

УДК 621.66-9

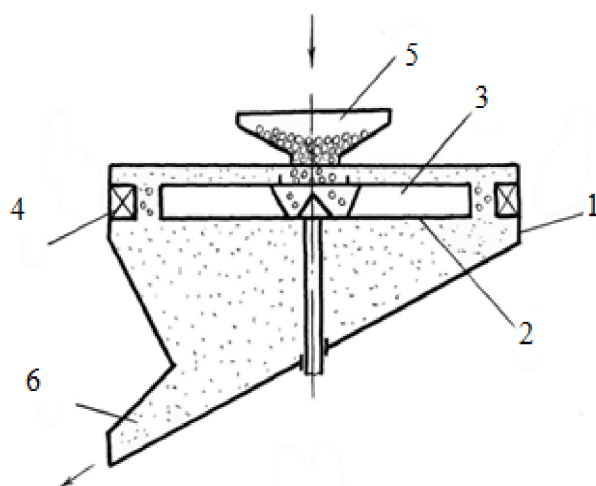
к.т.н. Левченко Э.П.,  
Павлиненко О.И.,  
Власенко Д.А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ПРИМЕНЕНИЕ РАЗГОННО-УДАРНЫХ МЕЛЬНИЦ ДЛЯ РАСКАЛЫВАНИЯ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ И ОСОБЕННОСТИ ИХ СКОРОСТНЫХ РАСЧЕТОВ

Путем аналитических расчетов и анализа зависимости абсолютной скорости вылета стальной дроби из ротора разгонно-ударной мельницы уточнена скорость удара частиц при производстве колотой стальной дроби. В результате анализа протекающих процессов выявлены пути их улучшения за счет применения многоступенчатого измельчения и эффективного отвода готового продукта.

**Ключевые слова:** разгонно-ударная мельница, абсолютная скорость, стальная дробь, многоступенчатое измельчение, шаровая мельница.

В настоящее время все более широкое внимание уделяется сравнительно новым видам дробильно-измельчительных машин, в том числе работающим по принципу разгона материала лопастями быстро вращающегося ротора и реализующим способ разрушения свободным ударом (рис. 1). Это вызвано их некоторыми преимуществами по сравнению с широко распространенными молотковыми дробилками.



1 - корпус, 2 - ротор, 3 - разгонная лопасть,  
4 - отбойное кольцо, 5 - загрузочная воронка,  
6 - разгрузочное устройство

Рисунок 1 – Разгонно-ударная мельница

Аналогичные устройства, на основе лабораторной установки «Штраубе», приме-

няются для определения износостойкости стальной дроби. Однако, для приготовления колотой дроби применяются шаровые мельницы, работающие по принципу стесненного удара, что зачастую приводит к лишнему переизмельчению с образованием пылевых фракций, идущих в отходы. Поэтому, актуальной является задача эффективного раскалывания стальной дроби при низком процентном содержании металлической пыли и экономном расходе электроэнергии на дробление.

Основным фактором, непосредственно влияющим на разрушающую способность материала при выбросе из ротора разгонно-ударной мельницы, является скорость, чему уделяется внимание многих исследователей таких машин [1-3]. Таким образом, точное определение критической скорости, гарантирующей разрушение стальной дроби является первостепенным, ибо раскалывание происходит, как правило, при однократном ударном воздействии, что должно быть гарантировано еще на этапе проектирования машины.

Одним из эффективных методов определения скорости выброса из мельницы является применение математического аппарата на основе решения дифференциальных зависимостей, описывающих движение частиц в роторе мельницы.

Задачей данной публикации является уточнение аналитической зависимости скорости вылета стальной дроби из ротора разгонно-ударной мельницы и возможности их применения для раскалывания стальной дроби.

