

УДК 621.86:531.8

Афанасьев Анатолий Ильич

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технической механики
Уральский государственный
горный университет,
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru

Зубов Владимир Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры эксплуатации горного оборудо-
вания,
Уральский государственный
горный университет
e-mail: v.zubov.r66@yandex.ru

Симисин Денис Иванович

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой эксплуатации горного
оборудования,
Уральский государственный
горный университет,
e-mail: 7sinov@mail.ru

**АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ
И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
УДАРНЫХ ИЗМЕЛЬЧАЮЩИХ
УСТРОЙСТВ***Аннотация:*

На горно-обогатительном производстве процессы дробления и измельчения являются самыми энергоемкими. Доля затрат энергии на эти процессы составляет до 50 % всех затрат по переработке руд и нерудных материалов. В работе приведен обзор конструкций дезинтеграторов и лабораторных измельчителей. Выполнено сравнение измельчительных машин по производительности, энергопотреблению, показателям готовой продукции (крупности продукта, распределению по классам крупности), удельной энергии измельчения продукта. Показано, что измельчители горных пород, использующие удар, истирание, раздавливание и скол имеют большую эффективность, чем просто удар. При оценке эффективности работы измельчителя следует учитывать крепость горных пород, непосредственно связанную с дробимостью.

Ключевые слова: горная порода, степень дробления, удельный расход энергии, эффективность.

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.047

Afanasyev Anatoliy I.

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Technical Mechanics Department,
Ural State Mining University,
620144 Ekaterinburg,
30 Kuibysheva Str.,
e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru

Zubov Vladimir V.

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Mining Equipment Operation Department,
Ural State Mining University
e-mail: v.zubov.r66@yandex.ru

Simisinov Denis I.

Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor,
Head of the Mining Equipment
Operation Department
Ural State Mining University
e-mail: 7sinov@mail.ru

**ANALYSIS OF DESIGN SOLUTIONS
AND EVALUATION
OF THE EFFECTIVENESS OF IMPACT
SHREDDING DEVICES***Abstract:*

In mining and processing plants, crushing and grinding processes are the most energy-intensive. The share of energy costs for these processes is up to 50% of all costs for processing ores and non-metallic materials. The paper provides an overview of the designs of disintegrators and laboratory shredders. A comparison of shredding machines in terms of productivity, energy consumption, indicators of finished products (product size, distribution by size classes), and specific energy of crushing the product was performed. The study illustrates that rock shredders using impact, abrasion, crushing and chipping have greater efficiency than just impact. When evaluating the efficiency of the shredder, the rock strength, which is directly related to crushing capacity, should be taken into account.

Key words: rock, degree of crushing, specific energy consumption, efficiency.

Введение

Актуальность. Рудоподготовительные процессы в строительной и горной промышленности практически все малоэффективны, так как характеризуются относительно высоким энергопотреблением. В частности, на горно-обогатительном производстве процессы дробления и измельчения являются самыми энергоемкими. Доля затрат энергии

на эти процессы составляет до 50 % всех затрат по переработке руд. Это объясняется необходимостью перед обогащением иметь относительно большую степень измельчения, а также относительно низкой эффективностью применяемого оборудования, КПД которого составляет 2 – 3 %. В связи с этим совершенствование дробильно-размольного оборудования всегда является важной задачей.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе разработки месторождения операции по дроблению и измельчению горной породы играют ключевую роль в подготовке образцов для анализа и последующего обогащения полезных ископаемых [1 – 3].

Анализ проб необходим для контроля добычи, оценки потерь полезных ископаемых, изменения их качества и, как следствие, корректировки цены готовой продукции. Для получения аналитических образцов применяются специализированные дробилки и измельчители, обеспечивающие требуемую гранулометрию материала.

