

УДК 621.926.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА КУСКОВ ХРУПКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДРОБЛЕНИИ В ОДНОВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКЕ С УПОРОМ НА ВАЛКЕ

**Никитин А.Г.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор кафедры «Механика и машиностроение» (nikitin1601@yandex.ru)

**Епифанцев Ю.А.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Механика и машиностроение» (epifantsev42@mail.ru)

**Медведева К.С.<sup>1</sup>**, ведущий инженер (ksuwinchester@mail.ru)

**Герике П.Б.<sup>2</sup>**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории средств механизации (am\_besten@mail.ru)

**Фастыковский А.Р.<sup>1</sup>**, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» (omd@sibsiu.ru)

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН  
(650000, Россия, Кемерово, пр. Советский, 18)

**Аннотация.** Переработка используемых в металлургической промышленности сыпучих материалов для получения необходимых классов крупности требует использования дробильных машин, в том числе и одновалковых. Показателями процесса дробления являются степень и эффективность дробления. Степень дробления оценивается отношением размеров исходного дробимого и получаемого кусков, зависит от величины зазора между валком и неподвижной щекой. В Сибирском государственном индустриальном университете спроектирована, изготовлена и запатентована опытно-экспериментальная установка для проведения исследований процесса дробления. Установка представляет собой одновалковую дробилку с упором на валке. Проведена серия экспериментов по дроблению различных образцов (по форме, размеру и прочности). Описана методика проведения эксперимента и конструкция одновалковой дробилки с упором на валке. Представлены результаты разрушения образцов изотропного материала, изготовленных из цементно-песчанной смеси, правильной (сферической) формы. Образцы из изотропного материала позволяют сравнивать аналитические выводы определения положения плоскости действия максимальных касательных напряжений с экспериментальными данными. Также разрушены образцы из анизотропного материала (на примере ферросплава). Экспериментально определено, что чем больше величина зазора между валком и неподвижной щекой, тем крупнее размер фракции готового продукта и меньше переизмельчение, чем при дроблении такого же куска при меньшем зазоре. При этом степень дробления в одновалковой дробилке с упором на валке не может быть равна 4 и более. Доказано, что разрушение изотропных материалов происходит по плоскости действия максимальных касательных напряжений. Анизотропные материалы разрушаются в зависимости от величины зазора между валком и щекой как по плоскости действия максимальных касательных напряжений, так и по плоскостям наименьшего сопротивления.

**Ключевые слова:** одновалковая дробилка, кусок, валок, упор, щека, степень дробления, зазор, фракция.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-554-559

### ВВЕДЕНИЕ

Многие промышленные производства перерабатывают сыпучие материалы различных классов крупности. Для получения необходимого размера фракции сырья применяются различные агрегаты. Подавляющее большинство подвергаемых измельчению материалов являются хрупкими, поэтому задача решается путем дробления исходных кусков большого размера. При этом должен выдерживаться соответствующий фракционный состав готового продукта, к которому предъявляются жесткие требования, так как переизмельченный продукт в дальнейшем чаще всего не используется, а идет в отвал [1 – 8].

Конструкции существующих дробильных машин и способы дробления имеют ряд существенных недостатков, которые связаны с высокой энергоемкостью,

относительно низкой производительностью процесса дробления и переизмельчением дробимого материала. Перспективным является направление совершенствования конструкций дробильных машин, основанное на реализации способов дробления высокой производительности, генерирующих в разрушаемых кусках сложное напряженное состояние посредством одновременно действующих нормальных и касательных напряжений. Усовершенствование конструкций дробильных машин связывается с уточнением закономерностей процесса разрушения рудных и нерудных материалов, разработкой научных и методологических основ повышения производительности машин с минимальными удельными энергозатратами на дробление, так как удельный расход энергии на единицу получаемой продукции является одним из основных технико-экономических показателей работы дробильных машин.

