Геотехнология, обогащение полезных ископаемых

УДК 622.73
DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-2-5

Экспериментальные исследования по интенсификации процессов измельчения в ступенчатой центробежной мельнице

А.И. Матвеев, В.Р. Винокуров

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, Россия
vaviro@mail.ru

Аннотация. *Приведены результаты экспериментальных исследований процессов измельчения при многократном динамическом воздействии, реализованном в центробежной ступенчатой мельнице конструкции ИГДС СО РАН. Для повышения эффекта измельчения предложена установка дополнительных отбойных элементов на рабочих органах мельницы, что, однако, не всегда решает проблему, сказывается негативное влияние формирующихся воздушных потоков в рабочем пространстве между верхними и нижними рабочими органами. Опытно-конструкторскими работами установлено рациональное количество дополнительных отбойных элементов, определяемое критическим значением скорости воздушного потока в рабочей камере лабораторной ступенчатой мельницы до 10 м/с. При соблюдении этих условий достигается значительное повышение степени измельчения в сравнении с базовым вариантом лабораторной центробежной ступенчатой мельницы без отбойных элементов.*

Ключевые слова: центробежные мельницы, конструкция, измельчение, рабочие органы, эффективность измельчения, скорости вращения, частицы, измельченный материал, экспериментальные исследования.

DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-2-5

Experimental studies on the intensification of grinding processes in a step centrifugal mill

A.I. Matveev, V.R. Vinokurov

N. V. Chersky Mining Institute of the North, SB RAS, Yakutsk, Russia
vaviro@mail.ru

Abstract. *Results of the experimental studies of grinding processes under multiple dynamic impact in a centrifugal step mill designed at the MIN SB RAS are reported. To enhance the grinding effect, it is proposed to mount additional baffle elements at the movable bodies of the mill. However, this is not always a solution of the problem because there is a negative effect of air flows formed in the working space between the upper and lower movable bodies. A rational number of additional baffle elements, determined by the critical air flow rate in the working chamber of the laboratory step mill which should be up to 10 m/s was determined in research and development works. Under these conditions, a substantial increase in grinding degree is achieved, in comparison with the basic version of the laboratory centrifugal step mill without baffle elements.*

Key words: centrifugal mill, design, grinding, working bodies, grinding efficiency, rotation speed, particles, crushed material, experimental studies.

 © А.И. Матвеев, В.Р. Винокуров, 2019

Введение

Процессы измельчения являются самыми распространенными и очень энергоемкими операциями в технологических процессах. На измельчение ежегодно тратится не менее 4 % всей производимой энергии в мире. Для конкретных горных предприятий доля энергии, затрачиваемая на измельчение исходного сырья, составляет существенную величину – до 50 % и выше. Такая большая доля в общем энергетическом балансе подчеркивает важность данного передела, и вопрос совершенствования измельчительного оборудования всегда был и остается важной задачей, требующей новых решений и подходов [1–5]. В настоящее время многие исследования направлены на разработку малогабаритных и высокоэффективных измельчителей, наибольшее распространение среди которых получили центробежные измельчители ударного действия [6–11]. Это связано с тем, что они наименее энергозатратны, просты по конструкции и имеют небольшие габаритные размеры при относительно высокой производительности.

Большинство существующих ударных мельниц для измельчения в своих конструктивных решениях не учитывают многообразие физико-механических свойств измельчаемого сырья и реализуют ограниченные одно-двухактные механические воздействия, недостаточные для эффективного разрушения геоматериала. Повышение эффективности измельчения невозможно без новых решений в центробежных измельчителях, в частности, без совершенствования конструкций рабочих органов и определения рациональных технологических параметров работы измельчительных установок.