Конструкция оборудования для дробления и измельчения полезных ископаемых зависит от метода разрушения породы, который, в свою очередь, определяется видами деформации материала [4 – 9]. Наиболее распространенными способами разрушения являются раздавливание, скол, истирание, стесненным ударом, свободным ударом. Хрупкие материалы лучше всего разрушать свободным ударом. Этот метод обладает рядом преимуществ:

- высокой степенью измельчения, что может исключить среднюю стадию дробления;
 - высокой производительностью и компактными размерами по сравнению с конусными дробилками;
 - хорошей балансировкой ротора, что снижает уровень вибраций и позволяет использовать легкие фундаменты;
 - простой системой обеспыливания;
 - хорошей ремонтпригодностью;
 - надежной защитой от попадания инородных тел в зону дробления;
 - высокой энергоэффективностью.
- Недостатки ударных дробилок:
- необходимость постоянной подачи материала для поддержания рационального режима работы;
 - низкий ресурс разгонных лопастей и отражательных плит из-за износа, что ограничивает применение этих дробилок для пород с высокой прочностью и абразивностью;
 - значительное выделение пыли, требующее установки циклонов или камер обеспыливания.

Для решения этих проблем применяются следующие технические решения:

- самофутеровка, уменьшающая площадь интенсивного износа;
- использование износостойких материалов для изготовления брони;
- рациональная геометрия лопастей и диска;
- повышение ремонтпригодности брони.

На рис. 1 приведена классификация дробилок, разрушающих горную породу свободным ударом.

Из классификации, приведенной на рис. 1, видно, что в настоящее время существуют центробежные дробилки, различные по кинематике движения куска. Подробное описание основных конструкций машин ударного и ударно-отражательного действия представлено в работах различных авторов [10 – 14]. По общепринятой терминологии измельчительное оборудование представлено дезинтеграторами, дисмембраторами, истирателями и измельчителями. Одним из технических решений, заслуживающих внимания, является центробежная дробилка [15], изображенная на рис. 2.

