

Д.А. Власенко /к.т.н./

ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» (Алчевск)

## ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РИФЛЕНЫХ ВАЛКОВ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ ДРОБИЛКАХ

*Рассматривается возможность использования рифленых верхних валков в четырехвалковой дробилке, обоснованы конструктивные параметры и предложены рациональные размеры рифлей для различных марок углей и кокса с определенными фракционными характеристиками. Проведен анализ номинальных показателей дробилки ДЧГ 900×700 при использовании верхних валков с гладкой и рифленой поверхностью.*

**Ключевые слова:** агломерация, твердое топливо, четырехвалковая дробилка, валок, рифленый бандаж, размер валиков сетки.

### Постановка проблемы

Технологический процесс подготовки шихтовых компонентов в агломерационном производстве включает в себя несколько стадий: фракционную подготовку сырья, усреднение шихтовых составляющих по физико-механическим и химическим свойствам, увлажнение, смешивание и окускование (спекание). Обязательным критерием эффективности агломерационного процесса и получения готовой продукции высокого качества является подача на спекание шихты, однородной по гранулометрическому и химическому составу. При этом фракционный состав шихтовых материалов оказывает существенное влияние на их удельный расход в процессе спекания шихты, производительность процесса агломерации, качество готового агломерата и вредные выбросы в атмосферу [1...3].

### Анализ последних исследований и публикаций

Влияние фракционного состава используемых в агломерационном производстве различных видов твердого топлива (коксовой и угольной мелочи, антрацита и других каменных углей), от которого существенно зависят основные технологические параметры процесса, исследованы многими учеными. Большинство результатов исследований сводятся к тому, что более высокие показатели эффективности введения твердого топлива в слой агломерационной шихты достигаются при условии использования фракции 0,5...3 мм [4,5]. Это обеспечивает более высокую температуру в слое, позволяет увеличить выход годного продукта, повысить удельную производительность, в том числе за счет увеличения скорости спекания, обусловленного уда-

лением мелочи из топлива. Установлено, что уменьшение содержания фракции 0,5 мм в агломерационной шихте приводит к снижению расхода кокса в доменном процессе за счет повышения прочностных характеристик агломерата и росту производительности самих доменных печей.

Технологическим оборудованием, наиболее часто используемым при измельчении твердого топлива до фракции 0,5 мм в условиях агломерационного производства, являются четырехвалковые дробилки различных типов [6,7], зарекомендовавшие себя из всего разнообразия дробильных машин с наилучшей стороны при дроблении данного вида каменно-рудного сырья, но в то же время имеющие ряд недостатков [6...11]. Одними из основных недостатков всех валковых дробилок являются проскальзывание материала по поверхности бандажа в процессе измельчения, вследствие чего происходит переизмельчение материала и износ рабочей поверхности бандажа, и ограничение по максимальному размеру загружаемого в рабочее пространство сырья [11]. Это связано с тем, что при попадании крупных кусков не обеспечивается внедрение материала в рабочее пространство бандажей верхними валками, обусловленное углом захвата (углом между двумя касательными к поверхности валков в точках соприкосновения с дробимым материалом) [6]. Так, для условий использования гладких валков данный угол составляет в зависимости от материала, подвергаемого дроблению, приблизительно 16...24° [6,12]. При таких значениях отношение диаметров валка к диаметру куска дробимого материала при минимальном межвалковом зазоре составляет 1:20...1:10 [12].

### Цель (задачи) исследования

Задачами данного исследования являются: анализ результатов, полученных с помощью математической модели, процесса контактного взаимодействия куска дробимого материала с рифленой поверхностью бандажей верхних валков четырехвалковой дробилки на этапе внедрения материала в ее рабочее пространство; обоснование рациональных конструктивных параметров сетки валков четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 при измельчении различных видов твердого топлива с определенным фракционным составом при подготовке шихтовых компонентов в условиях производства железорудного агломерата на основании предложенных математических зависимостей.

### Основной материал исследования

Четырехвалковые дробилки по конструкции представляют собой две пары валков, расположенных одна над другой, при этом их можно рассматривать как две двухвалковые дробилки, смонтированные в одном корпусе [6].

