

О.И. Павлиненко, Д.А. Власенко, Э.П. Левченко /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донбасский государственный технический университет» (Алчевск)

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНОЙ УДАРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОЛОТОЙ ДРОБИ

На основании второго закона Ньютона проведено аналитическое исследование динамики движения рабочих органов ударной роторной мельницы для производства стальной колотой дроби. Обоснованы зависимости расстояния, пройденного молотом, и его скорости при контактном взаимодействии со слоем дроби. В результате предложены конструктивные и технико-эксплуатационные параметры мельницы для дробления стальной сферической дроби.

Ключевые слова: ударная мельница, стальная дробь, ротор, молот, конструктивно-технологические параметры.

Постановка проблемы

Область применения сферической стальной колотой дроби довольно широка. Машиностроение и metallurgия, авиа- и автомобилестроение, прочие сферы промышленности активно используют этот материал для дробеструйной и дробеметной обработки.

Однако при изготовлении колотой дроби возникает потребность в усовершенствовании существующих процессов дробления и обосновании параметров дробильной машины с целью повышения эффективности процесса и качества продукции, а также снижения стоимости производства стальной колотой дроби.

Анализ последних исследований и публикаций

Дробь стальная колотая остроугольная производится путем дробления литой стальной дроби с применением определенных технологий в специальных дробильных машинах. Для этого в основном используются шаровые мельницы или валковые дробилки [1,2]. Однако они имеют ряд недостатков, таких как переизмельчение дробимого продукта по причине многократного ударного нагружения шарами, низкая производительность валковых дробилок и, вследствие этого, высокая энергоемкость процессов [3,4]. Таким образом, применение новых, усовершенствованных или основанных на ином способе разрушения материала [5] типов или конструкций дробильно-измельчительных машин позволит повысить эффективность процесса дробления стальной дроби.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является обоснование конструктивно-технологических параметров ударной роторной мельницы и обеспечение

повышения ее эффективности при производстве стальной колотой дроби на основе предложенной математической модели контактного взаимодействия ударного элемента дробильной машины с дробью и динамики основных рабочих органов в рабочем пространстве мельницы [6].

Основной материал исследования

Для исключения недостатков при изготовлении колотой дроби в шаровых мельницах и валковых дробилках рекомендуется использовать в качестве способа разрушения сырья стесненный прямой центральный удар молотом. Такой принцип наложения разрушающей нагрузки исключает переизмельчение дробимого материала, снижает энергозатраты [3,6], вследствие чего повышается эффективность всего процесса дробления. Для реализации этого метода рекомендуется использовать ударную роторную дробилку с подвижными молотами (рис. 1), состоящую из корпуса, ротора и ударных элементов (молотов), перемещающихся в направляющих, расположенных в валу ротора.

Для математического моделирования рассматриваемой ударной роторной мельницы изначально необходимо определить технические требования для раскалывания дроби стесненным ударом [6]: массу молота и его скорость при ударном контакте с дробью по методике, предложенной в работе [7]. Затем на основании полученных результатов необходимо определить основные параметры ударной мельницы – конструктивные размеры (радиус внешнего и внутреннего положения молота), а также технологические и энергосиловые параметры дробильной машины – угловую скорость вращения ротора, скорость ударного контакта, количество рядов молотов, производительность мельницы.