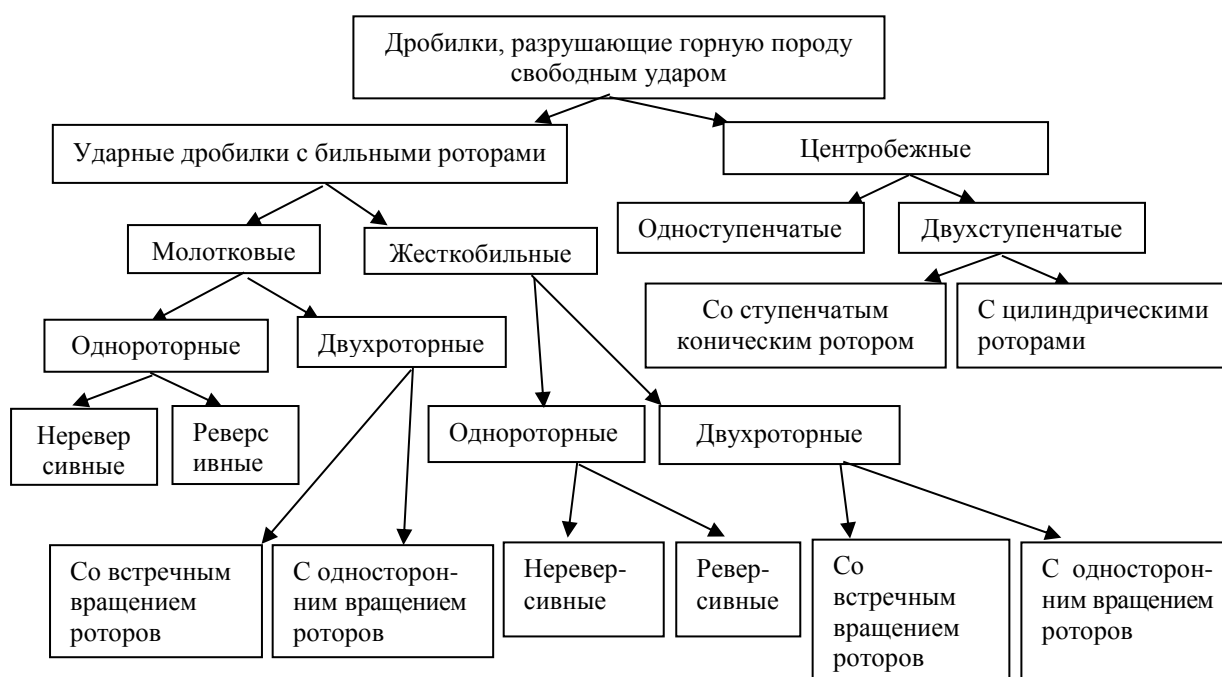


Рис. 1. Классификация дробилок, использующих разрушение свободным ударом

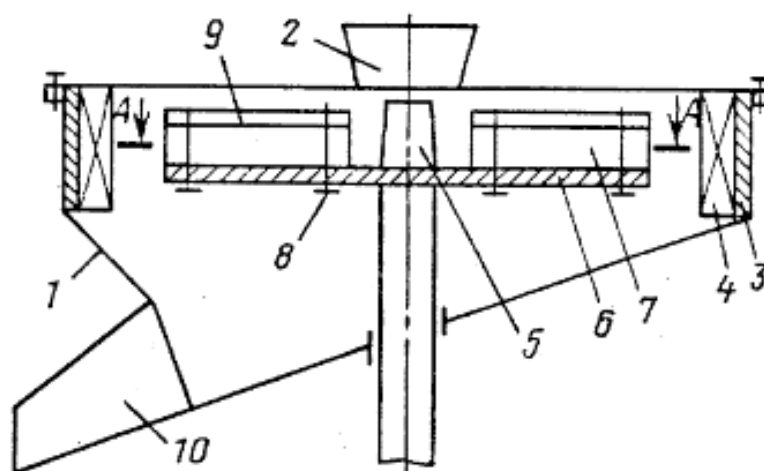


Рис. 2. Центробежная дробилка

Цетробежная дробилка состоит из корпуса 1, загрузочной воронки 2, отбойного кольца 3 с внутренними зубьями 4. Внутри корпуса 1 расположен ведущий вал 5, на котором жестко закреплен диск 6 с разгонными рабочими органами 7, которые закреплены на диске болтами 8 и клиньями 9. Выгрузка дробленого материала осуществляется через желоб 10. Исходный материал поступает в рабочую зону через загрузочную воронку 2 корпуса 1 и попадает на диск 6. Куски материала разгоняются радиально установленными разгонными рабочими органами 7 и выбрасываются на зубья 4 отбойного кольца 3, разрушаются, а затем попадают в течку 10.

Достоинством данной дробилки является простота конструкции, недостатком – относительно низкая эффективность разрушения кусков материала, обусловленная тем, что удар частиц о зубья практически невозможно сделать по нормали к поверхности

окружности, проведенной через вершины зубьев, кроме того, разрушение кусков горной породы происходит за один удар.

Многократное ударное воздействие на куски горной породы происходит в центробежном измельчителе [16]. Типичным представителем машин этого типа является приведенный на рис. 3 центробежный измельчитель встречного удара.

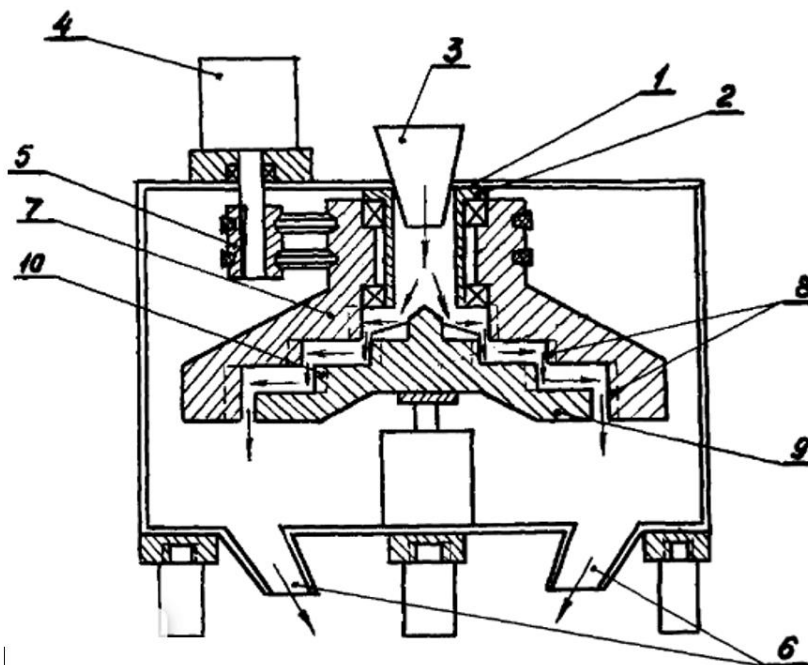


Рис. 3. Центробежный измельчитель встречного удара [16]