Для дробления исходного материала в основном используются дробильные машины, в том числе и одновалковые, которые в последнее время получили широкое распространение [9 – 17].

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Запатентована разработанная в Сибирском государственном университете конструкция одновалковой дробилки с принудительной подачей разрушаемого материала в зону дробления [18], в которой захват дробимого куска происходит за счет упора, расположенного на валке.

Схема одновалковой дробилки с упором на валке показана на рис. 1. Дробилка работает следующим образом: кусок дробимого материала *1* подается в зазор между приводным вращающимся валком *2* и неподвижной щекой *3*, затягивается в него под действием силы трения между валком и дробимым материалом и дробится [19]. Вертикальная составляющая этой силы трения направлена в сторону зазора между валком *2* и неподвижной щекой *3*. Однако при увеличении степени дробления (то есть отношения размера  $2r$  дробимого куска к величине зазора *a* между валком и неподвижной щекой) угол захвата  $\alpha$  увеличивается и это может привести к тому, что вертикальная составляющая силы трения между валком и дробимым материалом будет направлена в сторону, противоположную от зазора между валком *2* и неподвижной щекой *3*, при этом будет происходить проскальзывание куска *1* по поверхности валка *2* без захватывания куска в зону дробления. В этом случае при вращении валка упор *4* рабочей поверхностью соприкасается с куском и начинает давить на кусок: при этом возникает сила, действующая на кусок

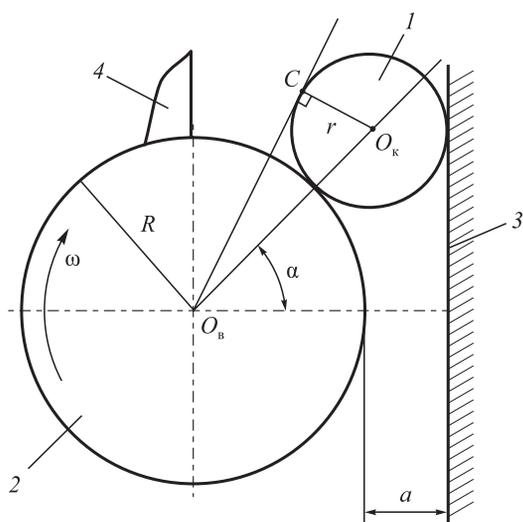


Рис. 1. Схема одновалковой дробилки с упором на валке:  
 1 – дробимый кусок; 2 – рабочий валок; 3 – неподвижная щека;  
 4 – упор

Fig. 1. Diagram of a single-roll crusher with a block stop on the roll:  
 1 – crushed piece; 2 – work roll; 3 – steady jaw; 4 – block stop

и направленная в сторону зазора, кусок материала принудительно подается в зону дробления и дробится [20].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения фракционного состава раздробленного различного материала с разной степенью дробления была проведена серия экспериментов на исследовательской установке. Опытно-экспериментальная установка (рис. 2) представляет собой одновалковую дробилку с упором на валке с возможностью регулирования зазора между валком и щекой. Установка состоит из рамы; двигателя мощностью 3 кВт, соединенного с редуктором (передаточное отношение  $i_p = 15,3$ ), приводного валка (диаметр валка 180 мм, число оборотов в минуту 100); жесткой вертикальной щеки.

Образцы диам. 40 мм дробили с установленным на дробилке зазором 26, 20, 13 и 10 мм. На рис. 3, *a – в* приведены результаты влияния степени дробления на фракционный состав готового продукта при разрушении образцов сферической формы из цементно-песчаной смеси (изотропный материал) на одновалковой дробилке с упором на валке.

