

УДК 621.926.323

Власенко Д. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАХВАТА МАТЕРИАЛА РИФЛЁНЫМИ ВАЛКАМИ ВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКИ

На основании третьего закона Ньютона предложена математическая модель процесса захвата материала верхними рифлёными валками четырёхвалковой дробилки при его измельчении. В результате аналитического обоснования получены зависимости, определяющие угол контакта куска с валиком наплавленной сетки, размер валика и угол между соседними рифлями на рабочей поверхности бандажа для обеспечения условия гарантированного захвата рифлёными верхними валками куска материала определённого фракционного состава при отсутствии эффекта его проскальзывания. Предложены рациональные размеры валиков и угла между центрами окружностей соседних рифлей на рабочей поверхности бандажа верхних валков дробилки ДЧГ 960×700 для производственных условий процесса измельчения твёрдого топлива в условиях подготовки шихтовых компонентов при производстве агломерата в агломерационном цехе Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» (Алчевский металлургический комбинат).

Ключевые слова: *измельчение, дробление, четырёхвалковая дробилка, валок, рифлёный валок, твёрдое топливо, фракция, условие захвата, размер валика, угол расположения рифлей.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Процессы фракционной подготовки материалов широко используются в различных отраслях человеческой деятельности, особенно в коксохимической промышленности, а также в металлургии чёрных и цветных металлов. В условиях металлургических и коксохимических предприятий процессы дробления и измельчения применяются для подготовки исходных шихтовых материалов, в том числе твёрдого топлива, путём дробления и измельчения сырья до необходимого фракционного состава.

Для реализации данных процессов используются различные типы дробильных машин, в том числе ударные роторные молотковые и четырёхвалковые дробилки. Однако молотковые дробилки уступают в эффективности диспергирования данного вида технологического сырья в показателях степени измельчения и энергоёмкости процесса, и на основании этого, а также из анализа производственного опыта для реализации измельчения твёрдого топлива предпочтение отдаётся именно валковым дробилкам [1–3].

При этом 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 рабочих органов и узлов дробилок является весьма актуальным и существенно сказывается на основных показателях агломерации шихтовых материалов в металлургическом производстве [1, 2].

Постановка задач. Задачами данного исследования являются математическое обоснование контактного взаимодействия куска дробимого материала при установленном движении по рабочей поверхности бандажей верхних валков четырёхвалковой дробилки на основании третьего закона Ньютона, а также определение рациональных конструктивных параметров рифлёных бандажей верхних валков с целью повышения эффективности измель-

чения твёрдого топлива дробилками ДЧГ 960×700 в процессе фракционной подготовки шихтовых материалов в агломерационном цехе в условиях Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» (Алчевский металлургический комбинат).

Изложение материала и его результаты. Четырёхвалковые 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.

Для повышения эффективности процесса измельчения материала в данном типе дробильных машин верхние валки выполняют с рифлёной или зубчатой поверхностью, а нижнюю пару, как правило, оставляют гладкой. Этим достигается более высокая степень измельчения материала в дробилке в целом. Подобные конструктивные особенности дробильных машин применяются на агломерационных фабриках для измельчения кокса и угля большинства металлургических предприятий полного цикла.

Одним из основных показателей эффективности процесса дробления в валковых дробилках является угол захвата материала, который регламентирует максимально допустимый размер куска материала, загружаемого в рабочее пространство дробильной машины, в зависимости от конструктивно-технологических характеристик дробилки и фракционного состава сырья. При этом, используя гладкие валки, требуется соблюдать следующее условие [1, 3, 4]:

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

где α_1 — угол захвата куска материала в рабочее пространство для гладких валков; R_σ — радиус рабочей поверхности бандажа валка; r_k — условный радиус куска материала; b — межвалковый зазор (ширина выходной щели между валками); γ_{mp} — угол трения материала куска по

рабочей поверхности бандажа, $\gamma_{mp} = \tan \mu$ (где μ — коэффициент трения измельчаемого материала по материалу бандажа валка) [1, 3, 4].