Центробежный измельчитель встречного удара состоит из двух (7 и 9) вращающихся в противоположные стороны роторов с приводом верхнего ротора 7 от двигателя 4 через клиноременную передачу 5. Верхний ротор 7 выполнен ступенчатым, на вертикальной стенке каждой ступени размещены отбойные плиты 8, ориентированные по нормали к направлению вектора сообщения импульса нижнему ротору. Нижний, разгонный ротор 9 представляет собой ступенчатый конус, на каждой ступени которого расположены радиальные ребра 10. Роторы закрыты цилиндрическим разборным корпусом 1. Загрузочной частью является втулка 2 с бункером 3 и нижними разгрузочными 6 отверстиями. Материал загружается в бункер 3 и поступает через загрузочную втулку 2 на верхнюю часть нижнего ротора 9. Куски породы за счет радиальных разгонных ребер 10 разгоняются и затем ударяются об отбойные плиты 8, закрепленные на внутренней стенке верхнего ротора 7. Нераздробленные куски отскакивают от отбойных плит 8 и повторно получают удары. Раздробленные куски попадают на последующую ступень разгонного диска, и процесс дробления повторяется, пока разрушенная порода не удалится через разгрузочные отверстия 6 на днище корпуса 1.

Недостатком данного технического решения является невысокая радиальная составляющая скорости материала, обусловленная относительно небольшой величиной длины разгонных ребер 10, и, соответственно, низкая эффективность измельчения, так как на каждой последующей стадии дробления необходимо нелинейно увеличивать скорость удара, что выполнить в данном устройстве затруднительно.

На рис. 4 приведена конструктивная схема [17] дезинтегратора встречного удара с соосным расположением ударных элементов, в котором происходит многократное ударное воздействие на куски горной породы.

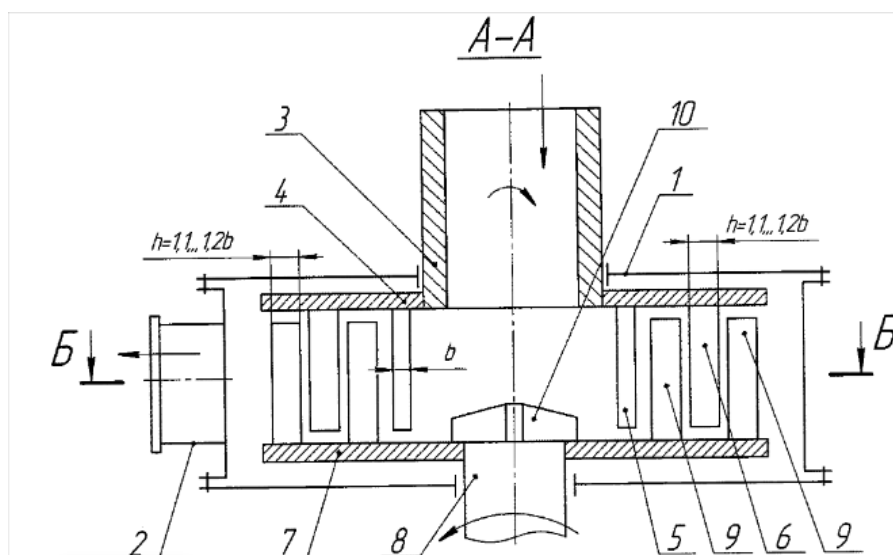


Рис. 4. Дезинтегратор [17]

Дезинтегратор состоит из корпуса 1 с осевым загрузочным 3 и тангенциальным разгрузочным 2 патрубками. В корпусе 1 установлены верхний 4 и нижний 7 диски, на которых концентрично жестко закреплены ударные элементы 5, 6, 9 прямоугольного сечения. Диски 4 и 7 вращаются в разные стороны.