Рассматриваемый процесс измельчения материала в четырехвалковой дробилке включает в себя два основных технологических процесса: предварительное дробление в рабочем пространстве верхних валков и последующие измельчение между поверхностями нижних валков. Разрушение куска обеспечивается преимущественно за счет раздавливания между валками и истирания при скольжении кусков относительно поверхности бандажа. Однако измельчение истиранием требует значительно больших энергозатрат [13...15], чем раздавливание, и сопровождается существенным абразивным износом рабочей поверхности бандажа. При этом снижение влияния эффекта трения в процессе позволит

повысить эффективность разрушения материала, а также снизить содержание мелкой фракции в дробленом продукте, что в совокупности положительно скажется на технико-экономических показателях работы дробильной машины и при этом повлияет на основные показатели агломерационного процесса в целом.

Эффект трения материала по поверхности бандажа в основном возникает при дроблении фракции, при которой не соблюдается условие захвата измельчаемого куска материала валками [6,7,12], или близкой к ней – в этом случае условие захвата может не обеспечиваться вследствие неправильности формы куска и физико-технологических условий взаимного контакта с рабочей поверхностью рабочего органа (влажность материала, содержание пылевидной фракции, состояние рабочей поверхности бандажа).

Для повышения эффективности процесса измельчения материала в данном типе дробильных машин используют верхние валки с рифленой или зубчатой поверхностью, а на нижнюю пару, как правило, устанавливают гладкие бандажи. За счет этого достигается более высокая степень измельчения материала в дробилке в целом и снижение износа рабочих органов. Наибольшее распространение получила конструкция верхних валков с рифленой поверхностью, которая обеспечивается тем, что на рабочую поверхность бандажа наносят сетку, образуемую продольными и попечерными выступающими валиками радиальной формы, наплавленными при помощи непрерывной электродуговой наплавки износостойким материалом [16]. Подобные конструктивные особенности четырехвалковых дробилок (рис. 1) применяются на агломерационных фабриках большинства металлургических предприятий при фракционной подготовке твердого топлива.

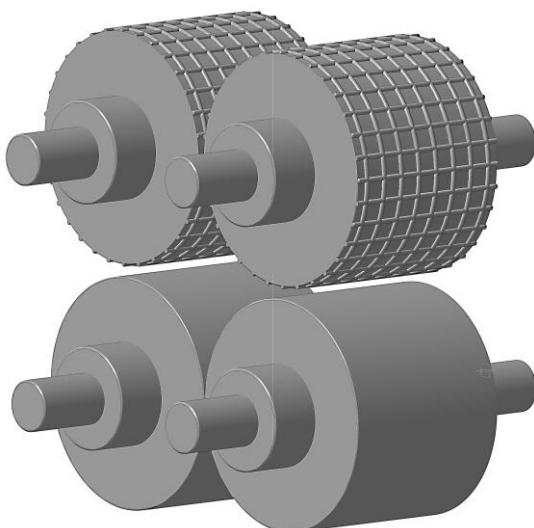


Рис. 1. Схема четырехвалковой дробилки с использованием верхних валков с рифленой поверхностью бандажей

Для проникновения измельчаемого материала 3 в рабочее пространство дробилки необходимо обеспечить его захват валками 1, который обеспечивается при выполнении следующего условия: сумма проекций сил трения материала по поверхности бандажа и валиков 2 на вертикальную ось должна быть больше суммы проекций выталкивающих сил – сил нормальной реакции от веса куска ( $N_1$  и  $F_{mp1}$  – для гладких валков,  $F_{mp1}+F_{mp2}$  и  $N_1+N_2$  – для рифленых) (рис. 2).

Для гладких валков данное условие определяется значением угла захвата, регламентирующим максимально допустимый размер куска измельчаемого материала, загружаемого в рабочее пространство дробильной машины, и в зависимости от конструктивно-технологических параметров дробилки и фракционного состава исходного сырья определяется как:

$$\alpha_1 = \arccos \left( \frac{R_\delta + 0,5b}{R_\delta + r_k} \right) \leq \gamma_{mp}, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  – угол захвата куска материала в рабочее пространство для гладких валков;  $R_\delta$  – радиус рабочей поверхности бандажа валка;  $r_k$  – условный радиус куска материала;  $b$  – межвалковый зазор (ширина выходной щели между валками);  $\gamma_{mp}$  – угол трения материала куска по рабочей поверхности бандажа,  $\gamma_{mp} = \tan \mu$  (где  $\mu$  – коэффициент трения измельчаемого материала по материалу бандажа валка) [6,7,12].

