

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВАЛКОВ ВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКИ С РИФЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ БАНДАЖЕЙ

Для подтверждения достоверности математической модели процесса захвата материала рифлеными валками дробилки в процессе дробления и методики определения основных конструктивных параметров рифленых валков дробильной машины в лабораторных условиях проведен многофакторный эксперимент по определению условий контактного взаимодействия куска дробимого материала с рифленой поверхностью бандажей на этапе его внедрения в рабочее пространство. На основании экспериментальных данных получены эмпирические зависимости для определения размера валика сетки, наносимого на рабочую поверхность бандажа, с помощью которых подтверждены аналитические зависимости для обоснования данного параметра рифленых валков.

Ключевые слова: валковая дробилка, валок, рифленый бандаж, размер валиков сетки, многофакторный эксперимент.

Постановка проблемы

Фракционная подготовка материалов широко используется в различных отраслях человеческой деятельности, особенно в металлургии черных и цветных металлов. В условиях металлургических предприятий процессы дробления и измельчения применяются для подготовки исходных шихтовых материалов путем дробления и измельчения сырья до необходимого фракционного состава. Для реализации данных процессов используются различные типы дробильных машин, в том числе и валковые дробилки.

Способы разрушения материала, применяемые в валковых дробилках, остаются относительно малоэффективными в плане энергозатрат и сопряжены со значительным износом рабочих органов дробильных машин [1...3], поэтому изучение и повышение эффективности дробильных машин с целью улучшения основных технико-экономических показателей самого процесса измельчения, а также увеличения срока службы узлов и деталей дробильных машин являются весьма актуальными и существенно сказываются на основных показателях любого технологического процесса [1,2].

В различных отраслях для фракционной подготовки сырья широкое распространение получили валковые дробилки различных конструкций [1...5]. Так, в металлургии применяются четырехвалковые дробильные машины

[1,2], для повышения эффективности процесса измельчения материала, в которых используются верхние валки с рифленой рабочей поверхностью. Данная конструкция дробилки позволяет измельчать исходное сырье с более высоким верхним пределом фракционного состава и обеспечивает степень измельчения материала в дробилке в большем диапазоне. Подобные конструкции многовалковых дробильных машин применяются для фракционной подготовки различного твердого топлива, используемого в агломерационном производстве металлургических предприятий.

На основании предшествующих исследований [2,6,7] можно утверждать, что применение в четырехвалковых дробилках рифленых валков с наплавленными валиками сетки определенного размера на рабочей поверхности бандажей позволит использовать исходное сырье большей крупности, снизить износ рабочих органов и повысить эффективность самого процесса измельчения различных материалов. Однако методика определения конструктивных параметров сетки экспериментально не подтверждена и не проверена адекватность ее применения при измельчении различных материалов в дробильных машинах валкового типа.

Анализ последних исследований и публикаций

Четырехвалковые дробилки по конструкции представляют собой две пары валков, располо-

женных одна над другой, при этом их можно рассматривать как две двухвалковые дробилки, смонтированные в одном корпусе.

Как сказано выше, для повышения эффективности процесса измельчения материала в данном типе дробильных машин используют верхние валки с рифленой или зубчатой поверхностью, а нижнюю пару, как правило, изготавливают с гладкой поверхностью бандажей. За счет этого достигается более высокая степень измельчения материала в дробилке в целом и снижение износа рабочих органов. С наилучшей стороны себя зарекомендовала конструкция верхних валков с рифленой поверхностью, которая обеспечивается тем, что на рабочую поверхность бандажа наносят сетку, образуемую продольными и поперечными выступающими валиками радиальной формы, нанесенной при помощи непрерывной электродуговой наплавки износостойким материалом [8]. Подобные конструктивные особенности четырехвалковых дробилок применяются на некоторых агломерационных фабриках металлургических предприятий при фракционной подготовке твердого топлива.

В работах [6,7] для обоснования конструктивных параметров сетки предложена методика определения необходимого радиуса валиков r_e . Зависимости, обоснованные в данных исследованиях, позволяют вычислить конструктивные параметры сетки, наплавляемой на рабочую поверхность бандажа для обеспечения условий захвата в рабочее пространство валков кусков дробимого материала, размеры которых превышают верхний предел фракции, при котором происходит захват гладкими валками.

