

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАНАЛА РОТОРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

А.И. Афанасьев, В.В. Zubov, В.Я. Потанов, В.В. Потанов, С.А. Упоров
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: В статье приведена математическая модель и сравнительный анализ конструкций измельчающих устройств, который показал, что наиболее подходящими для аналитических проб являются измельчители роторного типа, которые опережают в своем классе по производительности и надежности при минимальных габаритных размерах и массе. Однако они практически не известны потребителю и их выпуск ограничен. Выпускаемые в настоящее время роторные измельчители имеют недостаточную эффективность, которая характеризуется степенью измельчения. Основная причина сложившейся ситуации заключается в недостаточной изученности процессов, протекающих в лабиринтном роторе встречного удара при измельчении материала, и, как следствие, в недостаточной научной обоснованности методов проектирования. Геометрические параметры и скорость вращения рабочего органа до настоящего времени назначаются эмпирически по принципу подобия, что неминуемо приводит к отклонениям тонины и производительности измельчения от заданных значений. Совершенствование конструкции, позволяющее повысить эффективность работы устройств, невозможно без анализа кинематики куска в канале измельчителя.

Установлено, что с точки зрения эффективности разрушения материала, форма канала нуждается в изменениях его геометрии. На основании уравнения баланса энергии при свободном ударе куска по абсолютно жесткой поверхности установлено, что некоторая доля кинетической энергии куска переходит в потенциальную энергию упругой деформации осколков, которая, в свою очередь, преобразуется в кинетическую энергию их отскока от поверхности. Это позволяет повысить степень измельчения материала, а с другой стороны повышения эффективности свободного удара возможно за счет уменьшения угла входа частицы в канал. Данное условие потребует изменения его геометрических параметров и скорость вращения рабочего органа. На базе анализа предложенной теории движения частиц сформулированы основные пути дальнейшего совершенствования методики проектирования и создания роторного измельчителя нового типа.

Ключевые слова: измельчитель роторного типа, горная порода, геометрия канала, удар, баланса энергии, коэффициент восстановления.

EFFECTS OF CHANNEL GEOMETRY CHOPPER WITH A ROTOR COUNTERED (IRV) FOR PARTICLE REDUCTION EFFICIENCY

A.I. Afanasyev, V.V. Zubov, V.Ya. Potapov, V.V. Potapov, S.A. Uporov
Ural State Mining University, Yekaterinburg.

Abstract: The article presents a mathematical model and a comparative analysis of the designs of grinding devices, which showed that the most suitable for analytical samples are rotary-type grinders, which are ahead in their class in terms of performance and reliability with minimal overall dimensions and weight. However, they are practically unknown to the consumer and their release is limited. Currently produced rotary shredders have insufficient efficiency, which is characterized by the degree of grinding. The main reason for this situation is the insufficient knowledge of the processes occurring in the labyrinth rotor of the counter impact during material grinding, and, as a result, the insufficient scientific validity of design methods. The geometrical parameters and the speed of rotation of the working body until now are assigned empirically according to the principle of similarity, which inevitably leads to deviations in fineness and grinding performance from the specified values. Improving the design, which makes it possible to increase the efficiency of the devices, is impossible without analyzing the kinematics of the piece in the chopper channel.

It has been established that from the point of view of the efficiency of the destruction of the material, the shape of the channel needs to be changed in its geometry. Based on the energy balance equation for a free impact of a piece on an absolutely rigid surface, it is established that a certain fraction of the kinetic energy of the piece is converted into the potential energy of the elastic deformation of the fragments, which, in turn, is converted into the kinetic energy of their rebound from the surface. This makes it possible to increase the degree of grinding of the material, and on the other hand, it is possible to increase the efficiency of a free impact by reducing the angle of entry of the particle into the channel. This condition will require a change in its geometric parameters and the speed of rotation of the working body. Based on the analysis of the proposed theory of particle motion, the main ways of further improvement of the methodology for designing and creating a new type of rotary grinder are formulated.

