

УДК 621.926.9

*к.т.н. Левченко Э. П.,
Павлиненко О. И.,
к.т.н. Чебан В. Г.,
к.т.н. Левченко О. А.,
Куценко Е. В.*

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, levchenckoeduard@yandex.ua)

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНО-УДАРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО УСЛОВИЯ СТЕСНЕННОГО УДАРА

Работа посвящена расчету энерго-кинематических параметров роторно-ударного измельчителя, предназначенного для приготовления остроугольной стальной дроби прямым стесненным ударом из частиц дроби округлой формы в результате преобразования кинетической энергии вращающегося ротора в потенциальную энергию падающих тел. Предложенная методика позволяет определить требуемую мощность электродвигателя в зависимости от производительности и другие основные параметры измельчителя.

Ключевые слова: роторно-ударный измельчитель, методика расчета, мощность, производительность, энерго-кинематические параметры.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В условиях производства остроугольной стальной дроби (стального песка) как абразивного материала с высокими потребительскими свойствами основное место занимает технологический процесс раскалывания дроби округлой формы.

Основными недостатками существующей технологии приготовления остроугольных фрагментов стальных частиц являются повышенные энергозатраты на дефрагментацию, а также низкий выход готового продукта товарных фракций. В первую очередь это обусловлено тем, что в качестве исходных компонентов выступают близкие по форме к сферическим частицы стальной дроби, предварительно подвергнутые закалке до высокой твердости и обладающие низким коэффициентом трения.

Типовой машиной, обеспечивающей приготовление остроугольной дроби из частиц округлой формы является трубная мельница, наполненная мелющей загрузкой в виде шаров, имеющих диаметр около 100 мм. Преимущественное наложение загрузки свободно падающими шарами обеспечивает разрушение материала стес-

ненным ударом, нежелательными элементами которого являются вращательное движение шаров, способствующее изменению их траектории при ударе, и неблагоприятные условия соударения, приводящие к точечному контакту, причём, как правило, в условиях далёких от центрального удара, ввиду повышенной вероятности возникновения эффекта рикошета [1].

По этой причине работа шаровой мельницы сопровождается значительными энергопотерями, приводящими к повышенному тепловыделению. Также существенно снижается коэффициент полезного действия машины и сокращается выход готового продукта необходимых фракций. Кроме того, большая высота падения мелющей загрузки (около 2 м) в совокупности с её значительной массой и вращательное движение корпуса мельницы в существенной степени приводят к интенсивному пылеобразованию, состоящему из мелкодисперсных абразивных компонентов, что сравнительно быстро приводит к выходу из строя расположенного рядом оборудования, в первую очередь механических подвижных элементов привода самой мельницы. Также существенно ухудшаются условия труда рабочих.

Объектом исследования является технологический процесс получения остроугольного абразивного материала путем раскалывания стальной дроби округлой формы в роторно-ударном измельчителе, реализующем условие стесненного удара.

Предмет исследования — особенности расчета мощности привода роторно-ударного измельчителя, согласованной с его производительностью и потенциальной энергией падающих рабочих органов.

Задачи исследования — определение мощности привода роторно-ударного измельчителя для производства остроугольной стальной дроби путем обеспечения запаса необходимой потенциальной энергии ударных рабочих органов, при которой достигается минимально необходимая производительность установки.

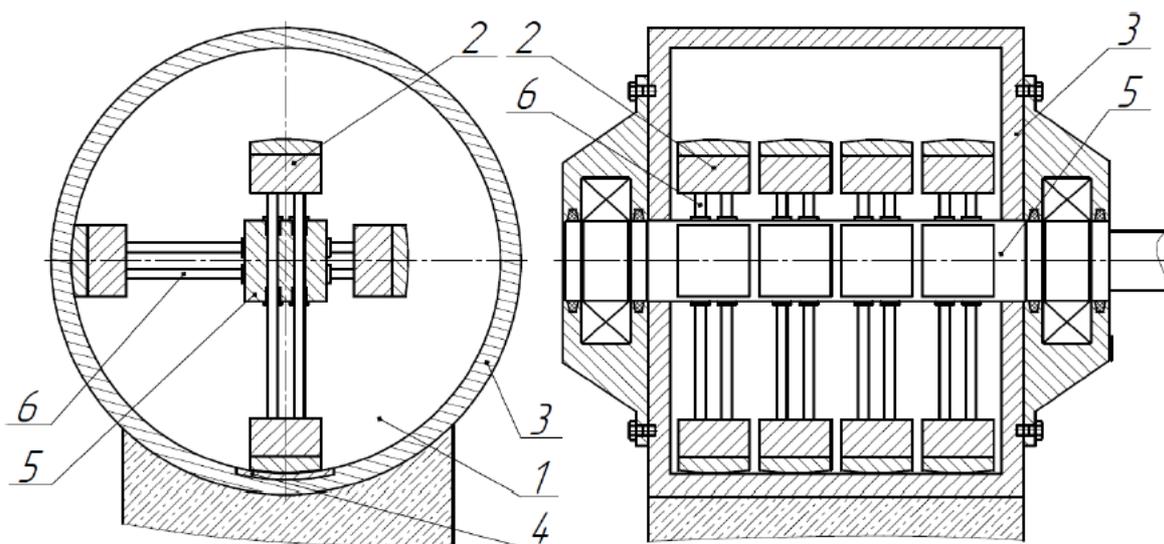
Методика исследований. Расчетные аналитические методы исследования условий подъема на необходимую высоту рабочих органов и их ударного воздействия на раскалываемый материал с помощью основных закономерностей механики.