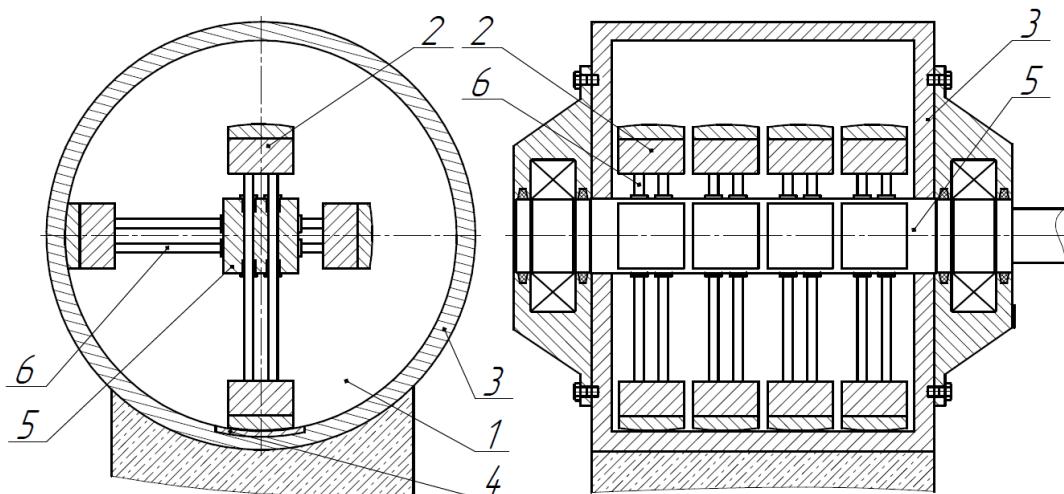


Рис. 1. Схема ударной роторной мельницы:

1 – рабочая камера мельницы; 2 – молот; 3 – корпус мельницы;
4 – зона ударного раскалывания дроби; 5 – ротор; 6 – шток молота

Для определения основных параметров математической модели ударной мельницы приняты следующие допущения:

- при относительном движении молота принимаем, что происходит сухое трение; влиянием изменения скорости движения штоков по направляющим на коэффициент трения пренебрегаем;
- массу штока принимаем равной нулю;
- при ударном контакте молотов со слоем дроби отсутствует относительное движение (скольжение) по поверхности дробимого материала.

В первую очередь необходимо обосновать значение требуемой массовой производительности ударной роторной мельницы при реализации гарантированного разрушения (раскалывания) материала при одиночном ударном взаимодействии молота с необходимым количеством дробимого материала N_{op} , которое определяется по следующей зависимости:

$$N_{op} = \frac{3M_o}{120\pi\rho d^3 n_p N_{yd}}, \quad (1)$$

где M_o – массовая производительность ударной мельницы, т/ч; ρ – плотность дробимого материала, т/м³; d – средний диаметр дробинок, м; n_p – число оборотов ротора, об/мин; N_{yd} – число молотов на роторе, шт.

Затем определяем следующие параметры ударного взаимодействия молота с дробью, необходимые для обеспечения условий гарантированного разрушения дробимого материала, – рабочие радиусы вращения молотов в их верхнем R и нижнем r положениях относительно центра

вращения ротора. Для этого используем закономерности, полученные в работе [7], с учетом результатов, полученных в зависимости (1).

Для наибольшей эффективности процесса раскалывания дроби необходимо реализовать удар молота по слою дроби в нижней части корпуса мельницы – в рабочей зоне раскалывания (см. рис. 1), где скорость стесненного движения молота совпадает с направлением силы удара. Для обеспечения этого условия следует определить необходимую угловую скорость вращения ротора.

Рассмотрим одновременное вращательное движение ротора мельницы относительно центра вращения и поступательное движение одного молота относительно поверхности направляющих.

Из анализа кинематики и динамики системы ротор – шток – молоты на примере расчетной схемы участка ротора ударной мельницы, представленной на рис. 2, видно, что для создания прямого центрального удара, обеспечивающего наибольшую эффективность разрушения материала, необходимо, чтобы соударение молота происходило со слоем дроби, находящейся в нижнем секторе корпуса мельницы (рис. 2, сектор А), так как в этом случае направление всех сил, проходящих через центр тяжести молота, совпадает с направлением его скорости. Выполнение этого условия при постоянных геометрических характеристиках мельницы зависит от следующих параметров:

- угловой скорости вращения вала ротора ω , с⁻¹;
- динамического коэффициента трения скольжения материала штока молота по материалу направляющих вала ротора f_1 .