Keywords: rotary grinder, rock, channel geometry, impact, impact energy balance equation, recovery factor.

В горной промышленности, при разработке технологии переработки материалов, требуется проводить опробование продуктов для определения содержания полезного ископаемого в пробе, предварительно измельчив горную породу с помощью измельчителей различных типов. Для обеспечения требуемой точности анализа руды, необходимо измельчить материал до продукта заданной крупности [1].

В подготовке аналитических проб используются устройства для измельчения, обеспечивающие требуемый для исследования гранулометрический состав измельченного материала. Выпускаемые в настоящее время роторные измельчители имеют недостаточную эффективность, которая характеризуется степенью измельчения. Под эффективностью измельчения подразумевается достижение оговоренной в техническом задании (ТЗ) производительности измельчителя с ротором встречного удара (ИРВУ) одновременно с обеспечением заданной тонины помола при минимальных энергозатратах [6].

Особенность ИРВУ, как отмечено выше, состоит в сравнительно низких затратах энергии на измельчение, поэтому эффективность работы можно понимать упрощенно как повышение производительности без ущерба тонине помола.

Совершенствование конструкции измельчителя, позволяющее повысить эффективность работы устройства, невозможно без соответствующих научно обоснованных зависимостей, определяющих соотношение между конструктивными параметрами и технологическими показателями оборудования. Поэтому теоретические и экспериментальные исследования измельчителей с ротором встречного удара являются актуальными.

Цель исследований: повышение эффективности работы роторного измельчителя руды за счет совершенствования его конструкции.

Методы исследования. Анализ движения частиц в каналах ротора выполнен с использованием положений теоретической механики и теории удара. Аэродинамика ротора рассмотрена с позиции теории турбомашин. Физическое моделирование и анализ его результатов выполнены в соответствии с методами планирования эксперимента и математической статистики. В ходе проведенного исследования использовался факторный анализ, синтез данных и моделирование.

Результаты исследования и их обсуждение.

Геометрия канала определяется формой и размерами. Совокупность размеров ротора и возможностей изготовления обуславливает весьма простую форму: ось канала ориентирована по радиусу ротора, ширина канала постоянная. Такая конфигурация позволяет выполнять каналы торцовыми или дисковыми фрезами, достигая приемлемых точности размеров и качества поверхности [2-18].

Однако анализ кинематики куска и частицы показывает, что, с точки зрения эффективности разрушения материала, форма канала нуждается в изменениях.

Уравнение баланса энергии при свободном ударе куска по абсолютно жесткой поверхности [4-5, 7-8]:

$$\frac{m_k w_k^2}{2} = \sum \frac{m_i w_i^2}{2} + A_p + A_{\text{деф}} + A_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где m_k , w_k — масса и относительная скорость куска до удара; m_i , w_i — масса и относительная скорость i -го осколка после удара; A_p — работа, затраченная на разрушение куска, $A_{\text{деф}}$ — работа, затраченная на пластическую деформацию; $A_{\text{тр}}$ — работа сил трения.

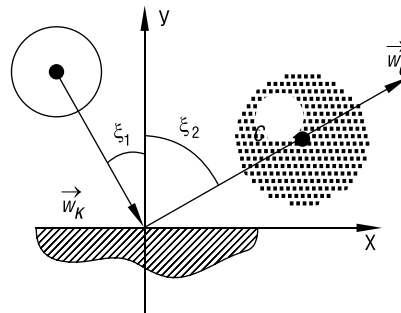


Рис. 1. Свободный удар куска о поверхность.

Fig.1. Free impact of a piece on a surface.

В общем случае картина ударного разрушения выглядит, как показано на рис. 1.

Кусок входит в контакт с поверхностью под углом ξ_1 к оси y и дробится на осколки. Некоторая доля кинетической энергии куска переходит в потенциальную энергию упругой деформации осколков, которая, в свою очередь, преобразуется в кинетическую энергию их отскока от поверхности.