Изложение материала и его результаты. Запатентованный способ разрушения

материалов стесненным ударом [2] реализован в принципиально новой конструкции роторно-ударного измельчителя, схема которого представлена на рисунке 1.

Анализ известных патентных документов выявил, что указанный способ разрушения в дробильно-измельчительной технике ранее не применялся. Следовательно, для разработки и изготовления предложенного роторно-ударного измельчителя необходимо выполнить предварительные расчеты мощностных характеристик при которых гарантируется работоспособность и обеспечивается заданная производительность при раскалывании литой стальной дроби округлой формы, выступающей в качестве исходного материала для получения остроугольных частиц стального абразива.

Подлежащая раскалыванию дробь сферической формы подается в рабочую камеру 1, где разрушается между падающими ударниками 2 и внутренней стенкой корпуса 3. При вращении ротора 5, мелющие тела 2 накапливают потенциальную энергию подъема за счет преобразования кинетической энергии его вращения.



1 — рабочая камера; 2 — мелющие тела (ударник); 3 — стенка корпуса; 4 — лист брони;
5 — ротор; 6 — направляющие штоки

Рисунок 1 Схема роторно-ударного измельчителя

В соответствии с кинематической схемой, представленной на рисунке 2, и заданной минимально необходимой производительностью установки 1 т/ч, с учетом ранее выполненных исследований [1, 3, 4], упрощенная методика расчета энерго-кинематических параметров роторно-ударного измельчителя может выглядеть следующим образом.

Мощность на валу измельчителя определяется по известной формуле [5]

$$P_{\text{вн}} = F \cdot V = M \cdot \omega, \quad (1)$$

где F — сила удара, необходимая для гарантированного раскалывания сферических частиц стальной дроби;

V — скорость падающего мелющего тела в момент удара;

M — крутящий момент на валу ротора;

ω — угловая скорость вращения ротора.

$$M = m_y \cdot g \cdot R_p, \quad (2)$$

где m_y — масса ударника;

R_p — радиус подвеса центра массы ударника на валу ротора.

Ввиду того, что противоположно расположенные ударные элементы соединены между собой (см. рис. 3), формула (2) примет вид

$$M = m_y \cdot g \cdot (R_{y1} - R_{y2}). \quad (3)$$

Масса одной сферической частицы стальной дроби

$$m_d = V_{\text{ш}} \cdot \rho_{\text{ст}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_d^3 \cdot \rho_{\text{ст}}, \quad (4)$$

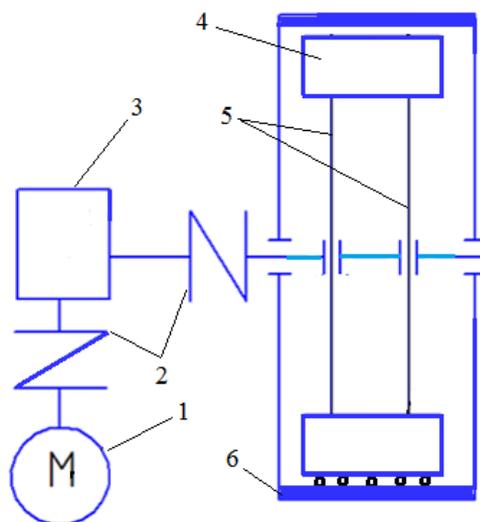
где $V_{\text{ш}}$ — объем шара, см^3 ;

$\rho_{\text{ст}} = 7,85 \text{ г/см}^3$ — плотность стали;

R_d — радиус сферической частицы стальной дроби, см.