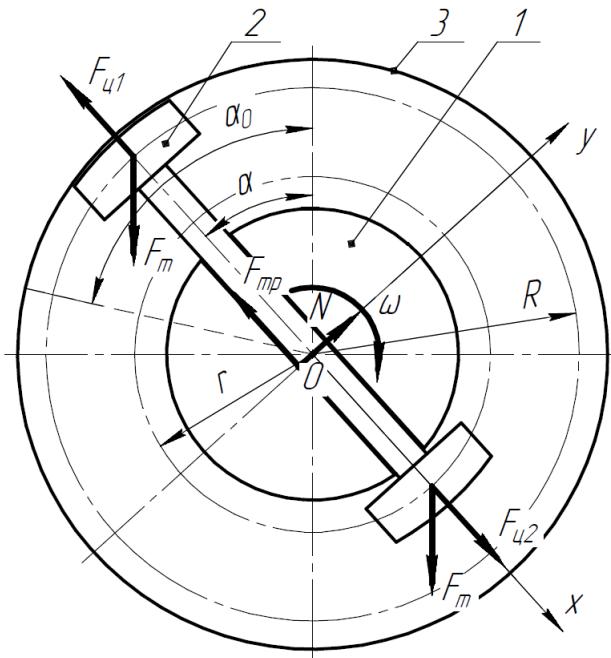


Рис. 2. Расчетная схема для определения основных параметров движения ударных элементов роторной мельницы:
1 – ротор; 2 – молот; 3 – рабочая поверхность корпуса мельницы; 4 – шток молота

Для обоснования основных конструктивно-технологических параметров мельницы необходимо определить угловую скорость вращения ротора и материал направляющих (его коэффициент трения), обеспечивающие необходимое условие контактного взаимодействия молота в нижней (центральной) зоне рабочего пространства (рабочей поверхности) мельницы. На основании этого определяется линейная скорость, при которой произойдет ударный контакт рабочего органа с материалом.

В процессе относительного перемещения молота по направляющим вала ротора на него действуют следующие силы и реакции: центробежные силы молотов F_{u1} и F_{u2} , сила кинетического трения скольжения штока в направляющих ротора F_{mp} , определяемая силой нормальной реакции от веса молота N и силы тяжести молота F_m (см. рис. 2).

Для математического обоснования мельницы воспользуемся дифференциальным законом механического движения тел (2-й закон Ньютона) [8]. Векторная форма уравнения динамики ударных элементов относительно вала ротора при их сложном движении в подвижной системе координат xOy запишется как:

$$2m_m \bar{a} = \bar{F}_{u1} + \bar{F}_{u2} + \bar{F}_{mp} + 2\bar{F}_m, \quad (2)$$

где \bar{a} – ускорение при поступательном движе-

нии ударных элементов относительно направляющих вала ротора, м/с^2 ; \bar{F}_{u1} – центробежная сила молота, находящегося в верхнем положении, Н; \bar{F}_{u2} – центробежная сила молота, находящегося в нижнем положении, Н; \bar{F}_{mp} – сила трения, возникающая при скольжении штока ударного элемента по поверхности направляющих ротора, Н; \bar{F}_m – сила тяжести ударных элементов, Н.

В первую очередь определим положение (угол поворота при вращении) ротора, при котором начнется движение (скольжение) ударного элемента относительно отверстия вала ротора.

Для этого рассмотрим систему в состоянии относительного покоя (то есть молот не перемещается относительно направляющих ротора).

Зависимость (2) в проекции векторов сил на подвижные координатные оси x , y при сохранении в первом приближении зависимости для определения силы трения от величины силы нормальной реакции от веса молотов со штоком будет определяться как $F_{mp}=f_1N$, а с учетом того, что $\bar{F}_{u1}=m_m\omega^2R$, $\bar{F}_{u2}=m_m\omega^2r$, $\bar{F}_m=m_mg$, и при отсутствии ускорения движения молота $\ddot{y}=0$, зависимость (2) дает окончательное уравнение равновесия системы молот-шток-ротор в проекции на подвижную ось x .

