

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВодОВ ВАЛКОВЫХ ДРОБИЛОК С РИФЛЕННЫМИ ВАЛКАМИ

Аннотация. Техничко-экономическая эффективность дробильно-измельчительных машин в процессе фракционной подготовки каменно-рудных материалов напрямую зависит от их энергоэффективности. Для обоснования рациональных энергосиловых параметров валковых дробилок в работе представлена математическая модель привода валковой дробилки с рифлеными валками. На основании результатов математического моделирования для фракционной подготовки твердого топлива в агломерационном цехе Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК» предложено использование в приводе верхних валков электродвигателя мощностью 22,0 кВт вместо 45,0 кВт. В производственных условиях с помощью многофакторного эксперимента подтверждена адекватность предложенных аналитических зависимостей для определения момента сопротивления и мощности привода валковых дробилок с рифлеными валками — средняя относительная погрешность результатов не превысила 13,6 %. Установлено, что основным фактором, влияющим на момент сопротивления, возникающий на валу электродвигателя в процессе дробления, является межвалковый зазор, образующийся в процессе дробления. На основании результатов экспериментальных исследований установлено, что предложенный электродвигатель 5АМ 200 S6 с номинальной мощностью 22,0 кВт в полной мере обеспечивает стабильную работу электропривода верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 в условиях фракционной подготовки твердого топлива в агломерационном цехе «АМК» ООО «ЮГМК».

Ключевые слова: валковые дробилки, рифленые валки, привод, электродвигатель, момент сопротивления, мощность, снижение энергоемкости.

Введение. Техничко-экономическая эффективность валковых дробильных машин [1–4] в процессе фракционной подготовки каменно-рудных материалов напрямую зависит от энергосиловых параметров их привода.

Номинальная мощность электродвигателя привода валковой дробилки, необходимая для его устойчивой работы, определяются силами дробления материала о поверхности рабочих органов и моментом сопротивления на валу исполнительного органа.

Изучению различных параметров процесса дробления в валковых дробилках посвящено множество работ. Так исследования [5–8] посвящены анализу и усовершенствованию конструктивных особенностей рабочих органов и самих валковых дробильных машин. Работы [9–12] направлены на изучение вопроса кинетики дробильно-измельчительных процессов и динамики дробилок валкового типа. В статьях [13–17] представлены результаты исследования процесса дробления материала валками и определения энергосиловых показателей валковых дробилок с гладкими валками.

Методы, представленные в отдельных работах, перечисленных выше, применяются для обоснования энергосиловых параметров процесса дробления и мощности привода гладких валков валковых дробильных машин в процессе дробления различных материалов. Однако при

использовании в валковой дробилке валков с рифленой рабочей поверхностью [18–20] условия разрушения материала между рабочими поверхностями валков и рифлей сетки в ее рабочем пространстве существенно меняются.

Исходя из этого, существующие зависимости для определения энергосиловых параметров привода валковых дробилок, не могут быть использованы для обоснования мощности электродвигателя привода валковых дробильных машин с рифлеными рабочими органами.

Математическая модель привода валковой дробилки с рифлеными рабочими органами.

В работе [19] представлена математическая валковой дробилки с рифлеными рабочими органами, согласно которой мощность электропривода дробильной машины данного типа определяется как:

$$W_{\text{дв}} = k_{\text{зап}} \frac{M_c \omega}{\eta_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса мощности электродвигателя [21]; M_c — момент сопротивления от сил, возникающих в процессе дробления материала, Нм; ω — угловая скорость вращения рабочих органов, рад/с.; $\eta_{\text{пр}}$ — коэффициент полезного действия привода [22].

Момент сопротивления M_c определяется как:

$$M_c = k_f (F_{др.б.} R_6 \sin \alpha_{6.ср} + F_\tau (R_6 + r_p \cos \alpha_{ср.у'}) + \mu_m F_n (R_6 + r_p \cos \alpha_{ср.х'})), \quad (2)$$

где k_f – коэффициент характерной формы и степени анизотропии дробимого материала [19]; $F_{др.б.}$ – сила, возникающая при разрушении материала между поверхностями бандажей верхней пары валков, Н; R – рабочий радиус бандажа, м; $\alpha_{6.ср.}$ – угол приложения силы $F_{др.б.}$ при контактом взаимодействии с бандажами валков [18–20], рад; F_τ – тангенциальная составляющая силы дробления о рифли стеки бандажа, Н; r_p – радиус рифли, м; $\alpha_{ср.у'}$ – угол положения тангенциальной составляющей силы дробления материала о

рифли, рад ($\alpha_{ср.у'} = \frac{0,43}{\mu_m - 1} + 1$ [19]); μ_m – коэф-

фициент трения дробимого материала по материалу бандажа; F_n – нормальная составляющая силы дробления о рифли сетки, Н; $\alpha_{ср.х'}$ – угол по-

ложения нормальной составляющей силы дробления материала о рифли (

$$\alpha_{ср.х'} = \frac{0,43}{\mu_m + 1} + 0,57. \quad [19]).$$

Для определения силы $F_{др.б.}$ в данной математической модели использовалась зависимость, предложенная в исследованиях [18–20]:

$$F_{др.б.} = \sigma_m S_{к.б.}; \quad (3)$$

где σ_m – предел прочности на сжатие дробимого материала, МПа; $S_{к.б.}$ – площадь контакта материала с рабочей поверхности бандажа (без учета рифлей сетки), м².

