и B , имеет вид:

$$y = \frac{x(d-\Delta)}{\sqrt{2d \cdot R_k - d^2}} + \Delta. \tag{24}$$

Исходя из выражения (24), находим значение угла в точке $x = 0$:

$$\psi(x = 0) = \psi_0 = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{d-\Delta}{\sqrt{2d \cdot R_k - d^2}}. \tag{25}$$

Для нахождения уравнения, описывающего изменение угла при движении двухфазной среды вдоль оси « ox », необходимо найти минимальное значение следующего функционала кинетической энергии:

$$E\left(\psi(x), \frac{d\psi}{dx}\right) = \rho \frac{\vec{v}^2}{2} \int [\cos^2 \psi(x) + x_L^2 (\nabla \vec{v})^2] dV, \tag{26}$$

где ρ – плотность двухфазной среды; x_L – расстояние, на котором происходит разворот вектора скорости, описываемый функцией $\psi(x)$ с граничными условиями вида:

при $x = 0 \quad \psi(0) = \psi_0, \quad \frac{d\psi}{dx} = 0, \quad (27)$

при $x = \infty \quad (x \gg x_L) \quad \psi(\infty) = \frac{\pi}{2}, \quad \frac{d\psi}{dx} = 0, \quad (28)$

Первое слагаемое в (26) представляет собой плотность единицы объема кинетической энергии потока вдоль оси « ou », а второе слагаемое представляет собой изменение плотности единицы объема энергии, затрачиваемой на разворот вектора скорости относительно оси « ou ».

Минимизация функционала (26), удовлетворяющая условиям (27) и (28), позволяет получить следующее уравнение:

$$x_L^2 \frac{d^2 \psi}{dx^2} + \sin \psi(x) \cdot \cos \psi(x) = 0. \quad (29)$$

Вычисление первого интеграла (29) приводит к следующему соотношению:

$$\left(\frac{d\psi}{dx}\right)^2 + \sin^2 \psi(x) = c_1. \quad (30)$$

Применив граничное условие (28) к (30) находим, что:

$$c_1 = 1. \quad (31)$$

С учетом (31) уравнение (30) принимает вид:

$$\frac{d\psi(x)}{\cos \psi(x)} = \pm \frac{dx}{x_L}. \quad (32)$$

Интегрирование уравнения (32) приводит к следующему результату:

$$\ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\psi(x)}{2} \right) \right| = \pm \frac{x}{x_L} + c_2. \quad (33)$$

Применив граничное условие (27) к соотношению (33), находим, что:

$$c_2 = \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\psi_0}{2} \right) \right|. \quad (34)$$

Подстановка (34) в (33) позволяет получить выражение, описывающее изменение угла поворота вектора скорости в тангенциальный патрубок:

$$\psi(x) = \frac{\pi}{2} - 2 \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\psi_0}{2} \right) \cdot \exp \left(-\frac{x}{x_L} \right) \right], \quad (35)$$

$$\vartheta_x = \sqrt{\vartheta^2} \cos \left[2 \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\psi_0}{2} \right) \cdot \exp \left(-\frac{x}{x_L} \right) \right) \right], \quad (36)$$

$$\vartheta_y = \sqrt{\vartheta^2} \sin \left[2 \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\psi_0}{2} \right) \cdot \exp \left(-\frac{x}{x_L} \right) \right) \right]. \quad (37)$$

Таким образом, полученные формулы (36) и (37) описывают процесс поворота вектора скорости двухфазной среды при истечении в тангенциальный разгрузочный патрубок дезинтегратора, а формула (35) описывает изменение угла поворота ψ вектора скорости двухфазного потока. Приведенные формулы позволяют определить оптимальные геометрические параметры тангенциального разгрузочного патрубка.

На рис. 3, 4 представлены графики, описывающие изменение угла поворота ψ вектора скорости двухфазного потока ϑ . При этом на рисунке 3 представлены кривые для разных значений расстояния x_L , а на рисунке 4 – для разных значений геометрического размера d тангенциального патрубка.