Точка C — центр массы группы разлетающихся осколков.

Доля энергии отскока зависит от упругих свойств материала. Чем выше упругость, тем ближе величина угла отскока ξ_2 к углу удара ξ_1 . Равенство этих углов означает абсолютно упругий удар, при котором $A_p = A_{\text{деф}} = A_{\text{тр}} = 0$.

Удар без разрушения реального куска описывается системой уравнений по [4]:

$$\begin{cases} m_k (w_1 \cos \xi_1 + w_2 \cos \xi_2) = S_N \\ m_k (w_1 \sin \xi_1 - w_2 \sin \xi_2) = S_{\text{тр}}, \end{cases} \quad (2)$$

где w_1 , w_2 — скорости куска при ударе и отскоке соответственно; S_N , $S_{\text{тр}}$ — составляющие ударного импульса.

Изменение скоростей характеризуется коэффициентом восстановления [4, 6]:

$$k = \frac{w_2 \cos \xi_2}{w_1 \cos \xi_1}. \quad (3)$$

В другом предельном случае материал абсолютно неупругий, и $\xi_2 = 90^\circ$. Нормальная составляющая скорости w_{kY} гасится, но за счет наличия составляющей w_{kX} осколки движутся по поверхности (прилипание материала к поверхности не рассматривается). Таким образом, даже при абсолютно неупругом ударе не вся кинетическая энергия переходит в работу, если $\xi_1 \neq 0$.

Изложенные соображения приводят к выводу о возможности повышения эффективности свободного удара за счет уменьшения угла между направлением относительной скорости частицы и нормалью к рабочей поверхности активного элемента [9-14].

На рис. 2, а показан фрагмент второго ряда элементов. Среднее положение канала AB показано сплошными линиями.

ми, положения $A'B'$ и $A''B'$, соответствующие моментам открытия и закрытия канала соответственно – прерывистыми.

Угол между радиусом r_{21} и стенкой канала:

$$\gamma = \frac{d}{2r_{21}}. \quad (4)$$

Для входа частицы в канал по первому варианту (рис. 2, б) максимальное значение угла ξ'_1 :

$$\xi'_1 = \alpha_{12} + \gamma, \quad (5)$$

а для входа по второму варианту:

$$\xi''_1 = \gamma. \quad (6)$$

Пусть ширина канала

$$d = 14 \text{ мм}, b_{12} - \text{по (2.12)}, r_{11} = 40 \text{ мм}, r_{12} \approx r_{21} = 50 \text{ мм}.$$

Тогда по первому варианту $\xi'_1 = 24^\circ 43'$, а по второму варианту $\xi''_1 = 8^\circ 01'$.

В частном случае для второго варианта входа, когда ширина канала равна минимальной и $\omega_1 = \omega_2$, за время движения частицы в канале его правая стенка займет положение B , в котором $\xi_1 = 0$. Поэтому значительно большее значение имеет угол удара по первому варианту, и именно на него должно быть обращено внимание.

Задача уменьшения значения ξ_1 (по (5) без существенного усложнения технологии изготовления ротора решается путем выполнения не радиально ориентированных каналов (рис. 3), оси которых наклонены под углом γ_1 к радиусам в направлении вращения. Равенство (5) видоизменяется:

$$\xi'_1 = \alpha_{12} + \gamma - \gamma_1, \quad (7)$$

Вопрос о величине γ_1 следует решать с учетом желательного сохранения универсальности ИРВУ и представлений об аэродинамике ротора. Ширину канала следует назначать, сообразуясь с минимальными значениями диаметра куска. Для куска диаметром частицы 2 мм

$$d_{\min} = 6,67 \text{ мм и } d_{\min} = 13,9 \text{ мм соответственно.}$$

Оба размера вполне реализуемы.

Заключение.

На базе анализа предложенной теории движения частиц сформулированы основные пути дальнейшего совершенствования методики проектирования и разработки новой конструкции измельчителя.