Решение данного уравнения в условиях состояния покоя механической системы относительно угла α дает следующее выражение для определения угла положения ротора относительно горизонтальной оси, при котором начинается относительное движение штока ударного элемента в направляющих при вращательном движении ротора α_0 :

$$\alpha_0 = 2 \arctan \left(\frac{\sqrt{4g^2(1+f_1^2) - \omega^4(R-r)^2} - 2g}{2f_1g + \omega^2(r-R)} \right). \quad (3)$$

Для определения основных параметров движения молота (зависимости расстояния, пройденного молотом, и его линейной скорости относительно оси вращения ротора от времени) рассмотрим выражение (2) в проекциях векторов сил на подвижные оси x , y (см. рис. 2), связанные с осью молота, в процессе вращения ротора при начальном значении угла поворота ротора $\alpha=\alpha_0$.

С учетом того, что угол между подвижной осью x и направлением вектора силы тяжести $\alpha'=\alpha_0+\alpha$ ($\alpha=\omega t$ – угол поворота ротора за определенное время, рад., t – время движения, с), выражение (2) дает окончательное дифференциальное уравнение относительного движения мо-

лота по поверхности направляющих ротора (с учетом центробежной силы, возникающей при вращении системы) [9]:

$$2\ddot{x} = \omega^2(r - R + 2x) + 2g \sin(\alpha_0 + \omega t) - 2f_1 g \cos(\alpha_0 + \omega t), \quad (4)$$

где \ddot{x} – вторая производная от пройденного расстояния молотом по времени (ускорение).

Данное уравнение является линейным неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. Стандартная процедура решения такого типа дифференциальных уравнений [10] (при заданных начальных условиях $t=0: x(0)=0, \dot{x}(0)=0$) дает следующий результат:

$$x(t) = \frac{R-r}{2} - \frac{g(\sin(\alpha_0 + \omega t) - f_1 \cos(\alpha_0 + \omega t))}{2\omega^2} + \frac{e^{\omega t} [\omega^2(r - R) + g(\cos(\alpha_0)(1 - f_1) + \sin(\alpha_0)(1 + f_1))]}{4\omega^2} - \frac{e^{-\omega t} [\omega^2(R - r) + g(\cos(\alpha_0)(1 + f_1) - \sin(\alpha_0)(1 - f_1))]}{4\omega^2}. \quad (5)$$

При этом скорость поступательного движения ударного элемента подчиняется следующей зависимости от времени:

$$V(t) = \dot{x}(t) = -\frac{g(\cos(\alpha_0 + \omega t) + \sin(\alpha_0 - \omega t)f_1)}{2\omega} + \frac{e^{\omega t} [\omega^2(r - R) + g(\cos(\alpha_0)(1 - f_1) + \sin(\alpha_0)(1 + f_1))]}{4\omega} - \frac{e^{-\omega t} [\omega^2(R - r) - g(\cos(\alpha_0)(1 + f_1) - \sin(\alpha_0)(1 - f_1))]}{4\omega}. \quad (6)$$

Решение уравнений (3), (5) и (6) численными методами позволяет описать законы движения молота по направляющим в зависимости от угловой скорости вращения ротора ω и различных коэффициентов трения при сочетании пар материалов рабочих органов: сталь по бронзе $f_1=0,12$; сталь по стали $f_1=0,15$; сталь по чугуну $f_1=0,3$. При проведении математических расчетов основных параметров мельницы использовались следующие ее технико-эксплуатационные характеристики: угловая скорость вращения ротора принималась в диапазоне $1,6 \dots 2,2 \text{ с}^{-1}$; рабочие радиусы вращения молотов в их верхнем и нижнем положениях относительно центра вращения ротора – $R=1,05 \text{ м}$ и $r=0,3 \text{ м}$ соответственно.

В зависимости от заданных геометрических характеристик ударной мельницы, от которых зависит расстояние, преодолеваемое молотом от верхнего до нижнего его положения относительно центра вращения ротора, при решении численными методами системы уравнений, состоящей из зависимостей (3) и (5), определяется необходимая угловая скорость вращения ротора для обеспечения ударного контакта в требуемом секторе рабочей поверхности корпуса дробилки ω' .

В первую очередь для этого необходимо найти угол положения ротора, при котором начинается движение штока ударного элемента мельницы относительно направляющих α_0 , и угловую скорость вращения, требуемую для обеспечения ударного контакта молота со слоем дроби в секторе А (см. рис. 2), при определенном коэффициенте трения f_1 , графические зависимости которых представлены на рис. 3.

