

DOI: 10.34031/article_5da463e3b2fce8.88813745

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

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

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

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

КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ ЧАСТИЦ МАТЕРИАЛА В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ В РАМКАХ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Аннотация. Дезинтеграторы являются одним из видов оборудования, которое имеет возможность совмещения помола, смешения и активации материалов средней прочности и твердости. Преимуществами дезинтеграторов являются возможность встраивания в существующие технологические схемы и получение продукта помола с заданным гранулометрическим составом, а также простота конструкции. В данной статье дан анализ кинетики разрушения частиц в междурядных пространствах камеры помола дезинтегратора. Представлена схема камеры помола дезинтегратора. Математическое описание ударного разрушения частиц в камере помола рассмотрено в рамках неоднородного Марковского процесса. Представлено уравнение, описывающее изменение статистической величины $m(t)$ – математического ожидания. Высказано предположение, что интенсивность Марковского процесса (λ) пропорциональна частоте (ω) вращения роторов, умноженной на функцию времени $f(t)$. Данная функциональная зависимость определяется из условия одинакового времени взаимодействия τ_0 частицы материала в междурядных пространствах камеры помола. Если предположить, что вероятность разрушения частиц материала при взаимодействии с каждым ударным элементом является постоянной величиной, тогда величина математического ожидания $m(t)$ будет пропорциональна числу частиц $n(t)$. Полученное соотношение (11) определяет закон изменения числа частиц при прохождении каждого ряда ударных элементов. В статье выведены формулы для определения изменения числа частиц в каждом междурядном пространстве камеры помола. Полученные соотношения (24) и (25) описывают кинетику измельчения частиц материала в камере помола дезинтегратора в рамках статистического подхода и дают возможность определения взаимосвязи между размером исходных частиц и размером продукта помола.

Ключевые слова: дезинтегратор, разрушение, частица, камера помола.

Введение. Дезинтеграторы являются одним из основных видов оборудования в промышленности строительных материалов, обеспечивающего совмещение процессов помола и смешения различных компонентов [1].

Математическое описание ударного разрушения частиц материала в камере помола дезинтегратора рассмотрим в рамках неоднородного Марковского процесса [2].

Основываясь на представлении о неоднородном Марковском процессе «рождения», запишем следующее уравнение, описывающее изменение статистической величины $m(t)$ – математического ожидания [3]:

$$\frac{dm(t)}{dt} = \lambda \cdot m(t), \quad (1)$$

где λ – интенсивность Марковского процесса. При определении зависимости величины λ от времени будем исходить из предположения, что данная величина пропорциональна частоте вращения ω роторов дезинтегратора, умноженной на функцию времени $f(t)$:

$$\lambda(t) = k \cdot \omega \cdot f(t), \quad (2)$$

где k – коэффициент пропорциональности, который зависит от формы и размера ударных элементов ротора дезинтегратора.

Функциональную зависимость $f(t)$ можно найти из условия того, что конструктивное расположение ударных элементов роторов дезинтегратора (рисунок 1) способствует тому, что все частицы материала подвергаются ударному взаимодействию в течение времени τ_0 нахождения в междурядном пространстве (ячейке). На основании сказанного имеем:

$$f(t) = 1 - \frac{t}{\tau_0}. \quad (3)$$

Если предположить, что вероятность разрушения частиц материала при ударном взаимодействии с каждым ударным элементом является постоянной величиной, тогда величина математического ожидания будет пропорциональна числу частиц материала $n(t)$. На основании сказанного уравнение (1) с учетом (2) и (3) примет вид:

$$\frac{dn(t)}{dt} = k \cdot \omega \cdot \left(1 - \frac{t}{\tau_0}\right) \cdot n(t). \quad (4)$$

Решение уравнения (4) должно удовлетворять начальному условию:

$$n(t = 0) = n_0, \quad (5)$$

здесь n_0 – начальное число частиц, поступающее на первый ряд ударных элементов.

