

Качаев А. Е., ассис.,  
Севостьянов В. С., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

## РАСЧЁТ ТРАЕКТОРИИ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ИЗМЕЛЬЧАЕМОГО МАТЕРИАЛА ПО ПОВЕРХНОСТИ РАБОЧЕГО ЭЛЕМЕНТА ДЕЗИНТЕГРАТОРА

doctor\_cement@mail.ru

*В статье рассмотрен дезинтегратор с ударно-сдвиговым воздействием на материал, в котором обеспечивается высокоскоростное ударное воздействие на материал и сдвиговое воздействие в слое частиц в зазоре между вращающимися роторами. Приведен аналитический метод расчета траектории и скорости движения частицы материала по поверхности рабочего элемента. В методике расчета использовался силовой метод определения скорости движения частицы по поверхности рабочего элемента.*

**Ключевые слова:** дезинтегратор, радиальная скорость, тангенциальная скорость, частица, рабочий элемент.

Одной из основных технологических стадий в производстве большинства строительных материалов является переработка мелкозернистого сырья в высокодисперсные порошки. Данная технологическая задача обуславливает актуальность разработки эффективных способов измельчения материалов посредством высокоскоростного ударного нагружения.

Достоверно известно, что с увеличением дисперсности измельчаемых материалов падает производительность, при этом одновременно возрастают энергозатраты и снижается эксплуатационная надежность оборудования. Рабочий ресурс ударных элементов помольного оборудования часто выступает сдерживающим фактором при выборе типа мельницы [1]. С целью увеличения надежности работы измельчителей роторно-центробежного типа, с точки зрения износа, необходимо перейти от измельчения частиц о корпус или ударные элементы к интенсивному самоизмельчению частиц в пространстве между рабочими элементами высокоскоростных роторов, вращающихся в противоположные стороны [2]. Этого можно достичь, если процесс измельчения организовать в слое измельчаемого материала и использовать принцип ударно-сдвиговой деформации этого слоя. Тогда на частицы помимо ударного нагружения от высокоскоростных вращающихся роторов действуют мгновенные растягивающие усилия, которые образуются в зазоре (пространстве) между ударными элементами роторов. Нагружение мелкозернистого материала при энергетически выгодном режиме необходимо осуществлять в сочетании с выделением тонких частиц, соответствующих дисперсности готового продукта. Наиболее полно это достигается при совмещении процессов измельчения и классификации в

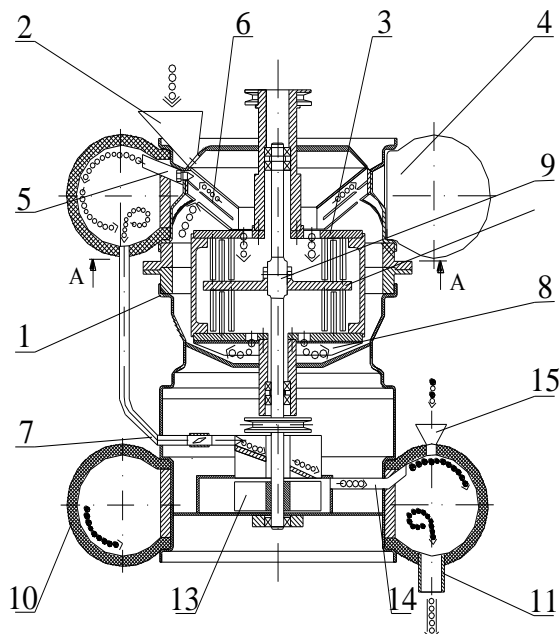
рамках одного агрегата, соблюдая при этом принцип стадийности.

В соответствии с этой целью нами разработан дезинтегратор [3] (рис. 1), который состоит из цилиндрического корпуса 1, в верхней части которого закреплены загрузочные воронки 2. В корпусе в подшипниковых узлах коаксиально установлен наружный ротор 3, а с внешней стороны верхней части корпуса 1 установлена камера 4 для смешивания и микрогранулирования, соединенная тангенциальным патрубком 5 отвода тонкодисперсного продукта с классификатором 6. Помимо этого, камера 4 соединена трубопроводом 7 дисперсного продукта с эксцентричной камерой вентилятора 13. В полости наружного ротора 3 коаксиально с возможностью вращения установлен внутренний ротор 9, а в нижней части наружного ротора смонтирована крыльчатка 8.