Цель (задачи) исследования

Задачами данного исследования является подтверждение адекватности математической модели процесса захвата куска материала рифлеными валками дробилки при проведении многофакторного эксперимента в лабораторных условиях по определению условий контактного взаимодействия куска дробимого материала с рифленой поверхностью бандажей при его внедрении в рабочее пространство дробильной машины.

Основной материал исследования

В вышеописанных работах [6,7] для обоснования конструктивных параметров сетки предложена зависимость, по которой необходимый радиус валиков r_e вычисляется как:

$$r_e = (R_{\sigma} + r_k) \cos \left(\alpha_2 - \arccos \left(\frac{R_{\sigma} + 0,5b}{R_{\sigma} + r_k} \right) \right) - r_k - 0,5 \cdot (2R_{\sigma}^2 - 2r_k^2 + \cos 2\alpha_2 (2R_{\sigma}^2 + 4R_{\sigma}(b - r_k) + b^2) - 4R_{\sigma}r_k + \sin 2\alpha_2 (2R_{\sigma} + b) \times \sqrt{(2r_k - b)(4R_{\sigma} + b + 2r_k)})^2, \quad (1)$$

где α_2 – угол, необходимый для обеспечения условия захвата куска материала рифлеными валками [6,7] ($\alpha_2 = \mu - \frac{\sin \alpha_1 - \sin \mu + \mu(\cos \mu - \cos \alpha_1)}{\sin \alpha_1}$); α_1 –

угол захвата куска дробимого материала в рабочее пространство для гладких валков, определяемый по зависимости $\alpha_1 = \arccos \left(\frac{R_{\sigma} + 0,5b}{R_{\sigma} + r_k} \right)$ [9];

R_{σ} – радиус рабочей поверхности бандажа валка; r_k – условный радиус куска материала; b – межвалковый зазор (ширина выходной щели между валками) [9]; μ – коэффициент трения измельчаемого материала по материалу бандажа валка).

При этом угол между центрами окружностей соседних валиков сетки β_2 определяется по следующей зависимости [6,7]:

$$\beta_2 = 2 \arccos \left[\frac{R_{\sigma}^2 - 0,5r_e^2 + r_k(R_{\sigma} - r_e)}{R_{\sigma}(R_{\sigma} + r_k)} \right]. \quad (2)$$

С целью подтверждения достоверности выдвинутых теоретических предположений и более досконального изучения процесса дробления различных материалов в валковых дробилках с рифлеными валками с использованием 3D-принтера изготовлена экспериментальная установка, представляющая собой уменьшенную модель дробилки (безразмерный геометрический симплекс [10], характеризующий геометрическое подобие экспериментальной установки реальной валковой дробилке, составляет $\Gamma_k=0,1$). Установка включает в себя два рабочих валка, вращающихся в опорах, закрепленных на станине стоек, с установленными на них шкивами и сменными бандажами с рифленой поверхностью (для изготовления рифленых бандажей валков использовался пластик ABS (ТУ 6-05-1609-77), (рис. 1). При этом крепление стоек на станине позволяет регулировать межвалковый зазор в необходимых пределах. Вращение валков при захвате куска материала рабочей поверхностью валиков сетки бандажей синхронизировано за счет ременной передачи.