При дроблении образцов с установленным зазором между вращающимся валком и неподвижной щекой 10 мм разрушение происходит следующим образом: происходит глобальное разрушение образца в точке контакта упора с куском на два фрагмента; после этого нижняя часть образца проваливается под упор, а верхняя, большая часть, переваливается через упор и попадает в следующий карман, при этом нижняя часть дробится упором и полученные фрагменты проваливаются в зазор; затем верхняя часть образца попадает под следующий кусок, аддитивность процесса нарушается, из-за чего происходит сильное переизмельчение фрагмента (рис. 3, *г*).



Рис. 2. Опытно-экспериментальная установка одновалковой дробильной машины с упором на валке

Fig. 2. Pilot unit of a single-roll crusher with a block stop on the roll

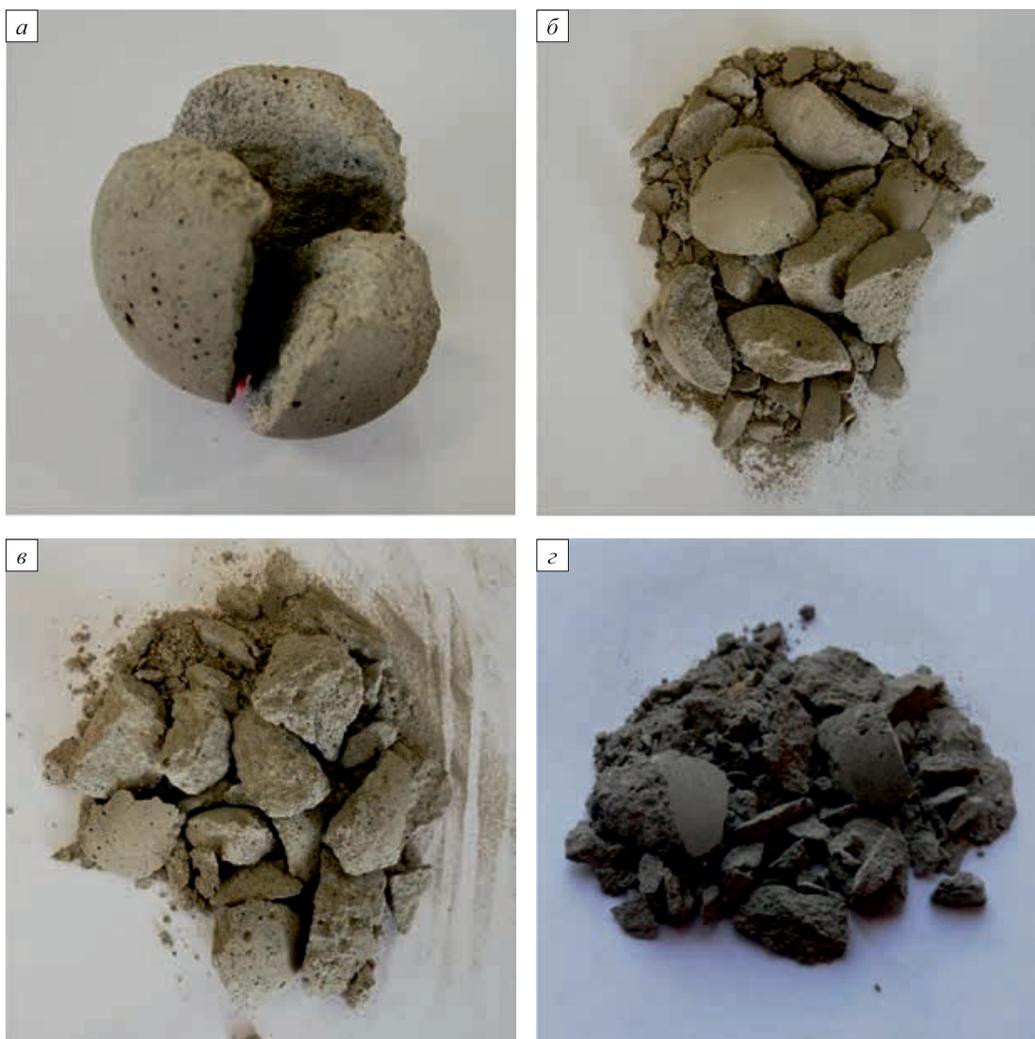


Рис. 3. Разрушение образцов из цементно-песчаной смеси в одновалковой дробилке с упором при степени дробления 1,5 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Fig. 3. Destruction of the samples made of cement-sand mixture in a single-roll crusher with a block stop at crushing degree of 1.5 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Таким образом установлено, что степень дробления в одновалковой дробилке с упором на валке не может быть равна 4 и более.