Для гладких валков значение данного угла составляет, в зависимости от сырья, подвергаемого дроблению, приблизительно 16–24° [3, 4]. При таких значениях угла α_1 соотношение диаметров валка и куска дробимого материала при минимальном межвалковом зазоре составляет 20:1–10:1, что негативно сказывается на степени дробления материала [4] и существенно ограничивает его фракционный состав.

При этом максимальный диаметр измельчаемого куска определяется из условия [1, 3, 4]

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

Повышения эффективности процесса измельчения каменно-рудных материалов в четырёхвалковой дробилке за счёт увеличения степени измельчения и возможности диспергирования более крупной фракции материала, а также снижения износа рабочей поверхности валков можно достигнуть, как указывалось выше, при использовании в комбинированной дробилке верхних валков с наплавленной сеткой, образующейся наплавленными продольными и поперечными выступающими валиками [5] определённого размера (рис. 1).

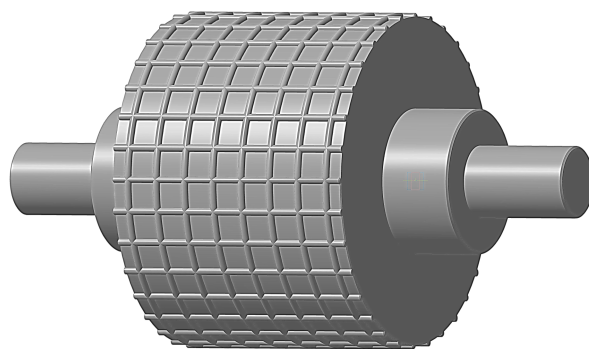


Рисунок 1 Трёхмерная модель рифлёного валка с наплавленной сеткой на рабочей поверхности бандажа

При этом в предшествующих исследованиях не уделялось достаточного внимания обоснованию процесса контактного взаимодействия с целью определения условий захвата куска дробимого материала рифлёными валками при его измельчении валковыми дробилками. Это не позволяло определить рациональные параметры валков наплаваемой сетки для повышения эффективности работы четырёхвалковой дробилки с рифлёными верхними валками.

Для математического моделирования процесса контактного взаимодействия куска измельчаемого материала с рабочей поверхностью рифлёных бандажей валков четырёхвалковой дробилки в процессе дробления необходимо принять следующие допущения:

- материал измельчаемой частицы — однородный, сплошной, изотропный и физически линейный;
- отдельный кусок дробимого материала представляется в виде шара;
- контактирующие поверхности предполагаются совершенно гладкими;
- кусок материала при контакте с поверхностями рифлёных верхних валков воспринимает равнозначные нагрузки и не вращается относительно своей оси симметрии.

При определении основных конструктивных параметров валка с рифлёными бан-

дажами в процессе их взаимного контакта с куском измельчаемого материала при его движении относительно рабочей поверхности предложена математическая модель, основанная на третьем законе Ньютона (законе равенства действия и противодействия) [6]. Схематическое отображение данного процесса представлено на рисунке 2.

При таком виде контактного взаимодействия куска материала 3 с рабочей поверхностью рифлёного валка 1 захват будет осуществляться при условии равновесия действующих сил:

$$\bar{F}_{mp1} + \bar{F}_{mp2} + \bar{N}_1 + \bar{N}_2 = 0, \quad (3)$$

где \bar{F}_{mp1} — сила трения скольжения при контактом взаимодействии куска материала с рабочей поверхностью бандажа; \bar{F}_{mp2} — сила трения скольжения при контактом взаимодействии куска материала с рабочей поверхностью валика сетки 2; \bar{N}_1 — сила нормальной реакции от силы тяжести куска в точке контакта с рабочей поверхностью бандажа; \bar{N}_2 — сила нормальной реакции от силы тяжести куска в точке взаимодействия с рабочей поверхностью валика.

