

УДК 622.23.05; 622.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ РУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ СУХОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ АППАРАТЕ
НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ**

А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,
E-mail: andrei.mati@yandex.ru, vaviro@mail.ru,
просп. Ленина, 43, 677007, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия*

С помощью лабораторной модели вертикального центробежного аппарата установлена зависимость эффективности измельчения рудных материалов с разной твердостью по шкале Мооса. Определены рациональные конструктивные и режимные параметры аппарата для данных руд, которые заложены в основу разработки и проектирования полного пакета рабочей документации на изготовление опытно-промышленного варианта вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12.

Разрушение, измельчитель, рабочие органы, твердость, частицы, гранулометрический состав, эффективность

DOI: 10.15372/FTPRPI20230417

Разработка научно-экспериментальных основ сухой переработки (измельчения) различного рудного минерального сырья с целью экономии финансовых средств и энергозатрат — одно из перспективных направлений рудоподготовки [1, 2]. Ударный способ разрушения наиболее рационален при предварительной подготовке материала перед обогащением и имеет преимущества по степени разрушения, энергоемкости и раскрытию полезных компонентов [3 – 6].

Многие ученые занимались исследованием процессов измельчения в области рудоподготовки и внесли большой вклад в совершенствование и разработку измельчительного оборудования ударного действия [7 – 14]. В [15] разработаны основные принципы подготовки рудного сырья к обогащению, согласно которым для эффективного разрушения материала необходимо приложение многократных дозированных нагрузок и применение разных методов разупрочнения руд. Создание таких условий в ударных центробежных мельницах возможно, если их конструкция обеспечит многократные динамические воздействия на измельчаемый материал.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0022, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800089-2) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).

Одно из основных преимуществ измельчительных установок ударного действия — относительно низкие удельные энергозатраты на разрушение материалов на стадии измельчения частиц крупностью < 5 мм [16, 17]. На эффективность измельчения влияют способ разрушения и особенности конструкции измельчительного оборудования [15–20]. В настоящее время активно разрабатываются центробежные измельчители ударного действия (Metso Outotec, Acrowood Corp., Metso Minerals, ЗАО “Новые технологии”, НПО “Центр”, завод “ТехПрибор”) [21, 22]. Несмотря на многообразие конструкций современного оборудования данного направления, при решении задач тонкого измельчения удельные энергозатраты достаточно высоки. Они особенно увеличиваются с уменьшением массы и крупности разрушаемых частиц в процессе измельчения.

Цель настоящей работы — продолжение исследований по разработке и испытанию модели вертикального центробежного измельчителя, а также обоснование проектирования опытно-промышленного варианта аппарата ВЦИ-12 производительностью до 12 т/ч.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Найдены условия существенной интенсификации процессов ударного измельчения в рабочей зоне разрушения, реализуемых в новых аппаратах. Эффективность измельчения повышается благодаря организации многократных динамических воздействий в режиме последовательного повышения скорости взаимодействия частиц с поверхностью рабочих органов по ходу измельчения, компенсирующей уменьшение импульса динамических контактов за счет сокращения массы частиц при измельчении [23, 24].

В Институте горного дела Севера СО РАН разработан, спроектирован и запатентован вертикальный центробежный измельчитель [25, 26]. Его отличительный конструктивный признак — регулируемый узел разгрузки, который расположен относительно вертикальной оси корпуса и определяется углом разгрузки (рис. 1). В результате удается управлять эффективностью измельчения за счет регулирования времени обработки измельчаемого материала в рабочей зоне.

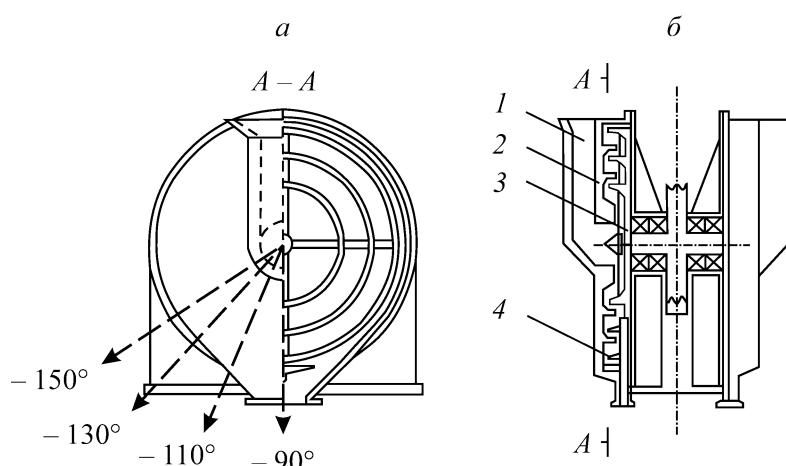


Рис. 1. Конструкция центробежного вертикального измельчителя: *а* — разрез по *A–A*; *б* — вид спереди с разрезом по оси вала; 1 — загрузочное отверстие; 2, 3 — неподвижный и вращающийся рабочий орган соответственно; 4 — регулируемое разгрузочное отверстие

