

## ПРОИЗВОДСТВО И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

УДК 631.361

**Э. Ц. Галсанова<sup>1</sup>, С. С. Ямпиллов<sup>1</sup>, Н. Ф. Васильев<sup>1</sup>, М. Б. Балданов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», Улан-Удэ

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Бурятская ГСХА им. В. Р. Филиппова», Улан-Удэ  
E-mail: erjena\_g@mail.ru

### ДИНАМИКА ЗЕРНОВОЙ ЧАСТИЦЫ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ

**Ключевые слова:** форма зерновой частицы, степень свободы, центр масс, скорость падения.

*Предложено устройство для регулирования степени измельчения материалов в безрешетной молотковой дробилке кормов в зависимости от их формы.*

**E. Galsanova<sup>1</sup>, S. Yampilov<sup>1</sup>, N. Vasiliev<sup>1</sup>, M. Baldanov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>FSBEI NPT «East Siberia State University of Technology and Management», Ulan-Ude

<sup>2</sup>FSBEI NPT «Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov», Ulan-Ude

### DYNAMICS OF GRAIN PARTICLES IN THE AIR FLOW IN HAMMER CRUSHER

**Key words:** shape of grain particles, the degree of freedom, the center of mass, the rate of fall.

*A device for controlling the degree of grinding materials in hammer crusher for feed without sieve, depending on their shape.*

**Введение.** Эффективность работы молотковой дробилки зависит от многих факторов, одним из них является положение зерновой частицы в момент соударения с молотком. Наиболее эффективным для раздробления зерновой частицы, имеющей форму эллипсоида, является боковой удар. Следовательно, при подаче зерновой массы в рабочую зону нужно ориентировать отдельные

зерновые частицы в оптимальное пространственное положение. Ориентирование зерновых частиц возможно посредством установки устройств, которые бы регулировали равномерную подачу зернового материала в рабочую камеру.

**Условия и методика исследования.** Рассмотрим процесс гравитационного течения зерновой массы. Перемещение зерновых частиц в наклонном

канале происходит под действием силы тяжести. При этом угол наклона либо близок к углу сухого трения, либо выше него. Движение зернистой среды зависит от совокупности физико-механических свойств частиц, фракционного состава среды и характеристик самого канала. Представим модель такого гравитационного потока зернистой среды. В результате взаимодействия частиц среды в гравитационном потоке происходит разделение частиц среды по размеру, т.е. зернистая среда делится на фракции. Описать процесс разделения зерновой среды достаточно сложно, поэтому рассмотрим упрощенную физическую модель при различных допущениях:

1. Движение среды характеризуется кратковременными контактами частиц, быстрым нарушением связей между ними, наличием перемешивания частиц.

2. При этом наблюдается режим псевдооживления, при котором происходит разделение частиц по плотности по высоте потока.

3. Характеристикой плотности принимается чисто геометрическая величина, определяемая размерами частиц.

4. Зерновая частица имеет форму эллипсоида (рис.1).

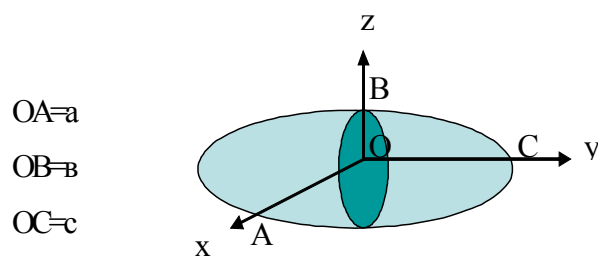


Рисунок 1 – Геометрическая форма зерновой частицы

Объем эллипсоида дается формулой:

$$V = \frac{4}{3} \pi a b c . \quad (1)$$

Площадь поверхности

$$S = 4\pi \left[ \frac{a^p b^p + b^p c^p + c^p a^p}{3} \right]^{\frac{1}{p}}, \quad P \approx \frac{1}{6} \quad (2)$$

$$b=c=\frac{a}{2} \Rightarrow V = \frac{\pi a^3}{3}, \quad S = 1.96 \pi a . \quad (3)$$

Введем аналог плотности частицы:

$$P(a) = \frac{V(a)}{S(a)} = 0.17 a^2 . \quad (4)$$

На рисунке 2 представлена модель, отражающая процесс разделения зерновой массы в гравитационном потоке в подвижной системе координат [1].