На внутренней поверхности наружного ротора 3 и наружной поверхности внутреннего ротора 9 по концентрическим окружностям и спиральям размещены ударные элементы 12, которые оказывают ударно-стирающее воздействие на измельчаемый материал посредством ударно-сдвиговой деформации. Камера пневмопомогенезации 10 оснащена разгрузочным патрубком 11 и связана с вентилятором 13 посредством нагнетательного патрубка 14. Для предварительного измельчения материалов дезинтегратор может быть оснащен ножевой насадкой 15, которая повышает эффективность работы агрегата, исключая попадание больших кусков материала в камеру помола.

Дезинтегратор работает следующим образом. Измельчаемый материал подается в загрузочные воронки 2 в помольную камеру, образованную наружным 3 и внутренним 9 роторами, для измельчения о ряды ударных элементов 12.

Ударные элементы 12, в свою очередь, расположены по концентрическим окружностям и четырем участкам спирали в 4 ряда, что обеспечивает не только высокое нагружение многократным ударом, но и способствует истирающему воздействию посредством сдвиговых деформаций слоя материала, находящегося в зазоре между противоположно вращающимися роторами 3 и 9 ( $n = 6000 \text{ мин}^{-1}$ ).



- Загрузка и циркуляция материала
- Ввод дисперсных добавок
- Разгрузка смеси
- Движение тонкодисперсного продукта
- Движение поликомпонентной смеси

Рис. 1. Дезинтегратор с внутренним рециклом измельчаемого материала:

- 1 – корпус; 2 – загрузочные воронки;
- 3 – наружный ротор; 4 – камера для смешивания и микрогранулирования тонкодисперсного порошка;
- 5 – тангенциальный патрубок отвода тонкодисперсного продукта; 6 – классификатор; 7 – трубопровод дисперсного продукта; 8 – вентиляционная крыльчатка; 9 – внутренний ротор; 10 – смесительная камера;
- 11 – разгрузочный патрубок; 12 – ударные рабочие элементы; 13 – вентилятор для гомогенизации смеси;
- 14 – патрубок нагнетания дисперсной смеси;
- 15 – воронка для ввода дисперсных добавок

После измельчения материал под действием крыльчатки 8 устремляется в циклон-осадитель 6, где под действием гравитации классифицируется на готовый продукт и крупку. Благодаря конструкции классификатора крупка возвращается в зону измельчения, а готовый продукт по патрубку 5 попадает в камеру 4, где может быть смешан с дисперсными компонентами. Далее материал под действием разрежения, создаваемого крыльчаткой 13, из камеры 4 через трубопровод 7 транспортируется в ниж-

нюю камеру 10, связанную с вентилятором 13 посредством патрубка 14. После пневмогомогенизации в камере 10 смесь разгружается через патрубок 11.

Для обеспечения рациональных траекторий и скоростей движения частиц измельчаемого материала в помольной камере дезинтегратора необходимо определить скорость движения частицы по поверхности рабочего элемента, а также характер движения частиц в торцевом и радиальном зазорах между вращающимися роторами дезинтегратора [4].

С целью упрощения расчетов траекторий и скоростей движения частицы по поверхности рабочего элемента сделаем предположение, что скорость воздуха и скорость частицы, входящей из загрузочного узла дезинтегратора, равны [5]. На частицу измельчаемого материала, движущуюся по криволинейной поверхности рабочего элемента, действуют центробежная сила инерции  $F_{ц}$ , сила инерции Кориолиса  $F_{к}$ , сила трения  $F_{тр}$ , образованная центробежной силой инерции  $F_{ц}$ , и нормальная сила  $N$  (рис. 2).

Центробежная сила инерции  $F_{ц}$  определяем по формуле:

$$F_{ц} = m\omega^2 R = m\omega^2 (r - r_3 \sin \theta), \quad (1)$$

где  $m$  - масса частицы корма, кг;  $\omega$  - угловая скорость разбрасывающей тарелки,  $c^{-1}$ ;  $R$  - текущий радиус перемещения частицы материала по поверхности рабочего элемента, м;  $r$  - расстояние от оси вращения до центра крепления рабочего элемента, м;  $r_3$  - радиус рабочего элемента, м.

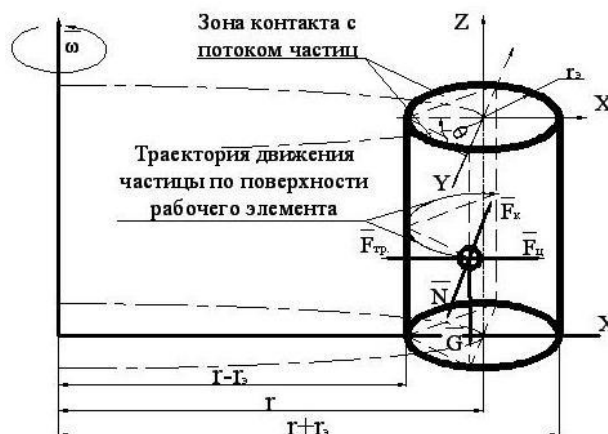


Рис. 2. Силы, действующие на частицу измельчаемого материала при ее движении по поверхности рабочего элемента дезинтегратора