При этом максимальный радиус измельчаемого куска определяется по зависимости [6]:

$$r_{k_{\max}} = \frac{R_\delta + 0,5b - R_\delta \cos \mu}{\cos \mu}. \quad (2)$$

На рис. 3 представлен график зависимости максимального радиуса куска, дробимого в дробилке ДЧГ 900×700 [17] (радиус рабочей поверхности бандажа валка  $R_\delta=0,45$  м; межвалковый зазор  $b=0,003$  м), от коэффициента трения материала.

Из анализа графической зависимости (рис. 3) максимально допустимый размер фракции материала, который возможно подавать в четырехвалковую дробилку ДЧГ 900×700 с верхними гладкими валками, для антрацита (коэффициент трения по стали  $\mu=0,2$ ) составляет 0,021 м, для коксовой мелочи ( $\mu=0,3$ ) – 0,045 м, для кокса сухого тушения с коэффициентом  $\mu=0,42$  может достигать 0,08 м.

Однако в условиях производства агломерата используются каменные угли и кокс различной фракции, верхний предел которой может превышать предельно допустимые размеры. При этом в процессе работы бандаж изнашивается, и его поверхность периодически протачиваются для обеспечения требуемого межвалкового зазора по всей его длине до допустимого диаметра 0,76 м, и в этих условиях максимальный размер куска уменьшается на 11...18 % в зависимости от вида твердого топлива. Поэтому, как оговаривалось ранее, с целью обеспечения возможности применения в производстве в качестве исходного сырья более крупную фракцию (в этом случае не требуется предварительное дробление материала и его классификация по крупности) на поверхность бандажей верхних валков наплавляют сетку.

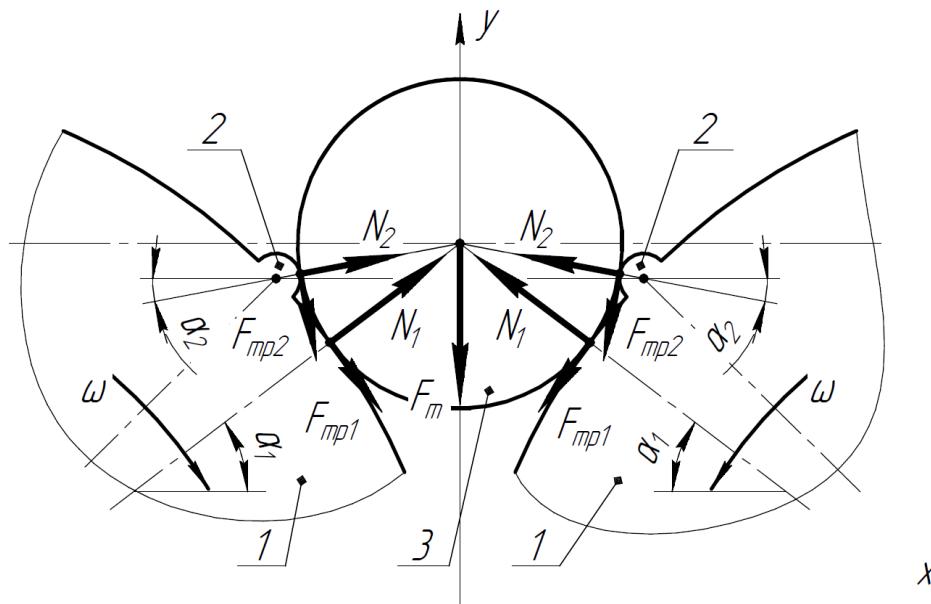


Рис. 2. Расчетная схема для определения параметров контактного взаимодействия измельчаемого материала с валками четырехвалковой дробилки

Однако в данное время в производственных условиях конструктивные параметры сетки (радиус валиков  $r_\delta$  и угол между центрами окружностей соседних валиков сетки  $\beta_2$ ) (рис. 4) подбирают эмпирически, а не обосновывая аналитическим путем.