Большое влияние на эффективность работы центробежных ударных мельниц, кроме физико-механических свойств разрушаемого геоматериала [12, 13], оказывают многие технологические параметры измельчительных установок, такие как геометрические размеры, конструктивные особенности [14] и окружная скорость вращения рабочих органов, а также скорость формирующегося воздушного (аэродинамического) потока в рабочей камере мельницы, зависящая от рабочих режимов центробежной мельницы [15, 16].

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по определению влияния установки дополнительных отбойных элементов и скорости воздушного потока на эффективность измельчения в центробежной ступенчатой мельнице. Центробежная ступенчатая мельница разработана в лаборатории ОПИ ИГДС СО РАН [17–19], в ней реализован способ организации многократного ударного динамического воздействия на разрушаемый материал [20–23]. Целью нашей работы является определение рациональных конструктивных и технологических параметров центробежной ступенчатой мельницы для повышения эффективности измельчения.

Материалы и методика экспериментальных исследований

Центробежная ступенчатая мельница ударно-отражательного действия (рис. 1) состоит из герметичного цилиндрического разборного корпуса *1*, верхняя загрузочная часть которого выполнена в виде утопленной втулки *2* по оси, с бункером *3*, с фиксированным электродвигателем *4* на верхней поверхности так, чтобы привод *5* находился внутри корпуса, с разгрузочными отверстиями *6* на днище корпуса.

Внутренняя поверхность верхнего ротора выполнена ступенчатой формы, на вертикальной окружной стенке каждой ступени под углом расположены отбойные элементы. Верхний рабочий

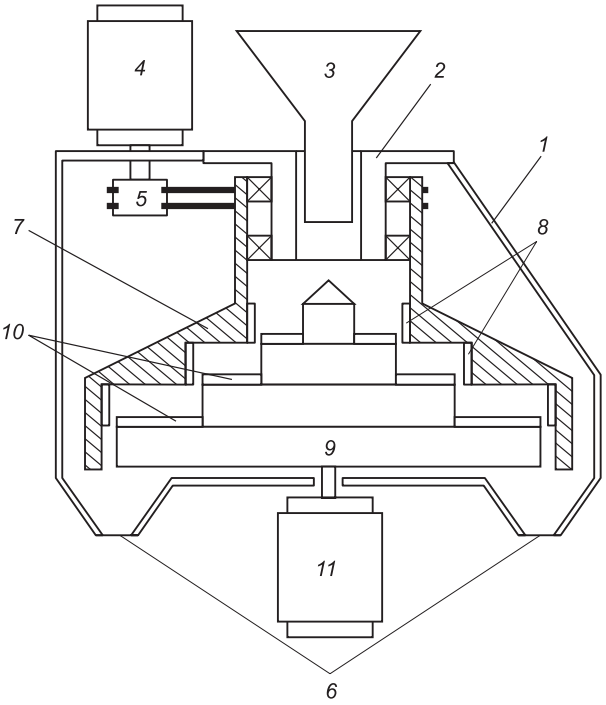


Рис. 1. Принципиальная конструкция ступенчатой центробежной мельницы.

Fig. 1. The basic design of a stepped centrifugal mill.

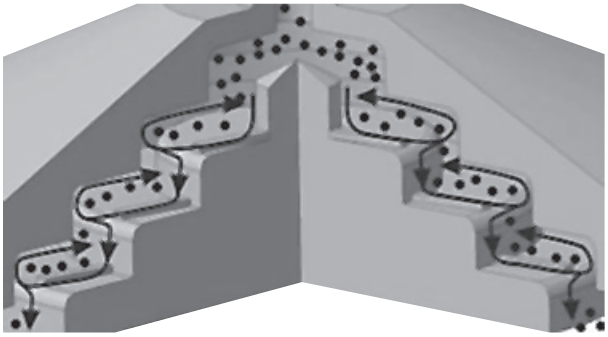


Рис. 2. Рабочая камера центробежной ступенчатой мельницы.

Fig. 2. Working chamber of a centrifugal speed mill.

орган вращается от привода верхнего электродвигателя.

