УДК 621.86:531.8 DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-27-35

Критерий эффективности рабочего процесса роторной центробежной дробилки

Зубов В. В.[1]
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: v.zubov.r66@yandex.ru

Реферат

Введение. *Приводятся результаты оценки эффективности применения дробилок (мельниц), работающих по принципу свободного удара. Эффективность дробилок на стадии проектирования определяется по степени дробления и затратам энергии на единицу готовой продукции, так как применить другие критерии до изготовления опытного образца затруднительно. Поскольку разрушение кусков происходит свободным ударом, то энергия, требуемая для разрушения горной породы, не может быть больше кинетической энергии кусков в момент их схода с разгонной лопасти.*

Цель исследования *– на основе теории подобия определить критерий эффективности рабочего процесса.*

Методы исследований *– математическое моделирование, экспериментальные исследования на физической модели и полупромышленной установке, регрессионный анализ.*

Порядок проведения исследования. *Степень дробления куска горной породы свободным ударом зависит от величины эквивалентного диаметра и скорости удара, т. е. затрат энергии, а также от плотности горной породы и прочностных свойств дробимого материала, она возрастает с увеличением эквивалентного диаметра и удельных затрат энергии. Поэтому в качестве независимых переменных взяты эквивалентный диаметр, удельная энергия куска и предельное напряжение, при котором происходит разрушение. Получено критериальное уравнение, связывающее удельную энергоемкость разрушения куска горной породы с его эквивалентным диаметром, плотностью и степенью дробления.*

В результате исследований *установлено, что с уменьшением размеров куска для его разрушения необходимо существенно увеличивать его скорость. Следовательно, это требует повышения скорости удара на каждой последующей стадии разрушения. 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.*

Выводы. *Имея критериальное уравнение процесса дробления, возможно выбрать рациональные конструктивные и режимные параметры дробилки.*

Ключевые слова: *горная порода; размеры кусков; масса кусков; скорость движения кусков; удельный расход энергии; степень дробления; плотность породы; критерий подобия.*

Введение. Дробление и измельчение – головные операции в процессе подготовки полезного ископаемого к обогащению. Существующие способы разрушения: раздавливание, скол, раскалывание, излом, срез, истирание и удар – определяют конструктивное исполнение машины. Выбор способа разрушения горной породы зависит, главным образом, от ее дробимости [1], необходимой крупности [2, 3] и физико-механических свойств. Изучением закономерностей разрушения горных пород занимались многие видные ученые [4–7], в частности, исследова-

лось потребление энергии. Установлено, что разрушение свободным ударом имеет значительное преимущество перед другими способами – существенно меньшую энергоемкость. При этом на горно-обогатительном производстве процессы дробления и измельчения являются самыми энергоемкими, затраты энергии на эти процессы составляют до 50 % всех затрат по переработке руд [8, 9].

Современные центробежные дробилки (измельчители) часто характеризуются малой эффективностью, которая определяется, главным образом, степенью измельчения. Одна из причин низкой эффективности – недостаточная изученность рабочего процесса разрушения свободным ударом, и, как следствие, неполная адекватность методов проектирования центробежных дробилок. Режимные и конструктивные параметры дробилок до настоящего времени определяются эмпирически по принципу подобия, что приводит к отклонениям степени дробления и производительности от заданных значений.

Актуальность. В связи с этим теоретические и экспериментальные исследования центробежных дробилок, позволяющие повысить их эффективность, являются актуальными.

