

УДК 621.926.323

СИЛОВОЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ В ОДНОВАЛКОВОЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЕ С УПОРОМ НА ВАЛКЕ

*Никитин А.Г.¹, д.т.н., доцент, директор института машиностроения
и транспорта (nikitin1601@yandex.ru)*

Епифанцев Ю.А.¹, к.т.н., доцент кафедры «Механика и машиностроение»

Медведева К.С.¹, аспирант кафедры «Механика и машиностроение» (ksuwinchester@mail.ru)

*Герике П.Б.², к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории средств
механизации (am_besten@mail.ru)*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
(650099, Россия, г. Кемерово, пр-т Советский, 18)

Аннотация. Переработка сыпучих материалов, используемых в металлургической промышленности для получения необходимых классов крупности, требует эксплуатации дробильных машин, в том числе и одновалковых. Показателями процесса дробления являются степень и энергоёмкость дробления. Степень дробления оценивается отношением размеров исходного дробимого и получаемого кусков и зависит от величины зазора между валком и неподвижной щекой. Энергоёмкость дробления определяется массой дробленого материала, получаемой при расходе единицы электроэнергии, и зависит, главным образом, от прочности дробимого материала. С целью снижения расхода энергии на дробление в Сибирском государственном индустриальном университете разработана одновалковая дробилка с принудительной подачей дробимого куска в зону разрушения за счет упора, расположенного на валке. Силы технологического сопротивления, возникающие в процессе эксплуатации машины, являются основными исходными величинами для расчета мощности привода машины и элементов конструкции на прочность, поэтому силовой анализ рабочего процесса является неотъемлемым этапом проектирования любой машины, в том числе и дробильной. В настоящей работе выявлены силы, действующие на дробимый кусок со стороны валка и неподвижной щеки в вертикальной и горизонтальной плоскостях. На основании полученных результатов определено, что на кусок дробимого материала действуют как внутренние сжимающие силы, вызывающие в куске действие нормальных сжимающих напряжений, так и внутренних крутящий момент, вызывающий действие касательных напряжений, т.е. в дробимом куске создается сложное напряженное состояние с одновременным действием нормальных и касательных напряжений, под действием которых происходит разрушение дробимого куска. Этим достигается уменьшение расхода энергии на дробление при прочих равных условиях, что уменьшает энергоёмкость работы одновалковой дробилки с принудительной подачей материала в зону дробления.

Ключевые слова: одновалковая дробилка, степень дробления, упор, сила, напряжение, энергоёмкость.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-303-307

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее энергоёмких процессов в металлургическом, горном, строительном и других производствах является дробление сыпучих материалов различных классов крупности. Ежегодно из недр Земли извлекаются и перерабатываются около 25 млрд. т минерального сырья. Для их переработки расходуются десятки гигаватт часов энергии в основном на дробление, в том числе и на одновалковых дробилках, которые в последнее время получили широкое распространение [1 – 11].

Нужная крупность материала достигается в процессе дробления путем измельчения более крупных кусков. Эффективность процесса оценивается степенью и энергоёмкостью дробления [12]. Степень дробления определяется отношением размеров исходного дробимого

и получаемого кусков, а энергоёмкость – массой дробленого материала, получаемой при расходе единицы электроэнергии, и зависит, главным образом, от прочности дробимого материала.

Основным недостатком валковых дробилок является малая степень дробления, которая в первую очередь зависит от угла захвата дробимого куска и диаметра валка, при этом угол захвата ограничивается коэффициентом трения между валком и куском. Значения коэффициента трения для минерального сырья изменяются в пределах 0,4 – 0,5 [13]; с увеличением же размера валка значительно возрастают габариты дробилки [14].

Цель исследования

В Сибирском государственном индустриальном университете спроектирована и запатентована конструкция

одновалковой дробилки [15], в которой за счет упора, расположенного на валке, происходит принудительная подача измельчаемого куска в зону дробления, что приводит к увеличению степени дробления [16].

Возникающие в процессе эксплуатации машины силы технологического сопротивления являются основными исходными величинами для расчета мощности привода машины и элементов конструкции на прочность. В связи с этим силовой анализ рабочего процесса является неотъемлемым этапом проектирования любой машины, в том числе и дробильной.