Из анализа результатов экспериментов можно сделать вывод, что, чем больше величина зазора между валком и неподвижной щекой, тем крупнее размер фракции готового продукта и меньше переизмельчение, чем при дроблении такого же куска при использовании меньшего зазора. Связано это с тем, что чем больше величина зазора, тем меньше степень дробления и меньше количество плоскостей действия максимальных касательных напряжений, по которым происходит разрушение.

Все сказанное выше относилось к разрушению изотропных материалов, то есть материалов, физические свойства которых одинаковы во всех направлениях. Однако дроблению подлежат не только изотропные, но и анизотропные материалы. Необходимо учитывать, что в отличие от изотропных материалов, которые раз-

рушаются в одновалковой дробилке с упором на валке по плоскостям максимальных касательных напряжений, разрушение анизотропных материалов происходит по плоскостям наименьшего сопротивления. В связи с этим были разрушены образцы кубовидной формы со стороной 40 мм из ферросплава (анизотропный материал) (рис. 4).

Эксперименты показали, что при дроблении в одновалковой дробилке с упором на валке как изотропных материалов, так и анизотропных материалов фракционный состав готового продукта практически одинаковый (см. таблицу).

## Выводы

Экспериментально определено, что чем больше величина зазора между валком и неподвижной щекой, тем крупнее размер фракции готового продукта и меньше переизмельчение, чем при дроблении такого

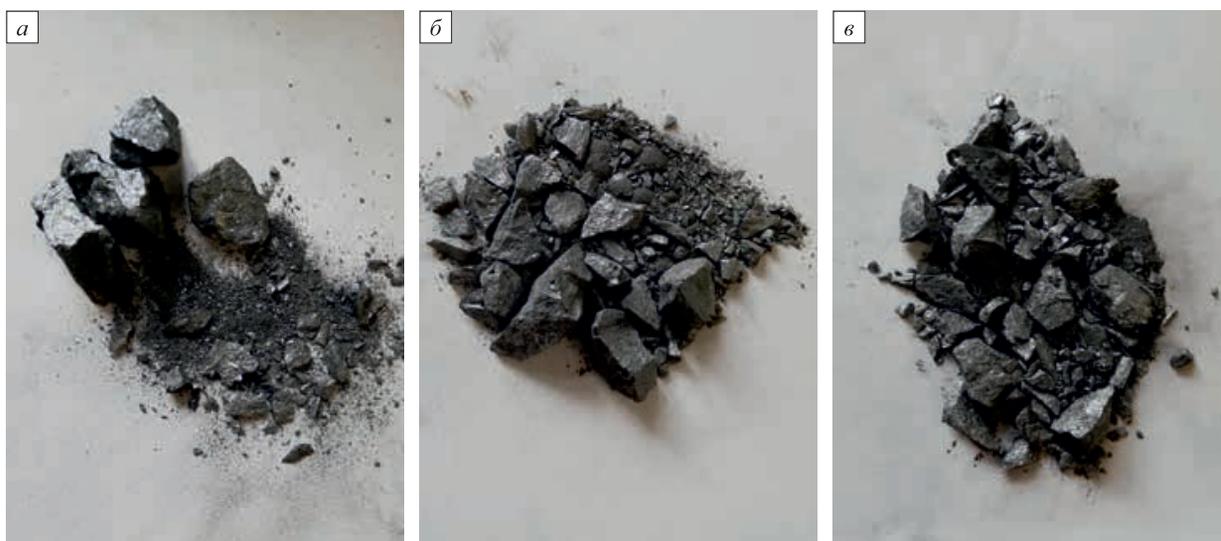


Рис. 4. Разрушение образцов ферросплава в одновалковой дробилке с упором при степени дробления 1,5 (а), 2 (б), 3 (в)