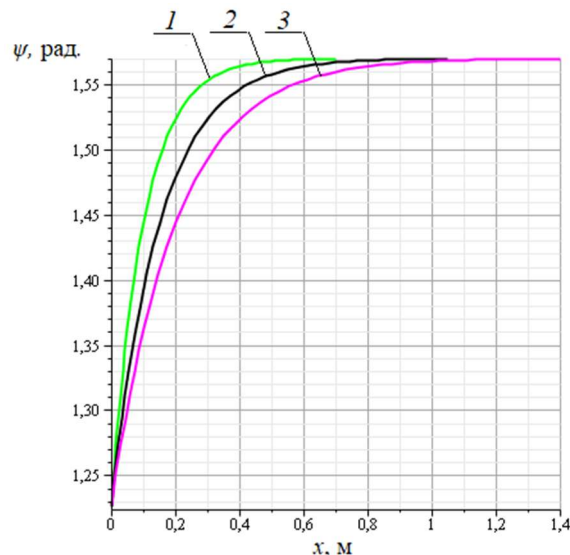


Рис. 3. Графики функции $\psi(x)$:
1 – $x_L = 0,1$ м; 2 – $x_L = 0,15$ м; 3 – $x_L = 0,2$ м

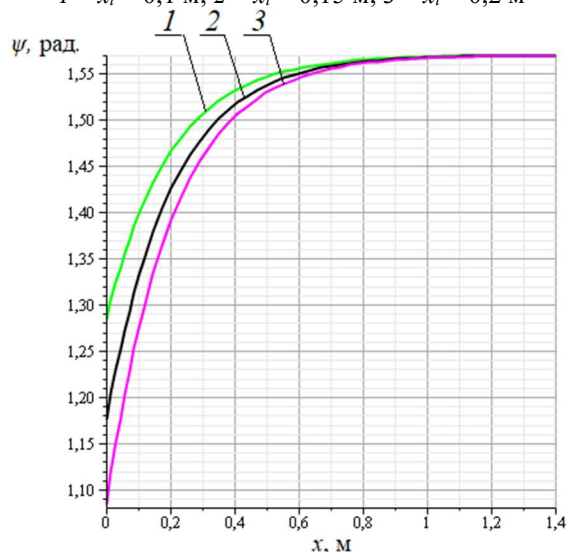


Рис. 4. Графики функции $\psi(x)$:
1 – $d = 0,04$ м; 2 – $d = 0,06$ м; 3 – $d = 0,08$ м

Анализ представленных графиков (рис. 3) показывает, что разворот вектора скорости ϑ двухфазного потока происходит на расстоянии $6 \cdot x_L$, чему соответствует значение угла поворота ψ равное 1,57 рад. или 90 град.

Графики, представленные на рисунке 4 показывают, что чем больше значение диаметра разгрузочного патрубка, тем большая его длина необходима для разворота двухфазного потока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хинт И.А. Основы производства силикалитных изделий. М.: Стройиздат, 1962. 636 с.
2. Кухлинг Х. Справочник по физике. М., Мир, 1985. 196 с.
3. Богданов В.С., Семикопенко И.А., Масловская А.Н., Александрова Е.Б. Дезинтегратор с повышенными нагрузками на измельчаемый материал // Строительные и дорожные машины. 2009. №5. С. 51–54.
4. Данилов Р.Г. Гипотеза механизма тонкого измельчения в роторных мельницах с зубчатоподобным зацеплением // Промышленность стройматериалов и стройиндустрия. Энерго- и ресурсосбережение в условиях рыночных отношений: Сб. докл. Междунар. конф. Ч.4. Белгород, 1997. С. 164–168.
5. Богданов В.С., Семикопенко И.А., Воронов В.П. Дезинтеграторы. Конструкции. Теория. Эксперимент. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. 235 с.
6. Сиваченко Л.А. Современное технологическое машиностроение. Основные положения // Инженер-механик. 2010. № 4. С. 10–20.
7. Воронов В.П., Семикопенко И.А., Пензев П.П., Вялых С.В., Гордеев С.И. Определение условия выхода частиц материала в разгрузочный патрубок камеры помола дезинтегратора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №2. С. 90–91.
8. Ключков Н.В., Блиничев В.Н., Бобков С.П., Пискунов А.В. Методика расчета расхода воздуха в центробежно-ударной мельнице // Известия ВУЗов. Химия и хим. технология. 1982. №2. С. 230–232.
9. Семикопенко И.А., Вялых С.В., Жуков А.А. Агрегат дезинтеграторного типа с внутренней классификацией материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №3. С. 74–76.