Площадь контакта материала с рабочей поверхности бандажа определяется как разница между площадью контакта для гладких бандажей S_6 [18–20] и площадью взаимодействия материала с рифлями S_{pi} [19]:

$$S_{к.б.} = S_6 - S_{pi} = \frac{(2R_6 - r_p)B_6}{\sqrt{4\frac{R_6}{b} + 1}} \left[\arctg \left(\sqrt{4\frac{R_6}{b} + 1} \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{1.6}}{2} \right) \right) - \sum_{i=1}^N \arctg \left(\frac{\sqrt{4\frac{R_6}{b} + 1} \left(\operatorname{tg} \left(\frac{(N_i - 1)\beta_2}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{(\alpha_p + (N_i - 1)\beta_2)}{2} \right) \right)}{1 - \left(4\frac{R_6}{b} + 1 \right) \left(\operatorname{tg} \left(\frac{(N_i - 1)\beta_2}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{(\alpha_p + (N_i - 1)\beta_2)}{2} \right) \right)} \right) \right], \quad (4)$$

где B_6 – ширина бандажа, м; b – рабочий зазор между бандажами [1–4, 10], м; $\alpha_{1.6}$ – угол сектора очага деформации для рифленых валков, рад; N – количество рифлей в очаге деформации, шт.; β_2 – угол между центрами соседних рифлей, рад; α_p – угол сектора бандажа, занимаемого одной рифлей до ее вершины, рад.

Угол $\alpha_{1.6}$ определяется по следующей зависимости [19, 20]:

$$\alpha_{1.6} = \alpha_1 + \frac{\beta_2}{2}, \quad (5)$$

где α_1 – угол захвата куска материала для гладких валков [1–4], рад.

Число таких секторов, находящихся в секторе деформации $\alpha_{1.6}$:

$$N = \frac{\alpha_{1.6}}{\beta_2}. \quad (6)$$

Угол между центрами окружностей соседних рифлей определяется как [19, 20]:

$$\beta_2 = 2 \arccos \left[\frac{R_6^2 - 0,5r_p^2 + r_k(R_6 - r_p)}{R_6(R_6 + r_k)} \right], \quad (7)$$

где r_k – условный радиус куска дробимого материала, м.

Угол α_p определяется как [19, 20]:

$$\alpha_p = \arccos \left(1 - \frac{r_p^2}{2R_6^2} \right). \quad (8)$$

Касательные F_{ti} и нормальные F_{ni} силы дробления о поверхность рифлей определяются по следующим зависимостям [19, 20]:

$$F_{ti} = \sum_1^N \frac{2\sigma_M r_p B_6 (1 - \mu_M)}{\pi \sqrt{4 \frac{R_6}{b} + 1}} \arctg \left(\frac{\sqrt{4 \frac{R_6}{b} + 1} \left(\operatorname{tg} \left(\frac{(N_i - 1)\beta_2}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{(\alpha_p + (N_i - 1)\beta_2)}{2} \right) \right)}{1 - \left(4 \frac{R_6}{b} + 1 \right) \left(\operatorname{tg} \left(\frac{(N_i - 1)\beta_2}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{(\alpha_p + (N_i - 1)\beta_2)}{2} \right) \right)} \right); \quad (9)$$

$$F_{ni} = \sum_1^N \frac{2\sigma_M r_p B_6 (1 + \mu_M)}{\pi \sqrt{4 \frac{R_6}{b} + 1}} \arctg \left(\frac{\sqrt{4 \frac{R_6}{b} + 1} \left(\operatorname{tg} \left(\frac{(N_i - 1)\beta_2}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{(\alpha_p + (N_i - 1)\beta_2)}{2} \right) \right)}{1 - \left(4 \frac{R_6}{b} + 1 \right) \left(\operatorname{tg} \left(\frac{(N_i - 1)\beta_2}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{(\alpha_p + (N_i - 1)\beta_2)}{2} \right) \right)} \right). \quad (10)$$

Методология, приборы, устройства и оборудование, применяемые для проведения экспериментальных исследований.

В работах [18, 19] с помощью экспериментального метода определения момента сопротивления на валу электродвигателя [21, 23] подтверждена адекватность разработанной математической модели валковой дробилки с рифлеными валками на уровне относительной погрешности 10,7...20,4 %.