Сила инерции Кориолиса  $F_{к}$  находим из выражения:

$$F_k = 2m \left| \vec{\omega} \right| \left| \vec{V}_r \right| \cdot \sin \left( \vec{\omega}, \vec{V}_r \right), \text{ или (2)}$$

$$F_k = 2m\omega \frac{dr}{dt} \cdot \sin \theta, \text{ (3)}$$

где  $\frac{dr}{dt} = V_r$  – радиальная скорость перемещения частицы измельчаемого материала по поверхности рабочего элемента, м/с;  $t$  – время перемещения частицы материала по поверхности, рабочего элемента, с.

Сила трения  $F_{mp}$  частицы материала по поверхности рабочего элемента равна:

$$F_{mp} = fN \text{ (4)}$$

где  $f$  – коэффициент трения частицы измельчаемого материала о поверхность рабочего элемента;

На основании, что  $N = |F_k|$ , имеем:

$$F_{mp} = 2f m \omega \frac{d(r - r_3 \sin \theta)}{dt}. \text{ (5)}$$

Для удобства ведения алгебраических преобразований заменим  $(r - r_3 \sin \theta)$  на  $R$ , по аналогии с выражением (1).

$$R = (r - r_3 \sin \theta), V_r = V_0, (r - r_3 \sin \theta) = C_1 + C_2. \text{ (11-13)}$$

Далее получим следующие дифференциальные уравнения:

$$\frac{dR}{dt} = C_1 \cdot \lambda_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot \lambda_2 \cdot e^{\lambda_2 t}. \text{ (14)}$$

В момент времени  $t = 0$ :

$$\frac{dR}{dt} = V_0 = C_1 \cdot \lambda_1 + C_2 \cdot \lambda_2. \text{ (15)}$$

В начальный момент времени, когда частица нормально соударяется с рабочим элементом на расстоянии  $(r - r_3)$  от оси вращения, она теряет свою радиальную составляющую начальной скорости по причине прямого удара (рис. 3), но сохраняет свою тангенциальную составляющую, которая позволяет частице подвигаться по поверхности рабочего элемента.

Из выражения (15) путем алгебраических преобразований получим постоянные интегрирования:

$$C_1 = \frac{V_0 - (r - r_3 \sin \theta) \left( -f - \sqrt{f^2 + 1} \right)}{2\sqrt{f^2 + 1}},$$

$$C_2 = \frac{(r - r_3 \sin \theta) \left( -f + \sqrt{f^2 + 1} \right) - V_0}{2\sqrt{f^2 + 1}}. \text{ (16-17)}$$

Уравнение динамики относительного движения частицы измельчаемого материала по поверхности рабочего элемента круглой формы запишется:

$$m \frac{d^2 R}{dt^2} = F_u - F_{mp}, \text{ или (6)}$$

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = \omega^2 R - 2f\omega \frac{dR}{dt}. \text{ (7)}$$

Выражение (7) является дифференциальным уравнением 2-ого порядка. Для его решения запишем характеристическое уравнение [6]:

$$\lambda^2 + 2f\omega\lambda - \omega = 0. \text{ (8)}$$

Уравнение (8) имеет два корня:

$$\lambda_1 = \omega \left[ -f + \left( \sqrt{f^2 + 1} \right) \right], \text{ (9)}$$

$$\lambda_2 = \omega \left[ -f - \left( \sqrt{f^2 + 1} \right) \right].$$

Тогда общее решение (8) запишется в следующем виде:

$$R = C_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot e^{\lambda_2 t}. \text{ (10)}$$

Решая уравнение (10) при начальных условиях ( $t = 0$ ), получим:

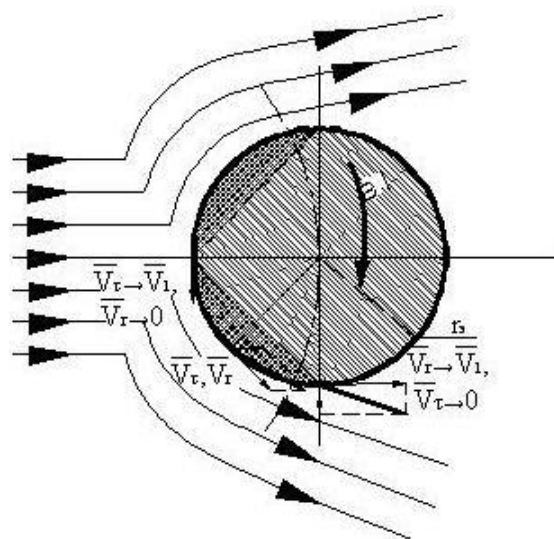


Рис. 3. Схема обтекания рабочего элемента двухфазным потоком.