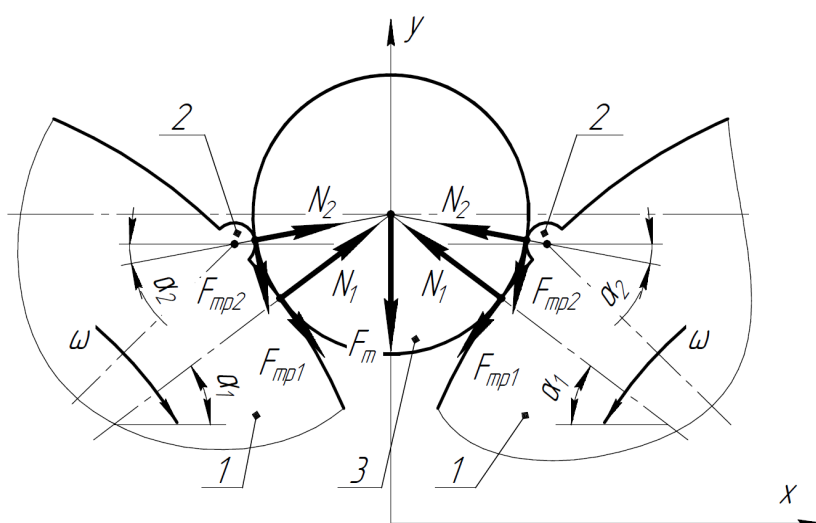


Рисунок 2 Расчётная схема для определения параметров контактного взаимодействия измельчаемого материала с рифлёными валками четырёхвалковой дробилки

Для определения силы нормальной реакции от силы тяжести куска в точке взаимодействия с рабочей поверхностью валика \bar{N}_2 необходимо определить величину избыточной силы выталкивания при их контакте, возникающей при углах трения куска материала определённого размера, превышающего условия захвата (1), и, соответственно, необходимую для компенсации её в проекции на вертикальную ось y силу трения, захватывающую кусок в рабочее пространство дробилки.

Для этого проанализируем взаимодействие сил на основании расчётной схемы, представленной на рисунке 3.

В этом случае необходимая сила трения в проекции на вертикальную ось F_{mp2}^y будет определяться как разница проекций F_{mp1}^y с учётом равенства проекций выталкивающей силы N_μ^y и силы трения $F_{mp\mu}^y$ при угле захвата, равном μ , а также того, что сила трения при сохранении в первом приближении $F_{mpi} = \mu N_i$:

$$\begin{aligned} F_{mp2}^y &= N_1^y - N_\mu^y - F_{mp1}^y + F_{mp\mu}^y = \\ &= N_1 \sin \alpha_1 - N_\mu \sin \mu - \mu N_1 \cos \alpha_1 + \\ &\quad + \mu N_\mu \cos \mu, \end{aligned} \quad (4)$$

где N_μ — сила нормальной реакции от силы тяжести куска в точке контакта с рабочей поверхностью бандажа при угле, значение которого равно коэффициенту трения μ .

При этом сила нормальной реакции от силы тяжести куска в точке контакта с рабочей поверхностью бандажа — $N_1 = F_m \sin^{-1} \alpha_1$ (где F_m — сила тяжести куска материала). Тогда из зависимостей (2), (3) в проекции на вертикальную ось y можно определить необходимую силу трения для обеспечения условия захвата куска в рабочее пространство валков, равную по своей величине в этой проекции силе выталкивания, которая возникает при превышении условия (1) при дроблении материала крупной фракции:

$$N_2 = \frac{F_m ((\sin \alpha_1 - \sin \mu) + \mu(\cos \mu - \cos \alpha_1))}{\sin \alpha_1}. \quad (5)$$

При этом, если принять во внимание, что в первом приближении $\operatorname{tg} \mu = \mu$, а также с учётом закономерности (1) решение относительно переменной α_2 для определения зависимости требуемого угла между вектором выталкивающей силы, возникающей при контактном взаимодействии материала с поверхностью валика N_2 , и перпендикуляром к вектору силы тяжести куска для обеспечения условия захвата принимает следующий вид:

$$\alpha_2 = \mu - \frac{\sin \alpha_1 - \sin \mu + \mu(\cos \mu - \cos \alpha_1)}{\sin \alpha_1}. \quad (6)$$

Для определения размера валика необходимо рассмотреть схему (рис. 4).