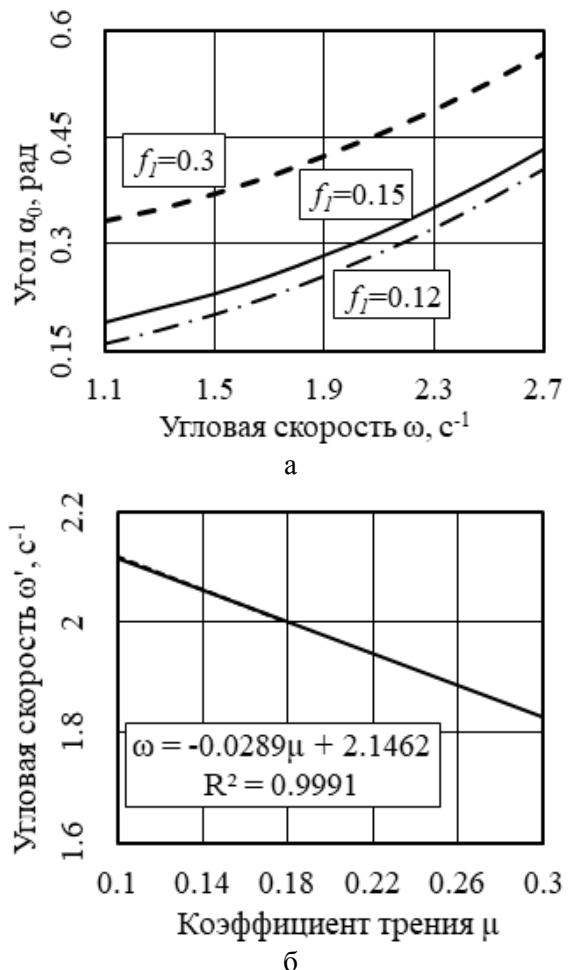


Рис. 3. Зависимости угла положения ротора α_0 от его угловой скорости вращения и требуемой угловой скорости вращения ротора от коэффициента трения:

а – зависимости угла α_0 от угловой скорости;
б – зависимость необходимой угловой скорости ω' от коэффициента трения

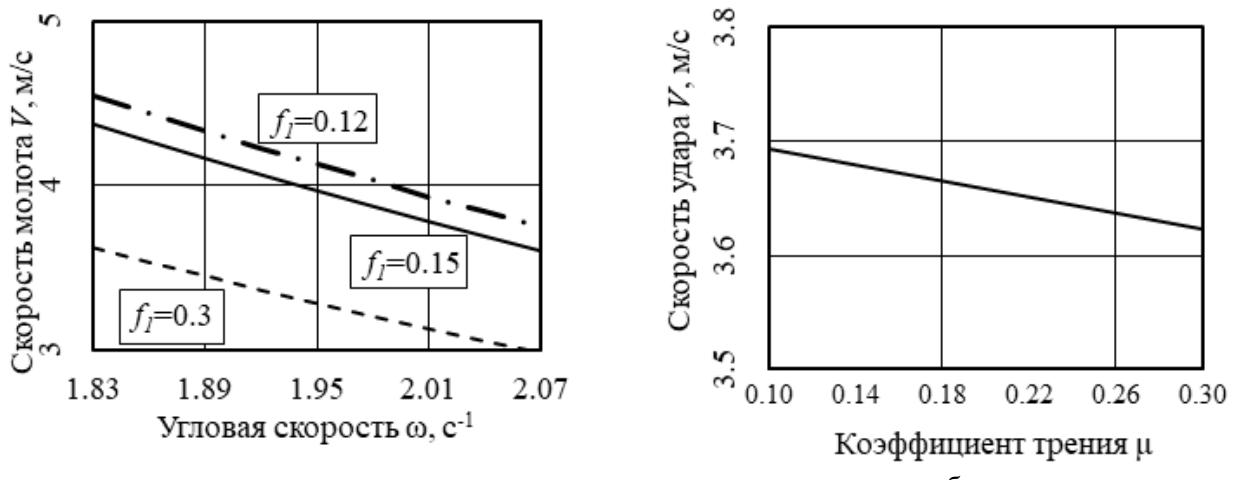


Рис. 4. Графические зависимости скорости ударного контакта молота с дробью:
 a – зависимости скорости молота от угловой скорости ротора; b – зависимость скорости молота в зоне контакта с дробью от угловой скорости и коэффициента трения