В ранее проводимых исследованиях известна математическая зависимость абсолютной скорости вылета материала из разгонно-ударной мельницы от основных параметров ротора [1]:

$$V_b = \omega R \times \left( \sqrt{1 + \frac{\left( \sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2} - \frac{r_n}{R} \cdot f} \right)^2}{\sqrt{f^2 + 1 + f}}} + \sqrt{1 + \frac{2 \left( \sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2} - \frac{r_n}{R} \cdot f} \right) \frac{r_n}{R}}{\sqrt{f^2 + 1 + f}}} \right). \quad (1)$$

За основу исследований при выводе формулы (1) принята расчетная схема (рис. 2).

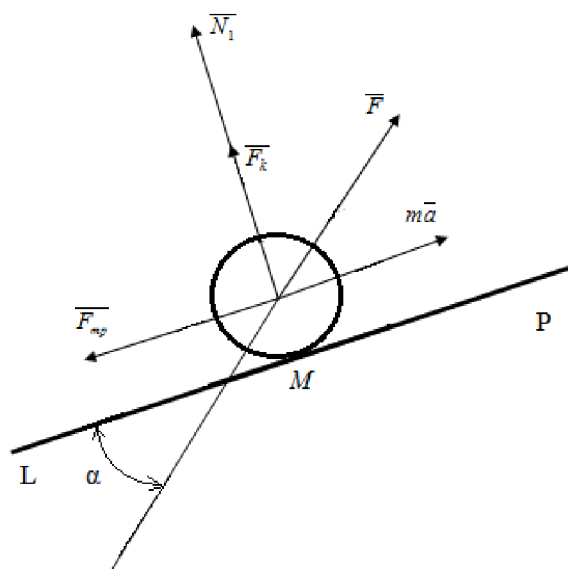


Рисунок 2 – Расчетная схема

Зависимость (1) была получена на основе дифференциального уравнения [1].

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} + 2f\omega \frac{dS}{dt} - \omega^2 S = \omega^2 (S - r \cdot f), \quad (2)$$

где  $m$  – масса частиц в г.;  $dS$  – элементарное перемещение частицы по лопасти ротора за время  $dt$ ;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора,  $c^{-1}$ ;  $f$  – коэффициент трения;  $r$  – радиус, нормальный к лопасти.

При этом точка М задает текущее положение частицы в момент времени  $t$  на разгонной лопасти LP (рис. 2). Положение частицы на лопасти во время движения характеризуется перемещением  $S(t) = LM$ . Угловая скорость вращения диска равна  $\omega$ . В плоскости лопасти на частицу действуют следующие силы:  $N_l$  – сила реакции лопасти,  $N_2$  – сила реакции диска,  $F_k$  – сила Кориолиса.

В соответствии с законом Ньютона [4], в проекции на LP сумма действующих на сферу сил:

$$m \cdot a - F_{mp} - F_y \cdot \cos \alpha = 0,$$

где:  $m$  – масса частицы;  $a$  – ее ускорение;  $F_{mp}$  – сила трения;  $F_y$  – центробежная сила;  $\alpha$  – угол наклона лопасти к радиусу диска.

Решением уравнения (2) служит выражение для относительной скорости [1].

$$V_{om} = \frac{dS}{dt} = \frac{\omega \left( \sqrt{R^2 - r_n^2} - r_n \cdot f \right)}{\sqrt{f^2 + 1 + f}}. \quad (3)$$

Абсолютная скорость  $V$  находится по теореме косинусов [5] (рис. 3):

$$V = \sqrt{V_{om}^2 + V_{окр}^2 - 2 \cdot V_{om} \cdot V_{окр}}, \quad (4)$$

где  $V_{окр} = \omega \cdot R$ ,  $|OP| \perp V_{окр}$ .

Из треугольника КРО (рис. 3) следует [5]:

$$S(t) = \sqrt{R^2 - r_n^2} - b. \quad (5)$$

Такая зависимость получена с учётом того, что частица дроби начинает двигаться по

лопасти не от центра диска, а только на расстоянии LP (в связи с тем, что лопасть расположена не радиально, а ротор снабжён распределительным конусом, имеющим радиус нижнего основания КО). Таким образом, длина пути движения дроби  $S(t) = |LP| = |KP| - |KL|$ , что меньше на величину  $|KL| = b$  того пути, который могла бы пройти частица, если бы движение начиналось в месте пересечения нормального радиуса распределительного конуса и образующей поверхности лопасти.