Недостатком данного дезинтегратора является относительно низкая эффективность разрушения кусков материала, вследствие малой вероятности обеспечения центрального удара кусков об ударные элементы. Как правило, удар куска об ударные элементы является косым, что существенно уменьшает степень дробления и, соответственно, эффективность процесса.

Эти выводы подтверждаются результатами эксперимента, полученными при дроблении свободным ударом сульфидной руды крупностью +10 – 60 мм и скорости 40 – 100 м/с. Статистическая зависимость минимально необходимой для разрушения скорости (V) куска перед ударом от его эквивалентного диаметра (d) имеет следующий вид:

$$V = 140d^{-0,37}, \quad (1)$$

где d – эквивалентный диаметр кусков в мм.

Относительно большое корреляционное отношение $R^2 = 0,93$ указывает на наличие существенной связи, минимально необходимой для разрушения скорости куска перед ударом от его размеров.

При проведении экспериментов на дробилке, имеющей такую же схему, что и изображенная на рис. 2 [15], степень дробления кусков сульфидной руды крупностью 50 – 55 мм при однократном воздействии свободным ударом достигала 3,8. Если исходное питание уменьшить до -10 мм, то согласно (1) скорость удара во второй стадии разрушения должна быть в 1,6 раза больше, а в третьей – в 2,5 раза. При этом должен быть обеспечен угол встречи куска с броней, близкий к 90° , что выполнить на существующих дезинтеграторах практически невозможно.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что дробление в центробежных дробилках должно включать не только удар, но и раздавливание и истирание.

Этому в определенной мере отвечает центробежный измельчитель [18]. Предлагаемый центробежный измельчитель позволяет разрушать куски горной породы ударом, раздавливанием, сколом, а также истиранием, что позволяет получить заданную крупность продукта.

Как правило, 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 массы продукции, есть не что иное, как половина квадрата скорости куска, т. е. удельная энергия. Для различных материалов при одинаковом значении удельной энергии степень измельчения может существенно отличаться друг от друга.

В табл. 1 приведены технические характеристики дезинтеграторов и лабораторных измельчителей.

Таблица 1

Технические характеристики дезинтеграторов

№	Тип измельчителя	Производительность, Q , кг/ч	Мощность двиг., N , кВт	Крепость по Протодюкову	Размер кусков исходного питания, мм	Степень измельчения, i	$N*(Q*i)^{-1}$, кВт*ч/т	Область использования	Способ разрушения
1	Ударник-18	3000	18,5	14-15	1,5	7,5	0,82	Промышленные	Удар + истирание
2	ИНТЕХ-ГмБХ	1000	120	10	10	40	3		
3	Горизонт 380185Z	1000	29,5	7	10	66,6	0,44		
4	МД 4*3	600	7,5	9	50	3 - 16	4,1-0,78		
5	ИЛЭ-200-50	30	2,2	14-15	4	40	1,8	Лабораторные	Истирание
6	DESI-11	10-20	4,1	6	1,5	10	20-41		Удар
7	ИД-130	8	1,1	10	1,5	34	4		Истирание
8	ИД-175	15	2,2	10	2,5	25	5,8		
9	ИД-250	30	4	10	2,5	25	5,3		Удар + истирание
10	ИЛА-2	30	1,1	9	4	36	1		
11	ИЛА-3	10	2,2	9	3,5	36	5,1		
12	ИД-200	30	2,2	10	2,5	25	2,9	Истирание	

Данные таблицы показывают, что при одинаковой степени измельчения удельная энергия для разных измельчителей может иметь существенное различие. Более объективной оценкой эффективности измельчителя, как это отмечено в работе [19], будет отношение удельной работы к степени измельчения. Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что для рассмотренных измельчителей наиболее эффективными будут такие, которые используют для разрушения удар и истирание. В частности, у измельчителя «Горизонт 380185Z» отношение удельной работы к степени измельчения минимальное, однако он способен дробить материал крепостью до 7 ед. по Протодюкову, а измельчитель «Ударник 18» дробит горные породы крепостью 14 – 15 ед.

Выводы

1. Измельчители горных пород, использующие удар, истирание, раздавливание и скол, имеют большую эффективность, чем просто удар.
2. При оценке эффективности работы измельчителя следует учитывать крепость горных пород, которая непосредственно связана с дробимостью.