Fig. 4. Destruction of the samples made of ferroalloy in a single-roll crusher with a block stop at crushing degree of 1.5 (a), 2 (b), 3 (c)

#### Содержание кусков готового продукта

##### Composition of the finished product

| а,<br>мм                           | Содержание кусков готового продукта, % (по массе),<br>при среднем размере куска, мм |        |         |          |
|------------------------------------|---|--------|---------|----------|
|                                    | менее 3   | 3 – 10 | 10 – 16 | более 16 |
| образцы из цементно-песчаной смеси |   |        |         |          |
| 13                                 | 12  | 25     | 28      | 35       |
| 20                                 | 10  | 15     | 30      | 50       |
| 26                                 | –   | –      | –       | 100      |
| образцы из ферросплава             |   |        |         |          |
| 13                                 | 18  | 20     | 32      | 30       |
| 20                                 | 15  | 18     | 25      | 42       |
| 26                                 | 5   | 10     | 35      | 50       |

же куска при меньшем зазоре. При этом степень дробления в одновалковой дробилке с упором на валке не может быть равна 4 и более. Доказано, что разрушение изотропных материалов происходит по плоскости действия максимальных касательных напряжений. Анизотропные материалы разрушаются в зависимости от величины зазора между валком и щекой как по плоскости действия максимальных касательных напряжений, так и по плоскостям наименьшего сопротивления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. Stantec Consulting. – Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008. – 330 p.
- Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, fabrication and testing of a double roll crusher // *Int. Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2016. Vol. 35. No. 11. P. 511 – 515.
- Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. Экспериментальное исследование дробления хрупких материалов в одновалковой дробилке // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2011. № 6. С. 52.
- Austin L.G., Van Orden D., McWilliams B., Perez J.W., Shoji K. Breakage parameters of some materials in smooth roll crushers // *Powder Technology*. 1981. Vol. 28. No. 2. P. 245 – 251.
- Zhao L.L., Zang F., Wang Z.B. Design and motion simulation for differential and grading toothed roll crusher // *Coal Mine Machinery*. 2007. Vol. 28. No. 6. P. 19 – 21.
- Zhao L.L., Wang Z.B., Zang F. Multi-object optimization design for differential and grading toothed roll crusher using a genetic algorithm // *Journal of China University of Mining and Technology*. 2008. Vol. 18. No. 2. P. 316 – 320.
- Sajjan Kumar Soni, Satish Chandra Shukla, Gautam Kundu. Modeling of particle breakage in a smooth double roll crusher // *Int. Journal of Mineral Processing*. 2009. Vol. 90. No. 1-4. P. 97 – 100.
- Болтенгаден И.Л., Власов В.Н., Клишин В.И. Расчет параметров валкового пресса для дробления кимберлитовой руды // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2003. № 3. С. 61 – 72.
- Cotabarren I., Schulz P.G., Bucalá V., Piña J. Modeling of an industrial double-roll crusher of a urea granulation circuit // *Powder Technology*. 2008. Vol. 183. No. 2. P. 224 – 230.
- Velletri P., Weedon D.M. Comminution in a non-cylindrical roll crusher // *Minerals Engineering*. 2001. Vol. 14. No. 11. P. 1459 – 1468.
- Morrell S. Predicting the specific energy required for size reduction of relatively coarse feeds in conventional crushers and high pressure grinding rolls // *Minerals Engineering*. 2010. Vol. 23. No. 2. P. 151 – 153.
- Shirong Zhang, Wei Mao. Optimal operation of coal conveying systems assembled with crushers using model predictive control methodology // *Applied Energy*. 2017. Vol. 198. P. 65 – 76.
- Schaefer H.U. Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals // *Minerals Engineering*. 2001. Vol. 14. No. 10. P. 1155 – 1160.
- Lieberwirth H., Hillmann Ph., Hesse M. Dynamics in double roll crushers // *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 103-104. P. 60 – 66.
- Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. *Дробилки*. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
- Масленников В.А. Дробилки, разрушающие материал сжатием // *Изв. вуз. Горный журнал*. 1996. № 10-11. С. 124 – 138.