В [27, 28] экспериментально определены рабочие параметры вертикального измельчителя: зазор между рабочими дисками (3 мм); рациональный угол разгрузки для кварцевой руды твердостью 7 по шкале Мооса и крупностью $-2.5 + 1.0$ мм (-150°). По ним разработан эскизный проект основных узлов опытно-промышленного образца вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12.

Для расширения экспериментальной базы исследований на данном оборудовании, а также определения рациональных конструктивных и режимных параметров вертикального центробежного измельчителя проведены лабораторные испытания для проб разной твердости при различных оборотах рабочих органов. Частота оборотов изменялась с помощью преобразователя частоты VACON0020-3L-0012-4 + DLRU + LLRU с панелью управления 135N0571 Danfoss (рис. 2).



Рис. 2. Частотный преобразователь VACON0020-3L-0012-4 + DLRU + LLRU

Измельчались рудные пробы из гипса, известняка, флюорита, мрамора, магнетита, кварца, базальта твердостью 2–8 по шкале Мооса. Все исходные пробы, подлежащие измельчению, представлены одним классом крупности $-2.5 + 1.6$ мм. Первоначально для нахождения рациональной частоты оборотов пробы подвергались измельчению при угле разгрузки -90° с варьированием частоты оборотов рабочего органа измельчителя от 500 до 1500 об./мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице представлены сравнительные результаты измельчения рудных материалов с разной твердостью при различной частоте оборотов рабочего органа лабораторной модели ВЦИ-12. Приведены те значения частот оборотов, при которых фиксировалась заметная разница выхода класса крупности -0.071 мм с шагом 50–100 об./мин. С увеличением скорости вращения рабочего органа на некотором этапе наблюдалось уменьшение динамики выхода контрольного класса крупности -0.071 мм, т. е. для каждого материала имелся свой предел эффективности измельчения. Выполнялась задача определения рационального рабочего режима измельчителя по частоте вращения рабочих органов, при превышении которого выход контрольного класса крупности -0.071 мм и эффективность измельчения практически не меняются.

Результаты измельчения рудных материалов

ν , об./мин	Класс крупности, мм							
	–2.5+1.6	–1.6+1.0	–1.0+0.5	–0.5+0.315	–0.315+0.2	–0.2+0.1	–0.1+0.071	–0.071+0
Гипс (2)								
450	0	0	0	2.8	17.7	44.4	22.9	12.2
500	0	0	0	0	11.1	39.2	35.6	14.1
550	0	0	0	0	0	26.8	42.4	30.8
600	0	0	0	0	0	26.6	42.1	31.3
650	0	0	0	0	0	26.5	42.1	31.4
Известняк (3)								
650	0	0	0	15.1	28.9	27.1	13.5	15.4
700	0	0	0	9.9	13.4	35.6	21.3	19.8
750	0	0	0	0	8.9	30.3	33.4	27.4
800	0	0	0	0	8.7	30.1	33.3	27.9
850	0	0	0	0	8.5	29.1	34.5	27.9
Флюорит (4)								
850	0	0	11.7	14.1	18.2	28.1	17.7	10.2
900	0	0	5.5	11.9	17.8	28.6	21.8	14.4
980	0	0	0	9.5	10.3	34.2	27.8	18.2
1050	0	0	0	9.3	10.1	35.1	26.9	18.6
1150	0	0	0	9.3	10.2	36.0	25.7	18.8
Мрамор (5)								
1000	5.4	30.1	19.1	8.9	10.9	8.0	7.9	9.7
1050	3.9	26.9	19.2	9.9	7.8	10.6	9.8	11.9
1140	0	22.1	20.6	11.2	9.3	9.3	15.1	12.4
1200	0	21.6	20.5	11.7	9.1	9.7	14.8	12.6
1250	0	21.7	20.3	11.5	9.2	9.5	15.0	12.8
Магнетит (6)								
1100	8.1	39.9	23.2	8.5	6.8	4.1	3.9	5.5
1150	6.6	33.1	24.2	12.8	8.7	2.8	3.1	8.7
1220	1.9	30.2	17.9	13.5	10.1	6.4	7.8	12.2
1300	1.9	29.9	17.5	14.1	9.7	6.5	8.0	12.4
1350	1.8	30.0	17.7	13.8	9.9	6.2	8.1	12.5
Кварц (7)								
1250	10.1	50.1	20.1	8.2	3.9	2.1	1.3	4.2
1300	8.8	47.7	20.9	7.2	5.1	3.6	1.8	4.9
1350	5.3	44.5	23.0	6.8	3.9	5.8	2.7	8.0
1400	5.1	44.2	22.7	6.6	4.2	6.0	2.9	8.3
1500	5.1	43.9	22.1	6.8	4.4	6.3	3.1	8.3
Базальт (8)								
1350	20.1	51.7	17.7	4.7	3.1	0.9	0.8	1.0
1400	13.6	50.5	24.1	4.1	3.4	2.0	1.2	1.1
1450	11.4	48.9	21.8	5.3	5.8	2.8	2.2	1.8
1500	10.1	47.7	20.1	6.0	6.7	3.5	3.1	2.8