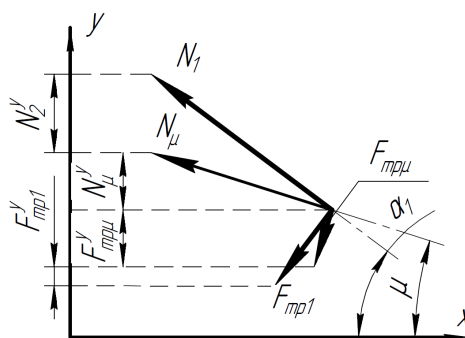


Рисунок 3 Расчётная схема определения компенсирующей силы трения для обеспечения условий захвата куска материала

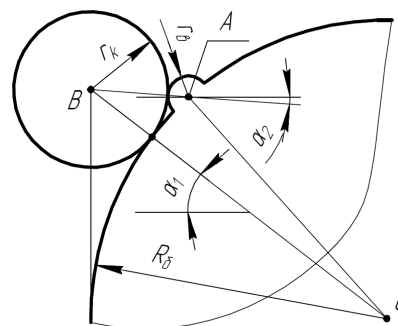


Рисунок 4 Расчётная схема для определения размеров валика

На основании вышеизложенного из треугольника OAB , отображённого на расчётной схеме (рис. 4), с учётом закономерностей (1), (5), (6) определяется необходимый радиус валиков r_6 сетки, наплавляемой на рабочей поверхности бандажей верхних валков, для обеспечения условий захвата, а также про-

никновения дробимого сырья в рабочее пространство дробильной машины в процессе их контактного взаимодействия в зависимости от определённых конструктивно-технологических параметров четырёхвалковой дробилки с рифлёными валками при измельчении материала определённой фракции:

$$r_6 = (R_6 + r_k) \cos \left(\alpha_2 - \arccos \left(\frac{R_6 + 0,5b}{R_6 + r_k} \right) \right) - r_k -$$

$$-0,5 \sqrt{ \frac{2R_6^2 - 2r_k^2 + \cos 2\alpha_2 (2R_6^2 + 4R_6(b - r_k) + b^2) -}{4R_6r_k + \sin 2\alpha_2 (2R_6 + b)} \sqrt{(2r_k - b)(4R_6 + b + 2r_k)} } . \quad (7)$$

При этом для обеспечения наиболее эффективного условия захвата загружаемого куска дробимого материала максимального размера необходимо исключить его проскальзывание за счёт одновременного контакта куска с поверхностью бандажа и двух соседних валиков наплавленной сетки на рабочей поверхности валка. Для этого рассмотрим схему — треугольник AOB (рис. 5).

Исходя из этого, угол между центрами окружностей соседних валиков сетки β_2 определяется как

$$\beta_2 = 2 \arccos \left[\frac{R_6^2 - \frac{r_p^2}{2} + r_k (R_6 - r_p)}{R_6 (R_6 + r_k)} \right]. \quad (8)$$