17. Клушанцев Б.В. Валковые дробилки. Их параметры и метод расчета мощности // Строительные и дорожные машины. 1982. № 8. С. 23 – 24.
18. Пат. 2603923 РФ. Валковая дробилка / Никитин А.Г., Лактионов С.А., Баженов И.А., Медведева К.С.; заявл. 20.10.2015; опубл. 10.12.2016. Открытия. Изобретения. Бюл. № 34.
19. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. Анализ сил, действующих на кусок дробимого материала в одновалковой дробилке. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 10. С. 41 – 42.
20. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С., Герике П.Б. Силовой анализ процесса разрушения хрупких материалов в одновалковой дробильной машине с упором на валке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 4. С. 303 – 307.

Поступила в редакцию 24 декабря 2019 г.  
После доработки 28 января 2020 г.  
Принята к публикации 7 февраля 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 7, pp. 554–559.

## EXPERIMENTAL STUDY OF FRACTIONAL COMPOSITION OF PIECES OF BRITTLE MATERIAL DURING CRUSHING IN A SINGLE-ROLL CRUSHER WITH BLOCK STOP ON THE ROLL

A.G. Nikitin<sup>1</sup>, Yu.A. Epifantsev<sup>1</sup>, K.S. Medvedeva<sup>1</sup>, P.B. Gerike<sup>2</sup>, A.R. Fastyskovskii<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

<sup>2</sup>Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of SB RAS, Russia, Kemerovo Region – Kuzbass, Kemerovo

**Abstract.** Processing of bulk materials used in metallurgical industry to obtain necessary grades of size requires application of crushing machines, including a single-roll type. Indicators of crushing process are degree and efficiency of crushing. Degree of crushing is estimated by the ratio of size of initial crushed and resulting pieces, which depends on size of the gap between a roll and a fixed jaw. The Siberian State Industrial University has patented, designed and manufactured a pilot unit, which is a single-roll crusher with block stop on the roll to study crushing process. A series of experiments on different samples (in shape, size and strength) crushing was carried out on the developed unit. Technique of the experiment and the design of a single-roll crusher with block stop on the roll were described. Results of destruction of the samples of isotropic material made of sand-cement mixture of regular (spherical) shape are presented. Samples from isotropic material allow comparison of analytical conclusions of determining position of the plane of action of maximum tangential stresses with experimental data. Samples of anisotropic material (for example, ferroalloy) were also destroyed. It was experimentally determined that the larger is clearance between the roll and the fixed jaw, the larger is the size of fraction of finished product and over-grinding is less than after crushing the same piece with a smaller clearance. The degree of crushing in a single-roll crusher with block stop on the roll cannot be equal to 4 or more. It was proved that destruction of isotropic materials occurs along the plane of action of maximum tangential stresses. Anisotropic materials are destroyed, depending on size of clearance between a roll and a jaw, both on the plane of action of the maximum tangential stresses and on the planes of least resistance.