Примечание. ν — частота оборотов рабочего органа; в скобках указана твердость по шкале Мооса.

По данным таблицы рассчитывались рациональные частоты вращения рабочего диска для измельчения рудных материалов определенной твердости. Рациональной принималась та частота вращения, при которой достигался максимальный выход контрольного класса крупности -0.071 мм. Например, при измельчении гипса твердостью 2 по шкале Мооса максимальные значения выхода контрольного класса достигались при $550-650$ об./мин с разницей до 0.6% . Соответственно, рациональная частота вращения рабочего органа для измельчения в модели вертикального центробежного измельчителя рудного материала твердостью 2 по шкале Мооса — 550 об./мин. Аналогично получены рациональные частоты вращения рабочего диска для измельчения следующих проб, об./мин: известняк — 750 ; флюорит — 980 ; мрамор — 1140 ; магнетит — 1220 ; кварц — 1350 ; базальт — 1500 (рис. 3).

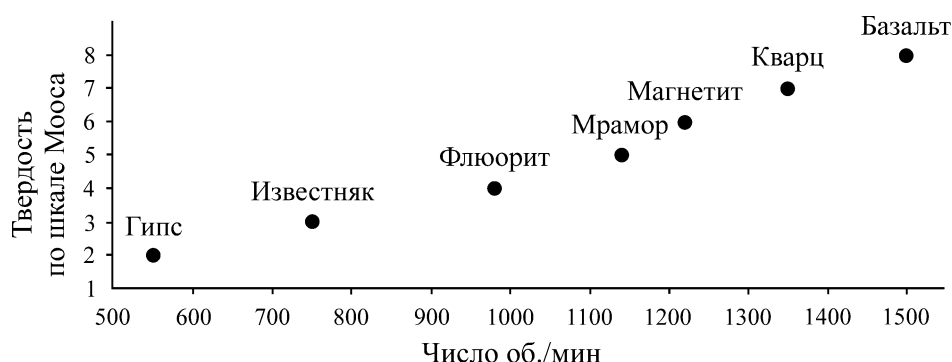


Рис. 3. Рациональная частота вращения рабочего органа измельчителя для проб разной твердости по шкале Мооса

Угол разгрузки измельченного материала в вертикальном центробежном аппарате позволяет управлять эффективностью процесса разрушения дополнительными динамическими воздействиями на разрушаемые частицы за счет увеличения времени их нахождения в рабочей зоне. Следовательно, для руд разной твердости рациональное время нахождения измельчаемых частиц в зоне измельчения (рациональные углы разгрузки измельченного материала) должно отличаться. Экспериментально определялись рациональные углы разгрузки измельченного рудного материала по выходу контрольного класса крупности -0.071 мм для проб с низкой, средней и высокой твердостью по шкале Мооса крупностью $-2.5 + 1.6$ мм.