С целью математического обоснования основных размеров сетки в работе [18] были предложены следующие зависимости, позволяющие определить:

- необходимый радиус валиков  $r_\delta$ :

$$r_\delta = \left( R_\delta + r_k \right) \cos \left( \alpha_2 - \arccos \left( \frac{R_\delta + 0,5b}{R_\delta + r_k} \right) \right) - \\ - r_k - 0,5(2R_\delta^2 - 2r_k^2 + \\ + \cos 2\alpha_2 (2R_\delta^2 + 4R_\delta(b - r_k) + b^2) - \\ - 4R_\delta r_k + \sin 2\alpha_2 (2R_\delta + b) \times \\ \times \sqrt{(2r_k - b)(4R_\delta + b + 2r_k)})^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\alpha_2$  – угол, необходимый для обеспечения условия захвата куска материала (угол между

вектором выталкивающей силы, возникающей при контактном взаимодействии материала с поверхностью валика, и перпендикуляром к вектору силы тяжести куска [18]):

$$\alpha_2 = \mu - \frac{\sin \alpha_1 - \sin \mu + \mu(\cos \mu - \cos \alpha_1)}{\sin \alpha_1}, \quad (4)$$

– угол между центрами окружностей соседних валиков сетки  $\beta_2$ :

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

На рис. 5 отображены графические зависимости радиуса валика и рекомендуемого угла между центрами окружностей соседних рифлей наплавляемой сетки на рабочей поверхности бандажа, необходимых для обеспечения условий захвата куска различного фракционного состава материала при дроблении отсевов кокса, кокса холодного тушения и углей марки АО и АС в дробилке ДЧГ 900×700.

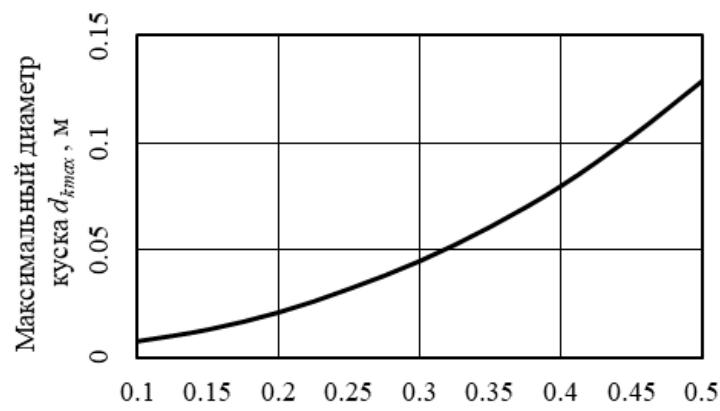


Рис. 3. График зависимости максимально допустимого диаметра куска измельчаемого материала в дробилке ДЧГ 900×700 от коэффициента трения

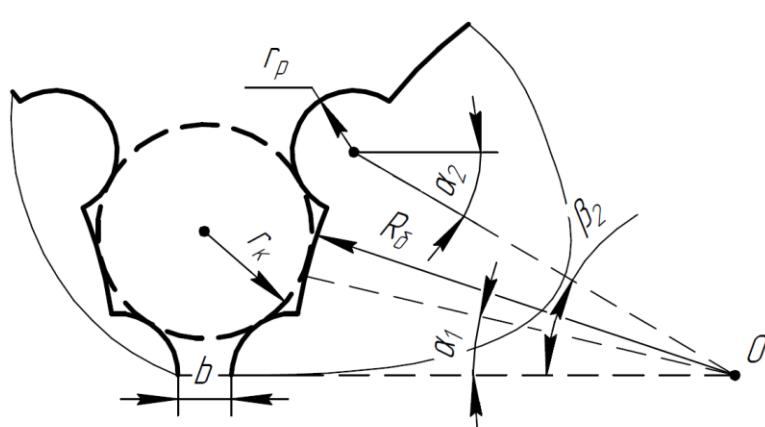


Рис. 4. Схема контактного взаимодействия измельчаемого материала с рифлеными валками четырехвалковой дробилки