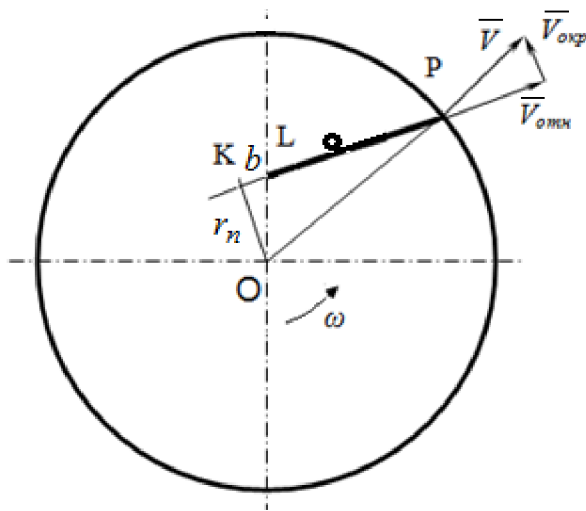


Рисунок 3 – Движение по лопасти

В таком случае абсолютная скорость вылета частиц из ротора определяется по формуле, которая отличается от (1) знаком «минус» при втором слагаемом:

$$V = \omega R \times \left[ \sqrt{1 + \frac{\left( \sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2} - \frac{r_n}{R} \cdot f} \right)^2}{\sqrt{f^2 + 1 + f}}} - \sqrt{\frac{2 \left( \sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2} - \frac{r_n}{R} \cdot f} \right) \frac{r_n}{R}}{\sqrt{f^2 + 1 + f}}} \right]. \quad (6)$$

Погрешность вычислений по формуле (6) в практических расчетах не превышает 2% [5].

Определим погрешность вычислений абсолютной скорости, рассчитанной по формулам (1) и (6):

$$\Delta V = \frac{V_b - V}{V_b} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Для упрощения расчетов, проводимых в общем виде, выполним анализ формулы абсолютной скорости, исходя из того, что коэффициент трения качения для дроби, имеющей форму сферы, можно считать, как бесконечно малую величину, и им можно пренебречь. Так, например, для шарикоподшипника качения, имеющего множество сферических тел качения, составляет 0,995, т. е. потери на трение шариков фактически отсутствуют.

Подставим значения формул (1) и (6) без учета коэффициента трения в выражение (7):

$$\Delta V = \frac{2 \left( \sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2}} \right) \frac{r_n}{R}}{\left( \sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2}} \right) \frac{r_n}{R}} \cdot 100\% = 200\%.$$

Таким образом, расчеты по формуле (1) могут приводить к завышенным результатам скорости удара стальной дроби при ее раскалывании почти в 2 раза.

Минимальную предупредную скорость частицы дроби можно найти экспериментальным путем для размеров дроби разного диаметра, исходя из равенства кинетической и потенциальной энергий, обеспечивающих гарантированное раскалывание:

$$E = \frac{m_d \cdot V_{\min}^2}{2} = m_c \cdot g \cdot h, \quad (8)$$

где  $m_d$  – масса частицы дроби, г;  $V_{\min}$  – минимальная скорость дроби в момент удара, гарантирующая ее раскалывание;  $m_c$  –

масса падающего груза при экспериментальном раскалывании дробы, г;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – минимальная высота падения груза, вызывающая раскалывание дробы, м.

Из равенства (8) скорость удара частицы об отбойную плиту должна составить не менее:

$$V \geq \sqrt{2 \cdot \frac{m_{\dot{a}}}{m_{\ddot{a}}} \cdot g \cdot h}. \quad (9)$$

С учетом численных значений, входящих в уравнение (9), и объема сферы  $\pi d^3/6$  при удельной массе стальной дробы  $\rho=7,82 \text{ г/см}^3$  формула (9) приобретет следующий вид:

$$V \geq \sqrt{2 \cdot \frac{m_{\dot{a}}}{\rho \cdot \pi d^3} \cdot g \cdot h}. \quad (10)$$

Или, окончательно, со всеми численными вычислениями:

$$V \geq 0,22 \sqrt{\frac{m_{\dot{a}}}{d^3} \cdot h}, \quad (11)$$

где  $d$  – диаметр дробы, м.