Нижний рабочий орган *9* представляет собой ступенчатый конус с отбойными элементами *10* на каждой ступени и вращается противоположно по отношению к верхнему рабочему органу от двигателя *11*, установленного по оси на нижней части корпуса. Верхний и нижний рабочие органы установлены соосно таким образом, что уровни кромок ступеней в них примерно совпадают и за счет разности наружного диаметра ступени нижнего ротора и внутреннего диаметра ступени верхнего ротора образуют рабочую камеру (рис. 2).

В процессе работы исходная дезинтегрируемая порода загружается в приемный бункер *3* и поступает в мельницу через загрузочную втулку корпуса *2* на верхнюю ступень вращающегося нижнего рабочего органа *9*, где куски породы при помощи радиально установленных отбойных элементов приобретают максимальную радиальную скорость в крайней точке ступени и, выбрасываясь от нее, испытывают вероятные жесткие нормальные удары о вставные отбойные плиты *8*, закрепленные на внутренней стенке ступени противоположно вращающегося верхнего рабочего органа *7*.

Нераздробленные куски породы отскакивают, и снова получают удары о ребра разгонного диска и возвращаются обратно до тех пор, пока не раздробятся, а раздробленные частицы за счет потери импульса выпадают на вторую ступень разгонного диска, от которого выстреливаются и встречают удар об отбойные плиты соответствующей ступени верхнего рабочего органа. Процесс продолжается, пока не разгрузится дезинтегрированная порода под воздействием центробежных сил с последней ступени нижнего рабочего органа и не удалится через разгрузочные отверстия на днище корпуса. Корпус герметизируется для предотвращения выброса пыли наружу.

При экспериментальных исследованиях в лабораторной ступенчатой мельнице с диаметром нижнего рабочего органа 180 мм и верхнего рабочего органа 200 мм использовались навески черносланцевой руды массой 150 г и крупностью –3+2,5 мм. Измельчение происходило в мельнице с установкой разного количества дополнительных съемных отбойных элементов на каждой ступени нижнего рабочего органа. Для регулировки частоты вращения рабочих органов мельницы использовались лабораторные автотрансформаторы, частоты вращения замерялась тахометром АДС-лаб. Замеры скорости воздушных потоков при разной окружной скорости вращения рабочих органов мельницы производились в точках разгрузки мельницы с помощью анемометра АТТ-1004. Для обработки измельченных проб применялся ситовый анализатор со стандартной методикой определения гранулометрического состава.

Результаты исследований и их обсуждение

При экспериментальных исследованиях по определению влияния скорости воздушного потока на эффективность измельчения в базовом варианте лабораторной центробежной ступенчатой мельнице без отбойных элементов получены следующие результаты.

В табл. 1 показано возрастание скорости воздушного потока при увеличении окружной скорости вращения нижнего рабочего органа в сту-

Таблица 1

Значения скоростей воздушного потока при неподвижном верхнем рабочем органе

Table 1

Values of airspeed while stationary top working body

Частота оборотов, об/мин	Скорость воздушного потока, м/с
1000	2,78
2000	4,56
3000	5,75
4000	6,98
5000	8,19
6000	11,26
7000	14,21

Таблица 2

Значения скоростей воздушного потока при разной окружной скорости вращения верхнего рабочего органа

Table 2

Values of airspeed at different peripheral speeds rotation of the upper working body

Частота оборотов, об/мин	Скорость возд. потока, м/с
500	8,22
1000	8,89
1500	9,14
2000	9,49
2500	10,11
3000	11,42



Рис. 3. Выход контрольного класса крупности –0,071 мм при разной окружной скорости верхнего рабочего органа.

Fig. 3. The output of the control class size –0.071 mm with different peripheral speed of the upper working body.

пенчатой мельнице с неподвижным верхним рабочим органом.