Тогда масса наиболее трудно разрушаемой частицы дроби [1, 3, 4], имеющей диаметр 2,1 мм, $m_{21} = 0,3 \text{ г}$, а число частиц, которые необходимо расколоть за 1 час, при производительности $Q_u = 1000 \text{ кг/ч}$

$$N_{\text{час}} = \frac{Q_y}{m_{21}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{0,3} = 3333333 \text{ шт.} \quad (5)$$



1 — электродвигатель; 2 — муфты; 3 — червячный редуктор; 4 — мелющие тела; 5 — направляющие штоки; 6 — футеровка корпуса

Рисунок 2 Кинематическая схема измельчителя

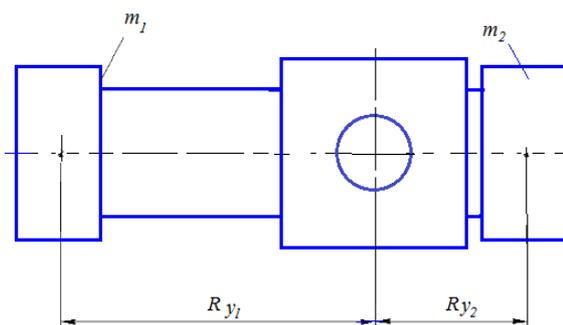


Рисунок 3 Расчетная схема для определения крутящего момента

При этом за одну минуту необходимо расколоть частиц

$$N_{\text{мин}} = \frac{N_{\text{час}}}{60} = \frac{3333333}{60} = 55556 \text{ шт.} \quad (6)$$

При четырехрядном исполнении каждым рядом ударников необходимо раскалывать 13889 частиц дроби за минуту.

Время падения мелющего тела составляет 0,45 с и находится по формуле [6]

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot H}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{9,81}} = 0,45 \text{ с}, \quad (7)$$

где $H = 1 \text{ м}$ — высота падения тела.

Из необходимости минимизации центробежных сил, возникающих на ударнике, примем частоту вращения ротора 15 об/мин, уточнение которой будет выполнено после анализа работы физической модели данной установки.

Так как каждый ряд содержит четыре ударника, то за 1 минуту будет реализовано 30 ударов. За каждый удар необходимо будет расколоть 231 частицу дробы.

Экспериментальным путем установлено, что для гарантированного раскалывания 1000 частиц дробы округлой формы достаточно иметь ударник массой в 250 кг.

Рассчитанный по формуле (3) крутящий момент при радиусе подвеса ударников $R_{y1} = 1$ м составит 1625 Н·м для однорядного устройства.

Для исключения передачи ударных нагрузок на вал ротора величина зазора между ударником и валом принята $\Delta = 25$ мм. Тогда при поперечном сечении вала 400 мм (выбрано конструктивно) и высоте мелющего тела 250 мм расстояние между центром вращения вала и центром тяжести ударника составит 325 мм. С учетом зазора Δ радиус $R_{y2} = 0,325 + 0,025 = 0,35$ м.

При четырехрядном исполнении измельчителя рассчитанный крутящий момент увеличится в 4 раза и составит 6500 Н·м.

При этом мощность на валу измельчителя, рассчитанная по формуле (1), составит 10205 Вт.

Учитывая коэффициенты полезного действия (КПД) кинематических пар, входящих в структуру кинематической схемы измельчителя, мощность привода составит

$$P_{пр} = \frac{P_{ви}}{\eta_m^2 \cdot \eta_{чр} \cdot \eta_{нк} \cdot \eta_{нс}}, \quad (8)$$

где η_m — КПД муфты;

$\eta_{чр}$ — КПД червячного редуктора;

$\eta_{нк}$ — КПД пары подшипников качения;

$\eta_{нс}$ — КПД подшипников скольжения поступательной пары штока с втулкой, характеризующий подъем и падение мелющих тел за счет вращения ротора.

Значения КПД приведены в таблице 1 [7].

Таким образом, рассчитанная по формуле (8) требуемая мощность привода измельчителя составит 16,9 кВт.

Следовательно, для приведения в действие роторно-ударного измельчителя четырехрядного исполнения необходимо выбрать ближайший по мощности трехфазный асинхронный электродвигатель номинальной мощностью 18,5 кВт типа АИР 200L8У3 с частотой вращения вала 730 об/мин [8].

Сравнительные характеристики типовой шаровой мельницы и роторно-ударного измельчителя приведены в таблице 2.

Ранее проведенные теоретические исследования [9] показали хорошую сходимость с методикой определения мощности привода роторно-ударного измельчителя стальной колотой дробы на основе уравнения Лагранжа второго рода для определения величины крутящего момента. При этом ранее опубликованная и рассматриваемая методики дают близкие результаты в определении мощности привода ударного измельчителя для раскалывания стальной дробы, что доказывает адекватность упрощенной методики расчета.