На рис. 4 представлена сравнительная характеристика продуктов измельчения проб с низкой (известняк), средней (мрамор) и высокой (кварц) твердостью по шкале Мооса — 3, 5, 7 соответственно при разных углах разгрузки. Видно, что при измельчении проб с низкой твердостью выход контрольного класса крупности -0.071 мм при -130° и -150° практически одинаков (-130° — 36.5% , -150° — 37.1%). Происходит преимущественное разрушение измельчаемого исходного материала классом крупности $-2.5 + 1.6$ мм с его переходом в классы <0.2 мм с накоплением класса $-0.1 + 0.071$ мм. Увеличение угла разгрузки измельченного материала более -130° для руд твердостью 3 не способствует повышению выхода контрольного класса крупности -0.071 мм. Однако это позволяет регулировать выход класса крупности $-0.1 + 0.071$ мм. Наиболее рациональный угол разгрузки при измельчении пробы с твердостью 3 по выходу контрольного класса крупности -0.071 мм — -130° .

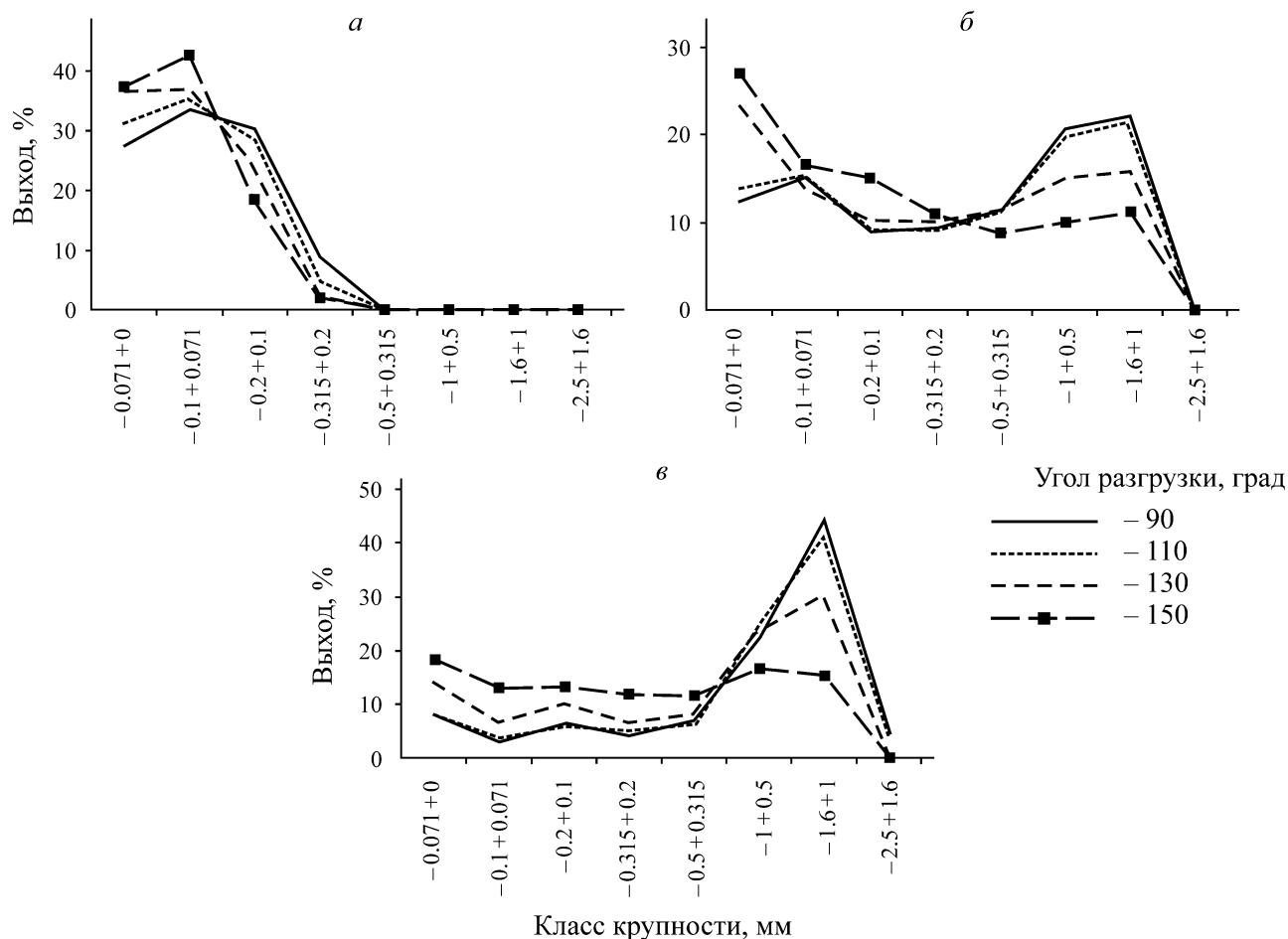


Рис. 4. Характеристика продуктов измельчения проб твердостью 3 (*a*), 5 (*б*) и 7 (*в*) по шкале Мооса при разных углах разгрузки