В ходе экспериментальных исследований, проводимых в условиях агломерационного цеха Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК» («АМК» ООО «ЮГМК»), установлено, что двигатель 5AM 250 S6 с номинальной мощностью 45,0 кВт в условиях дробления кокса сухого тушения фракцией – 140,0 мм [24] (как для наиболее неблагоприятных условий согласно критерия Вальда [25]) работает в диапазоне скоростей гораздо ниже критической (рис. 1). Это указывает на то, что привод дробилки ДЧГ 900×700 существенно недогружен и имеет необоснованно высокий коэффициент запаса мощности.

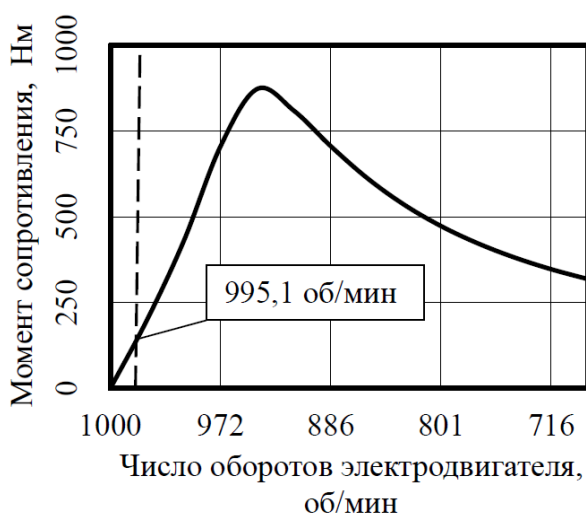


Рис. 1. Механическая характеристика и диапазон числа оборотов, при которых двигатель 5AM 250 S6 работает в процессе эксплуатации

На основании расчетной модели для привода верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 предложен асинхронный электродвигатель 5AM 200S6 с развиваемой мощностью $P_n = 22$ кВт, и согласно проверке на достаточность пускового момента [26] предложенная электрическая машина обеспечивает начальный (пусковой) вращающий момент, возникающий на валу двигателя при его разгоне. При этом за счет схожих габаритных и присоединительных размеров этих двигателей существенных изменений в конструкцию рамы привода верхних валков дробилки вносить не требовалось (рис. 2, а).

Для проверки работоспособности выбранного двигателя в условиях процесса дробления кокса сухого тушения проведен двухфакторный эксперимент, основанный на применении центрального композиционного ротатбельного униформпланирования второго порядка [27]. В качестве основных независимых факторов, влияющих на момент сопротивления на валу электродвигателя, выбирались зазор b и условный радиус куска дробимого материала r_k . Экспериментальные исследования проводились согласно методике, предложенной в работах [20, 21]. Для определения числа оборотов электродвигателя использовался сборщик данных «Кварц 2» [28] с фотоотметчиком лазерным КР-020-Л (рис. 2, б).

Выбор факторов и уровней их варьирования зависел от технико-технологических параметров четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 и производственных условий процесса фракционной подготовки твердого топлива на участке подготовки шихты агломерационного цеха «АМК» ООО «ЮГМК» (табл. 1).

Так как в производственных условиях не представляется возможным обеспечить реализацию факторов и уровней их варьирования с точностью, указанной в таблице 1, то значения регулировки зазора между валками округлялись до точности в одну десятую миллиметра, а размер фракции дробимого материала — до целых единиц (табл. 2). При этом среднее относительное

отклонение от необходимых значений не превысило 0,64 %, что фактически не повлияло на точность проведения эксперимента.



Рис. 2. Дробилка ДЧГ 900×700 (а) и схема установки лазерного отметчика на валу двигателя (б) привода верхних валков при проведении эксперимента

Таблица 1

Расчетные уровни и интервалы варьирования факторов для проведения экспериментальных исследований

Параметр	$x_1(b)$, мм	$x_2(r_k)$, мм
Основной уровень, $x_i = 0$	3,5	110,0
Интервал варьирования, I	1,06	21,21
Верхний уровень, $x_i = +1$	4,56	131,21
Нижний уровень, $x_i = -1$	2,44	88,79
Верхняя звездная точка, $x_i = +1,414$	5,0	70,0
Нижняя звездная точка, $x_i = -1,414$	2,0	40,0

Таблица 2

Уровни и интервалы варьирования факторов, используемые при проведении экспериментальных исследований

Параметр	$x_1(b)$, мм	$x_2(r_k)$, мм
Основной уровень, $x_i = 0$	3,5	110
Интервал варьирования, I	1,1	21
Верхний уровень, $x_i = +1$	4,6	131
Нижний уровень, $x_i = -1$	2,4	89
Верхняя звездная точка, $x_i = +1,414$	5,0	70
Нижняя звездная точка, $x_i = -1,414$	2,0	40

Проверку воспроизводимости эксперимента проводилась по критерию Кохрена, который при числе опытов 13, количестве повторностей опытов — 3 и уровне значимости 0,05 составляет $G = 0,336$, 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 $F = 6,59$ [29].

