



Оригинальная статья

УДК 621.926

DOI 10.17073/0368-0797-2021-6-442-446



ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СПОСОБОВ ДРОБЛЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

А. Г. Никитин¹, А. Р. Фастыковский¹, М. Е. Шабунев¹,
Н. М. Курочкин¹, И. А. Баженов²

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

² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Дробильные машины входят в состав шихтовых отделений доменных и сталеплавильных цехов металлургических предприятий. Одним из основных показателей процесса дробления является его энергоэффективность. Она определяется массой дробленого материала при расходовании единицы электроэнергии. Рассмотрены различные способы дробления хрупких материалов и конструкции дробильных машин для их осуществления. Анализ работы дробилок показал, что наиболее энергоэффективными являются дробилки ударного действия. Однако из-за существенного недостатка (выход годного продукта весьма мал) они практически не применяются в металлургической промышленности, в которой предъявляются высокие требования к фракционному составу готового продукта. В металлургической промышленности широко используются дробилки сжатия с примерно одинаковой удельной энергоемкостью, то есть с одинаковым расходом энергии на разрушение единичного объема материала равной прочности. Разрушение сжатием – самый энергоемкий из известных способов дробления. В одновалковых дробилках кусок материала подается в зазор между валком и сплошной неподвижной плитой. В процессе работы в разрушаемом материале генерируется сложное напряженное состояние. На кусок дробимого материала действуют сжимающие силы, вызывающие в куске действие нормальных сжимающих напряжений, и внутренний крутящий момент, вызывающий действие касательных напряжений. Этим достигается уменьшение расхода энергии на дробление при прочих равных условиях на 20 – 30 % по сравнению с дробилками, работающими на сжатие. Приведено описание конструкции дробилки, в которой разрушение перерабатываемого материала происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу. В этом случае в обрабатываемом куске возникают только касательные напряжения. Применение дробилок, в которых разрушение перерабатываемого материала происходит за счет генерации в куске только касательных напряжений, позволяет уменьшить расход энергии на единицу готовой продукции почти в два раза. Конструирование таких дробилок является перспективным направлением в разработке машин, предназначенных для дробления.

Ключевые слова: металлургическое оборудование, дробилка, энергоэффективность, сжатие, деформация

Для цитирования: Никитин А.Г., Фастыковский А.Р., Шабунев М.Е., Курочкин Н.М., Баженов И.А. Перспективы развития энергосберегающих способов дробления хрупких материалов // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 6. С. 442–446.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-6-442-446>

Original article

PROSPECTS FOR ENERGY-SAVING METHODS OF CRUSHING BRITTLE MATERIALS

A. G. Nikitin¹, A. R. Fastyskovskii¹, M. E. Shabunov¹,
N. M. Kurochkin¹, I. A. Bazhenov²

¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region–Kuzbass 654007, Russian Federation)

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

Abstract. Crushing machines are part of the charge departments of blast-furnace and steel-making shops of metallurgical enterprises. One of the main indicator of the crushing process is its energy efficiency. It is determined by the mass of crushed material when consuming a unit of electricity. The article considers various methods of crushing brittle materials and the design of crushing machines for their implementation. The analysis of the crushers has shown that impact crushers are the most energy-efficient. However, due to a significant drawback (the yield of a suitable product is very small), they are practically not used in the metallurgical industry, in which high requirements are imposed on the finished product fractional composition. In the metallurgical industry, compression crushers are widely used with approximately the same specific energy intensity, that is, with the same energy consumption for the destruction of a unit volume of material of equal strength. Compression fracture is the most energy intensive crushing method known. In single-roll crushers, a piece

of material is fed into the gap between a roll and a solid, stationary plate. During the operation a complex stress state is generated in the destructed material. Compressive forces act on a piece of crushed material, causing normal compressive stresses in it, and an internal torque, causing shear stresses. This is achieved by the reduction in energy on crushing by 20 – 30 % in comparison with crushers operating in compression (all other things are equal). The authors describe the design of a crusher, in which the destruction of the processed material occurs due to the forces acting on the crushed piece in one plane towards each other. In this case, only shear stresses arise in the processed piece. The use of crushers, in which the destruction of the processed material occurs due to generation of only tangential stresses in a piece, can reduce the energy consumption per unit of finished product by almost a half. The design of such crushers is a promising direction in the development of machines intended for crushing.