Таблица 1

Значения КПД

η_m	$\eta_{чр}$	$\eta_{нк}$	$\eta_{нс}$
0,98	0,78	0,99	0,95

Таблица 2

Сравнительная оценка измельчительного оборудования для приготовления остроугольной дробы

Измельчитель	Габаритные размеры, м	Масса мелющей загрузки, т	Производительность, т/ч	Мощность двигателя, кВт	Удельный расход энергии, кВт·ч/т
Шаровая мельница	2×2,5×3,	5,5	1,2	55,0	45,8
Роторно-ударный	2×2,0×2,5	4,0	1,0	18,5	18,5

Проведенные расчеты основных параметров принципиально нового роторно-ударного измельчителя показывают, что он выгодно отличается от традиционно применяемой в производстве остроугольной колотой дробы шаровой мельницы, в первую очередь по снижению удельных энергозатрат на раскалывание.

Выводы и направление дальнейших исследований. Таким образом, в результате проведенных расчетов и анализа двух видов измельчительного оборудования выявлено, что использование роторно-ударного измельчителя, реализующего условие разрушения материала прямым

стесненным ударом, при производстве остроугольной дробы по удельным энергозатрам экономичнее (почти в 3 раза), что даст значительный эффект в совокупности с повышением выхода товарной фракции готового продукта.

В качестве направления дальнейших исследований предполагается выполнить анализ влияния на потребляемую измельчителем мощность дополнительных устройств, необходимых для организации загрузки исходного сырья и выгрузки готового продукта, в том числе планируемого для организации подачи исходного продукта шлюзового питателя.

Библиографический список

1. Павлиненко, О. И. Экспериментальные исследования энергозатрат на раскалывание стальной дробы прямым стесненным ударом [Текст] / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2017. — Вып. 7 (50). — С. 158–163.
2. Пат. 2729155 Российская Федерация, МПК¹³ В 02 С 17/00. Способ разрушения материалов свободным ударом / О. И. Павлиненко, А. П. Жильцов, В. Г. Чебан, Э. П. Левченко, Д. А. Власенко, О. А. Левченко ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет». — № 1019127706 ; заявл. 02.09.19 ; опубл. 04.08.20, Бюл. № 2. — 2 с. : ил.
3. Павлиненко, О. И. Процесс разрушения стальной дробы центральным стесненным ударом [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов : материалы 5-й международной научно-практической конференции. Т. 3. — Донецк, 2019. — С. 104–108.
4. Перспективы получения колотой стальной дробы [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко и др. // Новые материалы и перспективные технологии : сборник материалов IV междисциплинарного научного форума с международным участием. Т. 1. — М. : ООО «Буки Веди», 2018. — С. 629–631.
5. Иванов, М. Н. Детали машин [Текст] : учебник для машиностроительных вузов / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. — М. : Высшая школа, 2003. — 408 с.
6. Иванов, Б. Н. Законы физики [Текст] : учебное пособие / Б. Н. Иванов. — М. : Высшая школа, 1986. — 335 с.
7. Дунаев, П. Ф. Детали машин. Курсовое проектирование [Текст] : учеб. пособ. для машиностроит. спец. учреждений среднего профессионального образования / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. — М. : Машиностроение, 2004. — 560 с.
8. Ануриев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст]. В 3-х т. Т. 3. / В. И. Ануриев. — М. : Машиностроение, 2001. — 864 с.
9. Определение мощности привода роторного ударного измельчителя для производства стальной колотой дробы [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2020. — № 19 (62). — С. 86–93.

© Левченко Э. П.
 © Павлиненко О. И.
 © Чебан В. Г.
 © Левченко О. А.
 © Куценко Е. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛГУ им. В. Даля Замотой Т. Н.,
к.э.н., доц. каф. ТОМП ДонГТИ Зинченко А. М.*

Статья поступила в редакцию 15.12.2020.

**PhD in Engineering Levchenko E. P., Pavlinenko O. I., PhD in Engineering Cheban V. G.,
PhD in Engineering Levchenko O. A., Kutsenko E. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR,
levchenckoeduard@yandex.ua)**

**JUSTIFICATION OF THE MAIN PARAMETERS OF ROTARY IMPACT CRUSHER THAT
IMPLEMENTS CONSTRAINED IMPACT CONDITIONS**

The work is devoted to the calculation of the energy-kinematic parameters of rotary impact crusher, designed to prepare steel grit with a direct constrained impact from round-shaped grit particles as a result of converting the kinetic energy of a rotating rotor into the potential energy of falling bodies. The proposed method allows you to determine the required power of the electric motor depending on the capacity and other main parameters of the crusher.

Key words: rotary impact crusher, design procedure, power, capacity, energy-kinematic parameters.