Результаты измельчения проб средней и высокой твердости показали повышение выхода контрольного класса крупности -0.071 мм с увеличением угла разгрузки измельченного материала (с -90° до -150°). Выход контрольного класса крупности при измельчении проб средней твердости повышался с 12.4 до 27.1 %, при измельчении проб высокой твердости — с 8.3 до 18.3 %. За счет дополнительных динамических нагрузок с ростом угла разгрузки интенсивно сокращался выход доли частиц крупностью > 0.315 мм при измельчении проб средней твердости, а при измельчении проб высокой твердости — частиц > 0.5 мм.

С целью более эффективного измельчения контролируемого по выходу класса -0.071 мм с увеличением твердости измельчаемых материалов необходимо повышать частоту вращения рабочего органа измельчителя.

Экспериментальным путем получены зависимости эффективности измельчения по выходу контрольного класса -0.071 мм от частоты вращения рабочего органа и от угла разгрузки измельченного материала для руд разной твердости. Это позволило управлять эффективностью их измельчения с помощью дополнительных динамических воздействий за счет увеличения времени нахождения разрушаемых частиц в рабочей зоне измельчения. В данных условиях важно определить основные факторы работы вертикального центробежного измельчителя. Рациональная частота вращения рабочего органа при измельчении проб средней твердости составила 1140 об./мин, для проб высокой твердости — 1350 об./мин, рациональный угол разгрузки измельченного материала для проб твердостью 5 и 7 по шкале Мооса — -150° .

ВЫВОДЫ

По выходу контрольного класса -0.071 мм установлены зависимости эффективности измельчения рудных материалов разной твердости по шкале Мооса от таких важных режимно-конструктивных параметров, как частота вращения рабочего органа измельчителя и угол разгрузки измельченного материала.

Найдены рациональные частоты вращения рабочего органа при угле разгрузки -90° для измельчения в модели вертикального центробежного аппарата рудного материала с разной твердостью по шкале Мооса, об./мин: гипс — 550; известняк — 750; флюорит — 980; мрамор — 1140; магнетит — 1220; кварц — 1350; базальт — 1500. Определены рациональные частоты вращения рабочего органа в зависимости от угла разгрузки для измельчения рудного материала разной твердости по шкале Мооса: угол разгрузки для материалов низкой твердости -130° при частоте оборотов вращения рабочего органа 550–750 об./мин; средней твердости -150° при 980–1220 об./мин; высокой твердости -150° при 1350–1500 об./мин.

Результаты исследования позволили обосновать исходные данные для проектирования опытно-промышленного варианта вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12 с проектной производительностью до 12 т/ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lakshmanan V. I., Ojaghi A., and Gorain B.** Beneficiation of gold and silver ores. In: V. Lakshmanan, B. Gorain (eds), *Innovations and Breakthroughs in the Gold and Silver Industries*, Springer Nature Switzerland, 2019. — 288 p.
2. **Chelgani S. C. and Neisiani A. A.** Dry mineral processing, Springer Cham, 2022. — 8 p.
3. **Юсупов Т. С.** Совершенствование процессов раскрытия минеральных сростков при освоении труднообогатимых объектов // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 143–149.
4. **Gong D., Nadolski S., Sun C., Klein B., and Kou J.** The effect of strain rate on particle breakage characteristics, *Powder Technol.*, 2018, Vol. 339. — P. 595–605.
5. **Мамонов С. В., Закиричный В. Н., Метелев А. А., Дресвянкина Т. П., Волкова С. В., Кузнецов В. А., Зиятдинов С. В.** Перспективные технологии раскрытия минерального сырья при подготовке к флотационному обогащению // ФТПРПИ. — 2019. — № 5. — С. 158–169.
6. **Zhou Wen-tao, Han Yue-xin, Sun Yong-sheng, Yang Jin-lin, and Ma Shao-jian.** Multi-scale impact crushing characteristics of polymetallic sulphide ores, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, Vol. 29, Issue 9. — P. 1929–1938.
7. **Барон Л. И., Коняшин Ю. Г., Курбатов В. М.** Дробильность горных пород. — М.: АН СССР, 1963. — 348 с.
8. **Вайсберг Л. А.** Современное дробильно-измельчительное и обогатительное оборудование “Механобр-Техники” // Тез. докл. II конгресса обогатителей стран СНГ. — М.: МИСиС, 1999. — С. 22–23.
9. **Александрова Т. Н., Чантурия А. В., Кузнецов В. В.** Минералого-технологические особенности и закономерности селективного разрушения железистых кварцитов Михайловского месторождения // Зап. Горн. ин-та. — 2022. — Т. 256. — С. 517–526.
10. **Александрова Т. Н., Афанасова А. В., Кузнецов В. В., Бабенко Т. А.** Исследование процессов селективной дезинтеграции медно-никелевых руд запольярного месторождения // ГИАБ. — 2021. — № 12. — С. 73–87.
11. **Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., and Kuznetsov V.** Justification for criteria for evaluating activation and destruction processes of complex ores, *Minerals*, 2023, Vol. 13, No. 5. — 684 p.