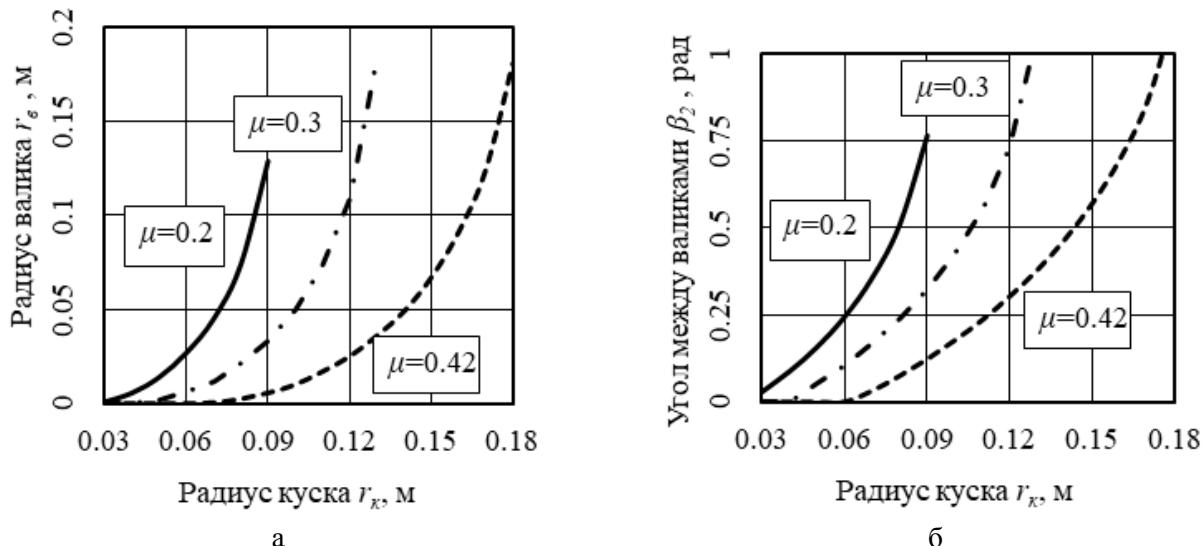


Рис. 5. Графические зависимости: *а* – радиуса валиков; *б* – угла между центрами соседних рифлей сетки на поверхности бандажа от радиуса куска дробимого материала

Для обеспечения условий технологического процесса производства агломерата, а также потребностей участка глиномялки доменного цеха в агломерационном цехе Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» на участке подготовки шихтовых материалов измельчению подвергаются следующие виды твердого топлива: угли марок АО и АС с фракционным составом 0...50 мм, коксовая мелочь (отсевы доменного производства) размерами 0...25 мм, кокс сухого тушения фракцией 60...140 мм.

Для повышения эффективности процесса фракционной подготовки сырья в данных технологических условиях на основании математических зависимостей (4), (5) предложены следующие размерные характеристики сетки верхних валков четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 при следующих технологических параметрах процесса измельчения твердого топлива (табл. 1).

При этом номинальные показатели дробилки при условии использования бандажей верхних

валков с гладкой и рифленой рабочей поверхностью в четырехвалковой дробилке в зависимости от максимально возможного размера валика сетки, ограниченного условием захвата куска материала нижними валками (максимальный радиус валика должен быть меньше максимального радиуса измельчаемого куска для нижних валков:  $r_{e_{\max}} \leq r_{k_{\max}}$ ), представлены в табл. 2.

Из анализа результатов, полученных с помощью зависимостей (1)...(5) и отображенных в табл. 2, видно, что при использовании рифленых верхних валков в дробилке ДЧГ 900×700 с аналитически обоснованными конструктивными параметрами наплавляемой сетки при помощи математической модели [18] реализована возможность использования в качестве исходного сырья твердого топлива с верхним пределом фракционного состава в 4,1...5,3 раза большего, чем при использовании верхних валков с гладкой поверхностью.

