

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МЕЛЬНИЦАХ

А.И. Афанасьев¹, В.В. Зубов¹, Д.И. Симисин¹, А.А. Чиркова¹

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, e-mail: 7sinov@mail.ru

Аннотация: Процессы измельчения осуществляются различным оборудованием: мельницами, дезинтеграторами, дисмембраторами, истирателями, измельчителями. Основным недостатком оборудования является его относительно низкая эффективность, которая оценивается степенью измельчения, энергоемкостью процесса, износостойкостью рабочего органа. При скоростях удара 30...50 м/с степень дробления горных пород крепостью по Протодяконову $f = 7...11$ не превышает трех. Создана опытно-промышленная центробежная мельница, на которой было произведено дробление различных горных пород. В результате исследований установлено, что необходимая для разрушения скорость куска горной породы определяется величиной эквивалентного диаметра и нелинейно увеличивается с уменьшением его диаметра. Получено уравнение, связывающее удельную энергоемкость разрушения куска горной породы с его эквивалентным диаметром. Установлено, что если дробление свободным ударом происходит в несколько стадий, то скорость куска перед последующим ударом должна определяться с учетом величины максимального куска, образовавшегося после предыдущего удара. Сделан вывод, что степень конструктивного совершенства и эффективность работы центробежных мельниц целесообразно оценивать по отношению индекса Бонда к степени измельчения. Центробежные мельницы, осуществляющие измельчение только свободным ударом, менее эффективны, чем машины, производящие измельчение ударом, истиранием, раздавливанием, сколом.

Ключевые слова: измельчение горных пород, центробежная мельница, дезинтеграторы, измельчители, эквивалентный диаметр куска, степень измельчения, дробимость горных пород, индекс Бонда.

Для цитирования: Афанасьев А. И., Зубов В. В., Симисин Д. И., Чиркова А. А. Измельчение горной породы в центробежных мельницах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 3. – С. 18–29. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_18.

Rock grinding in centrifugal mills

A.I. Afanasyev¹, V.V. Zubov¹, D.I. Simisnov¹, A.A. Chirkova¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: 7sinov@mail.ru

Abstract: Grinding can be done by different equipment: mills, disintegrators, dismembrators, attritors, grinders. The main disbenefit of such machines is low efficiency measured in terms of fineness, energy intake of the process and wear of an active member. At impact velocities of 30–50 m/s, the fineness of rocks with the hardness $f = 7...11$ on Protodyakonov's scale is no more than 3. A pilot centrifugal mill is designed for test grinding of different rocks. The research finds out that the impact velocity required to break a rock particle depends on the equivalent

diameter of the latter and increases nonlinearly as the diameter decreases. An equation is obtained to connect the energy intensity of fracture of a rock particle with its equivalent diameter. If free impact grinding takes a few stages, the particle velocity before the next impact should be determined with regard to the maximal particle size after the previous impact. The conclusion is drawn that it is expedient to assess the structural perfection and performance efficiency of centrifugal mills by the ratio of Bond's work index to fineness. Free-impact centrifugal mills are less effective as compared with the machines that perform grinding by impact, attrition, crushing and shearing.

Key words: rock grinding, centrifugal mill, disintegrators, crushers, equivalent diameter of particle, fineness, rock grindability, Bond's work index.

For citation: Afanasyev A. I., Zubov V. V., Simisinov D. I., Chirkova A. A. Rock grinding in centrifugal mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(3):18-29. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_18.

Введение

В горной промышленности перед обогащением производится измельчение полезного ископаемого до размеров, необходимых для флотации.

Измельчение принято классифицировать по крупности: грубое — до 1... 5 мм; среднее — 0,05... 1,00 мм; тонкое — 0,001... 0,050 мм; сверхтонкое — менее 0,001 мм.

Конструкция машин для измельчения полезных ископаемых определяется способом разрушения: раздавливание; раскалывание; излом; срез; истирание; удар. В измельчительных машинах практически всегда реализуется сочетание нескольких видов разрушения породы. Классификация промышленных мельниц основана на конструктивно-технологических признаках, определяющих взаимодействие мельющих тел с горной породой.

По общепринятой терминологии измельчительное оборудование обогатительных фабрик и лабораторное оборудование для подготовки проб в горнорудной промышленности представлено следующими типами мельниц:

- барабанные (шаровые, стержневые, галечные, рудногалечные, самоизмельчения, полусамоизмельчения);

- среднеходные (шаровые с одно или двухрядным расположением шаров, валковые, роliko-маятниковые);

- вибрационные (подробная классификация приведена в работе [1]);

- центробежные и центробежно-ударные (дезинтеграторы, дисембраторы, шахтные молотковые, бильные, бисерные мельницы);

- струйные (ударного действия, спиральные, противочные).

Объектом данной работы является центробежная мельница, объединяющая ряд указанных устройств, общим признаком которых является принцип разрушения материала под воздействием быстро вращающихся ударных тел разнообразной формы.