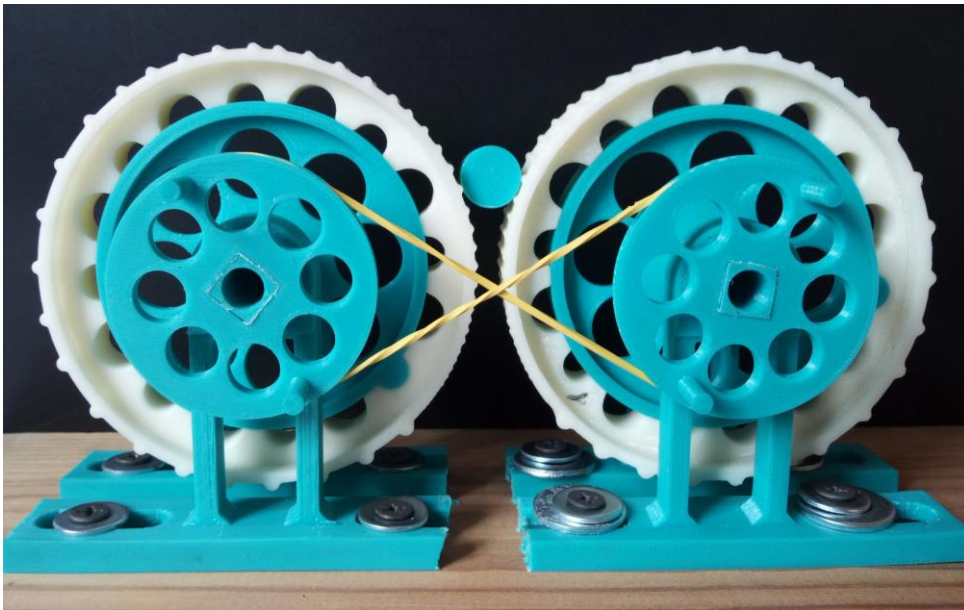


Рис. 1. Экспериментальная установка для определения условий захвата куска дробимого материала в валковой дробилке с рифленой поверхностью бандажей

При проведении исследований основным конструктивным параметром рифленых валков в экспериментальной установке задавались следующие значения:

- радиус рабочей поверхности бандажа $R_б=0,045$ м;
- радиус рифлей бандажей $r_б$ от 0,5 мм до 3,8 мм с шагом 0,3 мм.

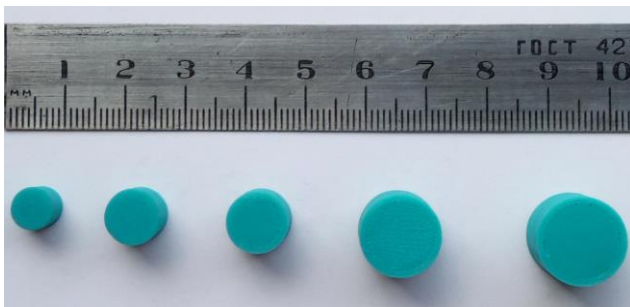
В качестве захватываемых кусков материала использовались цилиндры (рис. 2а) радиусом r_k (согласно матрице планирования (табл. 1) из пластика ABS с коэффициентами трения по

материалу бандажа $\mu_n=0,21$ (определялся экспериментально с помощью метода, основанного на равномерном скольжении вниз по наклонной плоскости [11] с помощью установки, представленной на рис. 2б, по зависимости

$$\mu = \tan \alpha_{mp} = \frac{L_1}{L_2},$$

где L_1 – длина противолежащего катета треугольника ABC;

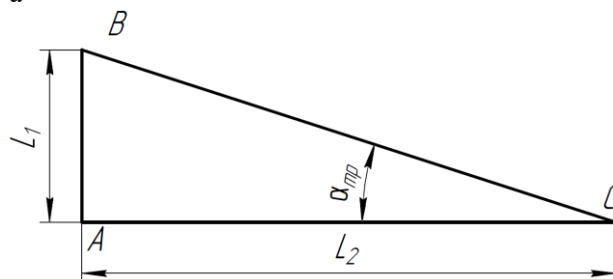
L_2 – длина прилежащего катета (рис. 2в) (зависит от высоты катета АВ, при которой начиналось движение куска материала относительно поверхности стола).



а



б



в

Рис. 2. а – куски требуемого размера; б – установка для определения коэффициента трения материала кусков по материалу бандажей валков; в – расчетная схема для определения угла трения

Для проведения многофакторного эксперимента использовалось центральное композиционное ротатабельное униформпланирование второго порядка [12,13]. В качестве основных независимых факторов, определяющих радиус валика наплавляемой сетки на поверхности бандажа валика r_6 , выбирались:

- межвалковый зазор b , м;
- условный радиус куска материала r_k , м.