В табл. 2 представлены значения скоростей воздушного потока при разной окружной скорости вращения верхнего рабочего органа в ступенчатой мельнице с наиболее рациональной частотой вращения нижнего рабочего органа 5000 об./мин.

Выход контрольного класса крупности –0,071 мм с частотой вращения нижнего рабочего органа 5000 об./мин и верхнего рабочего органа в диапазон с 500 об./мин до 3000 об./мин представлен на рис. 3.

Установлено (см. рис. 3), что при увеличении числа оборотов начиная с 1500 об/мин происходит повышение измельчения, характеризующееся увеличением выхода класса крупности –0,63 +0,315 мм. При этом после более 2000 об./мин повышения эффективности измельчения практически не происходит. Такой предел эффективности измельчения происходит из-за увеличения скорости воздушного потока в рабочей камере ступенчатой мельницы, который выносит из зоны измельчения неразрушенные частицы геоматериала.

Таким образом, экспериментальным путем определены рациональные окружные скорости вращения рабочих органов ступенчатой мельницы и предел скорости воздушного потока в рабочей камере лабораторной ступенчатой мельницы до 10 м/с, при превышении которого нарушаются условия образования циркуляции потоков измельчаемых частиц, вследствие чего эффективность измельчения снижается.

Далее были проведены экспериментальные исследования влияния установки дополнительных отбойных элементов на эффективность измельчения в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице. Исследования проводились без и с разным количеством дополнительных отбойных элементов в нескольких вариантах от 4 до 10 отбойных элементов на каждый ступени нижнего рабочего органа, при наиболее рациональных скоростях вращения верхнего рабочего органа 2000 об./мин и нижнего 5000 об./мин.

На рис. 4 представлены два варианта рабочих органов: без установки отбойных элементов; с восемью отбойными элементами на каждой ступени.

На рис. 5 представлены сравнительные результаты измельчения в лабораторной ступенчатой мельнице с разными вариантами отбойных элементов.

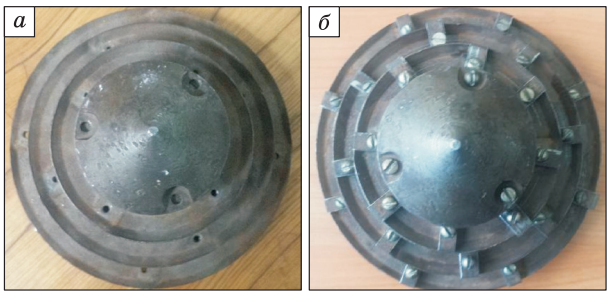


Рис. 4. Рабочие органы ступенчатой мельницы с дополнительными отбойными элементами: *а* – без отбойных элементов; *б* – с установкой 8 отбойных элементов.

Fig. 4. Working bodies of a step mill with additional fender elements: *а* – Without fender elements; *б* – with the installation of 8 fender elements.

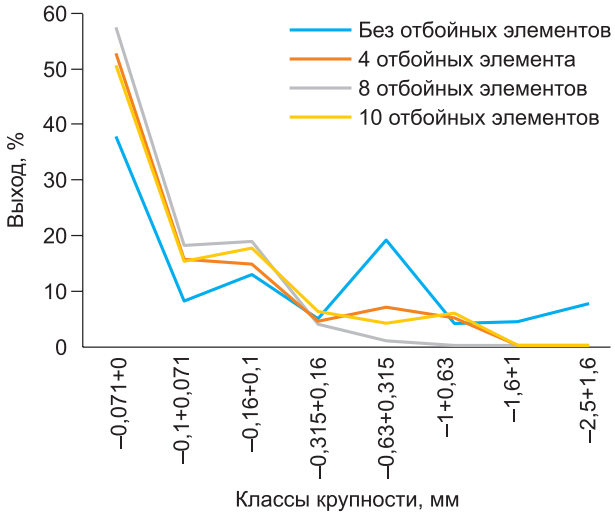


Рис. 5. Сравнительные результаты измельчения в лабораторной ступенчатой мельнице.