Результаты экспериментальных исследований.

По результатам экспериментальных исследований по определению момента сопро-

тивления, действующем на валу электродвигателя в процессе дробления кокса сухого тушения в дробилке ДЧГ 900×700, получены следующие его значения (табл. 2).

Таблица 3

Значения момента сопротивления $M_{сэ}$, действующем на валу электродвигателя в процессе дробления кокса сухого тушения, полученные в ходе эксперимента

Момент сопротивления, Нм	№ отдельного опыта эксперимента п/п												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$M_{сэ}$	115	222	153	285	100	253	153	243	193	206	192	206	199

По результатам статистической обработки результатов экспериментальных исследований при определении соответствующих эксперимен-

тальных значений критериев Стьюдента t , установлено, что все коэффициенты регрессии являются значимыми, а функция отклика выглядит следующим образом:

$$y(x_1, x_2) = 57,09x_1 + 28,53x_2 - 9,74x_1^2 + 0,78x_2^2 + 6,21x_1x_2 + 199,08. \quad (11)$$

На основании результатов статистической обработки [29] полученных экспериментальных данных критерий Кохрена составил $G = 0,25$, критерий Фишера $F = 3,5$, что подтверждает достоверность и адекватность полученного регрессионного уравнения момента сопротивления, возникающего на валу электродвигателя дробилки ДЧГ 900×700 в процессе дробления.

В натуральном виде [27] регрессионная зависимость от функции отклика (11) момента сопротивления $M_{сэ}$, действующем на валу электродвигателя в процессе дробления кокса сухого тушения, принимает следующий вид:

$$M_{сэ} = 84,04b - 1,0 \times 10^{-3} r_k - 8,66b^2 + 1,72 \times 10^{-3} r_k^2 + 0,28br_k - 116,09. \quad (12)$$

Для проверки адекватности аналитического метода определения момента сопротивления $M_{сэ}$, действующего на валу двигателя в процессе

дробления, проведен сравнительный анализ значений, рассчитанных с помощью формулы (2) и регрессионной зависимости (12) (табл. 4).

Таблица 4

Моменты сопротивления на валу электродвигателя в процессе дробления кокса сухого тушения, определенных по регрессионной и аналитической зависимостям, и значения относительной погрешности результатов эксперимента

№ п/п	Результаты		Относительная погрешность, %
	По зависимости (2)	По зависимости (12)	
1	115	102,1	11,2
2	222	182,8	17,7
3	153	135,1	11,7
4	285	253,4	11,1
5	100	99,6	0,4
6	253	240,3	5,0
7	153	125,1	18,2
8	243	203,2	29,8
9	193	170,6	11,6
10	206	170,6	17,2
11	192	170,6	11,1
12	206	170,6	17,2
13	199	170,6	14,3
Средняя относительная погрешность, %			13,6

Статистическая обработка экспериментальных данных показывает, что относительная погрешность определения момента сопротивления на валу электродвигателя в процессе дробления

кокса сухого тушения по формуле (2), по отношению к экспериментальным значениям составляет 0,4–29,8 % (среднее относительное отклонение

составило 13,6 %) [14], что в достаточной степени подтверждает адекватность предложенной математической модели.

Для наглядного отображения влияния межвалкового зазора b и радиуса куска дробимого материала r_k на момент сопротивления $M_{сз}$ на рисунке 3 представлен трехмерный график функции регрессионной модели (12).

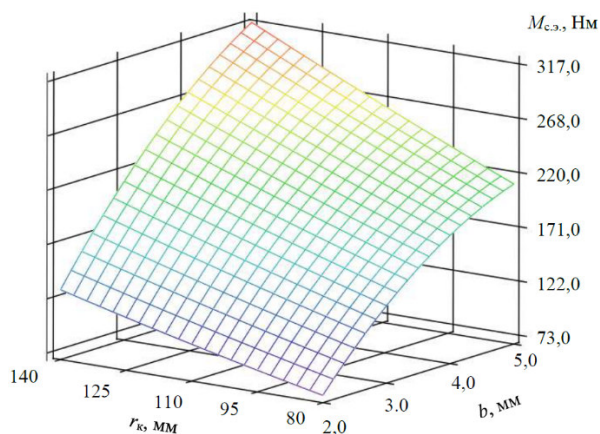


Рис. 3. Трехмерный график регрессионной модели момента сопротивления, действующего на валу электродвигателя в процессе дробления кокса сухого тушения в дробилке ДЧГ 900×700, от зазора b и радиуса куска материала r_k

При этом из анализа трехмерного графика (рис. 3) установлено, что наибольшее влияние на значение момента сопротивления оказывает межвалковый зазор b , что обусловлено тем, что при его увеличении существенно увеличивается площадь контакта дробимого материала с рабочей поверхностью валков.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что двигатель 5AM 200 S6 при дроблении кокса сухого тушения фракцией – 140,0 мм в условиях агломерационного цеха «АМК» ООО «ЮГМК» работает в диапазоне частот вращения 966,2...1000,0 об/мин (рис. 4), что выше критической скорости вращения данного двигателя, которая составляет $n_k = 893,3$ об/мин.