Выбор факторов и уровней их варьирования осуществлялся с учетом технических характеристик установки и условий процесса захвата материала с подобными параметрами процесса дробления твердого топлива в четырехвалковой дробилке ДЧГ 900×700 в условиях агломерационного процесса. Проверка воспроизводимости эксперимента проводилась по критерию Кохрена (при числе опытов равном 13, количестве повторностей 3 и уровне значимости 0,05 составляющего $G=0,336$); значимость коэффициентов определялась при сравнении опытных значений с табличным значением критерия Стьюдента $t_{cm}=2,16$; адекватность регрессионной модели определялась по критерию Фишера, табличное значение которого $F=6,59$ [12].

При проведении экспериментов по определению необходимого радиуса валика сетки на рабочей поверхности бандажа валика в дробилке для обеспечения условий захвата куска материала получены следующие значения (табл. 2).

Табл.1. Уровни и интервалы варьирования факторов

	$x_1(b)$, мм	$x_2(r_k)$, мм
Основной уровень, $x_i = 0$	5,3	5,2
Интервал варьирования, I	0,5	1,3
Верхний уровень, $x_i = +1$	5,8	6,5
Нижний уровень, $x_i = -1$	4,8	3,9
Верхняя звездная точка, $x_i = +1,414$	6,0	7,0
Нижняя звездная точка, $x_i = -1,414$	4,6	3,4

Табл. 2. Экспериментальные значения необходимого радиуса валика сетки для обеспечения условий захвата куска материала

Радиус валика сетки, обеспечивающий захват куска дробимого материала	№ эксперимента п/п												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
r_{e_1}	0,3	0	2,6	2,0	0,8	0,8	0	3,2	0,5	0,8	0,8	0,5	0,8
r_{e_2}	0	0	2,6	1,7	0,8	0,5	0,3	3,2	0,5	0,8	0,5	0,8	0,8
r_{e_3}	0	0	2,3	1,7	1,1	0,5	0	2,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
\bar{r}_6	0,1	0	2,5	1,8	0,9	0,6	0,1	3,1	0,6	0,8	0,7	0,7	0,8

После обработки данных экспериментальных исследований получены коэффициенты регрессии и соответствующие экспериментальные значения критерия Стьюдента t_s , представленные в табл. 3, из которой следует, что все коэффициенты полиномиальных зависимостей, кроме b_{11} , являются значимыми.

После определения значимости коэффициентов регрессии получена адекватная функция отклика:

$$y(x_1, x_2) = -0,15x_1 + 1,06x_2 - 0,005x_1^2 + 0,42x_2^2 - 0,15x_1x_2 + 0,72. \quad (3)$$

Согласно обработке данных экспериментальных исследований методами математической статистики [12], критерии Кохрена и Фишера составили: $F_{K_1} = 0,22$, $F_{\phi_1} = 5,67$, что подтверждает адекватность полученной регрессионной модели.

В натуральном виде [12] регрессионная зависимость от функции отклика (3) для определения необходимого радиуса валика сетки r_6 , обеспечивающего условия захвата куска материала определенного радиуса рифлеными валиками, принимает следующий вид:

$$r_6 = 0,93b - 0,61r_k + 0,26r_k^2 - 0,24br_k - 1,5. \quad (4)$$

С целью проверки адекватности зависимостей для определения радиуса валика r_6 проведен сравнительный анализ значений, полученных по формуле (1) и функции откликов (4) (табл. 4).

Статистическая обработка экспериментальных данных показывает, что относительная погрешность определения необходимого радиуса валика сетки рифленого валика по формуле (1) в сравнении с эмпирическими значениями равна 0,8...177,7 %. При этом среднее относительное отклонение теоретических данных от фактических составило 30,5 % [14]. Однако в данном случае необходимо учитывать, что экспериментальные исследования проводились с рифлями валков с размерами более 0,3 мм, что существенно сказывается на точности результатов, полученных с помощью регрессионной зависимости в меньших диапазонах размеров валков.