В настоящее время имеется достаточно большая номенклатура центробежных мельниц и дезинтеграторов, предназначенных для измельчения горных пород и других материалов [1–4], имеющих широкий диапазон производительности и выдающих готовую продукцию различной крупности от 0,5 до 0,044 мм.

На рис. 1 приведен ротор лабораторного измельчителя диаметром 200 мм. Он имеет два вращающихся навстречу ротора. Первая стадия разрушения ча-

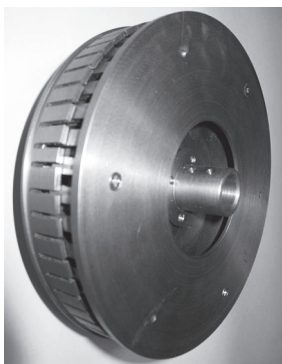


Рис. 1. Ротор измельчителя ИЛЭ-200-50
Fig. 1. Rotor of the ILE-200-50 shredder

стиц происходит свободным ударом, а затем осуществляется их истирание между роторами и в потоке воздуха.

Каждый тип мельниц используется для измельчения определенного вида материала. Некоторые из них имеют практически одинаковые характеристики: крупность помола, крупность питания, производительность, крепость материала по Протодряконову и т.д.

Главным недостатком этих устройств является повышенный износ контактирующих с горной массой рабочих элементов.

Выбор способа разрушения горной породы зависит главным образом от ее дробимости [5 – 7], а также от необходимой крупности [8] дробленого продукта. При относительно небольших скоростях удара центробежные мельницы имеют невысокую степень дробления, которая зависит от размеров кусков, поступающих на дробление. Наши эксперименты свидетельствуют, что при скоростях удара до 50 м/с степень дробления гранитов крепостью по Протодряконову $f = 10 \dots 13$, крупностью 30... 50 мм не превышает трех. Увеличение степени дробления свободным ударом в центробежных мельницах, как правило, достигается повышением скорости удара [9 – 11]. На практике для обеспечения необходимой крупности готового продук-

та в одной мельнице необходимо иметь несколько ступеней измельчения, что влечет за собой существенное усложнение конструкции и рост энергоемкости процесса. В связи с этим повышение эффективности работы за счет совершенствования конструкции центробежной мельницы является актуальной задачей.

У проектировщика возникает проблема выбора марки мельницы. Для этого необходимо определить и сравнить эффективность работы этих устройств.

Методы

Обычно сравнение измельчительных машин осуществляется по производительности, энергопотреблению, показателям готовой продукции (крупности продукта, распределению по классам крупности). Кроме этих показателей сравниваются: массы машин, сложность конструкции, износостойкость рабочих органов (по данным эксплуатации аналогичных машин), стоимость изготовления и эксплуатации. Наиболее «весомыми» являются первые три показателя. Отношение энергии, затраченной на единицу продукции, есть не что иное, как индекс работы по Бонду. Однако для различных материалов при одинаковом значении индекса Бонда степень измельчения может существенно отличаться друг от друга.

В табл. 1 приведены технические характеристики центробежных мельниц.

Данные таблицы показывают, что при одинаковой степени измельчения индекс Бонда для разных центробежных мельниц может иметь существенное различие. Более объективной оценкой эффективности центробежных мельниц, по нашему мнению, будет отношение индекса Бонда к степени измельчения. Из результатов, приведенных в табл. 1, видно, что среди рассмотренных мельниц наиболее эффективными будут такие, которые используют способы разрушения уда-

Таблица 1
 Технические характеристики центробежных мельниц
 Technical characteristics of centrifugal mills

№	Тип мельницы	Производительность, Q , кг/ч	Мощность, N , кВт	Крепость, f	Размер кусков исходного питания, мм	Размер кусков после измельчения, мм	Степень измельчения, i	Индекс Бонда, кВт·ч/т	Эффективность $N \cdot (Q \cdot i)^{-1}$, кВт·ч/т	Способ разрушения
1	Ударник-18	3000	18,5	14–15	1,5 (песок)	0,2	7,5	6,1	0,82	удар + истирание
2	ИЛЭ-200-50	30	2,2	14–15	4	0,1	40	73,3	1,8	истирание
3	DESI-11	10–20	4,1	6	1,5	0,15	10	200–410	20–41	удар
4	ИД-130	8	1,1	10	1,5	0,044	34	137	4	истирание
5	ИД-175	15	2,2	10	2,5	0,1	25	146	5,8	
6	ИД-250	30	4	10	2,5	0,1	25	133	5,3	
7	ИЛА-2	30	1,1	9	4	0,11	36	36,6	1	удар + истирание
8	ИЛА-3	10	2,2	9	3,5	0,1	36	220	5,1	
9	ИНТЕХ-ГмБХ	1000	120	10	10	0,25	40	120	3	
10	Горизонт 380185Z	1000	29,5	8	10	0,1	100	29,5	0,3	
11	МД 4-3	600	7,5	9	50	3–16	3–16	12,5	4,1–0,78	истирание
12	ИД-200	30	2,2	10	2,5	0,1	25	73,3	2,9	
13	Ударник-33	5000	33	14–15	1,5 (песок)	0,2	7,5	6,6	0,88	удар + истирание

ром и истиранием. На рис. 2 приведена зависимость коэффициента эффективности центробежных мельниц от индекса Бонда.