Таблица 1. Параметры процесса разрушения медно-цинковой руды
Table 1. Parameters of the copper-zinc ore crushing process

Масса кусков до дробления m, г	Степень дробления i	Удельная энергия разрушения $E_у/m$, кДж/кг	Относительная энергия разрушения $E_{ор}$, кДж/кг
47	2,96	1,670	0,55
74	3,60	1,400	0,39
126	3,80	1,100	0,29
223	3,10	0,775	0,25
500	1,87	0,410	0,22

Методика проведения исследований. Сравнение эффективности дробящих (измельчающих) устройств обычно выполняется по следующим критериям: степень дробления; затраты энергии на единицу готовой продукции; производительность; универсальность; массогабаритные показатели; надежность и ремонтопригодность; затраты на приобретение и эксплуатацию. В этом исследовании эффективность дробилок на стадии проектирования оценивается по степени дробления и затратам энергии на единицу готовой продукции, так как другие критерии применить до изготовления опытного образца затруднительно.

Эксперименты на опытно-промышленной центробежной дробилке осуществлялись с различными горными породами; в каждой точке эксперимента проводилось несколько опытов. Количество опытов определялось в зависимости от разброса полученных результатов.

В табл. 1 приведены средневзвешенные массы кусков медно-цинковой руды m, г; удельная энергия удара $E_у = E_0/m$, кДж, E_0 – кинетическая энергия куска перед ударом, и степень дробления i и относительная энергия разрушения $E_{ор}$, кДж/кг, в процессе ее разрушения.

Относительная энергия разрушения кусков медно-цинковой руды определялась по формуле:

$$E_{ор} = \frac{E_0}{im}. \quad (1)$$

На рис. 1 приведен график зависимости относительной энергии разрушения кусков медно-цинковой руды от их массы.

Статистическая зависимость относительной энергии разрушения кусков медно-цинковой руды от их массы имеет вид:

$$E_{\text{ор}} = 2{,}05m^{-0{,}377}. \quad (2)$$

Корреляционное отношение $R^2 = 0{,}90$ свидетельствует о наличии существенной связи массы куска с относительной энергией разрушения.

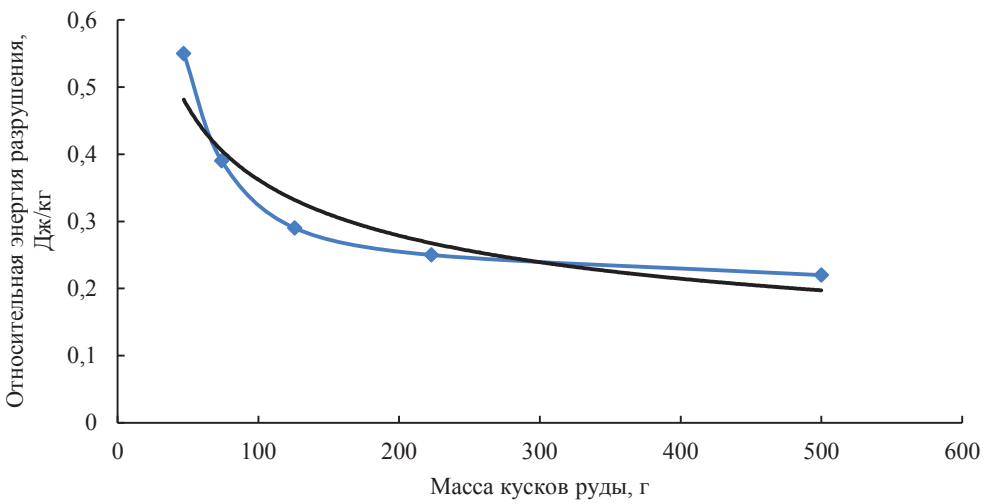

Рисунок 1. График зависимости относительной энергии разрушения кусков медно-цинковой руды от их массы
Figure 1. A dependency graph of the relative energy of copper-zinc ore particles crushing and its mass

Данные табл. 1 показывают, что характеризовать эффективность процесса разрушения по одному показателю (отношение энергии разрушения к массе куска или степени дробления) не вполне корректно. В третьей строке таблицы степень дробления больше, чем в первой и второй, а удельная энергия разрушения меньше. Во второй строке степень дробления в 1,2 раза больше, чем в первой, а удельная энергия разрушения в 1,3 раза меньше. Практика дробления показывает, что чем больше степень дробления, тем больше удельные затраты энергии [10–12]. В связи с этим мы предлагаем оценивать эффективность процесса дробления отношением удельной энергии разрушения к степени дробления, т. е. относительной энергии разрушения. Чем больше относительная энергия разрушения, тем меньше эффективность рабочего процесса и несовершеннее конструктивное исполнение центробежной дробилки. Уравнение (2) хорошо согласуется с данными работ [10, 13, 14].