Табл. 3. Значение коэффициентов регрессии и критериев Стьюдента t_s

Коэффициент регрессии	Значение коэффициента	Значение критериев Стьюдента t_s
b_0	0,72	5,79
b_1	-0,15	2,24
b_2	1,06	15,45
b_{11}	-0,005	0,09
b_{22}	0,42	8,26
b_{12}	-0,15	2,24

Табл. 4. Значения необходимого радиуса валика r_6 , полученные по аналитической и регрессионной зависимостям и абсолютной погрешности эксперимента

№ п/п	Результаты		Погрешность, %
	По регрессионной зависимости (4)	По формуле (1)	
1	0,05	0,09	71,6
2	0,04	0,002	96,3
3	2,45	2,34	4,3
4	1,83	1,82	0,8
5	0,9	0,96	7,0
6	0,45	0,48	6,7
7	0,04	0,1	177,7
8	3,0	2,88	3,9
9	0,67	0,71	5,7
10	0,67	0,71	5,7
11	0,67	0,71	5,7
12	0,67	0,71	5,7
13	0,67	0,71	5,7
Средняя погрешность, %			30,5

На основании вышесказанного можно исключить из расчетов результаты, при которых значение необходимого радиуса рифлей менее 0,3 мм (№№ 1, 2, 7 (табл. 4)). Тогда среднее относительное отклонение теоретических данных от фактических составит 5,1 %, что с достаточной степенью точности подтверждает достоверность предложенных теоретических методов по определению необходимого радиуса валика сетки для обеспечения захвата куска материала рифлеными валками при дроблении твердого топлива в реальных условиях (необходимый радиус валков сетки значительно больше соответствующего размера 3 мм с учетом геометрического симплекса подобия модели).

С целью наглядного отображения адекватности значений, полученных по предложенной аналитической формуле (1), и экспериментальных данных, определенных по эмпирической зависимости (4), построены графики поверхностей, отображающие значения необходимых радиусов валика сетки r_6 для обеспечения условий захвата куска материала от размера межвалкового зазора и условного радиуса куска дробимого материала (рис. 3).

Как видно из анализа графиков, поверхность, полученная с помощью теоретической зависимости (1), описывающая характер изменения конструктивных параметров сетки валика, достаточно близко совпадает с опытными значениями (4), что подтверждает адекватность результатов предшествующих исследований, в частности зависимости определения необходимого радиуса валика r_6 для обеспечения условия захвата кусков определенной фракции в рабочее пространство валковой дробилки с рифлеными валками.

Таким образом, в работе подтверждены ранее предложенные методика и аналитические зависимости конструктивных параметров верхних валков четырехвалковой дробилки с рифленой рабочей поверхностью бандажей, применяемых для измельчения различных каменно-рудных материалов.

Для дальнейших исследований перспективным направлением является метод комбинационного синтеза дробилок с использованием верхних рифленых валков, направленный на реализацию сочетания достоинств в одном устройстве дробильных машин данного типа с различными конструктивными особенностями. В настоящее время такие работы проводятся в Донбасском государственном техническом институте с привязкой к условиям фракционной подготовки твердого топлива