Статистическая зависимость коэффициента эффективности измельчителя от индекса Бонда (I_6 — индекс Бонда, R — корреляционное отношение) имеет вид

$$K_3 = 0,024I_6 + 0,76; R^2 = 0,76. \quad (1)$$

Корреляционное отношение [12, 13] $R^2 = 0,76$ свидетельствует о существенном влиянии индекса Бонда на эффективность работы центробежных мельниц.

Следует отметить, что центробежные мельницы, в которых реализуется только ударное разрушение [2, 14–16], не

могут обеспечить приемлемую степень разрушения.

В работах [9, 10] отмечается, что при постоянной скорости удара степень дробления частицы тем меньше, чем меньше ее диаметр. В частности, частица из карбида бора диаметром 1 мм имеет незначительное разрушение при скорости удара 150 м/с, а частицы диаметром 10 мм при этой же скорости имеют большую степень дробления. Для полного разрушения частицы размером 10 мм при скорости удара 300 м/с необходимо 4 удара, а частицы размером 1 мм — 7 ударов. При этом существенное разрушение частиц диаметром 1 и 10 мм при скорости удара 300 м/с происходит при угле встречи $\theta = 75 \dots 90^\circ$. Следует

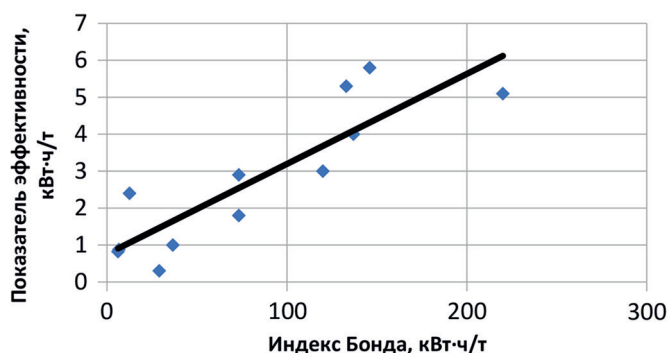


Рис. 2. Зависимость коэффициента эффективности центробежных мельниц от индекса Бонда
 Fig. 2. Dependence of the efficiency coefficient of centrifugal mills on the Bond index

отметить, что частицы карбида бора однородные по структуре и практически не имеют концентраторов напряжений в виде пустот, трещин и т.п., так как изготавливаются методом прессования при давлении до 35 МПа.

В известных работах [6, 17, 18] приведены сведения о неоднозначном влиянии размеров куска (эквивалентный диаметр кусков в опытах изменялся в пределах 15... 60 мм) на напряжение, при котором происходит его разрушение при свободном ударе.

Нами был проведен анализ описанных в работе [6] результатов экспери-

мента по дробимости свободным ударом горных пород:

а) второго класса разрушаемости (трудноразрушаемого диоритового порфирита — показатель дробимости равен 1,86, предел прочности при сжатии 84,5 МПа);

б) пятого класса разрушаемости (легкоразрушаемого песчанистого известняка — показатель дробимости 7,15, предел прочности при сжатии 30,9 МПа).

Эти горные породы по своим характеристикам охватывают относительно большой диапазон материалов, идущих на дробление.

На рис. 3 и 4 приведены зависимости степени дробления от скорости свободного удара песчанистого известняка и диоритового порфирита с различной исходной крупностью.

Статистическая зависимость [12, 13] степени дробления куска от его скорости (v_1 — скорость, R — корреляционное отношение) перед ударом имеет следующий вид:

- ряд 1:

$$i = 0,0008v_1^2 - 0,016v_1 + 1,7; \quad (2)$$

$$R^2 = 0,98,$$

- ряд 2:

$$i = 0,0004v_1^2 - 0,0048v_1 + 1,14; \quad (3)$$

$$R^2 = 0,99.$$

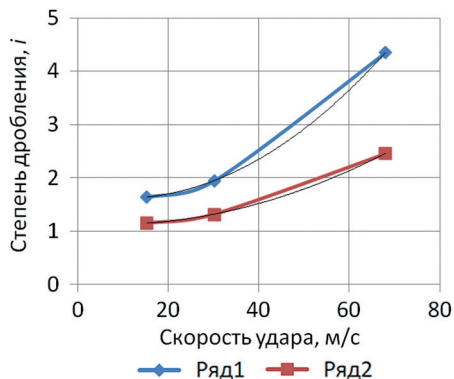


Рис. 3. Зависимость степени дробления песчанистого известняка (ряд 1) и диоритового порфирита (ряд 2) с исходной крупностью +50–60 мм

Fig. 3. Dependence of the degree of crushing of sandy limestone (row 1) and diorite porphyrite (row 2) with an initial size of +50–60 mm