Для изучения влияния относительной энергии разрушения на степень дробления проведена статистическая обработка данных, приведенных в [1] (отмечены звездочкой в табл. 2). Порода – песчанистый известняк; класс породы по дробимости – четвертый; показатель дробимости $V = 5{,}4$ см^3; предел прочности на сжатие $\sigma_{\text{сж}} = 92$ МПа; плотность кусков горной породы $\rho = 2{,}75$ т/м^3.

На рис. 2 приведены графики зависимости степени дробления песчанистого известняка от удельной энергии.

Статистическая зависимость [15, 16] степени дробления куска от удельной энергии ($E_у = E_0/m$), затраченной на разрушение, имеет вид:

$$\text{Ряд 1} : i = 0{,}0008E_у + 1{,}39R^2 = 0{,}97; \quad (3)$$

$$\text{Ряд 2} : i = 0{,}0011E_у + 1{,}41R^2 = 0{,}99; \quad (4)$$

$$\text{Ряд 3} : i = 0{,}0017E_у + 1{,}62R^2 = 0{,}95; \quad (5)$$

$$\text{Ряд 4} : i = 0{,}0024E_у + 1{,}96R^2 = 0{,}99. \quad (6)$$

Уравнения (3)–(6) адекватно описывают процесс дробления горной породы четвертого класса дробимости при изменении эквивалентного диаметра кусков от 7 до 50 мм и скорости удара от 25 до 65 м/с.

Таблица 2. Результаты разрушения песчанистого известняка
Table 2. Results of sandy limestone crushing

Удельная энергия E_0/m, Дж/кг	Средневзвешенный диаметр куска, мм		Степень дробления i
	до дробления $d_{исх}$	после дробления d	
297	7,5	4,7	1,6
	12,5	7,3	1,7
	25,0	12,5	2,0
	45,0	19,6	2,3
1166	7,5	3,6	2,5
	12,5	4,4	2,8
	25,0	6,0	3,9
	45,0	9,4	4,7
1752	7,5	2,7	2,8
	12,5	3,8	3,3
	25,0	5,7	4,4
	45,0	7,8	5,8

Относительно большие значения корреляционных отношений $R \approx 1$ уравнений (3)–(6) свидетельствует о наличии значимой связи степени дробления и удельной энергии. Для песчанистого известняка средней разрушаемости увеличение крупности с 7,5 до 45 мм при постоянной удельной энергии приводит к увеличению степени дробления практически в 2 раза.

Результаты исследований и их обсуждение. Из графиков, приведенных на рис. 2, можно сделать вывод: если на первую стадию дробления поступит материал крупностью 45 мм, то при скорости удара 59,2 м/с степень дробления будет равна 5,8. Следовательно, средняя крупность материала после дробления будет равна 7,7 мм. Согласно рис. 2 (ряд 1) степень дробления материала крупностью 7,5 мм при скорости удара 59,2 м/с будет равна 2,8, т. е. уменьшится в 2 раза.

В координатном поле (рис. 2) проведем линию (ряд 1) до пересечения с горизонтальной линией, соответствующей степени дробления, равной 3. Удельная энергия разрушения куска материала размером 7,5 мм будет примерно равна

2000 Дж/кг. Удельная энергия разрушения куска с размером 45 мм (ряд 4) при такой же степени дробления будет равна 600 Дж/кг. Таким образом, при уменьшении средних размеров кусков в 6 раз удельная энергия их разрушения до одинаковой степени дробления возрастает в 3,3 раза, что эквивалентно увеличению скорости удара в 1,8 раз. Это накладывает определенные ограничения на конструктивные параметры центробежных дробилок многократного силового воздействия [17].

