

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-8-96-100

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

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

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

## ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ МАТЕРИАЛА В МЕЖДУРЯДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ДЕЗИНТЕГРАТОРА С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ МЕЖДУРЯДНЫМ РАССТОЯНИЕМ

**Аннотация.** В настоящее время дезинтеграторы являются одним из видов оборудования, применяемого при помолу и смешении различных материалов. Преимуществами дезинтеграторов являются возможность регулирования частоты вращения роторов и изменения геометрических параметров для получения продукта помола с требуемым зерновым составом, а также простота конструкции. В предлагаемой работе в результате теоретических исследований получены аналитические выражения, в которых дано определение радиального размера между смежными рядами ударных элементов камеры помола с периодически изменяющимся расстоянием. Данное изменение радиального размера имеет высокочастотный характер, что предопределяет разрушение частиц материала под действием возникающих в них касательных напряжений. Для проведения необходимых преобразований в статье представлена расчетная схема камеры помола дезинтегратора с изменяющимся радиальным расстоянием между смежными рядами. В междурядном пространстве из-за неравенства окружных скоростей движущихся частиц возникают касательные напряжения, действующие на данные частицы. Согласно результату работы величина касательных напряжений в междурядном пространстве зависит от окружной скорости частицы, коэффициента псевдовязкого измельчения потока и величины междурядного расстояния. Величину междурядного расстояния в силу периодического характера можно представить в зависимости от амплитуды изменения данного расстояния и угла, отсчитываемого от начального направления оси. Решая дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными, можно определить начальное и конечное значение скорости частицы в области  $(0 \leq \varphi \leq \pi/2)$  междурядного пространства переменного сечения. Разрушение частицы материала в области с периодически изменяющимся расстоянием будет осуществляться в случае, если изменение кинетической энергии частицы будет превышать работу по ее разрушению в результате соударения.

**Ключевые слова:** дезинтегратор, междурядное пространство, частица.

Дезинтеграторы как в нашей стране, так и за рубежом в последние десятилетия эффективно используются во многих отраслях промышленности для помола различных материалов, их смешения и активации [1]. Широкое применение дезинтеграторов обусловлено простотой их конструкции, компактностью и возможностью регулирования параметров в значительных пределах. Вследствие этого, видится актуальной задача определения условия разрушения частиц материала в дезинтеграторе с модернизированной камерой помола, обеспечивающей изменение характера нагрузок на измельчаемый материал.

Описать движение частиц измельчаемого материала в междурядном пространстве ударных элементов дезинтегратора (рис. 1) [2], значения которого периодически изменяются от  $\Delta_{min}$  до  $\Delta_{max}$  и обратно можно следующим уравнением:

$$F_{\Delta} = m_0 \frac{dU_t}{dt}, \quad (1)$$

где  $F_{\Delta}$  – величина силы, действующей на частицу измельчаемого материала, Н;  $m_0$  – масса частицы измельчаемого материала, кг;  $U_t$  – скорость частицы материала в периодически изменяющемся междурядном пространстве, м/с;  $t$  – текущее время, с.

При движении частицы материала в периодически изменяющемся междурядном пространстве дезинтегратора, её скорость также меняется, вследствие чего возникают касательные напряжения  $\tau$ . Зависимость действующей на частицу силы  $F_{\Delta}$  от касательных напряжений выражается следующим соотношением [3]:

$$F_{\Delta} = \tau \cdot S_0, \quad (2)$$

где  $S_0$  – площадь поперечного сечения частицы, м<sup>2</sup>. При условии, что частица имеет сферическую форму, данная величина равна:

$$S_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}, \quad (3)$$

где  $d_0$  – диаметр частицы материала, м.

Согласно результату работы [4] касательные напряжения в междурядном пространстве равны:

$$\tau = \frac{\mu_{op} U_t}{\Delta}, \quad (4)$$

где  $\mu_{op}$  – коэффициент псевдовязкого измельчения, равный 2618 Па·с [4];  $\Delta$  – междурядное расстояние, м.