Информация об авторах

Семикопенко Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: semickopencko.i@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Беляев Денис Александрович, аспирант, кафедры механического оборудования. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Воронов Виталий Павлович, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры механического оборудования. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в 24.09.2019

© Семикопенко И.А., Беляев Д.А., Воронов В.П., 2020

***Semikopenko I.A., Belyaev D.A., Voronov V.P.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: semickopencko.i@yandex.ru*

DESCRIPTION OF THE PROCESS OF A TWO-PHASE MEDIUM FLOW FROM THE DISINTEGRATOR GRINDING CHAMBER IN A PLANE PERPENDICULAR TO THE AXIS OF ROTATION OF THE ROTORS INTO A TANGENTIAL SEMI-INFINITE BRANCH PIPE

Abstract. *In recent decades, disintegrator type mills have become widely used for grinding, activating and mixing construction materials. The efficiency of these mills is largely influenced by the design parameters of the working chamber, loading and unloading units, as well as some technological parameters, such as the speed of rotation of the rotors. In this article, an attempt is made to determine the conditions for the departure of material particles from the disintegrator grinding chamber into the tangential discharge pipe and the geometric parameters of this pipe, based on the conditions for the flow of a two-phase medium from the external row of shock elements to the discharge zone. Figure 1 shows the flow diagram of the two-phase medium from the disintegrator grinding chamber to the tangential discharge pipe. It is assumed that the speed of movement of the two-phase medium in this section does not change modulo and the length of the tangential branch pipe is significantly greater than its width. The results of this article can be used to design the discharge unit of the disintegrator with a tangentially located discharge pipe.*

Keywords: *disintegrator, the grinding chamber, two-phase medium, particles.*

REFERENCES

1. Hint I.A. Fundamentals of production silicate products [Osnovy proizvodstva silikal'citnyh izdeliy]. M.: Stroyizdat, 1962. 636 p. (rus)
2. Kuhlning X. Handbook of physics [Spravochnik po fizike]. M., Mir, 1985. 196 p. (rus)
3. Bogdanov V.S., Semikopenko I.A., Maslovskaya A.N., Aleksandrova E.B. Disintegrator with increased loads on the crushed material [Dezintegratory povyshennymi nagruzkami na izmel'chayemyy material] Construction and road machinery. 2009. No. 5. Pp. 51–54. (rus)
4. Danilov R.G. The hypothesis of the mechanism of fine grinding in rotary mills with gear-like gearing [Gipoteza mehanizma tonkogo izmel'cheniya v rotornyh mel'nichah s zubchatopodobnym zacepleniem]. Promyshlennost' stroymaterialov i stroyindustriya. Sb. dokl. Mezhdunar. konf. Ch.4. Belgorod, 1997. Pp. 164–168. (rus)
5. Bogdanov V.S., Semikopenko I.A., Voronov V.P. Disintegrators. Designs. Theory. Experiment [Dezintegratory. Konstrukcii. Teoriya. Eksperiment]. Belgorod: BGTU. 2016, 235 p. (rus)
6. Sivachenko L.A. Modern technological machine-building. Basic principles [Sovremennoe tekhnologicheskoe mashinostroenie. Osnovnye polozheniya]. Mechanical engineer. 2010. No. 4. Pp. 10–20. (rus)
7. Voronov V.P., Semikopenko I.A., Penzev P.P., Vyalykh S.V., Gordeev S.I. Determining the conditions for the release of material particles into the discharge pipe of the disintegrator grinding chamber [Opredelenie usloviya vyhoda chastic materiala v razgruzochnyj patrubok kamery pomola dezintegratora]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2011. No. 2. Pp. 90–91. (rus)
8. Klochkov N.V., Blinichev V.N., Bobkov S.P., Piskunov A.V. The method of calculating air flow in a centrifugal impact mill [Metodika rascheta raskhoda vozduha v centrobezhno-udarnoj mel'nice]. News of universities. Chemistry and chem. technology. 1982. No. 2. Pp. 230–232. (rus)
9. Semikopenko I.A., Vyalykh S.V., Zhukov A.A. Disintegrator type unit with internal material classification [Agregat dezintegratornogo tipa s vnutrennej klassifikaciej materiala]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 3. Pp. 74–76.

Information about the authors

Semikopenko, Igor A. PhD, Assistant professor. E-mail: semikopenko.i@yandex.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Belyaev, Denis A. Research assistant. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Voronov, Vitaly P. DSc, Professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 24.09.2019

Для цитирования:

Семикопенко И.А., Беляев Д.А., Воронов В.П. Описание процесса истечения двухфазной среды из камеры помола дезинтегратора в плоскости, перпендикулярной оси вращения роторов в тангенциальный полубесконечный патрубок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 4. С. 108–113. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-108-113

For citation:

Semikopenko I.A., Belyaev D.A., Voronov V.P. Description of the process of a two-phase medium flow from the disintegrator grinding chamber in a plane perpendicular to the axis of rotation of the rotors into a tangential semi-infinite branch pipe. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 4. Pp. 108–113. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-108-113