В настоящее время конкретных рекомендаций по выбору ширины канала нет, что обуславливает необходимость специальных теоретических и экспериментальных.

Высота активных элементов второго ряда (толщина кольцевого выступа Δr_2), зависит от ширины канала a :

$$\Delta r_2 = r_{22} - r_{21} \geq \operatorname{tg} \alpha_2, \quad (8)$$

где r_{22} – внешний радиус ряда 2.

Выводы.

1. Число каналов второго ряда z_2 , равное числу активных элементов определяет производительность измельчителя.

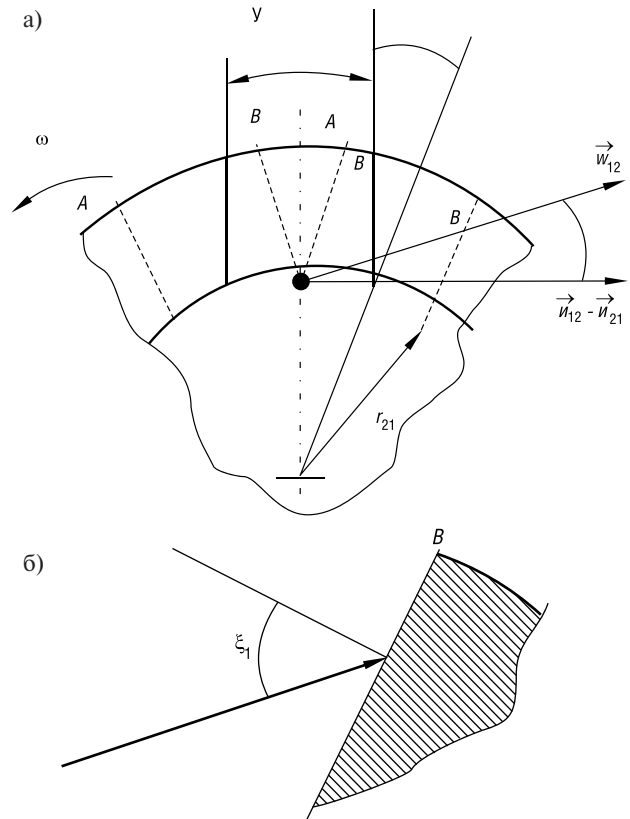


Рис. 2. Определение угла удара частицы о стенку канала.

а - ориентация стенки канала относительно скорости; б - угол удара частицы о стенку.

Fig. 2. Determination of the angle of impact on a particle on the pipe wall:

а - orientation of the pipe wall; б - the angle of impact on a particle on the wall.

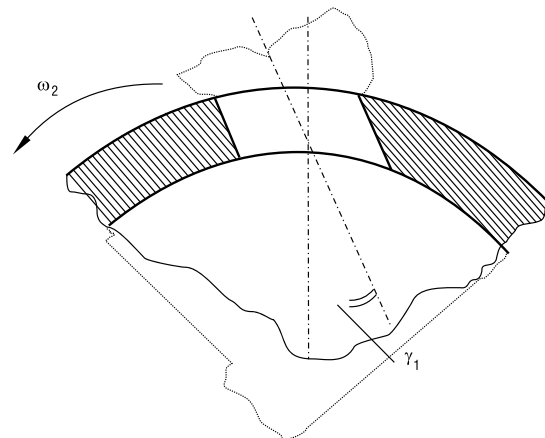


Рис. 3. Нерадиально ориентированный канал (свободный удар).

Fig. 3. Not radially oriented pipe (free impact).

2. Увеличение каналов второго ряда z_2 повышает вероятность свободного входа частицы в канал.

3. Увеличение z_2 снижает жесткость и прочность активного элемента, так как он представляет собой консольную балку [5-8], величина напряжения в заделке которой зависят в третьей степени от её размеров.