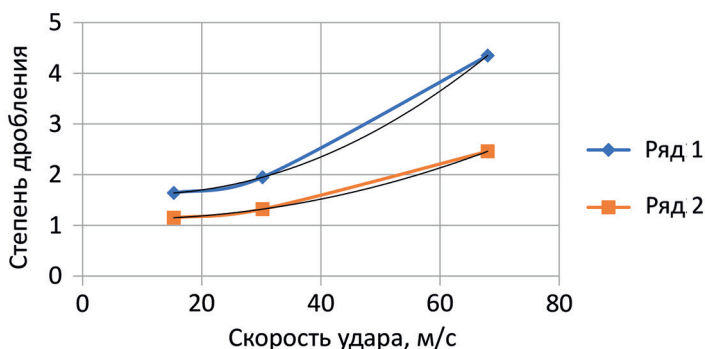


Рис. 4. Зависимость степени дробления песчанистого известняка (ряд 1) и диоритового порфирита (ряд 2) с исходной крупностью +15–20 мм

Fig. 4. Dependence of the degree of crushing of sandy limestone (row 1) and diorite porphyrite (row 2) with an initial size of +15–20 mm

Статистическая зависимость степени дробления куска от его скорости перед ударом имеет вид:

- ряд 1:

$$i = 0,0006v_1^2 - 0,0019v_1 + 1,15; \quad (4)$$

$$R^2 = 0,98,$$

- ряд 2:

$$i = 0,0001v_1^2 - 0,0029v_1 + 1,11; \quad (5)$$

$$R^2 = 0,99.$$

Относительно большие значения корреляционных отношений ($R^2 \approx 1$) уравнений (2... 5) свидетельствует о наличии существенной связи степени дробления и скорости куска перед ударом, причем при постоянной скорости степень дробления зависит от размеров куска. Для труднодробимого диоритового порфирита увеличение крупности с 20 мм до 60 мм приводит к увеличению степени дробления в 1,65 раза, а для легкодробимого песчанистого известняка — в 1,25 раза. Для труднодробимых горных пород скорость кусков с эквивалентным диаметром меньше 20 мм должна быть больше 100 м/с, в противном случае степень дробления будет меньше двух, что свидетельствует о низкой эффективности дезинтегратора.

Также нами были проведены экспериментальные исследования дробимости

серого гранита (г. Первоуральск, Урал) с целью определения рациональных режимов работы центробежной мельницы для получения максимального выхода кубовидного щебня. Дробление серого гранита, относящегося к труднодробимым породам, показало, что при крупности –32 мм, скорости удара, изменяющейся от 20 до 40 м/с, степень дробления изменяется от 1,2 до 1,5. При уменьшении крупности исходного питания степень дробления снижается.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ данных, полученных по результатам экспериментальных исследований дробимости различных образцов горных пород в центробежных мельницах (см. графики на рис. 3 и 4) позволяет сделать следующие выводы:

1. Для труднодробимых горных пород (к которым относится диоритовый порфирит) для достижения степени дробления 10 и более необходимо в измельчителе иметь несколько стадий разрушения. При этом куски каждой последующей стадии разрушения должны иметь значительно большую скорость, чем в предыдущей.

2. Для легкодробимых горных пород (к которым относится песчанистый из-

вестняк) для достижения степени дробления 10 и более также необходимо в измельчителе иметь несколько стадий разрушения.

Эти выводы подтверждаются результатами эксперимента, полученными при дроблении свободным ударом медно-цинковой руды. Нами выявлена зависимость минимально необходимой для разрушения скорости (V_1) куска перед ударом от его эквивалентного диаметра (d):

$$V_1 = ad^b \quad (6)$$

где a и b – постоянные коэффициенты, определяемые опытным путем. Для медно-цинковой руды крупностью от +10 – 60 мм коэффициенты равны: $a = 140$, $b = -0,37$.

Относительно большое корреляционное отношение $R^2 = 0,93$ [16] свидетельствует о наличии связи скорости куска перед ударом с его размерами.

Степень дробления медноцинковой руды однократным свободным ударом достигала 3,8. Если исходное питание измельчителя будет –10 мм, то, согласно уравнению (6), скорость удара во второй стадии разрушения должна быть больше в 1,6 раза, а в третьей – в 2,5 раза. При этом должен быть обеспечен угол встречи « θ », близкий к 90°. С технической точки зрения выполнить на существующих дезинтеграторах эти условия практически невозможно. Например, в дезинтеграторе [3] удар по частицам горной породы происходит цилиндрическими пальцами, соседние ряды которых расположены с небольшим зазором, а вероятность центрального удара $\theta = 90^\circ$ маловероятна. При угле встречи с рабочим органом меньше $\pi/4$ («косой» удар) дробление куска не происходит [9, 10].

Результаты наших экспериментов имеют хорошее совпадение с результатами, описанными в работах [19 – 22].