Keywords: metallurgical equipment, crusher, energy efficiency, compression, deformation

For citation: Nikitin A.G., Fastyskovskii A.R., Shabunov M.E., Kurochkin N.M., Bazhenov I.A. Prospects for energy-saving methods of crushing brittle materials. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 6, pp. 442–446. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-6-442-446>

ВВЕДЕНИЕ

Мировая потребность в различных видах раздробленного материала растет на 3 – 8 % в год [1, 2]. Дробильные машины входят в состав шихтовых отделений доменных и сталеплавильных цехов металлургических предприятий [3]. При подготовке рудных и нерудных материалов (руд, флюсов, топлива, агломерата) к введению в металлургический процесс (выплавки чугуна и стали) должен соблюдаться соответствующий фракционный состав. В большинстве случаев нужная крупность достигается измельчением более крупных кусков на дробилках. При производстве ферросплавов дробление является заключительной операцией для получения готового товарного продукта.

Одним из основных показателей процесса является энергоэффективность дробления [3], которая определяется массой дробленого материала при расходе единицы электроэнергии.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В промышленности используются дробилки для разрушения хрупких материалов сжатием (валковые, щековые, конусные) и ударом (зубчатые, молотковые), поэтому свойства дробимости на уровне количественных оценок и характеристик изучены для этих двух видов разрушающего воздействия [4].

Дробилки сжатия, широко используемые в металлургической промышленности, делятся на следующие виды: щековые, в которых разрушение происходит за счет встречного рабочего движения плит [5, 6]; валковые, разрушающие кусок при затягивании его в зазор между вращающимися друг навстречу другу [7, 8]; конусные, в которых дробление осуществляется сжатием материала между конусами, расположенными с эксцентриситетом один внутри другого [9, 10]. Эти дробилки, работающие на сжатие разрушаемого материала, имеют примерно одинаковую удельную энергоемкость, то есть одинаковый расход энергии на разрушение единичного объема материала равной прочности [11]. Разрушение сжатием – самый энергоемкий из известных способов дробления [12].

Ударные (роторные и молотковые) дробилки предназначены для ударного дробления различных хруп-

ких материалов с помощью бил, жестко закрепленных на роторе, вращающемся вокруг горизонтальной оси [13, 14], при этом разрушение происходит за счет раскалывания.

Разрушение хрупких пород ударом и сжатием требует различных энергозатрат, необходимых для разрушения материала, при этом разрушение сжатием требует почти полуторакратных затрат энергии по сравнению с разрушением ударом [15]. Однако дробилки ударного действия имеют существенный недостаток: 25 – 30 % готового продукта получают в заданном фракционном диапазоне [16].

Известны конструкции одновалковых дробилок, у которых кусок подается в зазор между валком и сплошной неподвижной плитой. В процессе работы в разрушаемом материале генерируется сложное напряженное состояние, при котором на кусок дробимого материала действуют как сжимающие силы, вызывающие в куске действие нормальных сжимающих напряжений, так и внутренний крутящий момент, вызывающий действие касательных напряжений [17]. При действии в материале сложного напряженного состояния прочность оценивается через эквивалентное напряжение, предел прочности которого меньше, чем при действии только нормальных напряжений [18]. Этим достигается уменьшение расхода энергии на дробление при прочих равных условиях на 20 – 30 % по сравнению с дробилками, работающими на сжатие.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью повышения энергоэффективности процесса разрушения хрупких материалов в Сибирском государственном индустриальном университете разработана конструкция роторно-конусной дробилки [19]. Дробление происходит за счет генерации в куске только касательных напряжений, под действием которых возникает деформация сдвига (среза). При таком виде деформации предел прочности для рассматриваемого материала принимает минимально возможное значение, равное примерно 0,5 от величины предела прочности при сжатии [20]. Отсюда следует, что такой способ дробления является наиболее энергоэффективным по сравнению со всеми другими при получении готового продукта заданной крупности.