Fig. 5. Comparative results of grinding in the laboratory step mill.

Таблица 3

Значения скоростей воздушного потока с установкой разного количества отбойных элементов

Table 3

Values of airspeed with the installation of a different number of breaker elements

Количество отбойных элементов	Скорость возд. потока, м/с
–	9,4 м/с
4	9,7 м/с
8	10,2 м/с
10	11,9 м/с

По результатам измельчения видно, что при измельчении с установкой восьми отбойных элементов по сравнению с другими вариантами в продуктах измельчения практически отсутствует класс крупности +0,315 мм, с переходом его в более мелкие классы крупности, за счет чего происходит значительное повышение степени измельчения (см. рис. 5).

В табл. 3 представлены полученные значения скоростей воздушного потока в рабочей камере ступенчатой мельницы без и с установкой отбойных элементов. В табл. 4 приведены сравнительные данные по степени измельчения и выходу контрольного класса крупности –0,071 мм.

По таблицам 3 и 4 видно, что при установке и увеличении числа отбойных элементов меняются аэродинамические характеристики вращающихся рабочих органов ступенчатой мельницы при одних тех же наиболее рациональных скоростях вращения верхнего рабочего органа 2000 об./мин и нижнего 5000 об./мин, из-за чего происходит постепенное возрастание скорости воздушного потока в рабочей камере установки, также повышаются степень измельчения и выход контрольного класса крупности 0,071 мм. Установка отбойных элементов позволяет избежать проскока неразрушенных частиц и создает необходимые условия для циркулирования частиц на уровне каждой ступени в режиме самоизмельчения и динамических нагрузок. Однако после увеличения количества отбойных элементов более восьми начинает сказываться негативное влияние образующегося воздушного потока, критический уровень которого составляет 10 м/с, при превышении данного уровня показатели измельчения снижаются.

Таким образом, экспериментальным путем было определено рациональное количество от-

Таблица 4

Сравнение продуктов измельчения по степени измельчения и выхода контрольного класса крупности

Table 4

Comparison of grinding products according to the degree of grinding and exit control class size

Рабочие органы	Степень измельчения ($i = d_н/d_к$)	Выход контрольного класса крупности 0,071 мм, %
Без отбойных элементов	2	37,6
С 4 отбойными элементами	4,2	52,27
С 8 отбойными элементами	9,5	57,31
С 10 отбойными элементами	3,7	50,2

бойных элементов, определяемое критическим значением скорости воздушного потока в рабочей камере лабораторной ступенчатой мельницы до 10 м/с.

Заключение

Экспериментальными исследованиями установлено значительное повышение степени измельчения в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице многократного ударного действия за счет установки и определения рационального количества дополнительных отбойных элементов, необходимых для организации рациональных условий интенсификации динамических контактов разрушаемых частиц с рабочими органами. Также экспериментально установленная зависимость эффективности измельчения геоматериалов в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице от скорости воздушного потока в рабочей камере при разных окружных скоростях вращения рабочих органов мельницы позволяет определить наиболее рациональные рабочие режимы работы и повысить эффективность работы ступенчатой центробежной мельницы.

Литература

1. *Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю.* Состояние и перспективы комплексных системных исследований процессов измельчения сыпучих материалов // Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева. 1988. Т. XXXIII. № 4. С. 362.

2. *Кулебакин В.Г.* Применение механохимии в гидрометаллургических процессах. Новосибирск: Наука, 1988. 271 с.

3. *Смирнов Н.М.* Совершенствование процессов и оборудования для ударного измельчения материалов различной абразивности: Дис. д-ра техн. наук. Иваново, 1997. 390 с.

4. *Смирнов Н.М.* Пути совершенствования измельчителей ударного действия // Межд. конф. «Теоретические и экспериментальные основы создания нового оборудования».

5. *Царицин В.В.* Технологическое разрушение горных пород. Киев: Техника, 1964. 68 с.

6. *Барон Л.И., Коняшин Ю.Г.* Научные основы рациональных режимов разрушения горных пород механическими способами при динамическом приложении нагрузки. М.: Ин-т горного дела им. Скочинского, 1986. 57 с.

7. *Барон Л.И., Веселова Г.М., Коняшин Ю.Г.* Экспериментальные исследования горных пород ударом. М.: АН СССР, 1962. 219 с.

8. *Власов О.Е., Смирнов С.А.* Сравнение показателей работ различных измельчителей // Теор. основы хим. технологии. 1986. Т. 2, № 4. С. 831–837.

9. *Гуюмджян П.П.* Закономерности разрушения одиночных частиц ударом // Сб. трудов Ивановской государственной архитектурно-строительной академии. Иваново: ИГАСА, 1999. С. 38–41.

10. *Ладаев Н.М., Ваганов Ф.А., Гуюмджян П.П.* О давлении, возникающем в хрупком материале при ударе // Информационная среда вуза. XV Международная научно-техническая конференция. Иваново, 2008. С. 833–836.

11. *Ладаев Н.М., Гуюмджян П.П., Жбанова Е.В.* О критерии разрушения одиночных частиц хрупких материалов ударом // Информационная среда вуза. XV Международная научно-техническая конференция Иваново. 2008. С. 837–839.

12. *Oliveira J.F.G., Silvab R.J., Duoc C., Hashimoto's F.* Manufacturing Technology // Industrial Challenges in Grinding. 2009. V. 58, Iss. 2. P. 663–680.

13. *Buss B.* Uber die Einzelkornprall zerkleinerunq von Steinsalz und anderen Stoffen, Bergakademie. 1980. V. 22, № 10. P. 592–598.

14. *Hoon Lee, Heechan Cho, Jihoe Kwon.* Powder Technology. Using the discrete element method to analyze the breakage rate in a centrifugal/vibration mill/ Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, South Korea. Seoul. 2010. V. 198, Iss. 3. P. 364–372.

15. *Abiljanuly T.A., Abilzhanov D.T., Alshurina A.S.* To determining air flow rate in a forage shredders // Scientific proceedings II International scientific and Technical conference "Agricultural machinery". Varna, Bulgaria, 2014. P. 30–34.

16. *Потапов В.Я., Ляпцев С.А.* Математическое описание поведения рудных частиц в воздушном потоке разделительных аппаратов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 1. С. 7–10. URL: www. Scienceducation.ru/101-5493.

17. Патент №2150323 7 B 02 C 13/20. Центробежный измельчитель встречного удара / Матвеев А.И., Григорьев А.Н., Филиппов В.Е. / Ин-т горн. дела Севера СО РАН. Заявл. 28.10.97; Опубл. 10.06.2000 // Изобретения. Полезные модели. 2000. № 16, ч. 2. С. 268.

18. *Матвеев А.И., Львов Е.С., Винокуров В.Р.* Новое в рудоподготовке – аппараты дробления и измельчения многократного ударного действия // Горн. информ.-аналит. бюл. 2016. № 8 (спец. выпуск № 21). С. 242–252.

19. Патент № 2198028, 7 B 02 C 13/20. Центробежный измельчитель. Матвеев А.И., Григорьев А.Н., Винокуров В.Р. / Ин-т горн. дела Севера СО РАН. Заявл.11.01.01; Опубл. 10.02.2003 // Изобретения. Полезные модели. 2003. № 4. ч. 2. С. 338.

20. *Ревнивцев В.И., Гапонов В.Г., Загоратский Л.П. и др.* Селективное разрушение минералов. М.: Недра, 1988. 286 с.

21. *Газалеева Г.И., Цыпин Е.Ф., Червяков С.А.* Рудоподготовка. Дробление, грохочение, обогащение. Екатеринбург: ООО «УЦАО», 2014. 914 с.

22. *Saravacos G., Kostaropoulos Ath.E.* Handbook of Food Processing Equipment/Part of the series Food Engineering Series Date: 30 December 2015/Mechanical Processing Equipment, 2015. P. 149–232.

23. *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

References

1. *Kafarov V.V., Dorohov I.N., Arutyunov S.Yu.* Sostoyanie i perspektivy kompleksnyh sistemnyh issledovanij processov izmel'cheniya sypuchih materialov // Zhurnal VHO im. D.I. Mendeleeva. 1988. V. XXXIII. N 4. P. 362.

2. *Kulebakin V.G.* Primenenie mekhanohimii v gidrometallurgicheskih processah, Novosibirsk, Nauka. 1988. P. 271 .

3. *Smirnov N.M.* Sovershenstvovanie processov i oborudovaniya dlya udarnogo izmel'cheniya materialov razlichnoj abrazivnosti: dis. d-ra tekhn. nauk. Ivanovo, 1997. P. 390.

4. *Smirnov N.M.* Puti sovershenstvovaniya izmel'chitelej udarnogo dejstviya // Sb. dokladov III Mezhd. konf. "Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy sozdaniya novogo oborudovaniya". Ivanovo: IGHTA. 1997. P. 98.

5. *Caricin B.B.* Tekhnologicheskoe razrushenie gornyh porod Kiev: Tekhnika. 1964. P. 68.

6. *Baron L.I., Konyashin Yu.G.* Nauchnye osnovy racional'nyh rezhimov razrusheniya gornyh porod mekhanicheskimi sposobami pri dinamicheskom prilozhenii nagruzki M.: / In-t gornogo dela im. Skochinskogo, 1986. P. 57.

7. *Baron L.I., Veselova G.M., Konyashin Yu.G.* Eksperimental'nye issledovaniya gornyh porod udarom. M.: AN SSSR. 1962. P. 219.

8. *Власов О.Е., Смирнов С.А.* Сравнение показателей работ различных измельчителей // Теор. основы хим. технологии. 1986. Т. 2, № 4. С. 831–837.

9. *Guyumdzhyan P.P.* Zakonomernosti razrusheniya odinochnyh chastic udarom // Sb. trudov Ivanovskoj gosudarstvennoj arhitekturno-stroitel'noj akademii. Ivanovo, IGASA. 1999. P. 38–41.

10. *Ladaev N.M. Vaganov F.A., Guyumdzhyan P.P.* O davlenii, voznikayushchem v hrupkom materiale pri udare. Informacionnaya sreda vuza, XV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya — Ivanovo, 2008. P. 833–836.

11. *Ladaev, N.M., Guyumdzhyan P.P., Zhbanova E.V.* O kriterii razrusheniya odinochnyh chastic hrupkih materialov udarom. Informacionnaya sreda vuza, XV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya Ivanovo, 2008. P. 837–839.

12. *Oliveira J.F.G., Silvab R.J., Duoc C., Hashimoto's F.* Manufacturing Technology // Industrial Challenges in Grinding. 2009. V. 58, Iss. 2. P. 663–680.

13. *Buss B.* Uber die Einzelkornprall zerkleinerunq von Steinsalz und anderen Stoffen, Bergakademie. 1980. V. 22, № 10. P. 592–598.

14. *Hoon Lee, Heechan Cho, Jihoe Kwon.* Powder Technology. Using the discrete element method to analyze the breakage rate in a centrifugal/vibration mill/ Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, South Korea. Seoul. 2010. V. 198, Iss. 3. P. 364–372

15. *Abiljanuly T.A., Abilzhanov D.T., Alshurina A.S.* To determining air flow rate in a forage shredders // Scientific proceedings II International scientific and Technical conference "Agricultural machinery". Varna, Bulgaria, 2014. P. 30–34.

16. *Potapov V.Ya., Lyapcev S.A.* Matematicheskoe opisanie povedeniya rudnyh chastic v vozdushnom potoke razdelitel'nyh apparatov // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. N 1. P. 7–10. URL: www.Scienceducation.ru/101-5493.

17. *Patent* №2150323 7 V 02 S 13/20. Centrobezhnyj izmel'chitel' vstrechnogo udara /Matveev A I, Grigor'ev A.N., Filippov V.E. /In-t gorn. dela Severa SO RAN. Zayavl. 28.10.97; Opubl. 10.06.2000 // Izobreteniya. Poleznye modeli. 2000. N 16, Ch. 2. P. 268.

18. *Matveev A.I., L'vov E.S., Vinokurov V.R.* Novoe v rudopodgotovke – apparaty drobleniya i izmel'cheniya mnogokratnogo udarnogo dejstviya // Gorn. inform.-analit. byul. 2016. N 8 (special'nyj vypusk N 21). P. 242–252.

19. *Patent* №2198028, 7 V 02 S 13/20. Centrobezhnyj izmel'chitel' / Matveev A.I., Grigor'ev A.N., Vinokurov V.R. / In-t gorn. dela Severa SO RAN. Zayavl.11.01.01; Opubl. 10.02.2003 //Izobreteniya. Poleznye modeli. (2003) N 4. Ch. 2. P. 338.

20. *Revnivcev V.I., Gaponov V.G., Zagoratskij L.P.* Selektivnoe razrushenie mineralov. M.: Nedra. 1988. P. 286.

21. *Gazaleeva G.I., Cypin E.F., Chervyakov S.A.* Rudopodgotovka. Droblenie, grohochenie, obogashchenie. Ekaterinburg: OOO «UCAO», 2014. P. 914.

22. *Saravacos G., Kostaropoulos Ath.E.* Handbook of Food Processing Equipment/Part of the series Food Engineering Series Date: 30 December 2015/Mechanical Processing Equipment, 2015. P. 149–232.

23. *Hopunov E.A.* Novyj vzglyad na processy pererabotki mineral'nogo syr'ya// Sovremennaya tekhnika i tekhnologii. 2015. N 3 [Elektronnyj resurs]. URL: http://technology.snauka.ru/2015/03/5944

Поступила в редакцию 08.05.2019
Принята к публикации 23.05.2019

Об авторах

МАТВЕЕВ Андрей Иннокентьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, 677980, Якутск, проспект Ленина, 43, https://orcid.org/0000-0002-4298-599, andrei.mati@yandex.ru

ВИНОКУРОВ Василий Романович – младший научный сотрудник лаборатории «Обогащение полезных ископаемых», Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, 677980, Якутск, проспект Ленина, 43,
https://orcid.org/0000-0001-5698-7922, vaviro@mail.ru

About authors

MATVEEV Andrey Innokentievich, Doctor of Technical Sciences, Principal Researcher, N.V. Chersky Mining Institute of the North, SB RAS, 43 Lenina pr., Yakutsk, 677980, Russia,
https://orcid.org/0000-0002-4298-599, andrei.mati@yandex.ru

VINOKUROV Vasily Romanovich, Research Assistant, N. V. Chersky Mining Institute of the North, SB RAS, 43 Lenina pr., Yakutsk, 677980, Russia,
https://orcid.org/0000-0001-5698-7922, vaviro@mail.ru

Информация для цитирования:

А.И. Матвеев, В.Р. Винокуров. Экспериментальные исследования по интенсификации процессов измельчения в ступенчатой центробежной мельнице // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019, том 24, № 2. С. 56–62. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-2-5

Citation:

A.I. Matveev, V.R. Vinokurov. Experimental studies on the intensification of grinding processes in a step centrifugal mill // Arctic and Subarctic natural resources. 2019, vol. 24, No. 2, pp. 56–62. (In Russ.). https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-2-5