Используя данные, приведенные в [6, 9], а также результаты наших исследова-

ний, нами была разработана имитационная модель, содержащая эквивалентный диаметр кусков (d), удельную энергию кусков (E_y) и степень дробления (i). Для упрощения обработки экспериментальных данных в матрице имитационной модели выбираем масштабы по осям независимых переменных (эквивалентный диаметр куска $d = X_1$; удельная энергия куска $E_y = X_2$) таким образом, чтобы верхний уровень соответствовал +1, нижний – (–1), а основной – 0. Кодирование факторов осуществляется по формуле [16]

$$E = \frac{E_H - E_{Ho}}{\Delta E_H}, \quad (7)$$

где x – кодированное значение факторов; x_H – натуральное значение фактора; x_{Ho} – основной уровень (натуральный); Δx_H – интервал варьирования.

$$d = X_1; X_1 = +1d = 55 \text{ мм};$$

$$X_1 = -1d = 17,5 \text{ мм};$$

$$D_{X_1} = 18,75 \text{ мм}; X_{10} = 36,25 \text{ мм}.$$

$$E_y = X_2; X_2 = +1E_y = 2300 \text{ Дж/кг};$$

$$X_2 = -1E_y = 450 \text{ Дж/кг};$$

$$D_{X_2} = 925 \text{ Дж/кг}; X_{20} = 1375 \text{ Дж/кг}.$$

В табл. 2 приведена матрица и результаты экспериментов по дроблению горной породы VI класса дробимости.

В результате статистической обработки экспериментальных данных, приведенных в табл. 2, получены следующие коэффициенты модели:

$$a_0 = 5,25; a_1 = 0,65; a_2 = 1,8; a_{12} = 0,4.$$

$$(i_p = 5,25 + 0,65X_1 + 1,8X_2 + 0,4X_1X_2)$$

Математическая модель в натуральных единицах имеет следующий вид:

$$i_p = 5,25 + 0,035(d - 36,25) + 0,00195(E_y - 1375) +$$

$$+ 2,85 \cdot 10^{-5}(d - 36,25)(E_y - 1375) \quad (8)$$

Эти уравнения справедливы для крупности исходного питания до 7,5... 55 мм и удельной энергии более 300 Дж/кг.

Для проверки адекватности методики расчета реальному процессу было произведено несколько дроблений горных пород. Для этого в Уральском государственном горном университете была спроектирована и изготовлена центробежная мельница с вертикально расположенной осью вращения ротора.

Центробежная мельница содержит раму, на которой закреплен двигатель постоянного тока П-22, имеющий мощность 16 кВт при 2800 об/мин. Двигатель имеет последовательную и шунтовую обмотки возбуждения и, соответственно, относительно жесткую характеристику. Скорость вращения якоря прямо пропорциональна напряжению в якорной цепи.

Наружный диаметр ротора равен 0,5 м, число разгонных стоек равно 4, а их высота 150 мм, что позволяет дробить куски горной породы размером до 60 мм. Передача вращения от вала двигателя ротору осуществлялась посредством клиноремной передачи, имеющей передаточное число, равное 0,7 (большой шкив диаметром 235 мм был установлен на валу двигателя, меньший диаметром 165 мм) — на валу ротора. Такая конструкция трансмиссии позволяла получить на валу ротора угловую скорость вращения, равную 4000 об/мин.

Перед проведением экспериментов была определена зависимость скорости вращения ротора от напряжения в якорной цепи. Для этого использовалось стандартное измерительное оборудование.

Зависимость скорости вращения ротора от напряжения в якорной цепи
Dependence of the rotor rotation speed on the voltage in the anchor circuit

Напряжение в якорной цепи, В	30	53	60	70	150	166	220
Скорость вращения вала ротора, об/мин	545	960	1090	1270	2720	3020	4000
Окружная скорость ротора, м/с	20	30	35	40	79	79	104

Таблица 2

Матрица и результаты экспериментов
Matrix and experimental results

№	X_1	X_2	i	i_p (расчетное)
1	-1	-1	3,2	3,2
2	+1	-1	3,7	3,7
3	-1	+1	6	6
4	+1	+1	8,1	8,1
Σ	0	0	21,0	21,0

ние: электронный тахометр, вольтметр, а также регулируемый источник питания — автотрансформатор мощностью 40 кВт и выпрямительный мост, выполненный из диодов В-250-10. Результаты тарировки приведены в табл. 3.

Модуль скорости удара об отражательную броню (V) определялся как сумма окружной скорости (V_0) и радиальной скорости (V_r) по формуле

$$V = (V_0^2 + V_r^2)^{0,5}, \quad (9)$$

где V_r — радиальная скорость движения куска горной породы в момент его схода с разгонной стойки (лопасти); V_0 — окружная скорость движения куска горной породы в момент его схода с разгонной стойки (лопасти).

Радиальная (V_r) скорость движения куска при «сходе» его с разгонной плоскости

$$V_r = C_1 k_1 \exp(k_1 t_c) + C_2 k_2 \exp(k_2 t_c), \quad (10)$$

где C_1, C_2 — постоянные интегрирования, определяются начальными условиями; k_1, k_2 — корни характеристического уравнения; t_c — время движения куска горной породы по разгонной плоскости.