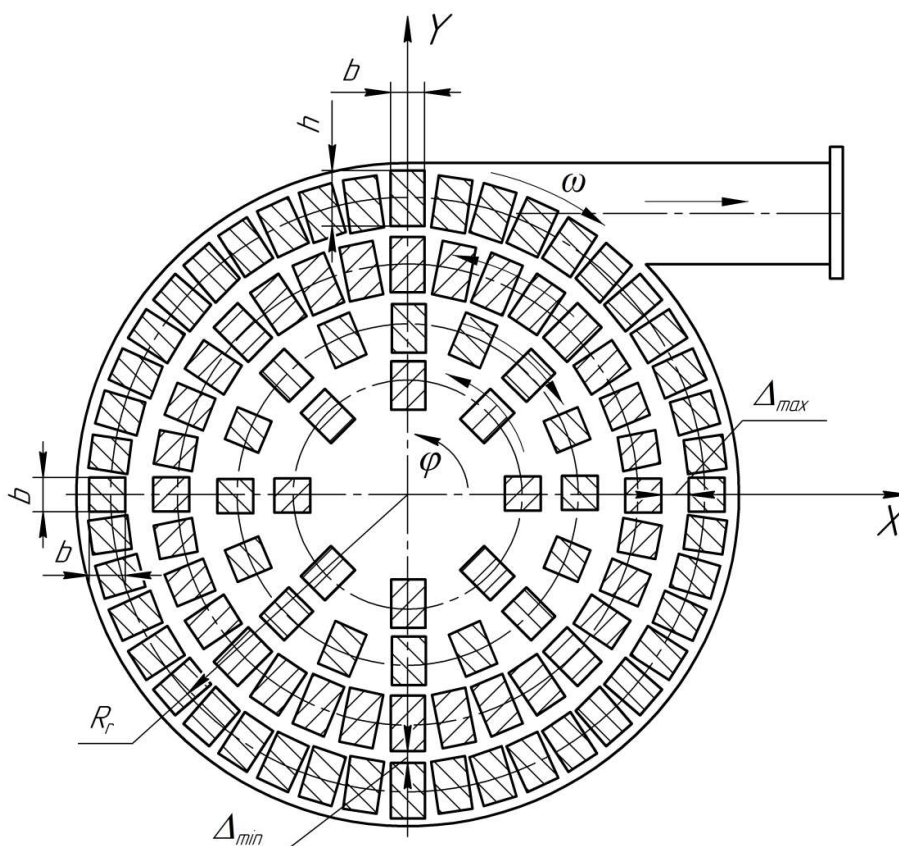


Рис. 1. Схема камеры помола дезинтегратора с изменяющимся междурядным расстоянием

Величину междурядного пространства в силу периодического характера можно представить в виде:

$$\Delta = \Delta_0 \cdot \sin(\varphi + \varphi_0), \quad (5)$$

где  $\Delta_0$  – амплитуда изменяющегося междурядного пространства, м;  $\varphi_0$  – значение начальной фазы;  $\varphi$  – угол, отсчитываемый от начального направления оси «x» (рис. 1).

Значения параметров  $\Delta_0$  и  $\varphi_0$  можно найти на основании следующих соотношений:  
при  $\varphi = 0$

$$\Delta = \Delta_{max} = \Delta_0 \sin \varphi_0; \quad (6)$$

при  $\varphi = \frac{\pi}{2}$

$$\Delta = \Delta_{min} = \Delta_0 \cos \varphi_0; \quad (7)$$

при  $\varphi = \pi$

$$\Delta = -\Delta_{max} = -\Delta_0 \sin \varphi_0; \quad (8)$$

при  $\varphi = \frac{3\pi}{2}$

$$\Delta = -\Delta_{min} = -\Delta_0 \cos \varphi_0. \quad (9)$$

На основании (6) – (9) получим:

$$\varphi_0 = \arctg \left( \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{min}} \right); \quad (10)$$

$$\Delta_0 = \frac{\Delta_{min}}{\cos \varphi_0} = \sqrt{\Delta_{min}^2 + \Delta_{max}^2}. \quad (11)$$

С учетом (10) и (11) формула (5) принимает вид:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{min}^2 + \Delta_{max}^2} \cdot \cos \left( \varphi + \arctg \left( \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{min}} \right) \right). \quad (12)$$

Если частица имеет сферическую форму, то её масса будет равна:

$$m_0 = \rho_0 \frac{\pi d_0^3}{6}, \quad (13)$$

где  $\rho_0$  – плотность частицы измельчаемого материала, кг/м<sup>3</sup>.