Табл.1. Технологические параметры процесса измельчения твердого топлива в четырехвалковой дробилке и рекомендуемые конструктивные параметры рифленых валков дробилки ДЧГ 900×700

Наименование параметра	Вид и фракция (мм) твердого топлива		
	Угли (...50)	Коксовая мелочь (...25)	Кокс сухого тушения (...140)
Коэффициент трения измельчаемого материала по стали $\mu$	0,2	0,3	0,42
Требуемая фракция дробленого материала после помола, мм	0...3	0...3	0...5
Угол $\alpha_1$ , рад	0,309	0,206	0,487
Угол $\alpha_2$ , рад	0,16	0,222	0,021
Необходимый радиус валика сетки $r_e$ , мм	3,9	-	14
Угол между центрами окружностей соседних валиков сетки $\beta_2$ , рад	0,064	-	0,191

Табл. 2. Номинальные технологические показатели дробилки с использованием гладких и рифленых верхних валков в дробилке ДЧГ 900×700 при измельчении различных видов топлива

Наименование параметра	Вид твердого топлива		
	Угли	Коксовая мелочь	Кокс сухого тушения
Наибольший радиус дробимого куска для гладких валков $r_{k_{\max}}$ , м	0,011	0,022	0,04
Наибольший радиус дробимого куска для рифленых валков (с максимально возможным размером валика $r_{e_{\max}}$ ) $r_{k_{\max}}$ , м	0,058	0,089	0,14
Общая степень дробления для дробилок с гладкими верхними валками [6]	7,3	14,7	16
Общая степень дробления для дробилок с рифлеными верхними валками	38,7	59,3	55,6

При этом общая степень измельчения в дробилке в данных условиях процесса измельчения, которая существенно влияет на энергозатраты в процессе дробления различных материалов, возрастает в 3,5...5,3 раза.

Таким образом, 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 различных типов. В настоящее время такие работы проводятся в Донбасском государственном техническом университете с привязкой к условиям агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» (бывшее ПАО «АМК»).

## Выводы

Проведен анализ результатов, полученных с помощью математической модели процесса контактного взаимодействия куска дробимого материала с рифленой поверхностью бандажей верхних валков четырехвалковой дробилки на этапе внедрения материала в ее рабочее пространство, а также обоснованы рациональные конструкционно-технологические параметры сетки валков четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 при измельчении различных видов твердого топлива с определенным фракционным составом при подготовке шихтовых компонентов в условиях производства железорудного агломерата на основании полученных математических зависимостей.

Проведен сравнительный анализ номинальных показателей дробилки ДЧГ 900×700 в условиях использования бандажей верхних валков с гладкой и рифленой рабочей поверхностью в четырехвалковой дробилке в зависимости от максимально возможного размера валика сетки.

Предложены конструктивно-технологические параметры процесса измельчения различных видов твердого топлива в четырехвалковой дробилке и рекомендуемые конструктивные параметры рифленых валков дробилки ДЧГ 900×700.

Перспективным и в то же время необходимым направлением развития данных исследований является проверка адекватности математической модели процесса контактного взаимодействия куска дробимого материала с рифленой поверхностью бандажей верхних валков с помощью лабораторных, а затем и промышленных экспериментов (в условиях агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис»), что в свою очередь позволит использовать полученные зависимости при обосновании технико-эксплуатационных характеристик четырехвалковых дробилок с конкретными конструктивными параметрами рифленых верхних валков при измельчении и дроблении различных видов каменно-рудного сырья.

## Список литературы

1. Treatise on Process Metallurgy, Vol.3: Industrial Processes / Editor-in-Chief S. Seetharaman. – Elsevier, 2014. – 1751 p.
2. Коротич, В.И. Агломерация рудных материалов. Научное издание / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Т.Н. Бездежский. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2003. – 400 с.
3. Fernández-González, D. Iron Ore Sintering: Raw Materials and Granulation / D. Fernández-González [et al.] // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2017. – Issue 1. Vol.38. – P. 36-46.
4. Ni, Wenjie. Effects of Fuel Type and Operation Parameters on Combustion and NO<sub>x</sub> Emission of the Iron Ore Sintering Process / Wenjie Ni