**Keywords:** single-roll crusher, piece, roll, stop, jaw, crushing degree, clearance, fraction.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-554-559

### REFERENCES

- Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008, 330 p.
- Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, fabrication and testing of a double roll crusher. *Int. Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2016, vol. 35, no. 11, pp. 511–515.
- Nikitin A.G., Sakharov D.F. Experimental study of brittle materials breaking in a single-roll crusher. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 6, pp. 53. (In Russ.).
- Austin L.G., Van Orden D., McWilliams B., Perez J.W., Shoji K. Breakage parameters of some materials in smooth roll crushers. *Powder Technology*. 1981, vol. 28, no. 2, pp. 245–251.
- Zhao L.L., Zang F., Wang Z.B. Design and motion simulation for differential and grading toothed roll crusher. *Coal Mine Machinery*. 2007, vol. 28, no. 6, pp. 19–21.
- Zhao L.L., Wang Z.B., Zang F. Multi-object optimization design for differential and grading toothed roll crusher using a genetic algorithm. *Journal of China University of Mining and Technology*. 2008, vol. 18, no. 2, pp. 316–320.
- Sajjan Kumar Soni, Satish Chandra Shukla, Gautam Kundu. Modeling of particle breakage in a smooth double roll crusher. *Int. Journal of Mineral Processing*. 2009, vol. 90, no. 1-4, pp. 97–100.
- Boltengagen I.L., Vlasov V.N., Klishin V.I. Calculation of roller-press parameters for kimberlite ore crushing. *Journal of Mining Science*. 2003, vol. 39, no. 3, pp. 260–270.
- Cotabarren I., Schulz P.G., Bucalá V., Piña J. Modeling of an industrial double-roll crusher of a urea granulation circuit. *Powder Technology*. 2008, vol. 183, no. 2, pp. 224–230.
- Velletri P., Weedon D.M. Comminution in a non-cylindrical roll crusher. *Minerals Engineering*. 2001, vol. 14, no. 11, pp. 1459–1468.
- Morrell S. Predicting the specific energy required for size reduction of relatively coarse feeds in conventional crushers and high pressure grinding rolls. *Minerals Engineering*. 2010, vol. 23, no. 2, pp. 151–153.
- Shirong Zhang, Wei Mao. Optimal operation of coal conveying systems assembled with crushers using model predictive control methodology. *Applied Energy*. 2017, vol. 198, pp. 65–76.
- Schaefer H.U. Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals. *Minerals Engineering*. 2001, vol. 14, no. 10, pp. 1155–1160.
- Lieberwirth H., Hillmann Ph., Hesse M. Dynamics in double roll crushers. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 103-104, pp. 60–66.
- Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. *Drobilki* [Crushers]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 320 p. (In Russ.).
- Maslennikov V.A. Compressive crushers. *Izv. vuz. Gornyi zhurnal*. 1996, no. 10-11, pp. 124–138. (In Russ.).
- Klushantsev B.V. Roll crushers. Their parameters and power calculation method. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 1982, no. 8, pp. 23–24. (In Russ.).
- Nikitin A.G., Laktionov S.A., Bazhenov I.A., Medvedeva K.S. *Valkovaya drobilka* [Roller crusher]. Patent RF no. 2603923. *Byulleten' izobretenii*. 2016, no. 34. (In Russ.).
- Nikitin A.G., Sakharov D.F. Analysis of forces acting on material piece at breaking in single-roll crusher. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 10, pp. 41–42. (In Russ.).
- Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S., Gerike P.B. Power analysis of the process of brittle materials destruction in univer-

sal crushing machine with roll locke. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 4, pp. 303–307. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**A.G. Nikitin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mechanics and Machine Engineering (nikitin1601@yandex.ru)

**Yu.A. Epifantsev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Mechanics and Mechanical Engineering (epifantsev42@mail.ru)

**K.S. Medvedeva**, Leading Engineer (ksuwinchester@mail.ru)

**P.B. Gerike**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Means of Mechanization (am\_besten@mail.ru)

**A.R. Fastyskovskii**, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Metal Forming and Metal Science. OJSC “EVRAZ ZSMK” (omd@sibsru.ru)

Received December 14, 2020

Revised January 28, 2020

Accepted February 7, 2020

---