Также установлено, что максимальный момент сопротивления $M_{сз}$ не превышает критический момент электрической машины $M_k = 474,3$ Нм, при этом диапазон рабочих температур корпуса двигателя в процессе эксплуатации составил (в зависимости от температуры окружающей среды) составил 45...60°C, что в совокупности вышесказанного указывает на то, что условия его надежности выполняются [30], а также выбранный электродвигатель обеспечивает стабильную работу электропривода верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 при дроблении твердого топлива в агломерационном цехе «АМК» ООО «ЮГМК».

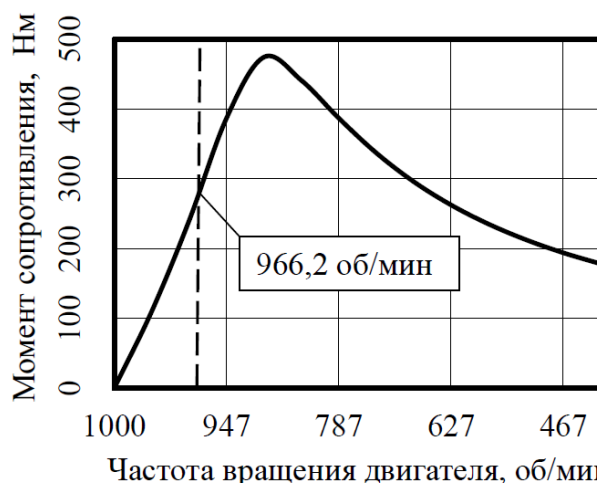


Рис. 4. Механическая характеристика двигателя 5AM 200 S6 и диапазон частот вращения, при которых работает двигатель в процессе дробления кокса доменного

Выводы.

1. Предложена математическая модель, на основании которой получен метод определения энергосиловых параметров привода валковых дробилок с рифлеными валками. Представлены аналитические зависимости для определения момента сопротивления от сил дробления, возникающего на валу электродвигателя, и мощности электропривода валковых дробильно-измельчительных машин с рифлеными валками в процессе дробления материала.

2. Для фракционной подготовки твердого топлива в агломерационном цехе АМК «ООО «ЮГМК» предложено использование в приводе верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 асинхронного электродвигателя 5AM 200 S6 номинальной мощностью 22,0 кВт.

3. С помощью многофакторного эксперимента подтверждены ранее предложенные аналитические зависимости для обоснования момента сопротивления, действующего на валу и мощности электродвигателя валковых дробилок с рифлеными бандажами, применяемых для измельчения различных каменно-рудных материалов. Относительная погрешность разработанной аналитической модели по отношению к результатам экспериментальных исследований составила 10,7...20,4 %.

4. Подтверждено, что двигатель 5AM 200 S6 при дроблении кокса сухого тушения фракцией – 140,0 мм в дробилке ДЧГ 900×700 в условиях агломерационного цеха «АМК» ООО «ЮГМК» работает в диапазоне частот вращения и моментов сопротивления ниже критических.

5. Установлено, что наибольшее влияние на значение момента сопротивления, возникающего в процессе дробления твердого топлива, оказы-

вает межвалковый зазор b , от которого непосредственно зависит площадь контакта дробимого материала с рабочими поверхностями вала.