- [et al.] // Energies. – 2019. – Issue 2. Vol.12. – P. 1-21.
5. Одинцов, А.А. Повышение качества железнорудного агломерата на основе разработки ресурсосберегающей технологии подготовки твердого топлива: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Одинцов Антон Александрович. – Новокузнецк: ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», 2015. – 23 с.
  6. Оборудование для переработки сыпучих материалов: учебное пособие / В.Я. Борщев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2006. – 208 с.
  7. Subba Rao, D.V. Minerals and Coal Process Calculations. – London: Taylor & Francis Group, 2016. – 354 p.
  8. 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. – Issue 11. Vol.35. – P. 511-515.
  9. 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.
  10. An Improved High-Pressure Roll Crusher Model for Tungsten and Tantalum Ores / H. Anticoi [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – Issue 6. Vol.8. – P. 5476-5489.
  11. Власенко, Д.А. Комплексный анализ особенностей эксплуатации дробильно-измельчительного оборудования в агломерационном производстве / Инновационные перспективы Донбасса. Т.3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов, г. Донецк, 21-23 мая 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 150-154.
  12. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. I / Под ред. Г.М. Островского. – С.-Пб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. – 848 с.
  13. Заднепровский, Р.П. Об энергоемкости разрушения тел с учетом их физического состояния и режима нагружения / Вестник Тамбовского университета, 2016. – № 3. – С. 826-829 (Серия: естественные и технические науки).
  14. Захаров, Е.В. Влияние знакопеременных температурных воздействий на энергоемкость процесса дробления горных пород: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20 / Захаров Евгений Васильевич. – Якутск: Учреждение Российской академии наук Институте горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН, 2012. – 120 с.
  15. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry / K. Holmberg [et al.] // Tribology International. – 2017. – Issue 115. – P. 116-139.
  16. Пат. 188107 РФ, МПК B02C 4/30. Валок четырехвалковой дробилки / А.П. Жильцов [и др.]. – № 2018134232; заявл. 27.09.2018; опубл. 28.03.2019; бюл. № 10.
  17. ПТИМ 229-ОА-030-7-2018. Техническое обслуживание и ремонт дробильного оборудования участка шихтоподготовки агломерационного цеха. – Введ. 2018.29.01. – Алчевск: Филиал № 12 ЗАО «Внешторгсервис», 2018. – 29 с.
  18. Власенко, Д.А. Некоторые способы повышения эффективности процессов фракционной подготовки шихтовых материалов в агломерационном производстве // Современные материалы, техника и технология. Сборник научных статей 9-й Международной научно-практической конференции, 28 декабря 2019 г. – Курск: ЮЗГУ, 2019. – Т.1. – С.94-99.

**D.A. Vlasenko /Cand. Sci. (Eng.)/**  
Donbas State Technical University (Alchevsk)

### SUBSTANTIATION OF DESIGN PARAMETERS AND PROSPECTS FOR USING FLUTED ROLLS IN FOUR-ROLL CRUSHERS

**Background.** Crushing solid fuel in the agglomeration process is quite energy-intensive. At the same time, the physical and technical parameters of the finished product are subject to high requirements, which determine the importance of this research and improvement of these processes to reduce energy consumption and improve the quality of the crushing process.

**Materials and/or methods.** The aim of this paper is the substantiation of constructive-technological parameters of four-roll crusher and enhancing its effectiveness in the crushing of various types of solid fuel on the basis of the proposed mathematical model of the process of contact interaction of the piece of crushable material with fluted surface of upper roll bands of four-roll crusher.

**Results.** The analysis is carried out of the results obtained using the mathematical model of the

process of contact interaction of the piece of crushable material with a fluted surface of upper roll bands of four-roll crusher at the stage of introduction of the material in its workspace.. A comparative analysis of the nominal parameters of the crusher under the conditions of using upper roll bands with a smooth and fluted working surface in a four-roll crusher, depending on the maximum possible size of the roller is carried out. The design and technical parameters of the process of grinding various types of solid fuel in a four-roll crusher and the recommended design parameters of the fluted rolls of the crusher are proposed.

**Conclusion.** The results of the research can be used to justify the main design parameters of an industrial grinding plant to confirm the adequacy of the mathematical model of the process of contact interaction of a piece of crushed material with the fluted surface of the upper roll bands.

**Keywords:** agglomeration, solid fuel, four-roll crusher, roll, fluted band, rollers size.

#### Сведения об авторе

Д.А. Власенко

SPIN-код: 6296-2040

Телефон: +380 (72) 112-82-33

Эл. почта: vlasdmitrij@yandex.ru

Статья поступила 25.02.2020 г.

© Д.А. Власенко, 2020

Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько

**НАУКА И ИННОВАЦИИ**  
ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Добыча угля из водоемов-отстойников**

**Водородная энергетика**

**Центр 3D-принтеринга**

**Виртуальный каталог геологического музея**