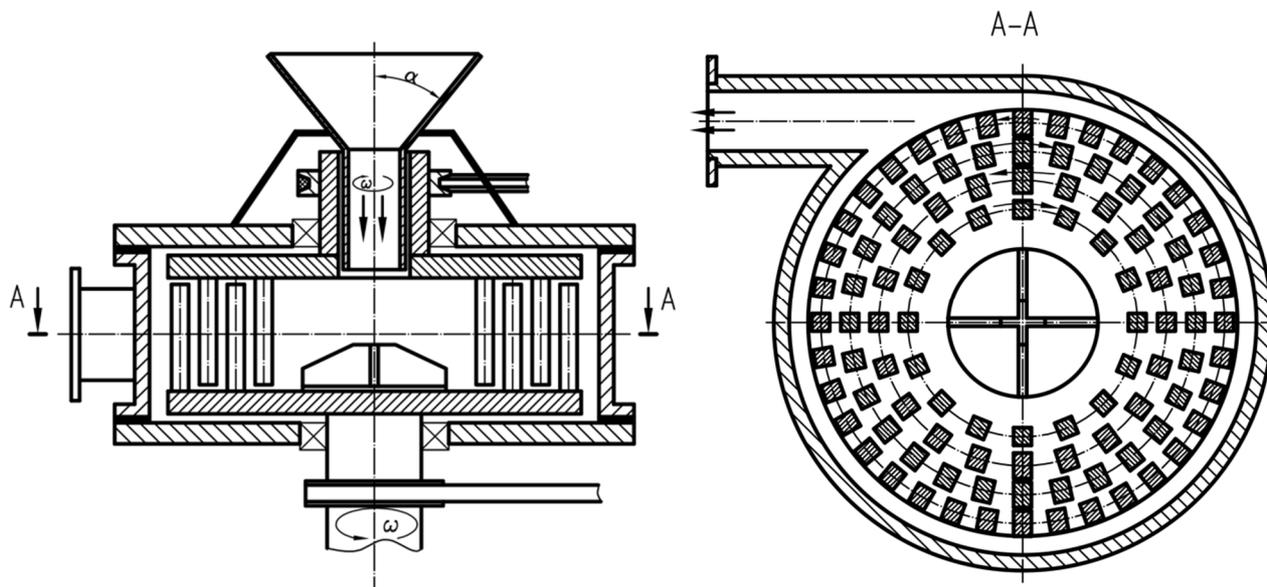


Рис. 1. Схема камеры помола дезинтегратора

Значение величины n_0 можно найти на основании следующих соотношений (рис. 1):

$$n_0 \cdot \frac{\pi d_0^3}{6} = Q_0, \quad (6)$$

$$Q_0 = (2 \cdot R_{ш} \cdot \beta_0)^{\frac{5}{2}} \cdot \tau_0 \cdot \sqrt{\frac{g}{tg\alpha}}, \quad (7)$$

$$n_0 = \frac{6Q_0}{\pi d_0^3}, \quad (8)$$

$$\beta_0 = \left(\frac{\Omega^2 h^2 tg\alpha \varphi^2}{4R_{ш}g} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (9)$$

где d_0 – среднее значение диаметра частицы загружаемого материала; Q_0 – пропускная способность; $R_{ш}$ – радиус трубы шнека; h – шаг шнека; Ω – частота вращения шнека; g – ускорение свободного падения; α – угол наклона стенки бункера к вертикали.

Интегрирование уравнения (4) приводит к следующему результату:

$$\ln(n(t)) = k \cdot \omega \cdot \left(t - \frac{t^2}{2\tau_0} \right) + \ln const. \quad (10)$$

Применив равенство (5) к (10) находим:

$$const = n_0. \quad (11)$$

Подстановка (11) в (10) приводит к результату

$$n(t) = n_0 \exp \left(k \cdot \omega \cdot \left(t - \frac{t^2}{2\tau_0} \right) \right). \quad (12)$$

Полученное соотношение (12) определяет закон изменения числа частиц при прохождении каждого ряда ударных элементов.

Число частиц, образовавшихся после взаимодействия с ударными элементами первого ряда ударных элементов:

$$n_{k_1} = n(t = \tau_0) = n_0 \exp \left(\frac{k \cdot \omega \cdot \tau_0}{2} \right). \quad (13)$$

Изменение числа частиц материала в между-рядном пространстве первого и второго рядов определяется формулой (12), в которой в качестве n_0 необходимо подставить (13):

$$n_2(t) = n_0 \cdot \exp \left(\frac{k \cdot \omega \cdot \tau_0}{2} \right) \cdot \exp \left(k \cdot \omega \cdot \left(t - \frac{t^2}{2\tau_0} \right) \right). \quad (14)$$

На основании (14) число частиц, образовавшихся после взаимодействия с ударными элементами второго ряда:

$$n_{k_2} = n_2(t = \tau_0) = n_0 \cdot \exp(k \cdot \omega \cdot \tau_0). \quad (15)$$