Подставив (2), (3), (4), (5), (13) в уравнение (1), получим следующее выражение:

$$\omega \frac{dU_t}{d\varphi} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\mu_{op} U_t}{\rho_0 d_0 \Delta_0 \sin(\varphi + \varphi_0)}. \quad (14)$$

Тогда, разделив переменные в дифференциальном уравнении (14), получим следующее соотношение:

$$\frac{dU_t}{U_t} = \alpha_0 \frac{d\varphi}{\sin(\varphi+\varphi_0)}, \quad (15)$$

здесь  $\alpha_0$  обозначает следующее:

$$\alpha_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\mu_{op}}{\omega \Delta_0 \rho_0 d_0}. \quad (16)$$

Согласно расчетной схеме (рисунок 1), проинтегрируем уравнение (15) в определенных пределах:

$$\int_{U_0}^{U_k} \frac{dU_t}{U_t} = \alpha_0 \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sin(\varphi+\varphi_0)}, \quad (17)$$

где  $U_0, U_k$  – соответственно начальная и конечная скорость частицы в области ( $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ ) междурядного пространства переменного сечения.

Вычисление определенных интегралов в (17) позволяет получить следующий результат:

$$\ln \left| \frac{U_k}{U_0} \right| = \alpha_0 \ln \left| \frac{tg\left(\frac{\pi+\varphi_0}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{tg\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)} \right|. \quad (18)$$

После математических преобразований уравнения (18), получим:

$$U_k = U_0 \left[ \frac{tg\left(\frac{\pi+\varphi_0}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{tg\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)} \right]^{\alpha_0}. \quad (19)$$

Процесс разрушения частицы измельчаемого материала в междурядном пространстве с периодически изменяющимся расстоянием (5) будет осуществляться в следующем случае [4]:

$$\Delta E_k \geq \frac{\pi \sigma_p^2 d_0^3}{12E}, \quad (20)$$

где  $\sigma_p$  – предельное растягивающее напряжение измельчаемого материала;  $E$  – Модуль Юнга измельчаемого материала;  $\Delta E_k$  – величина изменения кинетической энергии частицы измельчаемого материала в результате её движения в междурядном пространстве дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием, определить которую можно следующим соотношением [5]:

$$\Delta E_k = \frac{m_0}{2} (U_k^2 - U_0^2). \quad (21)$$

В результате подстановки (13) в (19) получим следующее соотношение:

$$U_0^2 \geq \frac{\sigma_p^2}{E \cdot \rho_0 \left[ \left( \frac{tg\left(\frac{\pi+\varphi_0}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{tg\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)} \right)^{2\alpha_0} - 1 \right]}. \quad (22)$$

Предположим, что начальная скорость частицы  $U_0$  в междурядном пространстве дезинтегратора связана с частотой вращения роторов следующим соотношением:

$$U_0 = \omega \cdot R_r, \quad (23)$$

где  $\omega$  – частота вращения роторов дезинтегратора;  $R_r$  – радиус рассматриваемого ряда ударных элементов.

На основании (23) и (22) имеем:

$$R_r \geq \frac{U_r}{\omega}, \quad (24)$$

здесь введено следующее обозначение:

$$U_r = \frac{\sigma_p}{\sqrt{E \cdot \rho_0 \left[ \left( \frac{tg\left(\frac{\pi+\varphi_0}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{tg\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)} \right)^{2\alpha_0} - 1 \right]}}. \quad (25)$$

Таким образом, полученные в результате данных теоретических исследований аналитические выражения (24) и (25) определяют радиальный размер между смежными рядами ударных элементов камеры помола дезинтегратора с периодически изменяющимся зазором (5), в котором под действием возникающих в частицах материала касательных напряжений (4), может происходить их разрушение.

На рис. 2 представлена графическая зависимость радиального размера переменного пространства от отношения максимального междурядного зазора к минимальному и частоты вращения роторов дезинтегратора.

Из рисунка видно, что отношение максимального значения междурядного зазора к его минимальному значению при фиксированном значении частоты вращения роторов на внутренних рядах ударных элементов больше, чем на внешних. Это можно объяснить тем, что при движении частиц от центра камеры помола к её периферии уменьшаются размеры частиц. С ростом частоты вращения при  $\frac{S_{max}}{S_{min}} = \text{const}$  наблюдается уменьшение радиального размера переменного пространства, что также объясняется увеличением нагрузок на частицы и уменьшением их размеров.

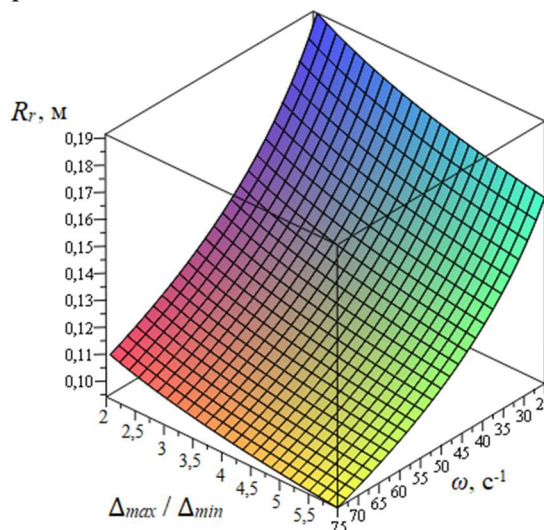


Рис. 2. Графическая зависимость радиального размера междурядного пространства  $R_r$  от угловой скорости  $\omega$  и отношения междурядных зазоров  $\Delta_{max} / \Delta_{min}$ .