Ввиду того, что форма куска измельчаемого материала не влияет на величину и направление сил, действующих на дробимое тело, а наиболее часто на практике подвергаются дроблению сферообразные материалы, то сечение куска можно принять круглым с радиусом r .

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В процессе работы дробилки куски подаются в камеру дробления, расположенную между валком и неподвижной щекой, и при повороте валка на некоторый угол происходит соприкосновение упора с куском дробимого материала в точке C , при этом возникает сила давления N_3 , давящая на него и действующая в направлении движения валка, перпендикулярно рабочей поверхности упора (рис. 1). До соприкосновения с упором кусок контактирует с вращающимся валком и давит на него за счет силы тяжести, а после соприкосновения упора с куском в точке контакта куска с валком возникает нормальная сила N_1 , направленная по радиусу от точки касания к центру куска. В дальнейшем валок, упор

и кусок движутся совместно, поэтому в точках A и C не возникает сил трения [17].

В процессе захвата дробимого куска под действием горизонтальных составляющих сил N_3 и N_1 возникает сила реакции N_2 , которая приложена в точке B и направлена по горизонтали от неподвижной щеки. Так как кусок под действием вертикальной составляющей силы N_3 движется вниз, то возникает сила трения F_2 , направленная в противоположную сторону и действующая по линии, совпадающей с поверхностью щеки. Сила F_2 препятствует движению куска в зазор между валком и щекой. Таким образом, на кусок действуют силы N_1 , N_2 , N_3 , а также сила трения $F_2 = f_2 N_2$, где f_2 – коэффициент трения между куском и щекой.

Для дальнейшего анализа сил, действующих в процессе разрушения материала в одновалковой дробилке с упором на валке, необходимо выразить силы N_1 и N_2 в функции силы N_3 , что выполнено в работе [18], в которой установлены следующие зависимости:

$$N_1 = N_3 \left(\frac{\cos \theta - f_2 \sin \theta}{\sin \alpha + f_2 \cos \alpha} \right);$$

$$N_2 = N_3 \left(\frac{\sin \alpha \sin \theta + \cos \alpha \cos \theta}{\sin \alpha + f_2 \cos \alpha} \right),$$

где α – угол захвата; θ – угол между направлением действия силы N_3 и ее вертикальной составляющей N_3^B (так называемый угол атаки).

В вертикальной плоскости (рис. 2, а) на кусок действуют три параллельные силы: две из них (сила трения F_2 и вертикальная составляющая нормальной силы N_1^B) направлены в одну сторону, а вертикальная составляющая силы давления N_3^B направлена в противоположную сторону. Так как рассматривается система, находящаяся в равновесии, то равнодействующая сил F_2 и N_1^B равна по модулю величине N_3^B , а линия ее действия находится на расстоянии от линии действия силы N_1^B , равном [19]

$$x_a = \frac{F_2}{N_3^B} (r + r \cos \alpha) = \frac{F_2}{N_3^B} r (1 + \cos \alpha).$$

Следовательно, на дробимый кусок в вертикальной плоскости действуют две силы, равные между собой по величине и направленные в противоположные стороны по параллельным линиям, т.е. они создают крутящий момент, под действием которого в куске возникают касательные напряжения, при этом плечо момента можно рассчитать по формуле

$$x = r \left[(\sin \theta - \cos \alpha) + \frac{F_2}{N_3^B} (1 + \cos \alpha) \right].$$

В горизонтальной плоскости (рис. 2, б) также действуют три параллельные силы: две из них (горизонтальные составляющие нормальной силы N_1^r и силы