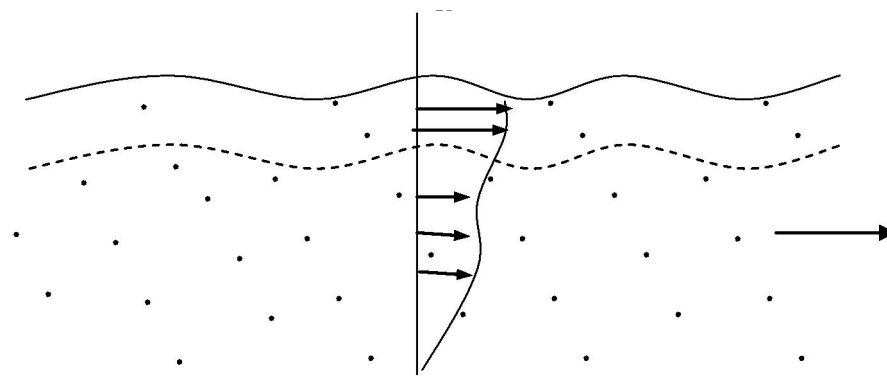


Рисунок 2 – Модель движения зернового потока

Профиль скоростей – криволинейный. Это приводит к перемешиванию слоев потока, когда число соударений пропорционально площади частицы, а ее объем влияет на диффузию частиц в сторону дна потока, когда более мелкие частицы всплывают (внешний слой), а тяжелые в смысле  $P(a)$  оседают. Этот

процесс может быть описан уравнением обратной диффузии, имеющей вид:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = -k \cdot P(a) \frac{\partial^2 a}{\partial y^2}, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент, отображающий другие физико-механические свойства зернового потока, который определяется опытным путем.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что частицы внешнего слоя зернового потока движутся под углом естественного откоса с ориентацией центра масс зерновой частицы. Для осуществления такого движения зернового потока усовершенствуем конструкцию существующей молотковой дробилки [2]. Установим в загрузочный бункер молотковой дробилки две регулировочные заслонки на разной высоте с возможностью перемещения (рис. 3). Верхнюю заслонку установим наклонно в сторону рабочей камеры дробилки. Нижнюю заслонку выполним с обратным углом наклона относительно верхней. Это позволит подавать зерно в необходимом положении.

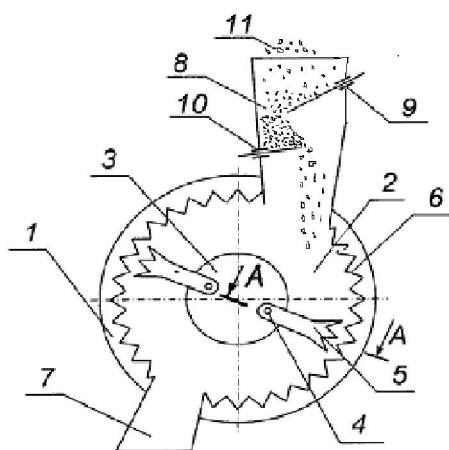


Рисунок 3 – Устройство для регулирования степени измельчения кормов в безрешетной молотковой дробилке кормов

1 - корпус с рабочей камерой; 2, 3 - ротор с шарнирно подвешенными на осях; 4 - монолитными молотками; 5 - с тремя острыми кромками; 6 - дека; 7 - выгрузная горловина. Для подачи исходного зернового материала – 11 в рабочую камеру 2 на корпусе установлен загрузочный бункер 8, в котором находятся две регулировочные заслонки: верхняя 9 и нижняя 10.

Устройство будет работать следующим образом [3]. Исходный материал – зерно – поступает в загрузочный бункер. Здесь в результате удара о верхнюю заслонку и, проходя через зазор между нею и стенкой загрузочного бункера, попадает на нижнюю заслонку, где накапливается. Далее материал (зерно) движется

к выходу из загрузочного бункера под действием силы тяжести под углом естественного откоса по слою продукта, расположенного на нижней заслонке. Затем зерно движется касательно вращению ротора и при выходе из загрузочного бункера ориентируется по траектории движения так, что имеет вертикальное положение продольной оси зерновки относительно монолитного молотка ротора и далее направляется в рабочую камеру.

Рассмотрим движение зерновой частицы в рабочей зоне. Пройдя две регулировочные заслонки, продольная линия зерновой частицы оказывается параллельной плоскости расположения остриев режущих кромок молотков. При подаче зерновой массы в рабочую зону в течение короткого промежутка времени, определяемого проходом молотков, на положение зерновки оказывает влияние воздушный поток, создаваемый их вращением. Схема этого процесса представлена на рисунке 4.