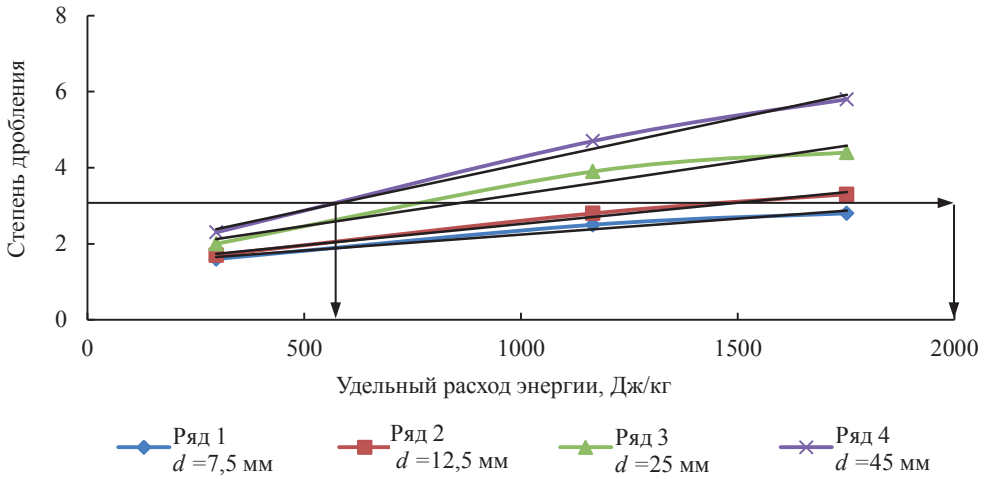

Рисунок 2. Зависимость степени дробления песчанистого известняка от удельной энергии (E_0/m)
Figure 2. Dependence of the sandy limestone reduction ratio on the specific energy (E_0/m)

Напряжения σ в куске при свободном ударе зависят [18–20] от модуля упругости E, плотности материала ρ, массы m, ее скорости v в момент удара, размеров куска d. При прямом центральном ударе скорость определяется частотой вращения и диаметром окружности, которую описывают концы лопастей. Угловая скорость вращения и диаметр являются основными параметрами центробежной дробилки. Определим один из критериев подобия процесса ударного разрушения кусков горной породы. Выберем в качестве независимых переменных: плотность куска горной породы ρ, скорость v, массу m и проверим это [15, 21].

$$\begin{matrix}\rho \\ v \\ m\end{matrix}\begin{pmatrix}[L]^{-3} & [M]^{1} & [T]^{0} \\ [L]^{1} & [M]^{0} & [T]^{-1} \\ [L]^{0} & [M]^{1} & [T]^{0}\end{pmatrix}\Delta = \begin{pmatrix}-3 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0\end{pmatrix} = -3(0+1) = -3 \neq 0, \quad (7)$$

где L – длина; M – масса; T – время; условие независимости переменных выполняется.

Существует некоторая функция Φ(σ, m, d, ρ, E) = 0, связывающая эти параметры. Выразим величину функции Φ в этих единицах и получим связь между безразмерными комплексами:

$$\sigma\left(\rho^{X}V^{Y}M^{Z}\right)^{-1} = idem. \quad (8)$$

Из этого уравнения получаем $\sigma(\rho^X V^Y M^Z)^{-1} = [L^{-1}M^1T^{-2}][(L^{-3}M^1)^X(L^1T^{-1})^Y M^Z]^{-1} = 1\ L^{-1+3X-Y}M^{1-X+Z}T^{-2+Y} = 1$ и, соответственно, находим $Z = 0$; $Y = 2$; $X = 1$.