Время движения куска горной породы по плоскости при разгоне находится из уравнения

$$t_c = \left\{ 2 \left[r_{12} + k_2 r_{11} (k_1 - k_2)^{-1} - k_1 r_{11} (k_1 - k_2)^{-1} \right] (C_1 k_1^2 + C_2 k_2^2)^{-1} \right\}^{0,5} \quad (11)$$

где r_{12} — наружный радиус разгонной лопасти.

Окружная скорость движения куска при сходе его с разгонной плоскости находится из уравнения

$$V_0 = r_{12} \omega, \quad (12)$$

где ω — угловая скорость вращения ротора, рад/с.

$$V_2 = \left((r_{12} \omega)^2 + V_r^2 \right)^{0,5}. \quad (13)$$

Корни характеристического уравнения и постоянные интегрирования находятся из уравнений

$$k_{1,2} = \omega \left[-f \pm (1 + f^2)^{0,5} \right], \quad (14)$$

где f — коэффициент трения куска горной породы о лопасть;

$$C_1 = -k_2 r_{11} (k_1 - k_2)^{-1}, \quad (15)$$

где r_{11} — внутренний радиус разгонной лопасти, м;

$$C_2 = k_1 r_{11} (k_1 - k_2)^{-1}. \quad (16)$$

Окружная скорость схода кусков горной породы регулировалась путем изменения частоты вращения якоря двигателя постоянного тока. В частности, было произведено дробление известняка и получены следующие результаты.

1. Расчетные значения:

$$\begin{aligned} r_{12} &= 0,25 \text{ м}; r_{11} = 0,1 \text{ м}; \\ V_1 &= r_{12} \omega = 85 \text{ м/с}; i_{\text{расч}} = 29,0; \\ V_2 &= 174,7 \text{ м/с}; \alpha = 61,9^\circ. \end{aligned} \quad (17)$$

2. Экспериментальное значение степени дробления: $i_{\text{сп}} = 27,2$.

Относительное расхождение результатов расчета и эксперимента равно $\varepsilon_1 = 6,6\%$.

3. Расчетные значения:

$$\begin{aligned} r_{12} &= 0,25 \text{ м}; r_{11} = 0,1 \text{ м}; \\ V_1 &= r_{12} \omega = 71 \text{ м/с}; i_{\text{расч}} = 21,2; \\ V_2 &= 146,1 \text{ м/с}; \alpha = 61,7^\circ. \end{aligned} \quad (18)$$

4. Экспериментальное значение степени дробления: $i_{\text{сп}} = 21,8$.

Относительное расхождение результатов расчета и эксперимента равно $\varepsilon_1 = 3,3\%$.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования дробимости горных пород позволяют сделать следующие выводы.

1. Степень конструктивного совершенства и эффективность работы центробежных мельниц целесообразно оценивать по отношению индекса Бонда к степени измельчения.

2. При определении степени измельчения горной массы следует учитывать радиальную скорость кусков при их сходе с разгонной стойки.

3. Центробежные мельницы, осуществляющие измельчение только свободным ударом, менее эффективны, чем машины, производящие измельчение ударом, истиранием, раздавливанием, сколом.


4. Разработана математическая модель процесса дробления горной породы свободным ударом, связывающая степень дробления с эквивалентным диаметром куска исходного питания и его удельной энергией перед ударом.

