УДК 622.23.05

В.Р. Винокуров

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ПРОЦЕСС ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СТУПЕНЧАТОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Аннотация. Центробежная ступенчатая мельница разработана в ИГДС СО РАН, ее особенностью являются конструктивные особенности рабочих органов, обеспечивающих многократное динамическое воздействие на разрушаемый материал. Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, 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 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. Определение критических скоростей воздушного потока в рабочей камере центробежной ступенчатой мельницы и зависимости эффективности измельчения от скорости воздушного потока позволит определить наиболее рациональные рабочие режимы работы центробежной ступенчатой мельницы, такие как частота окружной скорости верхнего и нижнего рабочих органов, для предотвращения преждевременного выноса воздушным потоком неразрушенных частиц из рабочей зоны измельчения и для организации многократных динамических контактов разрушаемых частиц с рабочими органами, что позволит повысить эффективность работы ступенчатой центробежной мельницы.

Ключевые слова: центробежная мельница, воздушный поток, скорость, измельчение, рабочая камера, контрольный класс, частота вращения, рабочие органы.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-158-164

Влияние на эффективность работы центробежных ударных мельниц кроме физико-механических свойств разрушаемого геоматериала [1—2] оказывают многие технологические параметры измельчительных установок, такие как геометрические размеры, конструктивные особенности [3] и частота вращения рабочих органов, а также скорость формирующегося воздушного (аэродинамического) потока в рабочей камере мельницы, меняющаяся от рабочих режимов мельницы [4—5].

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по определению влияния скорости воздушного потока на эффективность измельчения в центробежной ступенчатой мельнице. Центробежная ступенчатая мельница (рис. 1) разработана в лаборатории ОПИ ИГДС СО РАН [6—8], в которой реализован способ организации многократного ударного столкновения разрушаемых частиц при наращивании энергии динамического воздействия [9], в отличии от большинства существую-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 9. С. 158–164.
© В.Р. Винокуров. 2018.

щих измельчительных аппаратов, которые реализуют ограниченные одно-двухактные механические воздействия на разрушаемый геоматериал, не согласующиеся с физикой разрушения геоматериалов, связанной с последовательными процессами образования первоначальных дефектов, развитием системы трещин от начальных до магистральных, вплоть до нарушения целостности единичных зерен [10—12].

Измельчитель представляет собой два вертикально установленных ротора, которые вставлены друг в друга и вращаются в противоположном направлении. Рабочие органы как нижнего, так и верхнего ротора выполнены в ступенчатой форме. Ступенчатая форма рабочих органов, кроме того что позволяет организовать циркулирование разрушаемых материалов между рабочими органами, еще и создает возможность увеличения скорости, компенсирующей уменьшение массы частиц в процессе измельчения.

Центробежная ступенчатая мельница ударно-отражательного действия 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. Внутренняя поверхность верхнего ротора выполнена ступенчатой формы, на вертикальной окружной стенке каждой ступени под углом расположены отбойные элементы. Верхний рабочий орган вращается от привода верхнего электродвигателя.

Нижний рабочий орган *9* представляет собой ступенчатой конус с разгонными ребрышками *10* на каждой ступени и вращается противоположно по отношению к верхнему рабочему органу от двигателя, установленного по оси на нижней части корпуса. Верхний и нижний рабочие органы соосно насаже-