Таким образом, один из критериев подобия при ударном разрушении имеет вид:

$$\sigma\left(V^2\rho\right)^{-1} = \pi_1 = idem. \tag{9}$$

Физически это означает равенство удельной энергии разрушения модели и натуры. Условием подобия при разрушении кусков различной крупности и одинаковой плотности будет равенство напряжений при ударе. При этом они должны быть равны напряжениям, при которых происходит разрушение рассматриваемой горной породы.

Аналогичным способом получим критериальное уравнение для степени дробления:

$$i\left(\rho^X V^Y M^Z\right)^{-1} = idem. \tag{10}$$

Из этого уравнения получаем $i(\rho^X V^Y M^Z)^{-1} = i[(L^{-3}M^1)^X(L^1T^{-1})^Y M^Z]^{-1} = 1\ L^{3X-Y}M^{-X-Z}T^Y = 1$ и, соответственно, находим $Z = 0$; $Y = 0$; $X = 0$.

Следовательно, второй критерий подобия при ударном разрушении имеет вид:

$$i = \pi_2 = idem. \tag{11}$$

Перемножив уравнения (9) и (11), получим новое критериальное уравнение:

$$\pi_3 = \pi_1\pi_2 = i\sigma\left(V^2\rho\right)^{-1} = idem. \tag{12}$$

Уравнение (12) показывает, что степень дробления прямо пропорциональна удельной энергии куска и его плотности и обратно пропорциональна напряжению разрушения (пределу прочности).

Удельная энергия куска при его сходе с разгонной лопасти находится из формулы:

$$0,5V^2 = \left[\left(r_{12}\omega\right)^2 + V_r^{\,2}\right]0,5, \tag{13}$$

где V_r – радиальная скорость куска, м/с; r_{12} – наружный радиус разгонной лопасти, м; ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с.

Радиальная скорость куска находится из формулы:

$$V_r = -k_2 r_{11}\left(k_1 - k_2\right)^{-1} k_1 \exp\left(k_1 t_c\right) + k_1 r_{11}\left(k_1 - k_2\right)^{-1} k_2 \exp\left(k_2 t_c\right), \tag{14}$$

где $k_{1,2} = \omega[f \pm (1+f^2)^{0,5}]$ – корни характеристического уравнения, f –коэффициент трения куска горной породы о лопасть; r_{11} – внутренний радиус разгонной лопасти, м; t_c – время движения куска горной породы по разгонной плоскости, с.

Используя уравнения (10)–(14), а также характеристики горной породы, можно подобрать параметры дробилки.

Выводы. Скорость, необходимая для разрушения куска горной породы свободным ударом, увеличивается с уменьшением его массы и, соответственно, его диаметра. Степень дробления прямо пропорциональна удельной энергии куска и его плотности и обратно пропорциональна напряжению разрушения, которое в свою очередь зависит от размеров кусков. Проведение второй и последующих стадий разрушения в центробежных дробилках целесообразно осуществлять не свободным ударом, а другим способом (раздавливанием, сколом и т. д.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барон Л. И., Хмельковский И. Е. Разрушаемость горных пород свободным ударом. М.: Наука, 1971. 203 с.

2. Симонов П. С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // ГИАБ. 2020. № 1. С. 71–79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79

3. Андреев С. Е., Перов В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1980. 415 с.

4. Андреев С. Е., Товаров В. В., Перов В. А. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. М.: Металлургиздат, 1959. 437 с.

5. Adewuyi S. O., Ahmed H. A. M., Ahmed H. M. A. Methods of ore pretreatment for comminution energy reduction // Minerals. 2020. Vol. 10(423). P. 1–23. DOI: 10.3390/min10050423

6. Серго Е. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: 1985. 285 с.

7. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1977. 368 с.