Список литературы

1. Альбов М.Н., 1975. *Опробование месторождений полезных ископаемых: учебник для вузов*. Москва: Недра, 221 с.
2. Козин В.З., 2011. *Опробование минерального сырья*. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 316 с.
3. Чечотт Г.О., 1932. *Опробование и испытание полезных ископаемых*. Москва, Ленинград: ГНТГГИ, 114 с.
4. Барон Л.И., Хмельковский И.Е., 1971. *Разрушаемость горных пород свободным ударом*. Москва: Наука, 203 с.
5. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В., 1980. *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых*. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Недра, 415 с.
6. Андреев С.Е. и др., 1959. *Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава*. Москва: «Металлургиздат», 437 с.
7. Андреев С.Е., 1962. О законах дробления. *Горный журнал*, № 4, С. 66-70.
8. Серго Е.Е., 1977. *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых*. Москва: Недра, 285 с.
9. Сиденко П.М., 1977. *Измельчение в химической промышленности: издание 2-е, переработанное*. Москва: Химия, 368 с.
10. Беренс Д., 1966. Новые конструкции машин ударного действия для тонкого и сверхтонкого размола. *Труды Европейского совещания по измельчению*. Москва: Стройиздат, С. 444 – 470.
11. Смирнов Н.М., 1997. *Совершенствование процессов и оборудования для ударного измельчения материалов различной абразивности: дис. ... д-ра техн. наук*. Иваново, 390 с.
12. Олевский В.А., 1963. *Размольное оборудование обогатительных фабрик*. Москва: Государственное научно-техническое издательство по горному делу, 12 с.
13. Левенсон Л.Б., Прейгерзон Б.И., 1940. *Дробление, грохочение полезных ископаемых*. Москва-Ленинград: Гостоптехиздат, 771 с.
14. Борщев В.Я., 2004. *Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учебное пособие*. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 75 с.
15. Авторское свидетельство №1827285, МПК 7 В02С 13/14. *Центробежная дробилка*: опубл. 15.07.93, бюл. 26 / Королев П.П., Онопченко А.Н., Левченко Э.П.
16. Патент № 2150323 Российская Федерация, МПК В02, С 13/20. *Центробежный измельчитель встречного удара*: заявл. 28.10.1997; опубл. 10.06.2000 / Матвеев А.И., Григорьев А.Н., Филиппов В.Е.; заявитель и патентообладатель Институт горного дела Севера.
17. Патент №2630936 Российская Федерация, МПК 7 В02С 13/22. *Дезинтегратор*: заявл. 13.05.2016; опубл. 14.09.2017, бюл. № 26 / Семикопенко И.А., Горбань Т.Л., Ченцов А.Е., Беляев Д.А., Трофимов И.О.; заявитель и патентообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
18. Патент №2819684 Российская Федерация, МПК 7 В02С 13/24. *Центробежный измельчитель*: заявл. 10.08.23; опубл. 20.05.2024, бюл. № 15 / Афанасьев А.И., Зубов В.В., Потапов В.Я., Потапов В.В., Чиркова А.А.; заявитель и патентообладатель Уральский государственный горный университет.
19. Зубов В.В., 2025. Критерий эффективности рабочего процесса роторной центробежной дробилки. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 5, С. 27-35. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-27-35.