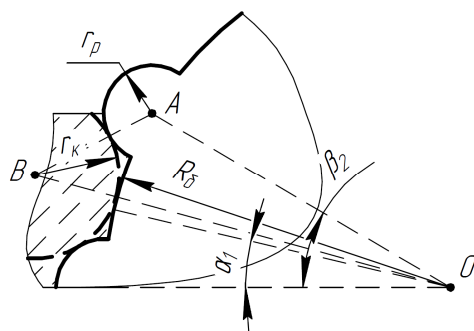


Рисунок 5 Схема обоснования угла между соседними валиками

На рисунке 6 отображены графические зависимости радиуса валика наплавляемой сетки на рабочую поверхность бандажа, необходимого для обеспечения условия захвата куска, от фракционного состава измельчаемого материала (для конструктивных параметров четырёхвалковой дробилки ДЧГ 960×700 [7]) в условиях необходимого межвалкового зазора, влияющего на угол захвата нижними гладкими валками (1) дробимых отсевов кокса, кокса холодного тушения, а также углей марок АО и АС (коэффициенты трения которых, в зависимости от формы поверхности и влажности материала, состояния поверхности бандажа валка, находятся в диапазоне 0,2–0,42 [3, 4]), обусловленного рекомендуемыми размерами измельчённой фракции, необходимой для обеспечения требуемых показателей агломерационного процесса шихтовых материалов, используемых в условиях современного доменного производства [8].

На основании вышеизложенных результатов исследования, а также исходя из условия, что радиус валика сетки, наплавляемой на верхних валках дробильной машины, не должен превышать радиус куска после реализации диспергирования в процессе первой стадии дробления, поступающего на нижние валки (из условия его захвата нижними гладкими валками [1]), максимальный размер фракции материала,

который возможно подавать в четырёхвалковую дробилку ДЧГ 960×700 с верхними рифлёными валками при наименьшем коэффициенте трения сырья по стали $\mu = 0,2$, составляет 0,18 м, при $\mu = 0,3$ — 0,26 м. В то же время, из полученных расчётных данных установлено, что максимальная фракция измельчаемого кокса с коэффициентом трения $\mu = 0,42$ может достигать 0,28 м.

На рисунке 7 представлены графические зависимости рекомендуемого угла между центрами окружностей соседних валков сетки валка от фракции измельчаемого материала для обеспечения наибольшей эффективной работы дробилки.

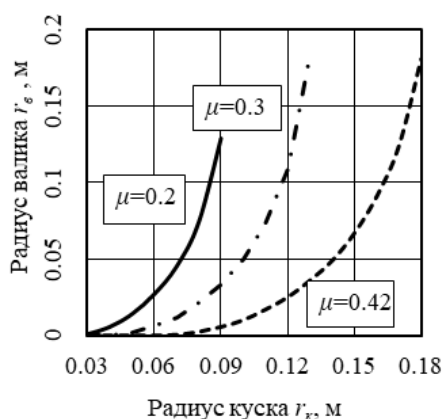


Рисунок 6 Графики зависимостей радиуса валика на поверхности бандажа от размеров дробимого материала

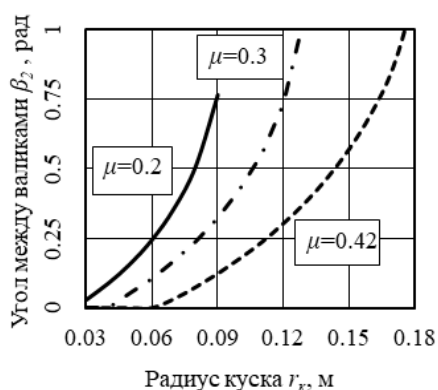


Рисунок 7 График зависимости угла между центрами соседних валков сетки валка от размеров материала

В условиях производства доменного агломерата в агломерационном цехе Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» на участке фракционной подготовки шихтовых материалов измельчению подвергаются следующие виды твёрдого топлива: для применения в агломерационном процессе спекания — уголь марок АО и АС фракционным составом 0–50 мм, коксовая мелочь размерами 0–25 мм, а также для обеспечения потребностей участка глиномялки доменного цеха — кокс сухого тушения фракцией 0–140 мм.

В таблице представлены результаты сравнительного анализа основных параметров четырёхвалковой дробилки ДЧГ 960×700 при реализации процесса измельчения различных видов твёрдого топлива в условиях агломерационного производства с использованием гладких и рифлёных верхних валков, а также рекомендуемые значения конструктивных параметров рифлёного верхнего вала дробилки с учётом технологического коэффициента запаса, учитывающего отклонение формы, влажности и запылённости куска материала и т. д., значение которого задаётся в пределах 1,1–1,2.