6. По результатам исследований установлено, что предложенный электродвигатель 5AM 200 S6 с номинальной мощностью 22,0 кВт в полной мере обеспечивает стабильную работу электропривода верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 в условиях фракционной подготовки твердого топлива в агломерационном цехе «АМК» ООО «ЮГМК».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва: Недра, 1985. 285 с.
2. Перов В.А., Андреев С.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва: Недра, 1990. 301 с.
3. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы: учебник для студентов; под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. Москва: Недра, 1998. 366 с.
4. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва: Недра, 1980. 415 с.
5. Mikulionok I.O. Classification of Roll Grinders for Lumpy and Bulk Materials (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. № 56. Pp. 951–957. DOI: 10.1007/s10556-021-00867-3.
6. Subba Rao D.V. Minerals and Coal Process Calculations. London: Taylor & Francis Group, 2016. 354 p. DOI: 10.1201/9781315225524.
7. Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, Fabrication and Testing of a Double Roll Crusher // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2016. Vol. 35 (№ 11). P. 511–515. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V35P303.
8. Lieberwirth H., Silbermann F., Szczelina P. New insights into double roll crushing // Minerals Engineering. 2023. Vol. 202. 108298. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108298.
9. Богданов В.С., Фадин Ю.М., Латышев С.С., Юдин К.А., Гавриленко А.В., Авдеев Я.А. Уравнение кинетики процесса измельчения в горизонтальной валковой мельнице // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области, Белгород, 20–21 апреля 2017 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. С. 22–30.
10. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. Москва: Машиностроение, 1990. 320 с.
11. Lieberwirth H., Hillmann Ph., Hesse M. Dynamics in double roll crushers // Minerals Engineering. 2016. Vol. 103–104. Pp. 60–66. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.08.009.
12. Johansson M., Evertsson M. A time dynamic model of a high pressure grinding rolls crusher // Minerals Engineering. 2019. Vol. 132. Pp. 27–38. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.008.
13. Gu R., Qin Z., Zhao S., Xing H. Mechanical characteristics of roll crushing of ore materials based on discrete element method // Scientific Reports. 2025. 15. 771. DOI: 10.1038/s41598-024-84734-0.
14. Anticoi H., Guasch E., Hamid S.A., Oliva J., Alfonso P., Bascompta M., Sanmiquel L., Escobet T., Escobet A., Parcerisa D., Peña-Pitarch E., Rosa Argelaguet R., De Felipe J.J. An Improved High-Pressure Roll Crusher Model for Tungsten and Tantalum Ores // Minerals. 2018. Vol. 8. № 483. DOI: 10.3390/MIN8110483
15. Rashidi S.A., Rajamani R.K., Fuerstenau D.W. Review of the Modeling of High Pressure Grinding Rolls // Powder and Particle Journal. 2017. Vol. 34. Pp. 125–140. DOI: 10.14356/kona.2017017.
16. Varela L.B., Tressia G., Masoumi M., Bortoleto E., Regattieri C., Sinatora A. Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur? // Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 122. Pp. 105295. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105295.
17. Ivashchuk O.A., Ivashchuk O.D., Fedorov V.I., Shtana A. I. Predicting the Operational Efficiency of High-Pressure Roller Crushers // Russian Engineering Research. 2020. Vol. 40. Pp. 970–972. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X2011009X>.
18. Vlasenko D.A. Justification of Rational Energy-Power Parameters of the Drive of Roll Crushers // Steel in Translation. 2023. Vol. 53. (No. 7). Pp. 640–647. DOI: 10.3103/s0967091223070124.
19. Власенко Д.А. Развитие теории процессов дробления и практика совершенствования валковых дробилок с гладкими и рифлеными валами: монография. Алчевск. ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2025. 172 с.
20. Vlasenko D.A. Modeling and Industrial Development of Grinding Processes in Roller Mills with Corrugated Rolls // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. (No. 4). Pp. 445–450. DOI: 10.3103/s0967091222040179.
21. Усольцев А.А. Электрический привод: учебное пособие. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. 238 с.

22. Зубарев Д.Н. Физическая энциклопедия: под ред. А.М. Прохорова. Москва: Советская энциклопедия, 1990. Т. 2. 704 с.

23. Vulfson I. Dynamics of cyclic machines. (Expanded edition of the monograph translation). Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. 2015. 410 p. DOI: 10.1007/978-3-319-12634-0.

24. ГОСТ 5.1261-72 Кокс доменный из углей Донецкого и Кузнецкого бассейнов и шихты Череповецкого металлургического завода. Требования к качеству аттестованной продукции. Введ. в дейст. 15.02.1972. М.: Изд-во стандартов, 1974. 2 с.

25. Wald A. Sequential analysis // J. Wiley & sons, Incorporated, 1947. 212 p.

26. Коварский Е.М., Янко Ю.И. Испытание электрических машин. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 319 с.

27. Белай Г.Е., Дембовский В.В., Соценко О.В. Организация металлургического эксперимента: учеб. пособ. для вузов. Под ред. В.В. Дембовского. Москва: Металлургия, 1993. 256 с.

28. ТУ 4277-076-54981193-15 Прибор виброизмерительный «Кварц 2». Серийный выпуск. Введ. в дейст. 21.04.2016. М.: ООО «ДИАМЕХ 2000», 2016. 136 с.

29. Браунли К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике: под ред. Л.Н. Большева. Москва: Наука, 1977. 407 с.

30. Кабдин Н.Е., Сторчевой В.Ф. Электропривод: учебник. Москва: МЭСХ, 2021. 286 с.

Информация об авторах

Власенко Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук. E-mail: VlsnkDA@yandex.ru. Липецкий государственный технический университет. 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

Поступила 07.07.2025 г.

© Власенко Д.А., 2025

Vlasenko D.A.