References

1. Al'bov M.N., 1975. Oprobovanie mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh: uchebnik dlya vuzov [Testing of mineral deposits: a textbook for universities.]. Moscow: Nedra, 221 p.
2. Kozin V.Z., 2011. Oprobovanie mineral'nogo syr'ya [Testing of mineral raw materials]. Ekaterinburg: Izd-vo UGGU, 316 p.
3. Chechott G.O., 1932. Oprobovanie i ispytanie poleznykh iskopaemykh [Testing and proving of minerals]. Moscow, Leningrad: GNTGGI, 114 p.
4. Baron L.I., Khmel'kovskii I.E., 1971. Razrushaemost' gornykh porod svobodnym udarom [Destructibility of rocks by free impact]. Moscow: Nauka, 203 p.
5. Andreev S.E., Perov V.A., Zverevich V.V., 1980. Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh [Crushing, milling and screening of minerals]. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow: Nedra, 415 p.
6. Andreev S.E. i dr., 1959. Zakonomernosti izmel'cheniya i ischisleniya kharakteristik granulometricheskogo sostava [Patterns of grinding and calculation the characteristics of the granulometric composition]. Moscow: "Metallurgizdat", 437 p.
7. Andreev S.E., 1962. O zakonakh drobleniya [About the patterns of crushing]. Gornyi zhurnal, № 4, S. 66-70.
8. Sergo E.E., 1977. Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh [Crushing, milling and screening of minerals]. Moscow: Nedra, 285 p.
9. Sidenko P.M., 1977. Izmel'chenie v khimicheskoi promyshlennosti: izdanie 2-e, pererabotannoe [Grinding in the chemical industry]. Moscow: Khimiya, 368 p.
10. Berens D., 1966. Novye konstruktsii mashin udarnogo deistviya dlya tonkogo i sverkh-tonkogo razmola [New designs of impact machines for fine and ultrafine grinding]. Trudy Evropeiskogo soveshchaniya po izmel'cheniyu. Moscow: Stroizdat, P. 444 – 470.
11. Smirnov N.M., 1997. Sovershenstvovanie protsessov i oborudovaniya dlya udarnogo izmel'cheniya materialov razlichnoi abrazivnosti [Improvement of processes and equipment for impact grinding of materials of various abrasiveness]: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Ivanovo, 390 p.
12. Olevskii V.A., 1963. Razmol'noe oborudovanie obogatitel'nykh fabrik [Grinding equipment of processing plants]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo po gornomu delu, 12 p.
13. Levenson L.B., Preigerzon B.I., 1940. Droblenie, grokhochenie poleznykh iskopaemykh [Crushing and screening of minerals]. Moscow-Leningrad: Gostoptekhizdat, 771 p.
14. Borshchev V.Ya., 2004. Oborudovanie dlya izmel'cheniya materialov: drobilki i mel'nitsy: uchebnoe posobie [Equipment for crushing materials: crushers and mills: a textbook]. Tambov: Izd-vo TGTU, 75 p.
15. Avtorskoe svidetel'stvo №1827285, MPK 7 V02S 13/14. Tsentrobezhnaya drobilka [Copyright certificate No. 1827285, IPC 7 B02C 13/14. Centrifugal crusher]: opubl. 15.07.93, byul. 26 / Korolev P.P., Onopchenko A.N., Levchenko E.P.
16. Patent № 2150323 Rossiiskaya Federatsiya, MPK V02, S 13/20. Tsentrobezhnyi izmel'chitel' vstrechnogo udara [Patent No. 2150323 Russian Federation, IPC B02, From 13/20. Centrifugal counterimpact shredder]: zayavl. 28.10.1997; opubl. 10.06.2000 / Matveev A.I., Grigor'ev A.N., Filippov V.E.; zayavitel' i patentoobladatel' Institut gornogo dela Severa.
17. Patent №2630936 Rossiiskaya Federatsiya, MPK 7 V02S 13/22. Dezintegrator [Patent No.2630936 Russian Federation, IPC 7 B02C 13/22. Disintegrator]: zayavl. 13.05.2016; opubl. 14.09.2017, byul. № 26 / Semikopenko I.A., Gorban' T.L, Chentsov A.E., Belyaev D.A., Trofimov I.O.; zayavitel' i patentoobladatel' Belgorod-skii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova.
18. Patent №2819684 Rossiiskaya Federatsiya, MPK 7 V02S 13/24. Tsentrobezhnyi izmel'chitel' [Patent No. 2819684 Russian Federation, IPC 7 B02C 13/24. Centrifugal shredder]: zayavl. 10.08.23; opubl. 20.05.2024, byul. № 15 / Afanas'ev A.I., Zubov V.V., Potapov



V.Ya., Potapov V.V., Chirkova A.A.; zayavitel' i patentoobladatel' Ural'skii gosudarstvennyi gornyi universitet.

19. Zubov V.V., 2025. Kriterii effektivnosti rabocheho protsessa rotornoii tsentrobezhnoi drobilki [Criterion of the efficiency of the rotary centrifugal crusher working process]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal, № 5, P. 27-35. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-27-35.