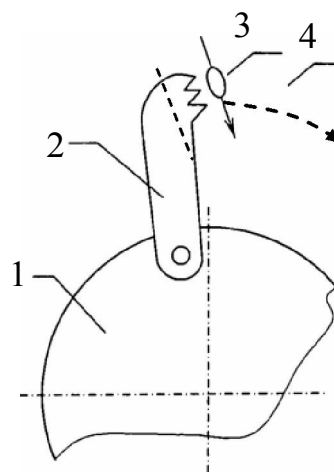


Рисунок 4 – Схема процесса влияния воздушного потока на положение зерновой частицы 1 – ротор, 2 – молоток, 3 – зерновая частица, 4 – воздушный поток

В промежутках безударного движения зерновая частица испытывает действие высокоскоростного воздушного потока, движущегося по окружности. Движение этой частицы в воздушном потоке рассмотрим на следующей схеме (рис. 5).

Зерновая частица имеет две степени свободы, соответственно, введем две обобщенные координаты:

$x$  – поступательное смещение параллельно периметру деки дробилки;

$\varphi$  – угол отклонения от направления поступательного смещения.

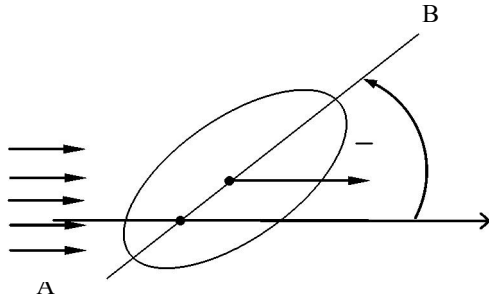


Рисунок 5 – Схема движения зерновой частицы в воздушном потоке

Движение рассматриваемой частицы описывается уравнениями Лагранжа второго рода:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = Q_x, \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_\varphi. \end{cases} \quad (6)$$

Центр тяжести частицы смещен от геометрического центра вдоль центральной оси на величину  $C_0 C_1$ . К геометрическому центру приложена сила напора воздуха, которая определяется по формуле:

$$R = \xi_1 \cdot F \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2}, \quad (7)$$

где

$$F = \pi \cdot b \cdot (a \cdot \sin \phi + b \cdot \cos \phi), \quad (8)$$

$F$  – миделевое сечение частицы зерна по координате  $x$ , м<sup>2</sup>;

$\xi_1$  – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы в поступательном движении;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – скорость потока воздуха, м/с.

Кинетическая энергия определяется по формуле:

$$T = \frac{m \cdot (\dot{x})^2}{2} + \frac{J_{zc} \cdot (\dot{\varphi})^2}{2}, \quad (9)$$

где  $\dot{x}$  – скорость центра масс,  $\dot{\varphi}$  – скорость вращения частицы,

$J_{zc}$  – осевой момент инерции,

$$J_{zc} = \frac{1}{12} \cdot (4 \cdot a^2 + 3 \cdot b^2). \quad (10)$$

Тогда уравнения Лагранжа (1) принимают следующий вид:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = R, \\ J_{zc} \cdot \ddot{\varphi} = -R \cdot C_0 C_1 \cdot \sin(\varphi). \end{cases} \quad (11)$$

Движение зерновой частицы в воздушном потоке начинается с нулевыми начальными условиями, кроме начального угла  $\varphi_0$ , имеющего различные значения, а некоторые из них предпочтительнее в силу предварительной ориентации при подаче на дробление. Уравнения интегрируем в системе Mathcad.

Для заданных величин

$$m = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг}, \quad OC = 0.24 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$\xi_1 = 0.3, \quad \rho = 1.29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$a = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad b = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$x_0 = 0 \text{ м}, \quad \dot{x}_0 = 30 \text{ м/с}, \quad \varphi_0 = 0, \quad \dot{\varphi}_0 = 120 \text{ с}^{-1}$$