Изменение числа частиц материала в между-рядном пространстве второго и третьего ряда ударных элементов дезинтегратора также будет определяться формулой (12), в которой необходимо сделать следующую замену:

$$n_0 \rightarrow n_{k_2} = n_0 \exp(k \cdot \omega \cdot \tau_0), \quad (16)$$

поэтому с учетом (16) формула (12) принимает вид:

$$n_3(t) = n_0 \cdot \exp(k \cdot \omega \cdot \tau_0) \cdot \exp \left(k \cdot \omega \cdot \left(t - \frac{t^2}{2\tau_0} \right) \right). \quad (17)$$

На основании (17) число частиц материала на выходе с третьего ряда ударных элементов камеры помола дезинтегратора будет равно:

$$n_{k_3} = n_3(t = \tau_0) = n_0 \cdot \exp \left(\frac{3}{2} \cdot k \cdot \omega \cdot \tau_0 \right). \quad (18)$$

Изменение числа частиц материала в пространстве между третьим и четвертым рядом ударных элементов можно найти, если в формуле (12) произвести очевидную замену:

$$n_0 \rightarrow n_3(t = \tau_0) = n_{k_3} = n_0 \exp \left(\frac{3}{2} \cdot k \cdot \omega \cdot \tau_0 \right). \quad (19)$$

Подстановка (19) в (12) приводит к соотношению

$$n_4(t) = n_0 \cdot \exp\left(\frac{3}{2} \cdot k \cdot \omega \cdot \tau_0\right) \cdot \exp\left(k \cdot \omega \left(t - \frac{t^2}{2\tau_0}\right)\right). \quad (20)$$

На основании (20) находим число частиц материала на выходе с последнего ряда ударных элементов камеры помола дезинтегратора:

$$n_k = n_4(t = \tau_0) = n_0 \cdot \exp(2k \cdot \omega \cdot \tau_0). \quad (21)$$

С другой стороны, значение числа n_k в готовом продукте на выходе из камеры помола дезинтегратора можно найти на основании очевидного равенства:

$$\frac{\pi d_k^3}{6} \cdot n_k = V_k, \quad (22)$$

где d_k – средний размер (диаметр) готового продукта в объёме V_k .

На основании (22):

$$n_k = \frac{6V_k}{\pi d_k^3}. \quad (23)$$

Подстановка (23) в (21) с учетом (8) позволяет получить соотношение:

$$\frac{6V_k}{\pi d_k^3} = \frac{6Q_0}{\pi d_0^3} \cdot \exp(2k \cdot \omega \cdot \tau_0). \quad (24)$$

На основании (24) находим:

$$d_k = \xi \cdot d_0, \quad (25)$$

где введено следующее обозначение:

$$\xi = \sqrt[3]{\frac{V_k}{Q_0}} \cdot \exp\left(-\frac{2}{3} k \cdot \omega \cdot \tau_0\right). \quad (26)$$

Таким образом, полученные соотношения (25) и (26) описывают кинетику измельчения частиц материала в камере помола дезинтегратора в рамках статистического подхода.

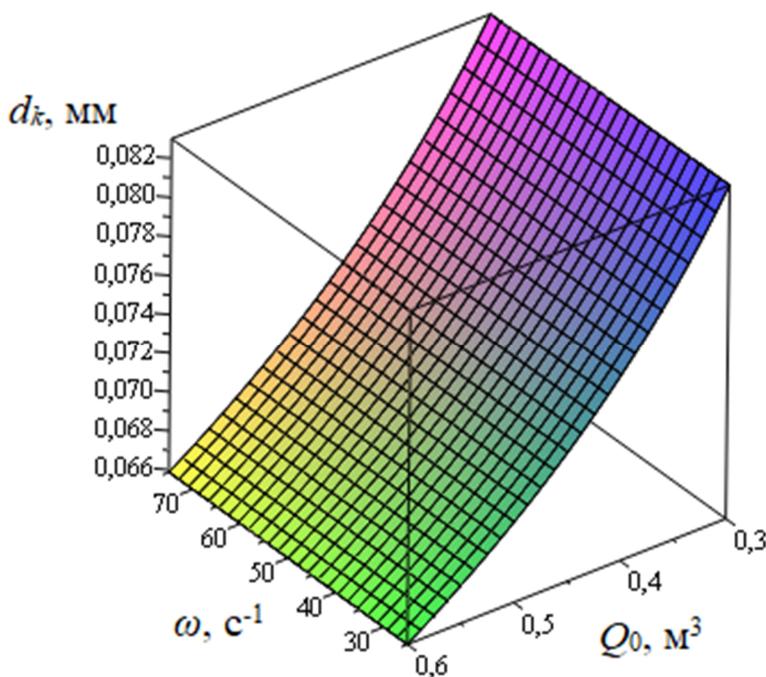


Рис. 2. Зависимость среднего размера частиц готового продукта от частоты вращения роторов дезинтегратора и его пропускной способности

Из графической зависимости, представленной на рисунке 2 видно, что средний размер частиц готового продукта при увеличении частоты вращения и пропускной способности дезинтегратора нелинейно уменьшается, то есть повышается тонкость помола.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хинт И.А. Основы производства силикатных изделий. Стройиздат, 1962. 636 с.