8. 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. 2020. Vol. 291(1). Art. 125228. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125228

9. Petrov V., Kuznetsov N., Morozov I. Experimental studies of energy technology indicators during ore crushing at a processing plant // Proceedings of IEEE ICATMRI: International Conference on advent trends in multidisciplinary research and innovation. 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICATMRI51801.2020.9398320

10. Гутьяр Е. М. К объемной теории дробления // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1981. Вып. 4. С. 163–166.

11. Vasilyeva N., Golyshevskaia U., Sniatkova A. Modeling and improving the efficiency of crushing equipment // Symmetry. 2023. Vol. 15. No. 7. Art. 1343.

12. 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. P. 1977–1983. DOI: 10.1007/s11182-022-02530-7

13. Афанасьев А. И., Зубов В. В., Симисинов Д. И., Чиркова А. А. Исследование измельчаемости руд в роторной центробежной мельнице // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2025. № 2. С. 25–34. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-2-25-34

14. Афанасьев А. И., Стожков Д. С., Потапов В. Я., Потапов В. В. Энергоемкость ударного разрушения бедных медно-цинковых руд // ГИАБ. 2017. № 10. С. 25–29. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-25-29

15. Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1967. 646 с.

16. Хартман К., Лецкий Э. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 552 с.

17. Винокуров В. Р. Методика расчета оптимальных рабочих параметров рудоразмольного оборудования многократного ударного действия // Проблемы и перспективы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых криолитозоны: Тр. Междунар. науч.-практ. конф., 14–17 июня 2005 г. Т. 3. Якутск: 2005. С. 27–30.

18. Саитов В. И. Условия подобия процессов разрушения горных пород при дроблении и измельчении // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 1(110). С. 25–28.

19. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1978. 359 с.

20. Селективное разрушение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.]. М: Недра, 1988. 285 с.

21. Веников В. А. Теория подобия и моделирования. М: Высшая школа, 1976. 480 с.

Поступила в редакцию 19 августа 2025 года

Сведения об авторе:

Зубов Владимир Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации горного оборудования Уральского государственного горного университета. E-mail: v.zubov.r66@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0003-0659-9870

DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-27-35

The efficiency criterion of the rotor centrifugal crusher work process

Vladimir V. Zubov[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *The free impact crusher (mill) efficiency evaluation has been presented. At the design stage, the crusher efficiency is determined based on the reduction ratio and energy consumption per unit of finished product, because other criteria can hardly be applied before a prototype is manufactured. Since particles are crushed by a free impact, the energy required to crush the rock cannot exceed the kinetic energy of the particles at the moment they descend from the accelerating blade.*

Research objective *is to determine the criterion of the work process efficiency based on the theory of similarity.*

Methods of research *include mathematical modelling, experimental research on a physical model and pilot plant, as well as the regression analysis.*

Research procedure. *The reduction ratio of a rock particle by a free impact depends on the size of the equivalent diameter and impact velocity, i.e. on energy consumption, as well as on rock density and crushed material strength properties. It increases with the growth of the equivalent diameter and specific energy consumption. That is why the equivalent diameter, the specific energy of a particle, and the limiting stress at collapse were taken as independent variables. A criterion equation has been obtained relating the specific energy intensity of a particle's failure with its equivalent diameter, density and reduction ratio.*

Research result. *It was found that a smaller rock particle requires significant increase in it's velocity in order to crush it. It therefore requires higher impact velocity in each subsequent stage of crushing. If free impact crushing is fulfilled in several stages, the particle velocity before the next impact should be determined based on the size of the maximum particle formed after the previous impact.*

Conclusion. *Having obtained a criterion equation of the crushing process, it is possible to choose rational design and operating parameters of the crusher.*

Keywords: *rock; particle size; particle mass; particle velocity; specific energy consumption; reduction ratio; rock density; similarity criteria.*

REFERENCES

1. Baron L. I., Khmelkovskii I. E. *Rocks' ability to be crushed by an impact.* Moscow: Nauka Publishing; 1971. (In Russ.)