Lipetsk State Technical University

E-mail: VlsnkDA@yandex.ru

FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING AND INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF DRIVES OF ROLLER CRUSHERS WITH CORRUGATED ROLLS

Abstract. The technical and economic efficiency of crushing and grinding machines in the process of fractional preparation of rock ore materials directly depends on their energy efficiency. In order to substantiate rational energy-power parameters of roller crushers, the paper presents a mathematical model of the drive of a roller crusher with corrugated rolls. Based on the results of mathematical modeling for fractional preparation of solid fuel in the sintering shop of the Alchevsk Metallurgical Plant of LLC «SMMC», it is proposed to use an electric motor with a power of 22,0 kW instead of 45,0 kW in the drive of the upper rolls. Under production conditions, using a multifactorial experiment, the adequacy of the proposed analytical dependencies for determining the moment of resistance and the drive power of roller crushers with corrugated rolls was confirmed - the average relative error of the results did not exceed 13,6%. It was found that the main factor influencing the moment of resistance arising on the electric motor shaft during the crushing process is the inter-roll gap formed during the crushing process. Based on the results of experimental studies, it was established that the proposed electric motor 5AM 200 S6 with a rated power of 22,0 kW fully ensures stable operation of the electric drive of the upper rolls of the DCG 900×700 crusher under the conditions of fractional preparation of solid fuel in the agglomeration shop "AMP" of LLC «SMMC».

Keywords: roller crushers, grooved rolls, drive, electric motor, moment of resistance, power, reduction of energy consumption.

REFERENCES

1. Sergo E.E. Crushing, grinding and screening of minerals. [Droblenie, izmel'chenie i groxochenie polezny'x iskopaemy'x]. Moscow: Nedra, 1985. 285 p. (rus)

2. Perov V.A., Andreev S.E., Bilenko L.F. Crushing, grinding and screening of minerals. [Droblenie, izmel'chenie i groxochenie polezny'x iskopaemy'x]. Moscow: Nedra, 1990. 301 p. (rus)

3. Handbook of ore beneficiation. Preparatory processes: textbook for students [Spravochnik po obogashheniyu rud. Podgotovitel'ny'e processy': uchebnik dlya studentov]. Edited by O.S. Bogdanov. Moscow: Nedra, 1998. 366 p. (rus)