5. Математическая модель процесса дробления горной породы свободным ударом позволяет определить рациональное соотношение конструктивных и режимных параметров, что обеспечивает повышение эффективности работы мельниц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулова С. Р. Вибрационные мельницы: аспекты классификации // Вестник ИргТУ. — 2015. — № 3 (98). — С. 30–34.
2. Матвеев А. И., Винокуров В. Р. Разработка конструкции нового измельчителя горных пород комбинированного действия // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2020. — Т. 25. — № 3. — С. 63–73. DOI: 10.31242/2618-9712-2020-25-3-6.
3. Савиных П. А., Исупов А. Ю., Иванов И. И. Определение основных кинематических показателей движения частицы в канале распределительной чаши центробежно-роторного измельчителя // Вестник НГИЭИ. — 2020. — № 7(110). — С. 37–46.
4. Батыров В. И., Алхудов Т. М. Обоснование основных конструктивных и технологических параметров двухвалкового роторного измельчителя // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета. — 2022. — № 4 (38). — С. 87–97. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-87-97.
5. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Kuznetsov V. Justification for criteria for evaluating activation and destruction processes of complex ores // Minerals. 2023, vol. 13, no. 5, article 684. DOI: 10.3390/min13050684.
6. Барон Л. И., Хмельковский И. Е. Разрушаемость горных пород свободным ударом. — М.: Наука, 1971. — 203 с.
7. Голованов А. В., Габов В. В., Сапожников А. И. Обоснование энергосберегающих технологий дезинтеграции горных пород // Горный журнал. — 2012. — № 11. — С. 11–14.
8. Андреев С. Е. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. — М.: Металлургиздат, 1959. — 437 с.
9. Belov N. N., Plyaskin A. S., Klopotov A. A., Yugov A. A., Bunkov V. E., Potekaev A. I., Yugov N. T., Useinov E. S. Deformation and fracture of sandwich concrete structures reinforced with carbon fiber under shock-wave loading // Russian Physics Journal. 2022, vol. 64, no. 10, pp. 1977–1983. DOI: 10.1007/s11182-022-02530-7.
10. Белов Н. Н., Бирюков Ю. А., Росляк А. Т., Югов Н. Т., Афанасьева С. А. Процессы ударного взаимодействия частиц керамических материалов при измельчении в пневмоциркуляционном аппарате // Теоретические основы химической технологии. — 2005. — Т. 39. — № 3. — С. 327–333.
11. Горлов И. В., Митусов П. Е., Беляев А. М. Анализ процесса измельчения слабых горных пород // Уголь. — 2022. — № 6 (1155). — С. 44–47. DOI: 0.18796/0041-5790-2022-6-44-47.
12. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. — М.: Наука, 1971. — 176 с.
13. Petrov V., Kuznetsov N., Morozov I. Experimental studies of energy technology indicators during ore crushing at a processing plant / 2020 IEEE International Conference on Advent Trends in Multidisciplinary Research and Innovation (ICATMRI). IEEE, 2020, pp. 1–4.
14. Adewuyi S. O., Ahmed H., Ahmed H. M. A. Methods of ore pretreatment for comminution energy reduction // Minerals. 2020, vol. 10, no. 423, pp. 1–23. DOI: 10.3390/min10050423.
15. Zubov V. V., Simisinov D. I., Akhlyustina N. V., Khazin M. L., Davydov S. Ya. Determination of the parameters of a counterblow grinder // Refractories and Industrial Ceramics. 2018, vol. 58, no. 5, pp. 521–524. DOI: 10.1007/s11148-018-0136-1.
16. Yusupov T. S., Baksheeva I. I., Rostovtsev V. I. Analysis of different-type mechanical effects on selectivity of mineral dissociation // Journal of Mining Science. 2015, vol. 51, no. 6, pp. 1248–1253. DOI: 10.1134/s1062739115060552.
17. Барон Л. И., Коняшин Ю. Г., Курбатов В. М. Дробимость горных пород. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 348 с.
18. Винокуров В. Р., Матвеев А. И. Разработка методики расчета рабочих параметров работы центробежных аппаратов измельчения многократного динамического воздействия // Наука и образование. — 2012. — № 1. — С. 32–34.
19. Матвеев А. И., Винокуров В. Р., Львов Е. С. Развитие метода разрушения «свободным» ударом при реализации способа многократного динамического воздействия для процессов рудоподготовки / Материалы XI Конгресса обогатителей стран СНГ. — М., 2017. — С. 376–379.
20. Purhamadani E., Bagherpour R., Tudeshki H. Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems // Journal of Cleaner Production. 2021, vol. 291, article 125228. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125228.

21. Wegener K., Bleicher F., Krajnik P., Hoffmeister H.-W., Brecher C. Recent developments in grinding machines // CIRP Annals. 2017, vol. 66, no. 2, pp. 779–802. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.006.

22. Rodriguez J., Pontt J., Newman P., Musalem R., Miranda H., Morán L., Alzamora G. Technical evaluation and practical experience of high-power grinding mill drives in mining applications // IEEE transactions on industry applications. 2005, vol. 41, no. 3, pp. 866–874. DOI: 10.1109/TIA.2005.847321. 

REFERENCES

1. Abdulova S. R. Vibrating mills: aspects of classification. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015, no. 3 (98), pp. 30–34. [In Russ].

2. Matveev A. I., Vinokurov V. R. Design development of a new combined-action rock shredder. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020, vol. 25, no. 3, pp. 63–73. [In Russ]. DOI: 10.31242/2618-9712-2020-25-3-6.

3. Savinykh P. A., Isupov A. Yu., Ivanov I. I. Determination of the main kinematic parameters of particle motion in the channel of the distribution bowl of a centrifugal rotary shredder. *Bulletin NGIEI*. 2020, no. 7(110), pp. 37–46. [In Russ].

4. Batyrov V. I., Apkhudov T. M. Substantiation of the main design and technological parameters of a two-roll rotary shredder. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian state agrarian university named after V.M. Kokov*. 2022, no. 4 (38), pp. 87–97. [In Russ]. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-87-97.

5. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Kuznetsov V. Justification for criteria for evaluating activation and destruction processes of complex ores. *Minerals*. 2023, vol. 13, no. 5, article 684. DOI: 10.3390/min13050684.

6. Baron L. I., Khmel'kovskiy I. E. *Razrushaemost' gornyx porod svobodnym udarom* [Destructibility of rocks by free impact], Moscow, Nauka, 1971, 203 p.

7. Golovanov A. V., Gabov V. V., Sapozhnikov A. I. Justification of energy-saving technologies of rock disintegration. *Gornyi Zhurnal*. 2012, no. 11, pp. 11–14. [In Russ].

8. Andreev S. E. *Zakonomernosti izmel'cheniya i ischisleniya kharakteristik granulometricheskogo sostava* [Regularities of grinding and calculation of characteristics of granulometric composition], Moscow, Metallurgizdat, 1959, 437 p.