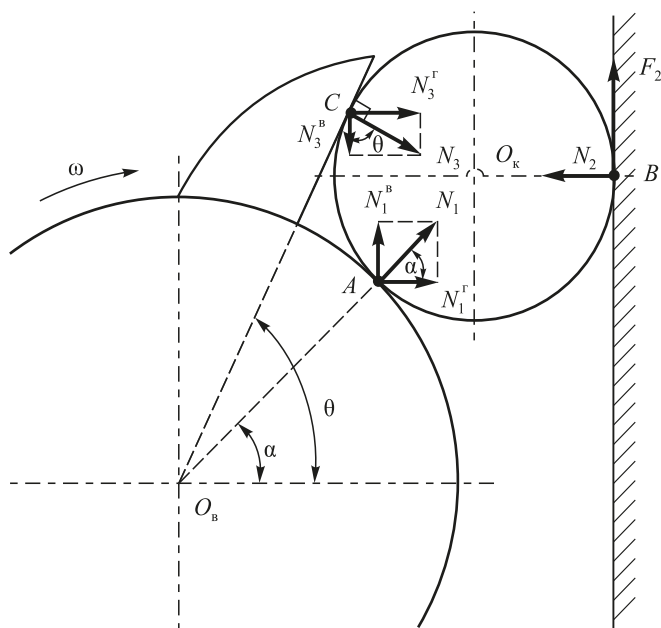


Рис. 1. Схема внешних сил, действующих на кусок дробимого материала

Fig. 1. Scheme of external forces acting on a piece of crushing material

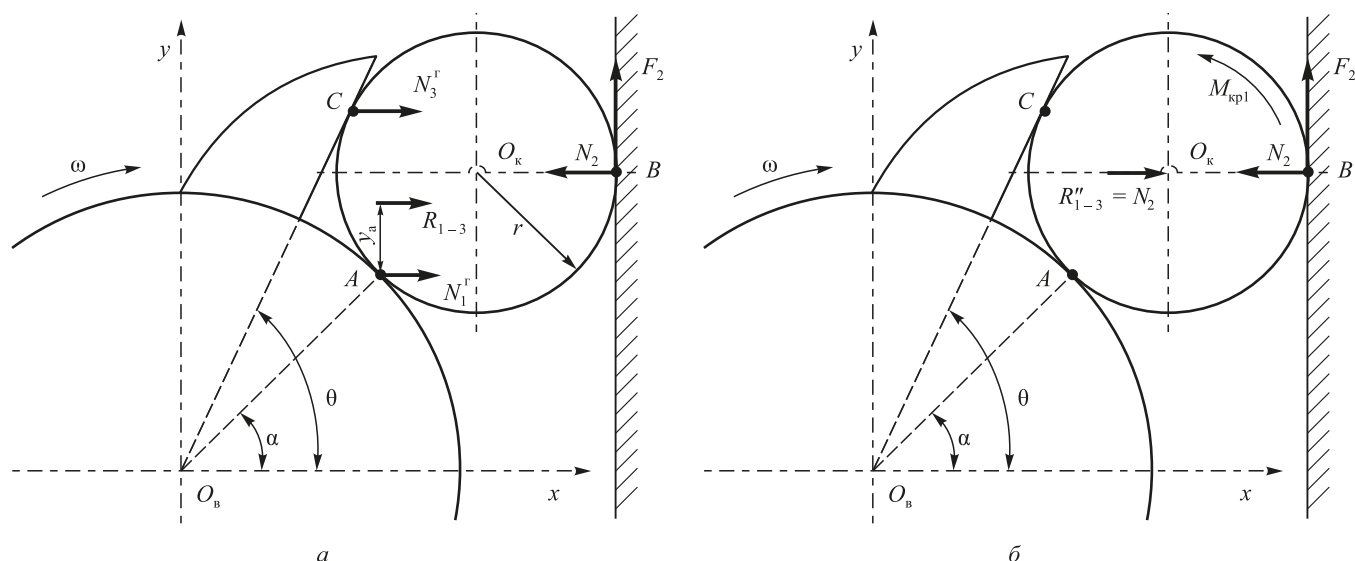


Рис. 2. Схема сил, действующих на кусок дробимого материала в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях

Fig. 2. Scheme of forces acting on a piece of crushing material in vertical (a) and horizontal (b) planes