Учитывая результаты, отображённые в таблице, можно утверждать, что для условий измельчения коксовой мелочи насадка сетки на поверхность бандажа не требуется, так как даже с учётом коэффициента запаса угол захвата гладкими валками фактически равен значению коэффициента трения. При использовании в агломерационном процессе углей рекомендуется наплавлять на верхний валок сетку, состоящую из валков радиусом 3,9 мм. Для обеспечения требуемого помола кокса сухого тушения для производственных потребностей глиномялки необходима сетка радиусом 14,0 мм. Требуемый угол между центрами поперечных валков сетки: для обеспечения процесса дробления углей — 0,064 рад, при измельчении кокса сухого тушения — 0,191 рад.

Таблица

Технологические параметры процесса измельчения твёрдого топлива в четырёхвалковой дробилке и рекомендуемые конструктивные параметры рифлёных валков

Наименование параметра	Вид и фракция (мм) твёрдого топлива		
	Угли (-50)	Коксовая мелочь (-25)	Кокс сухого тушения (-140)
Наименьшее значение коэффициента трения материала по стали μ	0,2	0,3	0,33
Требуемая фракция дроблёного материала после помола, мм	0–3	0–3	0–5
Угол α_1 , рад	0,308	0,308	0,487
Угол α_2 , рад	-0,16	0,272	-0,021
Радиус валика r_g сетки, мм	3,9	0,02	14
Угол между центрами окружностей соседних валиков сетки β_2 , рад	0,064	0,004	0,191
Наибольший размер дробимого куска для гладких валков, м	0,032	0,058	0,086
Наибольший размер дробимого куска для рифлёных валков (с максимально возможным размером валика), м	0,16	0,24	0,28
Степень дробления	16,7	8,3	28

На основании полученных результатов исследования можно утверждать, что реализация рифлёных валков с определёнными конструктивными параметрами позволит использовать исходное сырьё большей фракции, снизить износ рабочих органов и повысить эффективность самого процесса измельчения каменно-рудных материалов, в том числе и твёрдого топлива, в четырёхвалковых дробилках. Однако применение рифлёных валков и более крупной фракции исходного сырья значительно повысит усилия, возникающие при разрушении материала при контакте с поверхностью валиков, что будет негативно сказываться на прочностных характеристиках вала, ресурсопригодности подшипниковых узлов, а также энергосиловых параметрах самого процесса измельчения материала в дробилке.

Выводы и направление дальнейших исследований. В ходе исследований разработана математическая модель процесса захвата материала рифлёными валками валковой дробилки.

Предложены закономерности для определения необходимого радиуса валиков

сетки, наплавляемой на рабочей поверхности бандажей верхних валков четырёхвалковой дробилки, для обеспечения условия захвата материала в процессе его дробления и угла между центрами окружностей соседних валиков сетки для максимально возможного снижения проскальзывания материала по рабочей поверхности бандажа и её степени износа.

Выявлено влияние данных конструктивных параметров на эффективность работы самой дробилки.

Предложены рациональные конструктивные параметры сетки рифлёного верхнего валика ДЧГ 960×700 для измельчения различных видов твёрдого топлива в условиях агломерационного цеха в Филиале № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС».

Дальнейшими перспективами в исследовании процесса дробления различных материалов в валковых дробилках с рифлёными валками являются математическое описание стадии разрушения материалов при контактном воздействии на него рабочей поверхности бандажа и валика сетки с использованием полученных в данной ра-

боте результатов моделирования, а также экспериментальное подтверждение выдвинутых предположений и исследование влияния конструктивных параметров валка на основные технологические показатели процесса измельчения каменно-рудных материалов в валковых дробильных машинах.