4. Andreev S.E., Perov V.A., Zverevich V.V. Crushing, grinding and screening of minerals. [Droblenie, izmel'chenie i groxochenie polezny'x iskopaemy'x]. Moscow: Nedra, 1980. 415 p. (rus)
5. Mikulionok I.O. Classification of Roll Grinders for Lumpy and Bulk Materials (Survey of Patents). Chemical and Petroleum Engineering. 2021. No. 56. Pp. 951–957. DOI: 10.1007/s10556-021-00867-3.
6. Subba Rao D.V. Minerals and Coal Process Calculations. London: Taylor & Francis Group, 2016. 354 p. DOI: 10.1201/9781315225524.
7. Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, Fabrication and Testing of a Double Roll Crusher. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2016. Vol. 35 (No. 11). P. 511–515. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V35P303.
8. Lieberwirth H., Silbermann F., Szczelina P. New insights into double roll crushing. Minerals Engineering. 2023. Vol. 202. 108298. DOI:10.1016/j.mineng.2023.108298.
9. Bogdanov V.S., Fadin Yu.M., Latyshev S.S., Yudin K.A., Gavrilenko A.V., Avdeev Ya.A. Kinetic equation of the grinding process in a horizontal roller mill [Uравnenie kinetiki processa izmel'cheniya v gorizonta'noj valkovoj mel'nice]. Regional scientific and technical conference on the results of the competition of oriented fundamental research on interdisciplinary topics held by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Belgorod Region, Belgorod, April 20–21, 2017. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov, 2017. Pp. 22–30. (rus)
10. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. Crushers. Design, calculation, operating features. [Drobilki. Konstrukciya, raschet, osobennosti e'kspluatatsii]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 320 p. (rus)
11. Lieberwirth H., Hillmann Ph., Hesse M. Dynamics in double roll crushers. Minerals Engineering. 2016. Vol. 103–104. Pp. 60–66. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.08.009. (rus)
12. Johansson M., Evertsson M. A time dynamic model of a high pressure grinding rolls crusher. Minerals Engineering. 2019. Vol. 132. Pp. 27–38. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.008.
13. Gu R., Qin Z., Zhao S., Xing H. Mechanical characteristics of roll crushing of ore materials based on discrete element method. Scientific Reports. 2025. 15. 771. DOI: 10.1038/s41598-024-84734-0.
14. Anticoi H., Guasch E., Hamid S.A., Oliva J., Alfonso P., Bascompta M., Sanmiquel L., Escobet T., Escobet A., Parcerisa D., Peña-Pitarch E., Rosa Argelaguet R., De Felipe J.J. An Improved High-Pressure Roll Crusher Model for Tungsten and Tantalum Ores. Minerals. 2018. Vol. 8. No. 483. DOI: 10.3390/MIN8110483
15. Rashidi S.A., Rajamani R.K., Fuerstenau D.W. Review of the Modeling of High Pressure Grinding Rolls. Powder and Particle Journal. 2017. Vol. 34. Pp. 125–140. DOI: 10.14356/kona.2017017.
16. Varela L.B., Tressia G., Masoumi M., Bortoleto E., Regattieri C., Sinatora A. Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur? Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 122. 105295. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105295.
17. Ivashchuk O.A., Ivashchuk O.D., Fedorov V.I., Shtana A.I. Predicting the Operational Efficiency of High-Pressure Roller Crushers. Russian Engineering Research. 2020. Vol. 40. Pp. 970–972. DOI: 10.3103/S1068798X2011009X.
18. Vlasenko D.A. Justification of Rational Energy-Power Parameters of the Drive of Roll Crushers. Steel in Translation. 2023. Vol. 53. (No. 7). Pp. 640–647. DOI: 10.3103/s0967091223070124.
19. Vlasenko D.A. Development of the theory of crushing processes and the practice of improving roller crushers with smooth and grooved rolls: monograph. [Razvitie teorii processov drobleniya i praktika sovershenstvovaniya valkovy'x drobilok s gladkimi i rifleny'mi valkami: monografiya]. Alchevsk. State Educational Institution of Higher Education of the LPR "DonGTI", 2025. 172 p. (rus)
20. Vlasenko D.A. Modeling and Industrial Development of Grinding Processes in Roller Mills with Corrugated Rolls. Steel in Translation. 2022. Vol. 52. (No. 4). Pp. 445–450. DOI: 10.3103/s0967091222040179.
21. Usolt'sev A.A. Electric drive: a tutorial. [E'lektricheskij privod: uchebnoe posobie]. St. Petersburg: NRU ITMO, 2012. 238 p. (rus)
22. Zubarev D.N. Physical Encyclopedia [Fizicheskaya e'nciklopediya]. Edited by A.M. Prokhorov. Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya, 1990. Vol. 2. 704 p. (rus)
23. Vulfson I. Dynamics of cyclic machines. (Expanded edition of the monograph translation). Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. 2015. 410 p. DOI: 10.1007/978-3-319-12634-0.
24. GOST 5.1261-72 Blast furnace coke from coals of the Donetsk and Kuznetsk basins and charge of the Cherepovets Metallurgical Plant. Quality requirements for certified products. [Koks domenny'j iz uglej Doneczkogo i Kuzneczkogo bassejnov i shixty' Cherepoveczkogo metallurgicheskogo zavoda. Trebovaniya k kachestvu attestovannoj produkcii]. Introduced on 15.02.1972. Moscow: Publishing House of Standards, 1974. 2 p. (rus)

25. Wald A. Sequential analysis. J. Wiley & sons, Incorporated, 1947. 212 p.
26. Kovarsky E.M., Yanko Yu.I. Testing of electrical machines [Ispy'tanie e'lektricheskix mashin]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 319 p. (rus)
27. Belay G.E., Dembovsky V.V., Sotsenko O.V. Organization of metallurgical experiment: textbook. manual for universities. [Organizatsiya metallurgicheskogo e'ksperimenta: ucheb. posob. dlya vuzov]. Edited by V.V. Dembovsky. Moscow: Metallurgy, 1993. 256 p. (rus)
28. TU 4277-076-54981193-15 Vibration measuring device "Quartz 2". Serial production. [Pribor vibroizmeritel'ny'j «Kvarcz 2». Serijny'j vy'pusk]. Put into effect on 21.04.2016. Moscow.: OOO "DI-AMEH 2000", 2016. 136 p. (rus)
29. Brownlee K.A. Statistical Theory and Methodology in Science and Technology [Statisticheskaya teoriya i metodologiya v nauke i tekhnike]. Edited by L.N. Bolshev. Moscow: Nauka, 1977. 407 p. (rus)
30. Kabdin N.E., Storchevoy V.F. Electric Drive: textbook. [E'lektroprivod: uchebnik]. Moscow: MESKh, 2021. 286 p. (rus)

Information about the authors

Vlasenko, Dmitry A. PhD. E-mail: VlsnkDA@yandex.ru. Lipetsk State Technical University. 30 Moskovskaya St., Lipetsk, Russia, 398055.

Received 07.07.2025

Для цитирования:

Власенко Д.А. Особенности математического моделирования и повышение энергоэффективности приводов валковых дробилок с рифлеными валками // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 134–143. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-134-143

For citation:

Vlasenko D.A. Features of mathematical modeling and increasing energy efficiency of drives of roller crushers with corrugated rolls. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 134–143. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-134-143