Подставляя (10) в (14), получим уравнение движения частицы измельчаемого материал по поверхности рабочего элемента ротора дезинтегратора:

$$R = \frac{\left( \frac{V_0}{\omega} - (r - r_3 \sin \theta) (-f - \sqrt{f^2 + 1}) \right) e^{\lambda t} + \left( (r - r_3 \sin \theta) (-f + \sqrt{f^2 + 1}) - \frac{V_0}{\omega} \right) e^{\lambda_2 t}}{2\sqrt{f^2 + 1}}, \quad (18)$$

где  $V_0$  – начальная скорость движения частицы до столкновения с рабочим элементом, м/с.

Радиальная скорость будет равна:

$$V_r = \frac{dR}{dt} = \frac{\left( V_0 - (r - r_3 \sin \theta) \omega (-f - \sqrt{f^2 + 1}) \right) (-f + \sqrt{f^2 + 1}) e^{\lambda t}}{2\sqrt{f^2 + 1}} + \frac{\left( (r - r_3 \sin \theta) \omega (-f + \sqrt{f^2 + 1}) - V_0 \right) (-f - \sqrt{f^2 + 1}) e^{\lambda_2 t}}{2\sqrt{f^2 + 1}}. \quad (19)$$

Тангенциальную скорость  $V_\tau$  можно найти по следующей формуле:

Из анализа уравнений (2.18) и (2.20) получим:

$$V_\tau = \omega R. \quad (20)$$

$$V_\tau = \left[ \frac{\left( \frac{V_0}{\omega} - (r - r_3 \sin \theta) (-f - \sqrt{f^2 + 1}) \right) e^{\lambda t} + \left( (r - r_3 \sin \theta) (-f + \sqrt{f^2 + 1}) - \frac{V_0}{\omega} \right) e^{\lambda_2 t}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right] \cdot \omega. \quad (21)$$

Абсолютная скорость  $V_1$  после первого соударения частицы материала с рабочим элементом будет равна:

$$V_1 = \sqrt{V_r^2 + V_\tau^2}. \quad (22)$$

Используя полученные аналитические зависимости, можно определить величины перемещений и скоростей частиц измельчаемого материала по поверхности рабочего элемента. Движение частицы по криволинейной поверхности рабочего элемента носит колебательный характер в виду нелинейного роста радиальной скорости и нелинейного убывания её тангенциальной составляющей.

В следующей статье будет приведена математическая модель движения двухфазного потока в радиальном зазоре между вращающимися роторами дезинтегратора, которая основана на конструктивно-технологических и режимных особенностях работы данного агрегата. Данная модель позволит определить оптимальные режимы работы дезинтегратора для различных материалов, а также выявит основные параметры помольной камеры, необходимые для эффективной организации процесса измельчения материалов в дезинтеграторе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хинт, И.А. Основы производства силикатных изделий [Текст]/ И.А Хинт. – М.-Л.: Стройиздат, 1962. – 636 с.
2. Богородский, А.В. Разработка конструкций и методов расчета интенсивных измельчителей дезинтеграторного типа/ А.В. Богородский//Дисс. работа на соискание уч. степени канд. техн. наук.- ИХТИ Иваново, 1982.- 171 с.
3. Пат. 2377070 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 02 С13/22, Дезинтегратор [Текст]/ А.М. Гридчин, В.С. Севостьянов, Р.В. Лесовик, Е.С. Глаголев, М.В. Севостьянов, А.Е. Качаев, Н.В. Солопов, Н.И. Алфимова; заявитель и патенто-обладатель Белгород; БГТУ им. В.Г. Шухова.- № 2008118079/03 заявл. 06.05.2008; опубл. 27.12.2009 в Бюлл. №36.
4. Семикопенко, И.А. Дезинтеграторы с эксцентричным расположением рядов рабочих элементов/ И.А. Семикопенко//Дисс. работа на соискание уч. степени канд. техн. наук.- БелГ-ТАСМ, Белгород, 1998.- 170 с.
5. Прокопец, В.С. Повышение эффективности дорожно-строительных материалов механическим модифицированием исходного сырья/ Дисс. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. Бедгород, 2005. – 523 с.
6. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Механика. — Издание 5-е, стереотипное. — М.: Физматлит, 2004. — 224 с. — («Теоретическая физика», том I).