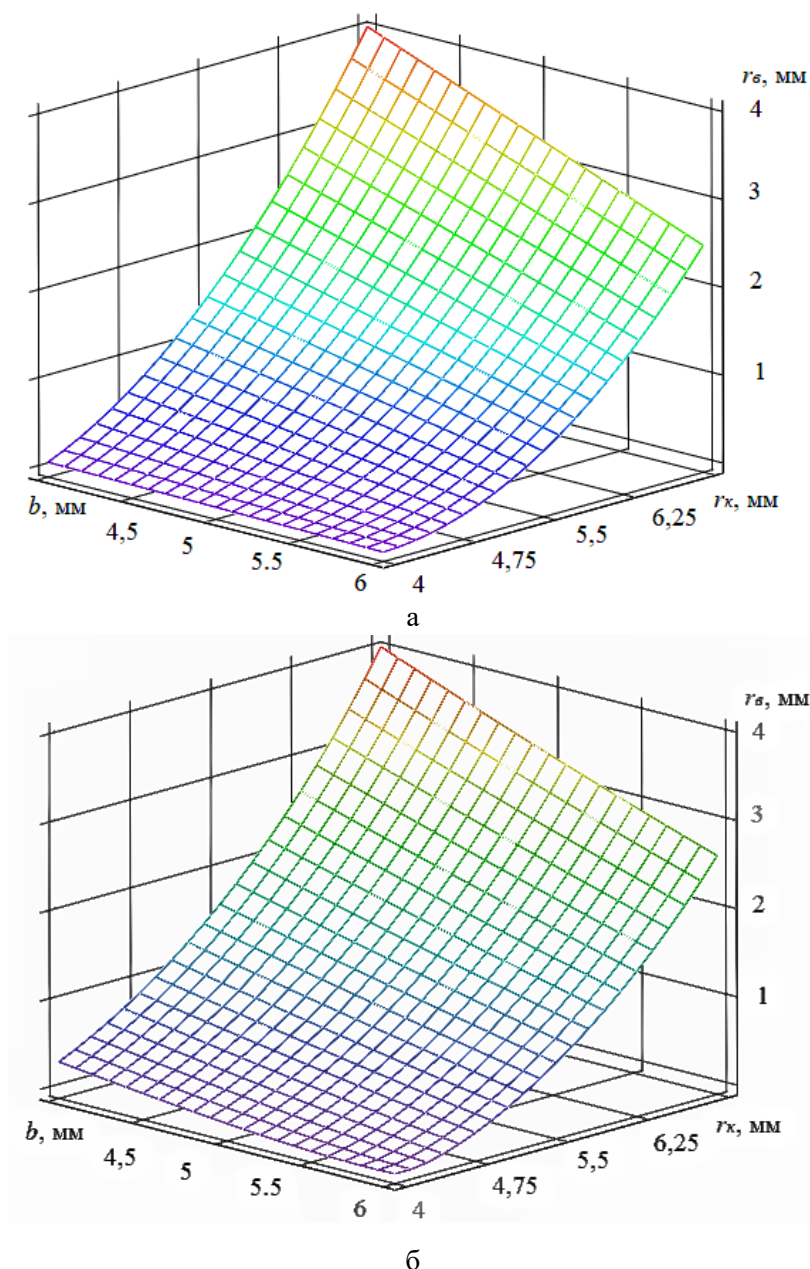


Рис. 3. Графики зависимостей необходимого радиуса валика r_g :
a – экспериментальная; *b* – теоретическая

в агломерационном производстве Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» (бывшее ПАО «Алчевский металлургический комбинат») и ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат».

Выводы

С помощью экспериментальной модели валковой дробилки в лабораторных условиях проведен многофакторный эксперимент по определению условий контактного взаимодействия куска дробимого материала с рифленой поверхностью бандажей на этапе его внедрения в рабочее пространство.

На основании экспериментальных данных

получены эмпирические зависимости размера валика сетки, наносимого на рабочую поверхность бандажа, с помощью которых подтверждены аналитические зависимости для обоснования данного параметра рифленых валков.

Проведенные экспериментальные исследования показали сходимость с теоретическими результатами на уровне 95 %, что свидетельствует о высокой степени достоверности принятой математической модели для реальных условий дробления материалов в валковой дробилке.

Перспективным и в то же время необходимым направлением развития данных исследований является аналитическое обоснование энергосиловых параметров процесса дробления раз-

личных материалов в валковой дробилке с рифленой поверхностью бандажей с дальнейшим испытанием в лабораторных, а затем и промышленных условиях, что, в свою очередь, позволит обосновать технико-эксплуатационные характеристики четырехвалковых дробилок с конкретными конструктивными параметрами рифленых верхних валков при измельчении и дроблении различных видов каменно-рудного сырья.

Список литературы

1. Subba Rao, D.V. Minerals and Coal Process Calculations. – London: Taylor & Francis Group, 2016. – 354 p.
2. Власенко, Д.А. Технические решения в области проектирования и повышения эффективности дробильно-измельчительных машин // Инновационные перспективы Донбасса. Т.3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 88-92.
3. Egbe, E.A.P. Design, Fabrication and Testing of a Double Roll Crusher / E.A.P. Egbe, O.A. Olugboji // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – Seventh Sense Research Group, 2016. – No.11. Vol.35. – P. 511-515.
4. Comparison of grinding characteristics in high-pressure grinding roller (HPGR) and cone crusher (CC) / L. Lei [et al.] // Physicochemical Problems of Mineral Processing. – 2017. – No.53(2). – P. 1009-1022.
5. An Improved High-Pressure Roll Crusher Model for Tungsten and Tantalum Ores / H. Anticoi [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – Iss.6. Vol.8. – P. 5476-5489.
6. Власенко, Д.А. Математическое моделирование процесса захвата материала рифлеными