2. Simonov P. S. Single-impact rock crushing experiment. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2020; 1: 71–79. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79

3. Andreev S. E., Perov V. A., Zverevich V. V. *Crushing, grinding, and screening of minerals*. Moscow: Nedra Publishing; 1980. (In Russ.)

4. Andreev S. E., Tovarov V. V., Perov V. A. *Grinding patterns and granulometric composition calculation.* Moscow: Metallurgizdat Publishing; 1959. (In Russ.)

5. Adewuyi S. O., Ahmed H. A. M., Ahmed H. M. A. Methods of ore pretreatment for comminution energy reduction. *Minerals.* 2020; 10(423): 1–23. Available from: doi: 10.3390/min10050423

6. Sergo E. E. *Crushing, grinding, and screening of minerals.* Moscow: 1985. (In Russ.)

7. Sidenko P. M. *Grinding in the chemical industry*. Moscow: Khimiia Publishing; 1977. (In Russ.)

8. 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.* 2020; 291(1): 125228. Available from: doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125228

9. Petrov V., Kuznetsov N., Morozov I. Experimental studies of energy technology indicators during ore crushing at a processing plant. In: *Proceedings of IEEE ICATMRI: International Conference on advent trends in multidisciplinary research and innovation.* 2020. P. 1–4. Available from: 10.1109/ICATMRI51801.2020.9398320

10. Gutiar E. M. Regarding the volumetric theory of crushing. *Izvestiia Timiriazevskoi selskokhoziaistvennoi akademii = Proceedings of the Timiryazev Agricultural Academy.* 1981; 4: 163–166. (In Russ.)

11. Vasilyeva N., Golyshevskaia U., Sniatkova A. Modeling and improving the efficiency of crushing equipment. *Symmetry*. 2023; 15(7): 1343.

12. 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; 64(10): 1977–1983. DOI: 10.1007/s11182-022-02530-7

13. Afanasiev A. I., Zubov V. V., Simisinov D. I., Chirkova A. A. Rock crushability in a rotor centrifugal mill. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2025; 2: 25–34 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2025-2-25-34

14. Afanasiev A. I., Stozhkov D. S., Potapov V. Ia., Potapov V. V. Energy consumption of impact fracture of low-grade copper-zinc ore. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2017; 10: 25–29. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-25-29

15. Zeldovich Ia. B., Myshkis A. D. *Elements of the applied mathematics*. Moscow: Nauka Publishing; 1967. (In Russ.)

16. Khartman K., Letskii E. *Planning an experiment in flow processes research.* Moscow: Mir Publishing; 1977. (In Russ.)

17. Vinokurov V. R. A method of calculating the optimal operating parameters for the ore grinding impact equipment. In: *The problems and prospects of developing the deposits of the permafrost zone: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 14–17 June 2005.* Vol. 3. Yakutsk: 2005. p. 27–30. (In Russ.)

18. Saitov V. I. Conditions similar to the process of destruction of rocks when crushing and grinding. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics.* 2015; 1(110): 25–28. (In Russ.)

19. Rzhevskii V. V., Novik G. Ia. *The fundamentals of rock physics.* Moscow: Nedra Publishing; 1978. (In Russ.)

20. Revnivtsev V. I. et al. *Selective breaking of minerals*. Moscow: Nedra Publishing; 1988. (In Russ.)

21. Venikov V. A. *The theory of similarity and modelling.* Moscow: Vysshaia shkola; 1976. (In Russ.)

Received 19 August 2025

Information about the author:

Vladimir V. Zubov – PhD (Engineering), Associate Professor, associate professor of the Department of Mining Machinery Operation, Ural State Mining University. E-mail: v.zubov.r66@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0003-0659-9870

Для цитирования: Зубов В. В. Критерий эффективности рабочего процесса роторной центробежной дробилки // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2025. № 5. С. 27–35. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-27-35

For citation: Zubov V. V. The efficiency criterion of the rotor centrifugal crusher work process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2025; 5: 27–35 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-27-35