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Хинт И.А. Основы производства силикатных 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. Монография. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. 235 с.

*Информация об авторах*

**Семикопенко Игорь Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: semikopenko.i@yandex.ru. 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.

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

Поступила в 18.04.2019.

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

**\*Semikopenko I.A., Voronov V.P., Belyaev D.A.**  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova  
\*E-mail: semikopenko.i@yandex.ru

**DESCRIPTION OF THE PROCESS OF MOVEMENT OF A MATERIAL PARTICLE  
IN THE INTER-ROW SPACE OF A DISINTEGRATOR WITH A CHANGING  
INTER-ROW DISTANCE**

**Abstract.** Currently, disintegrators are one of the types of equipment used for grinding and mixing various materials. The advantages of disintegrators are the ability to control the speed of rotation of the rotors and change the geometric parameters to obtain a grinding product with the desired grain composition, as well as the simplicity of the design. In this paper, as a result of theoretical research, analytical expressions are obtained, which define the radial size between adjacent rows of impact elements of the grinding chamber with a periodically varying distance. This change in the radial size has a high-frequency character, which determines the destruction of material particles under the influence of tangential stresses arising in them. To perform the necessary transformations, the article presents a design scheme of the disintegrator grinding chamber with a changing radial distance between adjacent rows. In the inter-row space, due to the inequality of the circumferential velocities of moving particles, tangential stresses acting on these particles occur. According to the result of, the value of tangent stresses in the inter-row space depends on the circumferential velocity of the particle, the coefficient of pseudo-viscous flow grinding and the value of the inter-row distance. The value of the row spacing, due to its periodic nature, can be represented as a function of the amplitude of the change in this distance and the angle measured from the initial direction of the axis. By solving a first-order differential equation with separable variables, it is possible to determine the initial and final value of the particle velocity in the region ( $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ ) of an inter-row space of variable cross-section. The destruction of a material particle in an area with a periodically changing distance will be carried out if the change in the kinetic energy of the particle exceeds the work on its destruction as a result of collision.

**Keywords:** disintegrator, inter-row space, particle.

**REFERENCES**

1. Hint I.A. Basics of the production of silicate products [Osnovy proizvodstva silikal'citnyh

izdelyi]. Moscow: Stroyizdat, 1962. 636 p. (rus)

2. Kuhling X. Physics reference book [Sppavochnik po fizike.]. M., Mir, 1985. 196 p.

3. Bogdanov V.S., Semikopenko I.A.,

Maslovskaya A.N., Alexandrova E.B. Disintegrator with increased loads on the crushed material. Construction and road vehicles. 2009. No. 5. Pp. 51–54. (rus)

4. Danilov R.G. Hypothesis of the mechanism of fine grinding in rotary mills with a gear-like gearing [Gipoteza mehanizma tonkogo izmel'cheniya v rotornyh mel'nichah s zubchatopodobnym zacepleniem]. Construction

materials industry and construction industry. Energy and resource saving in the conditions of market relations: Sat. report Int. conf. Part 4. Belgorod, 1997. Pp. 164–168. (rus)

5. Bogdanov V.S., Semikopenko I.A., Voronov V.P. Disintegrators Constructions. Theory. Experiment. Monograph [Dezintegratory. Konstrukcii. Teoriya. Eksperiment]. Belgorod, BSTU im. V.G. Shukhova, 2016. 235 p. (rus)

*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.

**Voronov, Vitaly P.** DSc, Professor. 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.

---

*Received 18.04.2019*

**Для цитирования:**

Семикопенко И.А., Воронов В.П., Беляев Д.А. Описание процесса движения частицы материала в междурядном пространстве дезинтегратора с изменяющимся междурядным расстоянием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 8. С. 96–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-8-96-100

**For citation:**

Semikopenko I.A., Voronov V.P., Belyaev D.A. Description of the process of movement of a material particle in the inter-row space of a disintegrator with a changing inter-row distance. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 8. Pp. 96–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-8-96-100