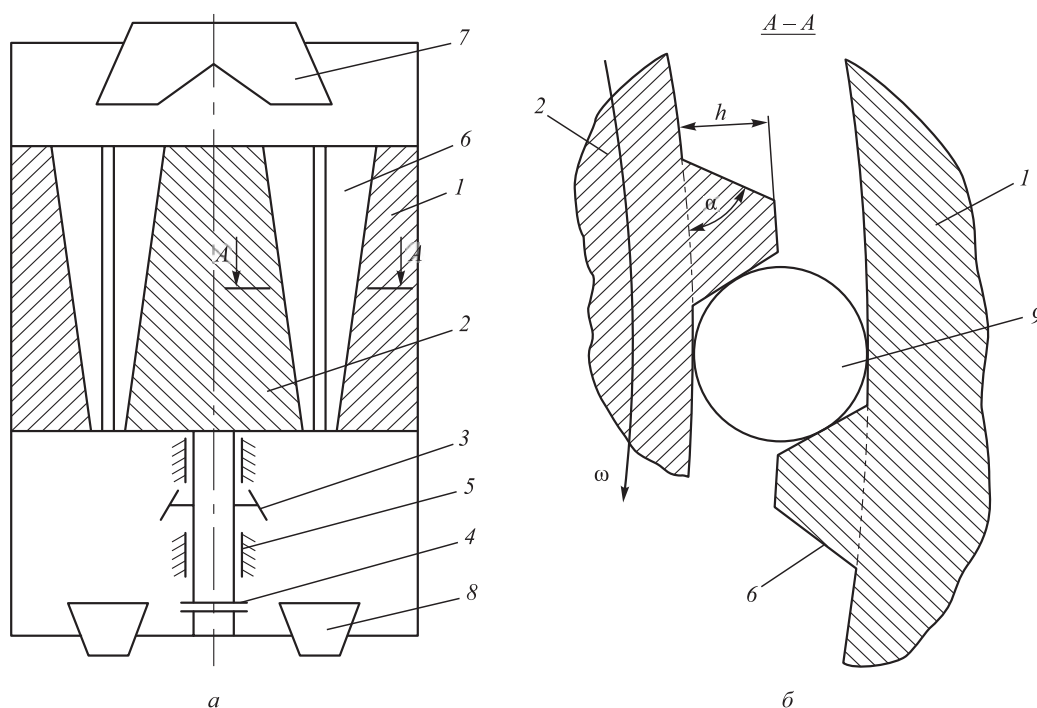


Схема роторно-конусной дробилки:
а – вид дробилки в разрезе; б – сечение А – А

Scheme of a rotary cone crusher:
а – sectional view of the crusher; б – cross-section A – A

В процессе работы рассматриваемой дробилки разрушение перерабатываемого материала происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу, то есть обеспечивается условие генерации в куске только касательных напряжений.

Дробилка состоит из корпуса 1, выполненного заодно с неподвижным конусом, и расположенного соосно с ним вращающегося внутреннего конуса 2 с приводом 3 (см. рисунок). Вращающийся внутренний конус установлен в радиальных подшипниках 5 и опирается на упорный подшипник 4. На рабочих поверхностях конусов по их образующим расположены ребра 6. В верхней части корпуса 1 имеется течка 7 для подачи материала, а в нижней – разгрузочные окна 8.

Дробление происходит следующим образом. Кусок дробимого материала 9 через течку 7 подается в зону дробления, образованную рабочими поверхностями конусов 1 и 2. При вращении внутреннего конуса 2 ребра 6, расположенные на рабочих поверхностях конусов, периодически располагаются друг напротив друга и образуют каналы, в которые под действием сил гравитации кусок 9 проваливается на глубину, на которой его поперечный размер равен величине зазора между поверхностями неподвижного внешнего и вращающегося внутреннего конусов 1 и 2. При дальнейшем вращении внутреннего конуса 2 кусок 9 зажимается между боковыми поверхностями ребер 6 и за счет возникновения в нем касательных напряжений развивается деформация сдвига, кусок разрушается.