**Результаты исследования.** Результаты расчетов представлены на графиках:

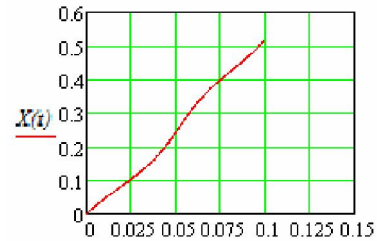


Рисунок 6 – График изменения координаты  $x(t)$

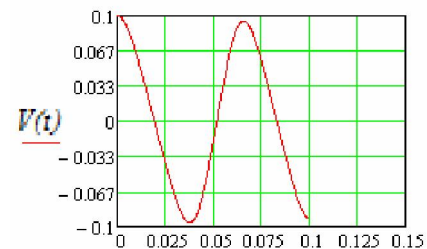


Рисунок 7 – График изменения скорости  $V(t)$

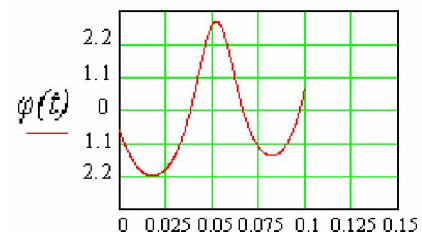


Рисунок 8 – График изменения координаты  $\varphi(t)$  по времени

Как видно из графиков (рис. 6-8), построенных для данной модели движения зерновой частицы, за время  $T=0,01$  сек. зерновая частица поворачивается под действием воздушного потока на угол  $= 0,4$  рад, что соответствует углу в  $23^\circ$ , т.е. продольная линия зерновой частицы действительно оказывается параллельной плоскости расположения остриев режущих кромок молотков, как и показано на рис. 4.

**Заключение.** Таким образом, в рабочей камере зерновая частица попадает под ударное воздействие монолитного молотка (способ измельчения «удар влет») и получает частичное разрушение (микротрещины). При ударном воздействии монолитного молотка скорость материала (зерна) увеличивается и он движется по траектории, направленной перпендикулярно неподвижной грани деки. Далее материал ударяется о грань деки и окончательно измельчается. Кроме того, измельчение материала происходит между острыми кромками монолитного молотка и острыми ребрами грани неподвижной деки (способ измельчения «скалывание-срез»).

Конструкция загрузочного устройства с двумя заслонками позволяет стабилизировать начальную скорость потока материала, устранить ее колебания, возникающие в результате действия различных внешних факторов. Исходный материал (зерно), поступая в загрузочный бункер, ударяется о верхнюю заслонку, скатывается по ней и накапливается на нижней заслонке, образуя небольшой слой материала. Следующий поток материала с заслонки с практически нулевой начальной скоростью движется под углом естественного откоса с ориентацией зерна зародышевой частью вперед по слою материала (зерна), расположенного на нижней заслонке, к выходу из загрузочного бункера. Таким образом, скорость, с которой материал (зерно) поступает в рабочую камеру дробилки, не зависит от каких-либо внешних факторов, а определяется его физико-механическими свойствами.

Использование двух заслонок служит также для сглаживания колебаний нагрузки, в значительной степени влияющей на качество измельчения материала в безрешетной молотковой дробилке. В случае превышения номинального значения нагрузки будет происходить заклинивание материалом (зерном) щели между верхней заслонкой и корпусом бункера, а в рабочую камеру дробилки поступит только установленное количество исходной смеси. Регулирование нагрузки можно осуществлять путем изменения высоты слоя материала (зерна) регулировкой положения верхней и нижней заслонок. Это позволит подавать измельчаемый материал (зерно) на разные уровни в дробилку, тем самым изменять время его пребывания в дробилке и, соответственно, степень измельчения. Наличие двух заслонок обеспечивает наиболее удобную регулировку нагрузки в широком диапазоне для материалов с различными физико-механическими свойствами. Такая конструкция дробилки позволяет повысить качество измельчения, получить более равномерный гранулометрический состав и снизить энергоемкость процесса.

#### Библиографический список

1. Математическая модель разделения зерновой массы на фракции в условиях гравитационного течения // Проблемы механики современных машин: Материалы V международной конференции. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. – Т.4. – 132 с.
2. Балданов М. Б. Определение параметров малогабаритной молотковой дробилки фуражного зерна: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Новосибирск, 2008. – 167 с.
3. Патент 2470710 Российская Федерация, МПК51 В 02 С 13/286. Устройство для регулирования степени измельчения материалов в безрешетной молотковой дробилке кормов / Васильев Н. Ф., Кобылкин А. В., Ямпиллов С. С., Алексеев А. А., Галсанова Э. Ц.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ВСГУТУ». – № 2011122149/13; заявл. 31.05.11; опубл. 27.12.12, Бюл. № 36.