давления N_3^r) направлены в одну сторону, а сила N_2 направлена в противоположную сторону. Равнодействующая сил N_1^r и N_3^r равна по модулю N_2 , а линия ее действия находится на расстоянии от линии действия силы N_1^r , равном

$$y_a = \frac{N_3^r r (\cos \theta + \sin \alpha)}{N_2} = r \frac{\sin \theta \cos \theta + \sin \theta \sin \alpha}{\cos \theta \cos \alpha + \sin \theta \sin \alpha} (\sin \alpha + f_2 \cos \alpha).$$

Полученное выражение не имеет аналитического решения, однако численное решение с учетом того, что расстояние между линией действия силы N_1^r и горизонтальной осью, проходящей через центр тяжести куска, равно $r \sin \alpha$, показывает практическое совпадение линии действия равнодействующей сил N_1^r и N_3^r с горизонтальной осью. Следовательно, в горизонтальной плоскости на дробимый кусок действует сжимающая сила, равная по модулю силе N_2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Как следует из вышеприведенных рассуждений, в одновалковой дробилке с упором на валке на кусок дробимого материала действуют как сжимающие силы, вызывающие в куске действие нормальных сжимающих напряжений, так и крутящий момент, вызывающий действие касательных напряжений, т.е. в дробимом куске создается сложное напряженное состояние с одновременным действием нормальных и касательных напряжений (рис. 3), под действием которых происходит разрушение дробимого куска. Этим достигается уменьшение расхода энергии на дробление при прочих равных условиях [20], что уменьшает энергоемкость

работы одновалковой дробилки с принудительной подачей материала в зону дробления.

Выводы

Выявлены силы, действующие на дробимый кусок со стороны вала и неподвижной щеки в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Определено, что в дробимом куске создается сложное напряженное состояние с одновременным действием нормальных и касательных напряжений, под действием которых происходит его разрушение. В результате уменьшается расход энергии на дробление и снижается энергоемкость рабо-

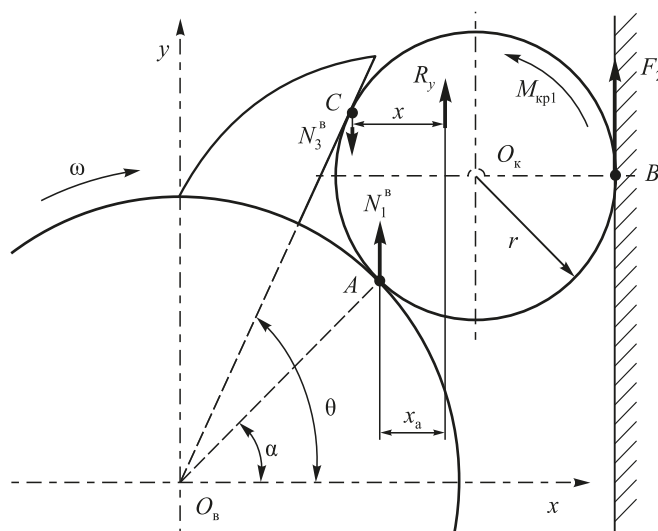


Рис. 3. Схема внутренних силовых факторов, действующих на кусок дробимого материала