- валками в валковых дробилках // Сб. науч. тр. ДонГТУ. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. – №18(61). – С. 122-130.
7. Власенко, Д.А. Обоснование конструктивных параметров и перспективы использования рифленых валков в четырехвалковых дробилках // Вестник Донецкого национального технического университета. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып.№1(19). – С. 15-23.
8. Пат. 188107 РФ, МПК В02С 4/30. Валок четырехвалковой дробилки / А.П. Жильцов, Г.А. Билан, Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, Р.С. Мележик. – № 2018134232; заявл. 27.09.2018; опубл. 28.03.2019.
9. Клушанцев, Б.В. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации / Б.В. Клушанцев, А.И. Косарев, Ю.А. Муйземек. – М.: Машиностроение, 1990.– 320 с.
10. Основы теории и техники физического моделирования и эксперимента: учебное пособие / Н.Ц. Гатапова [и др.]. – Тамбов: ТГТУ, 2014. – 77 с.
11. Билимович, Б.Ф. Законы механики в технике. – М.: Просвещение, 1975. – 58 с.
12. Белай, Г.Е. Организация металлургического эксперимента: учеб. пособ. для вузов / Г.Е. Белай, В.В. Дембовский, О.В. Соценко; под ред. В.В. Дембовского. – М.: Металлургия, 1993. – 256 с.
13. Особенности математического моделирования механических процессов металлургических машин / Э.П. Левченко [и др.] // Modern problems of theory of machines. – North Charleston: CreateSpace, 2016. – №4(1). – С. 14-16.
14. Математические методы обработки результатов измерений: учебник для вузов / В.С. Сизиков. – СПб.: Политехника, 2001. – 239 с.

D.A. Vlasenko /Cand. Sci. (Eng.)/

Donbas State Technical Institute (Alchevsk)

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE METHOD OF DETERMINING THE CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF ROLLS OF A ROLL CRUSHER WITH CORRUGATED BANDAGE SURFACE

Background. *Crushing solid fuel in the conditions of the agglomeration process is quite energy-intensive, while high requirements are imposed on the physical and technical parameters of the finished product, which determines the importance of this research and improvement of these processes to reduce energy consumption and improve the quality indicators of the crushing process.*

Materials and/or methods. *The purpose of this paper is to confirm the adequacy of the mathematical model of the process of capturing a piece of material by the grooved rolls of the crusher under laboratory conditions during a multi-factor experiment to determine the conditions of contact interaction of a piece of crushed material with the grooved surface of the bandages when it is introduced into the working space of the crushing machine.*

Results. Using an experimental model of a roller crusher, a multi-factor experiment was conducted in the laboratory to determine the conditions of contact interaction between a piece of crushed material and the corrugated surface of the bandages at the stage of its introduction into the working space. Based on experimental data, empirical dependences of the size of the mesh roller applied to the working surface of the bandage are obtained, with the help of which analytical of a four-roll crusher with certain design parameters of grooved upper rolls for introduction into agglomeration production. Dependences for justifying this parameter of grooved rolls are confirmed. The conducted experimental studies showed a 95 % convergence with the theoretical results, which indicates the reliability of the accepted mathematical model for the real conditions of crushing materials in a roller crusher.

Conclusion. A promising and at the same time necessary direction for the development of these studies is the analytical justification of the energy-power parameters of the crushing process of various materials in a roll crusher with a grooved surface of bandages with further testing in the laboratory and then industrial conditions, which, in turn, will allow justifying the technical and operational characteristics of four-roll crushers with specific design parameters of grooved upper rolls when grinding and crushing various types of stone and ore raw materials. The results of the research can be used as recommendations for determining the technical and operational characteristics.

Keywords: roller crusher, roller, grooved bandage, mesh roller size, multi-factor experiment.

Сведения об авторе

Д.А. Власенко

SPIN-код: 6296-2040
Author ID: 977842
ORCID iD: 0000-0002-6829-061X
Author ID: 57211713792
Телефон: +380 (72) 179-70-56
Эл. почта: vlasdmitrij@yandex.ru

Статья поступила 25.02.2021 г.

© Д.А. Власенко, 2021

Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько