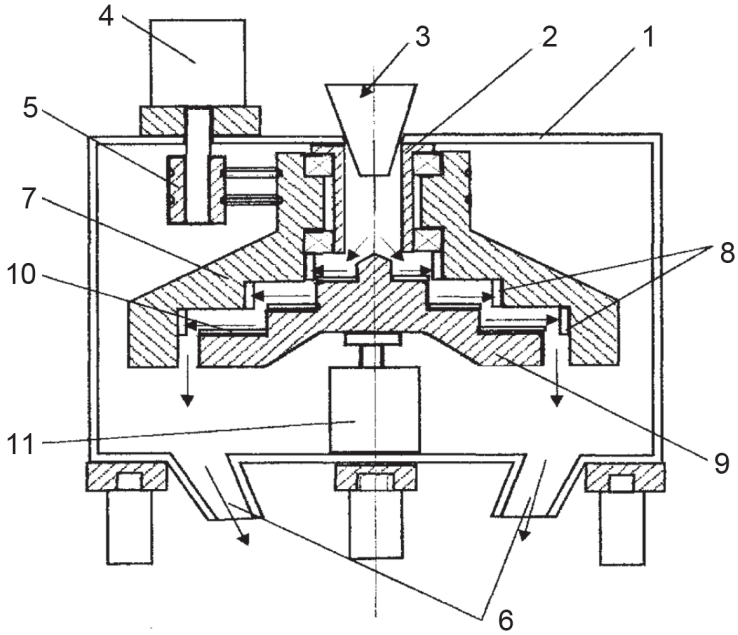

Рис. 1. Принципиальная конструкция ступенчатой центробежной мельницы
Fig. 1. Schematic configuration of centrifugal stage mill

ны 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.

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 разгонных ребрышек *10*,приобретают максимальную радиальную скорость в крайней точке ступени и, выбрасываясь от нее, испытывают жесткие нормальные удары об вставные отбойные плиты *8*, закрепленных на внутренней стенке ступени противоположно вращающегося верхнего рабочего органа *7*.

Не раздробленные куски породы отскакивают и снова получают удары об 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.

Верхний рабочий орган имеет отбойные элементы, закрепленные под определенным углом на внутренних вертикальных стенках каждой ступени, обеспечивающие нормальные встречные удары кусков породы, вылетающих от разгонного ступенчатого диска (нижнего рабочего органа). Эффект разрушения при этом достигается сложением противонаправленных импульсов, сообщаемых горной породе верхними и нижними дисками мельницы в момент удара.

Мельница также обеспечивает своевременный переход дезинтегрированной части породы, из-за потери инерции, на нижележащую ступень, где производится следующий цикл динамического воздействия. Нераздробленные куски породы, за счет сообщаемых знакопеременных импульсов со стороны рабочих органов находятся на этой ступени, многократно подвергаясь ударам рабочими органами мельницы до тех пор,

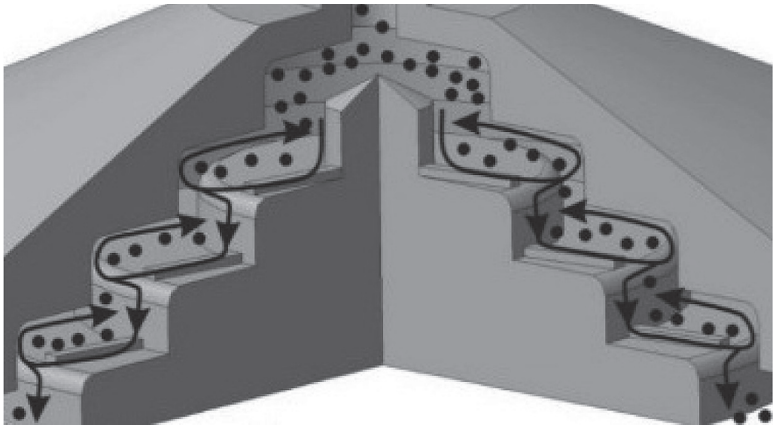

Рис. 2. Рабочая камера центробежной ступенчатой мельницы
Fig. 2. Work chamber of centrifugal stage mill

пока не раздробятся до степени, позволяющей переход на нижележащую ступень. А переход процесса измельчения по ступеням позволяет одновременно наращивать энергию динамического воздействия, чем достигается эффективность измельчения в целом.

На рис. 2 представлена рабочая камера центробежной ступенчатой мельницы.

При экспериментальных исследованиях в лабораторной ступенчатой мельнице использовалась черносланцевая руда крупностью –2,5+1,6 мм. Замеры скорости воздушных потоков при разной окружной скорости вращения рабочих органов мельницы производились в точках разгрузки мельницы с помощью анемометра АТТ-1004 (рис. 3).

Рис. 3. Анемометр АТТ-1004
Fig. 3. Anemometer ATT-1004

В табл. 1 показано возрастание скорости воздушного потока при увеличении окружной скорости вращения нижнего рабочего органа в ступенчатой 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. 4.

По рис. 4 установлено, 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 более 2000 об/мин повышения эффективности измельчения практически не происходит. Такой пре-

Таблица 1

Значения скоростей воздушного потока при неподвижном верхнем рабочем органе
Air flow rates at immobile upper operative part

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

Air flow rates at different rotation speeds of the upper operative part

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

дел 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 был определен предел скорости воздушного потока в рабочей камере лабораторной ступенчатой мельницы до 10 м/с при превышении которого нарушаются условия образования циркулирования потоков измельчаемых частиц, вследствие чего эффективность измельчения понижается.

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.

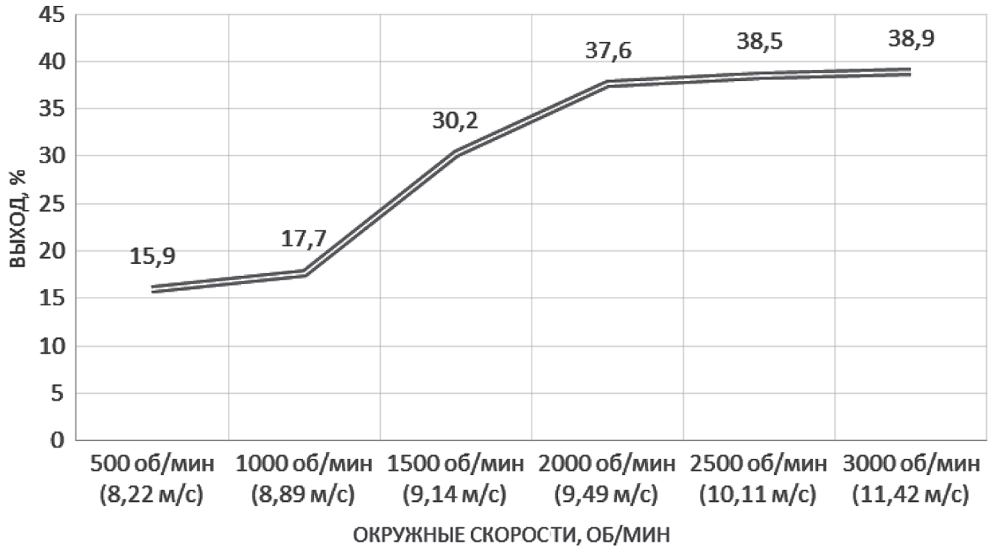

Рис. 4. Выход контрольного класса крупности –0,071 мм при разной окружной скорости верхнего рабочего органа

Fig. 4. Yield of check size grade of -0.071 mm at different rotation speeds of the upper operative part

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oliveira J.F.G., Silvab R.J., Duoc C., Hashimoto's F.* Manufacturing Technology // Industrial challenges in grinding. Vol. 58, Issue 2, 2009, pp. 663—680.

2. *Buss B.* Uber die Einzelkornprall zerkleinerunq von Steinsalz und anderen Stoffen. Bergakademie, 1980. 22. no 10, pp. 592—598.

3. *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.Volume 198, Issue 3, 25 March 2010, pp. 364—372.

4. *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, pp. 30—34.

5. *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.

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

7. *Матвеев А.И.*, *Львов Е.С.*, *Винокуров В.Р.* Новое в рудоподготовке — аппараты дробления и измельчения многократного ударного действия // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — СВ 21. — С. 242—252.

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

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

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

11. *George Saravacos, Athanasios E. Kostaropoulos.* Handbook of Food Processing Equipment / Part of the series Food Engineering Series Date: 30 December 2015 / Mechanical Processing Equipment, pp. 149—232.

12. *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. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Винокуров Василий Романович — младший научный сотрудник,
e-mail: vaviro@mail.ru,
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского
Сибирского отделения РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 9, pp. 158–164.

Experimental research into influence of air flow rate on grinding efficiency of centrifugal stage mill

Vinokurov V.R., Junior Researcher, e-mail: vaviro@mail.ru,
Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 677018, Yakutsk, Russia.

Abstract. The influence of air flow rate generated in work chambers of centrifugal impact mills is one of the basic factors of grinding efficiency. This article presents the experimental research results on the air

flow rate influence on grinding efficiency of centrifugal stage mill. The centrifugal stage mill engineered at the Institute of Mining of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, features special design of operative parts which ensure multiple impacts on treated material. The experimental research has found that with an increase in rotation speed starting from 1500 rpm, grinding efficiency is improved, which shows itself as the higher yield of particle size grade of -0.63 +0.315 mm. The rotation speed higher than 200 rpm results in no intensification of grinding. The grinding efficiency is enhanced at the specified rotation speed as the higher rate air flow removes unbroken particles from the grinding zone of the stage mill work chamber. Finding critical rates of air flow in work chamber of centrifugal stage mill and the grinding efficiency–air flow rate relationship will make it possible to determine the most rational operating parameters of centrifugal impact mills, such as rotational speeds of the upper and lower operating parts, in order to prevent early removal of unbroken particles from the grinding zone by air flow and to ensure multiple dynamic contacts between the particles and operative parts, which will enhance efficiency of centrifugal stage mills.

Key words: centrifugal mill, air flow, rate, grinding, work chamber, check size grade, rotation speed, operative parts.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-158-164

REFERENCES

1. Oliveira J. F. G., Silvab R. J., Duoc C., Hashimoto's F. Manufacturing Technology. *Industrial challenges in grinding*. Vol. 58, Issue 2, 2009, pp. 663—680.

2. Buss B. Uber die Einzelkornprall zerkleinerunq von Steinsalz und anderen Stoffen. *Bergakademie*, 1980. 22. no 10, pp. 592—598.

3. 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. Vol. 198, Issue 3, 25 March 2010, pp. 364—372.

4. 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, pp. 30—34.

5. Potapov V. Ya., Lyaptsev S. A. Matematicheskoe opisanie povedeniya rudnykh chastits v vozdushnom potoke razdelitel'nykh apparatov [Mathematic description of behavior of ore particles in air flow in separation equipment]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012, no 1, pp. 7—10. URL: www. Scienceducation.ru/101-5493.

6. Matveev A. I., Grigor'ev A. N., Filippov V. E. *Patent RU 2150323 7 V 02 S 13/20*, 10.06.2000.

7. Matveev A. I., L'vov E. S., Vinokurov V. R. Novoe v rudopodgotovke apparaty drobleniya i izmel'cheniya mnogokratnogo udarnogo deystviya [Innovations in ore pretreatment—Multiple-impact grinding and milling equipment]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, Special edition 21, pp. 242—252. [In Russ].

8. Matveev A. I., Grigor'ev A. N., Vinokurov V. R. *Patent RU 2198028, 7 V 02 S 13/20*, 10.02.2003.

9. Revnivtsev V. I., Gaponov V. G., Zagoratskiy L. P. *Selektivnoe razrushenie mineralov* [Selective breakage of mineral], Moscow, Nedra, 1988, 286 p.

10. Gazaleeva G. I., Tsypin E. F., Chervyakov S. A. *Rudopodgotovka. Droblenie, grokhochenie, obogashchenie* [Ore pretreatment. Grinding, screening, concentration], Ekaterinburg, OOO «UTSAO», 2014, 914 p.

11. George Saravacos, Athanasios E. Kostaropoulos. Handbook of Food Processing Equipment / Part of the series Food Engineering Series Date: 30 December 2015. *Mechanical Processing Equipment*, pp. 149—232.

12. Khopunov E. A. Novyy vzglyad na protsessy pererabotki mineral'nogo syr'ya [New insight into mineral processing]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*. 2015, no 3. URL: http://technology.snauka.ru/2015/03/5944.