Fig. 3. Scheme of internal force factors acting on a piece of crushed material

ты одновалковой дробилки с принудительной подачей материала в зону дробления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Austin L.G., Van Orden D., McWilliams B., Perez J.W., Shoji K. Breakage parameters of some materials in smooth roll crushers // Original Research Article Powder Technology. 1981. April – May. Vol. 28. Iss. 2. P. 245 – 251.
2. Austin L.G., Van Orden D., Pérez J.W. A preliminary analysis of smooth roll crushers // Original Research Article International Journal of Mineral Processing. 1980. February. Vol. 6. Iss. 4. P. 321 – 336.
3. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. Экспериментальное исследование дробления хрупких материалов в одновалковой дробилке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 6. С. 53.
4. Rogers R.S.C. Closed form analytical solutions for models of closed circuit roll crushers // Original Research Article Powder Technology. 1982. May – June. Vol. 32. Iss. 1. P. 125 – 127.
5. Sajjan Kumar Soni, Satish Chandra Shukla, Gautam Kundu. Modeling of particle breakage in a smooth double roll crusher // International Journal of Mineral Processing. 2009. February. Vol. 90. Iss. 1-4. P. 97 – 100.
6. Болтенгаген 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.
7. Ivana Cotabarren, Pablo Gastón Schulz, Verónica Bucalá, Juliana Piña. Modeling of an industrial double-roll crusher of a urea granulation circuit // Original Research Article Powder Technology. 2008. April. Vol. 183. Iss. 2. P. 224 – 230.
8. Velletri P., Weedon D.M. Comminution in a non-cylindrical roll crusher // Original Research Article Minerals Engineering. 2001. November. Vol. 14. Iss. 11. P. 1459 – 1468.
9. 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. January. Vol. 23. Iss. 2. P. 151 – 153.
10. Shirong Zhang, Wei Mao. Optimal operation of coal conveying systems assembled with crushers using model predictive control methodology // Original Research Article Applied Energy. 2017. July. Vol. 198. P. 65 – 76.
11. Schaefer H.U. LOESCHE vertical roller mills for the comminution of ores and minerals // Original Research Article Minerals Engineering. 2001. October. Vol. 14. Iss. 10. P. 1155 – 1160.
12. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 1. – М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.
13. Jack de la Vergne. Hard Rock Miner's Handbook. – Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008. – 330 p.
14. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
15. Пат. РФ 2524536. Способ дробления в валковой дробилке / Никитин А.Г., Люленков В.И., Лактионов С.А., Кузнецов М.А., Матехина А.Н. // Открытия. Изобретения. 2014. Бюл. № 21.
16. Никитин А.Г., Медведева К.С., Титов В.А. Определение степени дробления материала в одновалковой дробилке с упором на щеке. – В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество: Труды XIX Международной научно-технической конференции: Ч. 1. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2015. С. 371 – 372.
17. Meriam J.L., Kraige L.G. Engineering Mechanics. – Hoboken, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. – 550 p.
18. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С., Герики П.Б. Влияние коэффициента трения между дробимым материалом и щекой в одновалковой дробилке на энергоемкость процесса дробления // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 10. С. 846 – 848.
19. Pytel A., Kiusalaas J. Engineering Mechanics: Statics. – Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2010. – 601 p.
20. Goulet J. Resistance des matériaux. – Paris: Bordas, 1976. – 192 p.

Поступила в редакцию 8 ноября 2017 г.

После доработки 12 января 2018 г.

Принята к публикации 12 января 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 4, pp. 303–307.

POWER ANALYSIS OF THE PROCESS OF BRITTLE MATERIALS DESTRUCTION IN UNIVERSAL CRUSHING MACHINE WITH ROLL LOCKER

A.G. Nikitin¹, Yu.A. Epifantsev¹, K.S. Medvedeva¹,
P.B. Gerike²

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo
Region, Russia

²Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS,
Russia, Kemerovo

Abstract. The processing of friable materials used in metallurgical industry for production of definite size classes requires operation of crushing machines, including single-roll machines. Parameters of crushing process are degree and efficiency of crushing. The crushing degree is estimated by the ratio of dimensions of the initial crushing and resulting pieces and depends on the size of gap between the roll and the fixed jaw. Crushing efficiency is determined by mass of material crushed by consumed electric energy unit, and depends mainly on strength of crushed material. In order to reduce energy consumption needed for crushing, a single-roll crusher was developed at Siberian State Industrial University with forced feeding of crushing piece into the fracture zone due to the locker located on the roll. Forces of technological resistance appearing during machine operation are the main initial values for machine drive power and structural elements strength testing, thus, the operation power analysis is

an integral stage in the design of any machine, including a crushing one. In the present work, forces acting on a crushing piece from roll side and fixed jaw in vertical and horizontal planes are identified. Based on the results obtained, it was determined that internal compressive forces acting on piece of crushing material cause action of normal compressive stresses in a piece, as well as an internal torque effect, which causes shearing stresses action, i.e. a complex stress state is generated in a fractioned piece with simultaneous action of normal and shearing stresses, under which action a fractioning piece is destroyed. Thus reduction in energy consumption for crushing is achieved, with all other conditions being equal. It reduces energy consumption of a single-roll crusher with forced feeding of material into the crushing zone.