Табл. 1. Конструктивно-технологические параметры ударной роторной мельницы

№ п/п	Параметр	Материал направляющих		
		Бронза	Сталь	Чугун
1	Коэффициент трения молота по направляющим	0,12	0,15	0,3
2	Радиус внешнего положения молота, м		1,05	
3	Радиус внутреннего положения молота, м		0,3	
4	Угловое положение ротора, α_0 , рад	0,25	0,28	0,42
5	Рекомендуемая угловая скорость вращения ротора, с^{-1}	2,07	2,04	1,83
6	Расчетная скорость ударного контакта, м/с	3,69	3,67	3,62
7	Количество ударных элементов, шт.		4	
8	Предполагаемая производительность мельницы, т/ч	1,05	1	0,9

На рис. 4 отображены графики зависимости линейных скоростей, при которых происходит ударное взаимодействие молота с дробью в зоне контакта, от угловой скорости при различных коэффициентах трения (рис. 4а) и графическая зависимость, отображающая функцию линейной скорости удара молота (сектор А) (рис. 4б) от коэффициента трения, сочетание которых гарантирует условие ударного контакта в требуемом секторе.

Из анализа графиков на рис. 3 и 4 видно, что коэффициент трения материалов существенно влияет на угол положения ротора, при котором начинается относительное движение молота по направляющим. При увеличении угла во время вращения ротора, α_0 , уменьшается время, необходимое для обеспечения перемещения молота в необходимый сектор ударного контакта, что требует уменьшения скорости вращения ротора, приводящего к снижению массовой производительности мельницы. При этом исследования показали, что сопоставление требуемых значений коэффициентов трения материалов штока и направляющих, а также угловых скоростей вращения ротора, обеспечивающих условие удара

молота по дроби в необходимом секторе корпуса, фактически не сказывается на линейной скорости ударного взаимодействия молота и дроби.

Полученные результаты математического моделирования рабочего процесса взаимодействия и движения основных рабочих органов ударной роторной мельницы, предназначенный для производственного дробления сферической стальной дроби, в виде рекомендуемых для нее конструктивно-технологических и технико-эксплуатационных параметров при использовании стальных штоков молотов и направляющих, изготовленных из различных материалов, представлены в табл. 1.

Выводы

Получена математическая модель движения ударных элементов и ротора, позволяющая обосновать наибольшую эффективность процесса дробления сферической стальной дроби в ударной мельнице.

Определены зависимости угловой скорости вращения ротора и линейной скорости молота при соударении с дробью, характеризующие основные параметры процесса дробления материала.

Предложены конструктивно-технологические параметры ударной роторной мельницы при использовании различных сочетаний материалов основных рабочих органов для рационального их применения в дробильной машине.

Результаты исследований могут использоваться при обосновании основных конструктивных параметров экспериментальной дробильной установки для подтверждения адекватности математической модели процесса дробления материала при проведении экспериментальных исследований, а в дальнейшем – как рекомендации при определении технико-эксплуатационных характеристик ударной роторной мельницы с подвижными молотами для внедрения в производство стальной колотой дроби.