Библиографический список

1. *Treatise on Process Metallurgy. Vol. 3. Industrial Processes [Text] / Editor in Chief S. Seetharaman. — Elsevier, 2014. — 1751 p.*
2. Власенко, Д. А. Комплексный анализ особенностей эксплуатации дробильно-измельчительного оборудования в агломерационном производстве [Текст] / Д. А. Власенко // *Инновационные перспективы Донбасса. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк : ДонНТУ, 2019. — Т. 3 — С. 150–154.*
3. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкция, расчёт, особенности эксплуатации [Текст] / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. — М. : Машиностроение, 1990. — 320 с.
4. Борщев, В. Я. Оборудование для измельчения материалов : дробилки и мельницы [Текст] / В. Я. Борщев. — Тамбов : изд-во ТГТУ, 2004. — 75 с.
5. Пат. 188107 Российская Федерация, МПК В02С 4/30 (2006.1). Валок четырёхвалковой дробилки / А. П. Жильцов, Г. А. Билан, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко, Р. С. Мележик ; заявитель и патентообладатель Липецкий гос. техн. ун-т. — № 2018134232 ; заявл. 27.09.18 ; опубл. 28.03.19, Бюл. № 10. — 3 с. : ил.
6. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики [Текст] / С. М. Тарг. — М. : Высшая школа, 1995. — 416 с.
7. ПТИМ 229–ОА–030–7–2018. Техническое обслуживание и ремонт дробильного оборудования участка шихтоподготовки агломерационного цеха [Текст]. — Введ. 2018–29–01. — Алчевск : Филиал № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС», 2018. — 29 с.
8. Коротич, В. И. Агломерация рудных материалов [Текст] / В. И. Коротич, Ю. А. Фролов, Т. Н. Бездежский. — Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2003. — 400 с.

© Власенко Д. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А., к.т.н., доц. каф. МО ЛГТУ Харитоненко А. А.

Статья поступила в редакцию 08.01.20.

Власенко Д. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАХОПЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ РИФЛЕНИМИ ВАЛКАМИ ВАЛКОВОЇ ДРОБАРКИ

На підставі третього закону Ньютона запропоновано математичну модель процесу захоплення матеріалу верхніми рифленими валками чотиривалкової дробарки у процесі його подрібнення. В результаті аналітичного обґрунтування отримано залежності, що визначають кут контакту шматка з валиком напавленої сітки, розмір валика і кут між сусідніми рифлями на робочій поверхні бандажу для забезпечення умови гарантованого захоплення рифленими верхніми валками шматка матеріалу певного фракційного складу за відсутності ефекту його прослизання. Запропоновано раціональні розміри валиків і кута між центрами кіл сусідніх рифлів на робочій поверхні бандажа верхніх валків дробарки ДЧГ 960×700 для виробничих умов процесу подрібнення твердого палива в умовах підготовки шихтових компонентів при виробництві агломерату в агломераційному цеху Філії № 12 ЗАТ «ВНЕШТОРГСЕРВИС» (Алчевський металургійний комбінат).

Ключові слова: подрібнення, дроблення, чотиривалкова дробарка, валок, рифлений валок, тверде паливо, фракція, умова захоплення, розмір валика, кут розташування рифлів.

Vlasenko D. A. (*DonSTU, Alchevsk, LPR*)

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF MATERIAL CAPTURE BY FLUTED ROLLS OF A ROLL CRUSHER

Based on Newton's third law, a mathematical model of the process of material capture by the upper fluted rolls of a four-roll crusher during its grinding is proposed. As a result of analytical justification the dependences defining the contact angle of a piece with the roll of padding mesh, roll size and the angle between the neighboring ruffles on the operating tyre surface to ensure the conditions for guaranteed capture by the upper fluted rolls the piece of material of a certain fractional composition in the absence of its slipping effect were obtained. There have been proposed the optimal sizes of rolls and angle between the circle centers of neighboring ruffles on the operating tyre surface of the upper rolls crusher ДЧГ 960×700 for the operating conditions of grinding process of solid fuels in preparing burden components in the production of sinter in sintering plant of Branch № 12 of CJSC "VNESHTORGSERVIS" (Alchevsk Iron and Steel Works).

Key words: *grinding, crushing, four-roll crusher, roll, fluted roll, solid fuel, fraction, capture condition, roll size, angle of ruffles.*