Keywords: single-roll crusher, degree of crushing, locker, force, tension, energy intensity.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-303-307

REFERENCES

1. Austin L.G., Van Orden D., McWilliams B., Perez J.W., Shoji K. Breakage parameters of some materials in smooth roll crushers. *Original Research Article Powder Technology*. 1981, vol. 28, no. 2, pp. 245–251.

2. Austin L.G., Van Orden D., Pérez J.W. A preliminary analysis of smooth roll crushers. *Original Research Article International Journal of Mineral Processing*. 1980, vol. 6, no. 4, pp. 321–336.
3. 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.).
4. Rogers R.S.C. Closed form analytical solutions for models of closed circuit roll crushers. *Original Research Article Powder Technology*. 1982, vol. 32, no. 1, pp. 125–127.
5. Sajjan Kumar Soni, Satish Chandra Shukla, Gautam Kundu. Modeling of particle breakage in a smooth double roll crusher. *International Journal of Mineral Processing*. 2009, vol. 90, no. 1–4, pp. 97–100.
6. 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.
7. Ivana Cotabarren, Pablo Gastón Schulz, Verónica Bucalá, Juliana Piña. Modeling of an industrial double-roll crusher of a urea granulation circuit. *Original Research Article Powder Technology*. 2008, vol. 183, no. 2, pp. 224–230.
8. Velletri P., Weedon D.M. Comminution in a non-cylindrical roll crusher. *Original Research Article Minerals Engineering*. 2001, vol. 14, no. 11, pp. 1459–1468.
9. 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.
10. Shiron Zhang, Wei Mao. Optimal operation of coal conveying systems assembled with crushers using model predictive control methodology. *Original Research Article Applied Energy*. 2017, vol. 198, pp. 65–76.
11. Schaefer H.U. LOESCHE vertical roller mills for the comminution of ores and minerals. *Original Research Article Minerals Engineering*. 2001, vol. 14, no. 10, pp. 1155–1160.
12. Tselikov A.I. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. T. 1* [Machines and units of metallurgical plants. Vol. 1.]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 440 p. (In Russ.).
13. Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008, 330 p.
14. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. *Drobilki* [Crushers]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 320 p. (In Russ.).
15. Nikitin A.G., Lyulenkov V.I., Laktionov S.A., Kuznetsov M.A., Matekhina A.N. *Sposob drobleniya v valkovo drobilke* [Crushing method in a roller crusher]. Patent RF no. 2524536. *Otkrytiya. Izobreteniya. Byulleten' izobretenii*. 2014, no. 21. (In Russ.).
16. Nikitin A.G., Medvedeva K.S., Titov V.A. Determination of the degree of material crushing in a single-roll crusher with jaw locker. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo: Trudy XIX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii: Ch. 1* [Metallurgy: technologies, innovations, quality: Papers of XIXth Int. Sci.-Tech. Conf.: Part 1]. Novokuznetsk: SibGIU, 2015, pp. 371–372. (In Russ.).
17. Meriam J.L., Kraige L.G. *Engineering Mechanics*. Hoboken, NY, USA: JohnWiley & Sons, Inc., 2012, 550 p.
18. Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S., Gerike P.B. Influence of friction coefficient between the crushed material and the cheek in one-roll crusher on crushing process energy capacity. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 846–848. (In Russ.).
19. Pytel A., Kiusalaas J. *Engineering mechanics: Statics*. Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2010, 601 p.
20. Goulet J. *Resistance des matériaux*. Paris: Bordas, 1976, 192 p. (In Fr.).

Information about the authors:

A.G. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Director of Institute of Mechanical Engineering and Transport (nikitin1601@yandex.ru)
Yu.A. Epifantsev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Mechanics and Mechanical Engineering
K.S. Medvedeva, Postgraduate of the Chair of Mechanics and Mechanical Engineering (ksuwinchester@mail.ru)
P.B. Gerike, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Means of Mechanization (am_besten@mail.ru)

Received November 8, 2017

Revised January 12, 2018

Accepted January 12, 2018