Приравняв скорости, найденные по выражениям (6) и (11), можно определить угловую скорость вращения ротора разгонно-ударной мельницы.

$$0,22 \sqrt{\frac{m_{\dot{a}}}{d^3} \cdot h} = \omega R \times \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2} - \frac{r_n}{R} \cdot f}}{\sqrt{f^2 + 1 + f}} \right)^2} - \sqrt{\frac{2 \left( \sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2} - \frac{r_n}{R} \cdot f} \right) \frac{r_n}{R}}{\sqrt{f^2 + 1 + f}}} \right]. \quad (12)$$

Отсюда угловое ускорение ротора разгонно-ударной мельницы будет описываться выражением (13):

$$\omega = \frac{0,22 \sqrt{\frac{m_{\dot{a}}}{d^3} \cdot h}}{\sqrt{1 + \left( \frac{\sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2} - \frac{r_n}{R} \cdot f}}{\sqrt{f^2 + 1 + f}} \right)^2} - \sqrt{\frac{2 \left( \sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2} - \frac{r_n}{R} \cdot f} \right) \frac{r_n}{R}}{\sqrt{f^2 + 1 + f}}}}. \quad (13)$$

Или, упрощенно, при бесконечно малом (нулевом) значении коэффициента трения качения:

$$\omega = \frac{0,22 \sqrt{\frac{m_{\dot{a}}}{d^3} \cdot h}}{\sqrt{1 + \left( \sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2}} \right)^2} - 2 \left( \sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2}} \right) \frac{r_n}{R}}. \quad (14)$$

При необходимости легко пересчитать угловую скорость вращения в частоту вращения по известным зависимостям.

Для практического применения свободного удара при раскалывании стальной дробы необходимо создавать достаточно большие скорости ее вылета. Это негативно может сказываться на надежности работы машины в связи с высокой изнашивающей способностью металлических абразивных частиц и самой дробы, относительно быстро выводя машину из работоспособного состояния. При этом возможны внезапные разрушения защитного корпуса, в результате чего может возникнуть повышенная вероятность угрозы обслуживающему персоналу. Поэтому крайне желательно снизить угловую частоту вращения ротора, например, путем осуществле-

ния многоступенчатого разрушения [6], когда на первом этапе стальная дробь может получать внутренние дефекты, приводящие к предварительному зарождению трещин в ее структуре, а на последующих стадиях – проводить окончательное раскалывание.

При проводимых экспериментах было замечено, что выбрасываемая из ротора дробь отражается от брони рабочих плит и рикошетом возвращается в зону действия лопастей ротора, что существенно снижает эффективность работы мельницы, резко увеличивая потери электроэнергии, а также сильно изнашивает конечные участки рабочих лопастей. Это впоследствии требует их частой замены и проведения сложных балансировочных работ. Таким образом, ремонтпригодность мельницы существенно усложняется, и снижаются межремонтные сроки эксплуатации. Одним из технических решений, направленных на устранение данного недостатка, является выполнение отбойных поверхностей с наклоном в сторону выгрузки раскалываемого материала.

Приведенные недостатки разгонно-ударных дробильно-измельчительных машин при раскалывании стальной дроби указывают, что применяемые для этой цели шаровые мельницы являются более надежными и безопасными в работе, однако требуют адекватной доработки в части организации более надежного способа реализации стесненного удара, т. к. ударное

взаимодействие сферических мелющих тел со сферическими частицами дроби является очень неэффективным с точки зрения осуществления центрального удара. Поэтому в первоначальный момент дробь раскалывается очень плохо, а затем, когда появляются частицы некруглых форм, начинается их резкое переизмельчение с образованием значительного количества металлической пыли, идущей в отбраковку.