2. Лозовая С.Ю. Создание методов расчета и конструкций устройств с деформируемыми рабочими камерами для тонкого и сверхтонкого помола материалов. Диссертация доктора технических наук: 05.02.13. Белгород, 2005. 456 с.

3. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Пензев П.П. Теоретические исследования скорости движения частиц материала вдоль поверхности ударного элемента мельницы дезинтеграторного типа // Известия ВУЗов. Строительство. 2008. № 11–12. С. 93–96.

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.

Латышев Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент 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.

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

Поступила в апреле 2019 г.

© Семикопенко И.А., Латышев С.С., Воронов В.П., Беляев Д.А., 2019

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

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

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

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

FRACTURE KINETICS OF THE MATERIAL PARTICLES IN DISINTEGRATOR USING STATISTICAL APPROACH

Abstract. *Disintegrators are one of the types of equipment that has the ability to combine grinding, mixing and activation of materials of medium strength and hardness. The advantages of disintegrators are the ability to integrate into existing technological schemes and obtain a grinding product with a given particle size distribution, as well as the simplicity of the design. This article analyzes the kinetics of particle destruction in the inter-row spaces of the disintegrator grinding chamber. A diagram of the disintegrator grinding chamber is presented. The mathematical description of impact destruction of particles in the grinding chamber is considered in the framework of the inhomogeneous Markov process. An equation is presented that describes the change in the statistical quantity $m(t)$ - the mathematical expectation. It has been suggested that the intensity of the Markov process (λ) is proportional to the frequency (ω) of rotor rotation multiplied by the time function $f(t)$. This functional dependence is determined from the condition of the same interaction time τ_0 of the material particle in the inter-row spaces of the grinding chamber. If we assume that the probability of destruction of the particles of the material in the interaction with each shock element is constant, then the mathematical expectation value $m(t)$ will be proportional to the number of particles $n(t)$. The resulting relation (11) determines the law of change in the number of particles during the passage of each row of shock elements. The article derived formulas for determining the change in the number of particles in each inter-row space of the grinding chamber. The obtained relations (24) and (25) describe the kinetics of grinding material particles in the grinding chamber of the disintegrator in the framework of the statistical approach and make it possible to determine the relationship between the size of the initial particles and the size of the grinding product.*

Keywords: *disintegrator, destruction, particle, grinding chamber.*

REFERENCES

1. Khint I.A. Basics of the production of silicic-calcium products [Osnovy proizvodstva silikal'citnyh izdelij]. Stroyizdat, 1962. 636 p. (rus)
2. Lozova S.Yu. Creation of calculation methods and device designs with deformable working chambers for fine and ultrafine grinding of materials [Sozdanie metodov ras-cheta i konstrukcij ustrojstv s deformirue-mymi rabochimi kamerami dlya tonkogo i sverhtonkogo pomola materialov]. The dissertation

of a doctor of technical sciences: 05.02.13. Belgorod, 2005. 456 p. (rus)

3. Semikopenko I.A., Voronov V.P., Penzev P.P. Theoretical studies of the speed of movement of material particles along the surface of the shock element of a mill of a disintegrator type [Teoreticheskie issledovaniya skorosti dvizheniya chastic materiala vdol' po-verhnosti udarnogo elementa mel'nicy dezintegratornogo tipa]. News of Universities. Construction, 2008. No. 11-12. Pp. 93–96. (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.

Latyshev, Sergey S. PhD, Assistant professor. 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 in April 2019

Для цитирования:

Семикопенко И.А., Латышев С.С., Воронов В.П., Беляев Д.А. Кинетика разрушения частиц материала в дезинтеграторе в рамках статистического подхода // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 121–125. DOI: 10.34031/article_5da463e3b2fce8.88813745

For citation:

Semikopenko I.A., Latyshev S.S., Voronov V.P., Belyaev D.A. Fracture kinetics of the material particles in disintegrator using statistical approach. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 121–125. DOI: 10.34031/article_5da463e3b2fce8.88813745