Размеры ребра характеризуются следующими параметрами: высотой ребра h и углом α наклона боковой поверхности ребра к основанию. Их значения определяются следующим образом. Высота ребра h не должна быть больше, чем 0,5 от величины зазора между поверхностями неподвижного и вращающегося внутреннего конусов, чтобы обеспечить возможность вращения внутреннего конуса, и не меньше чем 0,1, так как в этом случае может произойти переваливание куса через ребро без разрушения из-за его упругой деформации (5 – 7 % для хрупких материалов). При $\alpha = 90^\circ$ разрушение дробимого куса происходит под действием только касательных напряжений, следовательно, энергопотребление уменьшится на 50 % по сравнению с дробилками сжатия. Полученный готовый продукт соответствует требуемому фракционному составу.

Конструирование дробилок, в которых разрушение перерабатываемого материала происходит за счет генерации в куске только касательных напряжений (что позволяет уменьшить расход энергии на единицу готовой продукции почти в два раза), является перспективным направлением в разработке машин, предназначенных для дробления.

Выводы

Анализ работы дробилок показал, что наиболее энергоэффективными являются дробилки ударного действия. Из-за существенного недостатка (выход год-

ного продукта весьма мал) они практически не применяются в металлургической промышленности, в которой предъявляются высокие требования к granulometricheskому составу готового продукта. Разрушение сжатием – самый энергоемкий из известных способов дробления хрупкого материала.

Приведено описание конструкции дробилки, в которой разрушение перерабатываемого материала происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу, при

этом в обрабатываемом куске возникают только касательные напряжения. Конструирование дробилок, в которых разрушение перерабатываемого материала происходит за счет генерации в куске только касательных напряжений (позволяет уменьшить расход энергии на единицу готовой продукции почти в два раза) является, очевидно, перспективным направлением в разработке машин, предназначенных для дробления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование, управление. М.: Недра, 1981. 343 с.
2. Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008. 330 p.
3. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 1. М.: Машиностроение, 1987. 440 с.
4. Клущанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
5. Telsmith. Jaw-crushers. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://telsmith.com/products/crushing-equipment/jaw-crushers> (Дата обращения: 07.09.2020).
6. Pat. 105682804 US. Jaw-crushers. Sandvik intellectual property / Lindstrom Anders. Publ. 15.06.2016.
7. Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, fabrication and testing of a double roll crusher // *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2016. Vol. 35. No. 11. P. 511–515. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V35P303>
8. Lieberwirth H., Hillmann Ph., Hesse M. Dynamics in double roll crushers // *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 103-104. P. 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.08.009>
9. Evertsson M. Output prediction of cone crushers // *Minerals Engineering*. 1998. Vol. 11. No. 3. P. 215–231. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(98\)00001-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(98)00001-6)
10. Johansson M., Quist J., Evertsson M., Hulthen E. Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation // *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 103-104. P. 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.015>
11. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. Сравнительный анализ энергозатрат дробилок, работающих на сжатие // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2011. № 4. С. 56, 57.
12. Масленников В.А. Дробилки, разрушающие материал сжатием // *Известия вузов. Горный журнал*. 1996. № 10-11. С. 124–138.
13. Zhao L.L., Zang F., Wang Z.B. 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. [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(08\)60067-X](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(08)60067-X)
14. BEDESCHI – производство тяжелой техники и оборудования [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bedeschi.com> (Дата обращения: 07.09.2020)
15. Лагунова Ю.А. Дробимость хрупких материалов при разрушении их сжатием // *Известия вузов. Горный журнал*. 1996. № 10-11. С. 121–124.
16. Фишман М.А. Дробилки ударного действия. М.: Госгортехиздат, 1960. 189 с.
17. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С., Герики П.Б. Силовой анализ процесса разрушения хрупких материалов в одновалковой дробильной машине с упором на валке // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 4. С. 303–307. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-303-307>
18. Goulet J. *Resistance des materiaux*. Bordas, Paris. 1976. 192 p.
1. Lynch A.J. *Mineral Crushing and Grinding Circuits: Their Simulation, Optimisation, Design and Control*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publ. Co., 1977, 342 p.
2. Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008, 330 p.
3. Tselikov A.I. *Machines and Units of Metallurgical Plants*. Vol. 1. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 440 p. (In Russ.).
4. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. *Crushers. Design, Calculation, Features of Operation*. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 320 p. (In Russ.).
5. Telsmith. *Jaw-crushers*. [Electronic resource]. Available at URL: <http://telsmith.com/products/crushing-equipment/jaw-crushers> (Accessed 07.09.2020).
6. Lindstrom Anders. *Jaw-crushers*. Sandvik intellectual property. Patent no. 105682804 US. Publ. 15.06.2016.
7. Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, fabrication and testing of a double roll crusher. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2016, vol. 35, no. 11, pp. 511–515. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V35P303>
8. Lieberwirth H., Hillmann Ph., Hesse M. Dynamics in double roll crushers. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 103-104, pp. 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.08.009>
9. Evertsson M. Output prediction of cone crushers. *Minerals Engineering*. 1998, vol. 11, no. 3, pp. 215–231. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(98\)00001-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(98)00001-6)
10. Johansson M., Quist J., Evertsson M., Hulthen E. Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 103-104, pp. 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.015>
11. Nikitin A.G., Sakharov D.F. Comparative analysis of compression crushes energy consumption. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 4, pp. 56, 57. (In Russ.).
12. Maslennikov V.A. Compression crushers. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1996, no. 10-11, pp. 124–138. (In Russ.).
13. Zhao L.L., Zang F., Wang Z.B. 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. [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(08\)60067-X](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(08)60067-X)
14. BEDESCHI – Production of heavy machinery and equipment. Available at URL: <https://www.bedeschi.com> (Accessed 07.09.2020)
15. Lagunova Yu.A. Crushability of brittle materials at compression destruction. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1996, no. 10-11, pp. 121–124. (In Russ.).
16. Fishman M.A. *Impact Crushers*. Moscow: Gosgortekhzizdat, 1960, 189 p. (In Russ.).
17. Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S., Gerike P.B. Power analysis of the process of brittle materials destruction in universal crushing machine with roll locker. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 4, pp. 303–307. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-303-307>
18. Goulet J. *Resistance des materiaux*. Bordas, Paris, 1976, 192 p.

19. Пат. 2526738 РФ. Роторное дробильное устройство / Никитин А.Г., Люленков В.И., Мочалов С.П., Матехина А.Н.; заявл. 18.06.2013; опубл. 27.08.2014. Бюл. № 24.
20. Степин П.А. Сопротивление материалов. СПб.: Лань, 2014. 320 с.
19. Nikitin A.G., Lyulenkov V.I., Mochalov S.P., Matekhina A.N. *Rotary crushing device*. Patent 2526738 RU. *Bulleten' izobretenii*. 2014, no. 24. (In Russ.).
20. Stepin P.A. *Strength of Materials*. St. Petersburg: Lan', 2014, 320 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Григорьевич Никитин, д.т.н., профессор кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0001-9198-6386

E-mail: nikitin1601@yandex.ru

Андрей Ростиславович Фастыковский, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: omd@sibsiu.ru

Максим Евгеньевич Шабунув, аспирант кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: shabunovme1994@mail.ru

Никита Максимович Курочкин, аспирант кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: k_nikitos@mail.ru

Игорь Алексеевич Баженов, к.т.н., доцент кафедры маркетинга, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

E-mail: mta@kpost.ru

Aleksandr G. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Mechanics and Machine Engineering, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-9198-6386

E-mail: nikitin1601@yandex.ru

Andrei R. Fastyskovskii, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University

E-mail: omd@sibsiu.ru

Maksim E. Shabunov, Postgraduate of the Chair of Mechanics and Machine Engineering, Siberian State Industrial University

E-mail: shabunovme1994@mail.ru

Nikita M. Kurochkin, Postgraduate of the Chair of Mechanics and Machine Engineering, Siberian State Industrial University

E-mail: k_nikitos@mail.ru

Igor' A. Bazhenov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Marketing, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

E-mail: mta@kpost.ru

Поступила в редакцию 07.09.2020

После доработки 12.09.2020

Принята к публикации 15.09.2020

Received 07.09.2020

Revised 12.09.2020

Accepted 15.09.2020