#### **Выводы и направление дальнейших исследований.**

1. Известная формула абсолютной скорости вылета частицы из ротора разгонно-ударной мельницы для стальной дроби сферической формы дает фактически в два раза завышенное значение, что затрудняет адекватное описание протекающих процессов приготовления колотой дроби.

2. Разгонно-ударные дробилки за счет реализации способа разрушения свободным ударом обеспечивают значительную скорость вылета стальной дроби, что является неблагоприятным с точки зрения как стойкости футеровочных элементов мельницы, так и охраны труда производственного персонала.

3. Перспективным направлением раскалывания стальной дроби в разгонно-ударных мельницах с точки зрения снижения скоростей вылета дроби является применение многоступенчатых схем измельчения и эффективного отвода отраженных от отбойных поверхностей частиц к зоне разгрузки мельницы.

#### **Библиографический список**

1. Оскаленко Г.Н. Исследование дробления и измельчения силикатных и других материалов в центробежной роторной мельнице-дробилке : автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.05.04 "Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины" / Г.Н. Оскаленко. — Днепропетровск, 1965. — 27 с.

2. Вайтехович П.Е. Модель движения материала в роторе-ускорителе центробежно-ударной дробилки / П.Е. Вайтехович, П.С. Гребенчук, А.В. Таболич // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. — 2014. — № 3. — С. 102–104.

3. Королев П.П. Исследования по роторно-ударным дробилкам / П.П. Королев, В.Н. Алтухов, Э.П. Левченко // Сборник научных трудов ДГМИ. — Алчевск, 2002. — Вып. 16. — С. 180–184.

4. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики / С.М. Тарг. — М. : Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1963. — 480 с.

5. Левченко Э.П. Интенсификация технологического процесса измельчения зерна на комбикорм в центробежно-ударной мельнице: дис. канд. техн. наук : 05.05.11 / Левченко Эдуард Петрович. — Луганск, 2001. — 179 с.

6. Пат. 2029618 Россия, МКИ В02С 13/14. Центробежная дробилка / Онопченко А.Н., Зинченко А.М., Левченко Э.П., Сухомлин Р.М.; заявитель и патентособственник Левченко Эдуард Петрович. — № 4882162/33; заявл. 16.11.90; опубл. 30.01.93, Бюл. № 6. — 3 с.: ил.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. ДонГТУ Ульяницким В.Н.,  
д.т.н., проф. ДонНТУ Еронько С.П.*

*Статья поступила в редакцию 16.05.16.*

**к.т.н. Левченко Е.П., Павлиненко О.І., Власенко Д.О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)**

### **ЗАСТОСУВАННЯ РОЗГІННО-УДАРНИХ МЛИНІВ ДЛЯ РОЗКОЛЮВАННЯ СТАЛЬНОГО ДРОБУ ТА ОСБЛИВОСТІ ЇХ ШВИДКІСНИХ РОЗРАХУНКІВ**

*Шляхом аналітичних розрахунків та аналізу залежності абсолютної швидкості вильоту сталюго дробу з ротору розгінно-ударного млину уточнено швидкість удару частинок при виробництві колотого сталюго дробу. В результаті аналізу процесів, що протікають, виявлено шляхи їх покращення за рахунок застосування багатоступеневого подрібнення та ефективного відводу готового продукту.*

**Ключові слова:** *розгінно-ударний млин, абсолютна швидкість, сталюий дріб, багатоступенеve подрібнення, кульковий млин.*

**PhD in Engineering Levchenko E.P., Pavlinenko O.I., Vlasenko D.A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**

### **USING THE ROTOR-IMPACT MILLS FOR STEEL SHOT CLEAVING AND PECULIARITIES FOR THEIR RATE COMPUTATIONS**

*The impact velocity of particles in steel grit production has been defined through analytical calculations and analyzing the dependence of steel shot absolute escape velocity out of impact mill rotor. As a result of analysis of occurring processes the ways for their enhancement were found out due to using the multi-stage milling and effective product yielding.*

**Key words:** *rotor-impact mill, absolute rate, steel grit, multi-stage milling, ball mill.*