12. **Александрова Т. Н., Чантурия А. В.** Выбор схемы рудоподготовки железистых кварцитов по результатам имитационного моделирования // Обогащение руд. — 2023. — № 1. — С. 3–9.
13. **Сиденко П. М.** Измельчение в химической промышленности. — М.: Химия, 1977. — 368 с.
14. **Хопунов Э. А.** Исследование механизма селективного разрушения руд // Интенсификация технологических процессов рудоподготовки: сб. науч. тр. Механобр. — 1987. — С. 116–135.
15. **Ревнивцев Е. И.** Совершенствование процессов дробления, измельчения, грохочения и классификации руд и продуктов обогащения // Междуведомств. сб. науч. тр. — Л.: Механобр, 1985. — С. 170–171.
16. **Salman A. D., Ghadiri M., and Hounslow M.** Particle Breakage, Handbook of Powder Technology, 2007, Vol. 12. — 1240 p.
17. **Ballantyne G. R. and Powell M. S.** Minerals engineering, Benchmarking Comminution Energy Consumption Proc. Copper and Gold Ores, 2014, Vol. 65. — P. 109–114.
18. **Хопунов Э. А.** Новый взгляд на процессы переработки минерального сырья // Современная техника и технологии. — 2015. — № 3. [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2015/03/5944>.
19. **Борщев В. Я.** Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы. — Тамбов: ТГТУ, 2004. — 75 с.
20. **Lomovskiy I., Bychkov A., Lomovsky O., and Skripkina T.** Mechanochemical and size reduction machines for biorefining, Molecules, 2020, Vol. 25, No. 22. — 5345.
21. **Новые технологии** // Центробежные дробилки и мельницы “Титан”. — 2005. — Вып. 6.
22. **Neikov O. D.** Mechanical crushing and grinding. Handbook of Non-Ferrous Metal Powders, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2009. — P. 47–62.
23. **Винокуров В. Р.** Испытания центробежных измельчителей с разной формой активаторов // ГИАБ. — 2008. — № S2. — С. 193–196.
24. **Матвеев А. И., Винокуров В. Р.** Особенности измельчения геоматериалов в центробежных аппаратах многократного динамического воздействия // ГИАБ. — 2011. — № 11. — С. 200–204.
25. **Пат. 2322299/2006.01 РФ В02С13/00.** Центробежный аппарат дезинтеграции / А. И. Матвеев, А. Н. Григорьев; заявитель и патентообладатель Учреждение ИГДС СО РАН им. Н. В. Черского № 2006106684/03; заявл. 03.03.2006 // Оpubл. в БИ. — 2008. — № 11.
26. **Пат. 2020119813 РФ В02С 7/00 (2021.01).** Вертикальный центробежный измельчитель / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров, А. Н. Григорьев; заявитель и патентообладатель ИГДС СО РАН им. Н. В. Черского № 2020119813; заявл. 08.06.2020 // Оpubл. в БИ. — 2021. — № 11.
27. **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.
28. **Матвеев А. И., Лебедев И. Ф., Винокуров В. Р., Львов Е. С.** Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых // Зап. Горн. ин-та. — 2022. — Т. 256. — С. 613–622.

Поступила в редакцию 04/IV 2023

После доработки 22/VI 2023

Принята к публикации 30/VI 2023