Список литературы

1. Subba Rao, D.V. Minerals and Coal Process Calculations. – London: Taylor & Francis Group, 2016. – 354 p.
2. Treatise on Process Metallurgy, Vol. 3: Industrial Processes / Editor-in-Chief S. Seetharaman. – Elsevier, 2014. – 1751 p.
3. Павлиненко, О.И. Анализ возможности использования существующих технических средств для получения стальной колотой дроби / О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко, В.Г. Чебан // Вестник ДонНТУ, 2016. – №4 (3). – С. 38-44.
4. Lynch, Alban J. The History of Grinding / Alban J. Lynch, Chester A. Rowland. – Littleton: SME, 2005. – 209 p.
5. Власенко, Д.А. Комплексный анализ особенностей эксплуатации дробильно-измельчи- тельного оборудования в агломерационном производстве / Инновационные перспективы Донбасса: материалы 5-й Международной научно-практической конференции. Т.3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов, г. Донецк, 21-23 мая 2019 г. – Донецк, 2019. – С. 150-154.
6. Оборудование для переработки сыпучих материалов: учебное пособие / В.Я. Борщев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2006. – 208 с.
7. Павлиненко, О.И. Аналитические приемы обоснования основных параметров процесса раскалывания стальной дроби стесненным ударом / О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко, Д.А. Власенко // Сб. науч. тр. ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ, 2019. – №15(58). – С. 106-112.
8. Медведев, Б.В. Начала теоретической физики. Механика, теория поля, элементы квантовой механики. – М.: Физматлит, 2007. – 38 с.
9. Павлиненко, О.И. Процесс разрушения стальной дроби центральным стесненным ударом / О.И. Павлиненко, Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 5-й Международной научно-практической конференции. Т.3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов, г. Донецк, 21-23 мая 2019 г. – Донецк, 2019. – С. 104-108.
10. Демидович, В.П., Моденов, В.П. Дифференциальные уравнения. – СПб.: Лань, 2008. – 288 с.

O.I. Pavlinenko, D.A. Vlasenko, E.P. Levchenko /Cand. Sci. (Eng.)/
Donbass State Technical University (Alchevsk)

SUBSTANTIATION OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE ROTARY IMPACT MILL FOR THE CRUSHED SHOT PRODUCTION

Background. The process of splitting steel spherical shot is quite energy-intensive. Besides, the physical and technical characteristics of the finished product are subject to high requirements. This fact determines the importance of studying and improving these processes to reduce energy costs and the quality of steel shot.

Materials and/or methods. The mathematical model is based on the application of the main parameters of the dynamics of the rotor-hammer system under constrained impact in the impact mill and the solution of the Hertz Contact Theory. The objective of this work is the substantiation of constructive-technological parameters of the impact rotary mill and increasing its efficiency in the production of steel crushed shot based on the proposed mathematical model of contact interaction of the impactor crushing machine with small shot, and the dynamics of the central working bodies in the working space of the crushing machine.

Results. A mathematical model of the complex motion of the impact elements and the rotor is developed, which allows substantiating the highest efficiency of the process of crushing spherical steel shot in the impact mill with a combination of different materials of the working bodies. The dependences of

the angular rotation velocity of the rotor and the linear speed of the hammer at impact with the shot, characterising the main parameters of the crushing the material process in the impact mill, are determined. The design and technical parameters of the impact rotary mill with the use of different combinations of materials of the main working bodies for their rational application in the crushing machine are proposed.

Conclusion. The perspective direction of the increase of efficiency of the process of splitting of steel spherical shot, from the rise of operational characteristics of crushing machines, is the realisation of the direct central constrained blow at the superimposition of loadings on crushed material in a shock mill. The research results can be used to substantiate the basic design and technological parameters of the experimental crushing plant to confirm the adequacy of the mathematical model for the material crushing process during experimental studies, and in the future - as recommendations in determining the technical and operational characteristics of the impact rotary mill with movable hammers for introduction into the production of steel crushed shot.

Keywords: impact mill, steel shot, rotor, hammer, structural and technological parameters.

Сведения об авторах

О.И. Павлиненко

Телефон: +380 (72) 106-98-30
Эл. почта: olia.pavlinenko@yandex.ua

Д.А. Власенко

SPIN-код: 6296-2040
Телефон: +380 (72) 112-82-33
Эл. почта: vlasdmitrij@yandex.ru

Э.П. Левченко

SPIN-код: 8607-5905
Телефон: +380 (72) 154-74-30
Эл. почта: levchenkoeduard@yandex.ua

Статья поступила 30.10.2019 г.

© О.И. Павлиненко, Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, 2019

Рецензент д.т.н., доц. Н.А. Ченцов