9. Belov N. N., Plyaskin A. S., Klopotov A. A., Yugov A. A., Bunkov V. E., Potekaev A. I., Yugov N. T., Useinov E. S. Deformation and fracture of sandwich concrete structures reinforced with carbon fiber under shock-wave loading. *Russian Physics Journal*. 2022, vol. 64, no. 10, pp. 1977–1983. DOI: 10.1007/s11182-022-02530-7.

10. Belov N. N., Biryukov Yu. A., Roslyak A. T., Yugov N. T., Afanasyeva S. A. Processes of impact interaction of particles of ceramic materials during grinding in a pneumatic circulation device. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2005, vol. 39, no. 3, pp. 327–333. [In Russ].

11. Gorlov I. V., Mitusov P. E., Belyaev A. M. Analysis of the grinding process of weak rocks. *Ugol'*. 2022, no. 6 (1155), pp. 44–47. [In Russ]. DOI: 0.18796/0041-5790-2022-6-44-47.

12. Rumshinskiy L. Z. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [Mathematical processing of experimental results], Moscow, Nauka, 1971, 176 p.

13. Petrov V., Kuznetsov N., Morozov I. Experimental studies of energy technology indicators during ore crushing at a processing plant. *2020 IEEE International Conference on Advent Trends in Multi-disciplinary Research and Innovation (ICATMRI)*. IEEE, 2020, pp. 1–4.

14. Adewuyi S. O., Ahmed H., Ahmed H. M. A. Methods of ore pretreatment for comminution energy reduction. *Minerals*. 2020, vol. 10, no. 423, pp. 1–23. DOI: 10.3390/min10050423.

15. Zubov V. V., Simisinov D. I., Akhlyustina N. V., Khazin M. L., Davydov S. Ya. Determination of the parameters of a counterblow grinder. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018, vol. 58, no. 5, pp. 521–524. DOI: 10.1007/s11148-018-0136-1.

16. Yusupov T. S., Baksheeva I. I., Rostovtsev V. I. Analysis of different-type mechanical effects on selectivity of mineral dissociation. *Journal of Mining Science*. 2015, vol. 51, no. 6, pp. 1248–1253. DOI: 10.1134/s1062739115060552.

17. Baron L. I., Konyashin Yu. G., Kurbatov V. M. *Drobimost' gornyx porod* [Rock crushing], Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1963, 348 p.

18. Vinokurov V. R., Matveev A. I. Development of a methodology for calculating the operating parameters of centrifugal crushing devices of multiple dynamic action. *The Education and Science Journal*. 2012, no. 1, pp. 32 – 34. [In Russ].

19. Matveev A. I., Vinokurov V. R., Lvov E. S. Development of the method of destruction by «free» impact in the implementation of the method of multiple dynamic impact for ore preparation processes. *Materialy XI Kongressa obogatiteley stran SNG* [Materials of the XI Congress of Enrichers of the CIS countries], Moscow, 2017, pp. 376 – 379. [In Russ].

20. Purhamadani E., Bagherpour R., Tudeszki H. Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems. *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 291, article 125228. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125228.

21. Wegener K., Bleicher F., Krajnik P., Hoffmeister H.-W., Brecher C. Recent developments in grinding machines. *CIRP Annals*. 2017, vol. 66, no. 2, pp. 779 – 802. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.006.

22. Rodriguez J., Pontt J., Newman P., Musalem R., Miranda H., Morán L., Alzamora G. Technical evaluation and practical experience of high-power grinding mill drives in mining applications. *IEEE transactions on industry applications*. 2005, vol. 41, no. 3, pp. 866 – 874. DOI: 10.1109/TIA.2005.847321.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Афанасьев Анатолий Ильич*¹ – докт. техн. наук, профессор, профессор, e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7869-9208,

*Зубов Владимир Владимирович*¹ – канд. техн. наук,

доцент, доцент, e-mail: v.zubov.r66@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0659-9870,

*Симисинов Денис Иванович*¹ – докт. техн. наук,

доцент, зав. кафедрой, e-mail: 7sinov@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6095-0073,

*Чиркова Алена Анатольевна*¹ – канд. техн. наук,

доцент, доцент, e-mail: alena.chirkova@m.ursmu.ru,

¹ Уральский государственный горный университет.

Для контактов: Симисинов Д.И., e-mail: 7sinov@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A.I. Afanasyev*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Professor, e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7869-9208,

*V.V. Zubov*¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, Assistant Professor,

e-mail: v.zubov.r66@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0659-9870,

*D.I. Simisnov*¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Head of Chair, e-mail: 7sinov@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6095-0073,

*A.A. Chirkova*¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, Assistant Professor,

e-mail: alena.chirkova@m.ursmu.ru,

¹ Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: D.I. Simisnov, e-mail: 7sinov@mail.ru.

Получена редакцией 13.11.2024; получена после рецензии 16.12.2024; принята к печати 10.02.2025.

Received by the editors 13.11.2024; received after the review 16.12.2024; accepted for printing 10.02.2025.