4. Податливость балки при ударе крайне нежелательна [15-17]. В настоящее время можно рекомендовать принимать такое z_2 , при котором $b = 5...10$ мм, причем большие значения b должны соответствовать перерабатываемым материалам с высокой ударопрочностью [18]. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Zubov V.V., Simisinov D.I., Akhlyustina N.V., Khazin M.L., Davydov S.Ya. Determination of the parameters of a counterblow grinder // *Refractories and Industrial Ceramics* Vol. 58, No. 5, January, 2018, pp. 521-524. DOI 10.1007/s11148-018-0136-1
2. Ляпцев С.А., Ахлюстина Н.В. Моделирование движения частицы в измельчителе // *Изв. вузов. Горный журнал*. - 2007 - № 8. - С. 107-110.
3. Ляпцев С.А., Потапов В.Я. Математическое описание поведения рудных частиц в воздушном потоке разделительных аппаратов // *Современные проблемы науки и образования*. - 2012. - №1. - С. 7-10.
4. Волков Е.Б., Ляпцев С.А. Связь вероятности прохождения частиц горных пород сквозь решетку грохота с эффективностью грохочения // *Фундаментальные исследования*. - 2014. - № 3. - С. 463-466.
5. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара // М.: Наука, 1977. - 224 с.
6. Потапов В.Я. Разработка математической модели движения частиц в сепараторе по трению и упругости // *Изв. вузов. Горный журнал*. - 2011. - №3. - С. 60-66.
7. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород // Л.: Недра, 1984. - 359 с.
8. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов: учебник для вузов // под ред. А.В. Александрова. - М.: Высшая школа, 2004. - 560 с.
9. Afanasev A.I., Simisinov D.I., Potapov V.Ya. Strengthening the Blades of a High-Speed Mixer on the Basis of Wear Curves // *Refractories and Industrial Ceramics*, Jan. 2016, Vol. 56, Issue 5, pp. 452-455. DOI: 10.1007/s11148-016-9867-z
10. Угольников А.В., Макаров В.Н., Макаров Н.В. Оптимизация геометрических параметров гидровихревого инерционного стратификатора Вентури // *Записки горного института*. - 2019. - Т. 240. - С. 638-648. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.638
11. Таугер В.М. Конструирование мехатронных модулей // Екатеринбург: УрГУПС, 2009. - 336 с.
12. Ахлюстина Н.В., Zubov V.V. Аэродинамика ротора измельчителя встречного удара // *Фундаментальные исследования*. - 2014 - № 8. - С. 1279-1282.
13. Кононенко В.Н., Халкечев К.В. Резонансное разрушение горных пород при дроблении и измельчении // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. - 2010. - № 1. - С. 231-235.
14. Халкечев К.В., Халкечев Р.К. Математическая модель разрушения поликристаллов при квазистатических и ударных нагрузках. // *Горный информационно-аналитический бюллетень. (Научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск)*. - 2011. - С. 22-26.
15. Weglarczyk J. / Optymalizacja ukadowrozdrabniania. / J.Weglarczyk// Rudy: Metale Niezelazne - Warszawa, 1987/ pp.97-99.
16. Tsherbakova S.A. Tchervyakov, S.P. Ivanova. Modern methods of ultrafine grinding and selective disclosure of minerals // *XV Anniversary Balkan Mineral Processing Congress, Bulgaria*, pp. 123-127.
17. Pande G., Beer, G. and Williams, J.R. Numerical Modeling in Rock Mechanics // John Wiley and Sons. - 1990.
18. Патент РФ № 2008125752/03, 10.02.2010. Тумашев А.С., Аввакумов Е.Г. Центробежно-струйная мельница. 2008, Бюлл. №4.

REFERENCES

1. Zubov V.V., Simisinov D.I., Akhlyustina N.V., Khazin M.L., Davydov S.Ya. Determination of the parameters of a counterblow grinder // *Refractories and Industrial Ceramics* Vol. 58, No. 5, January, 2018, pp. 521-524. DOI 10.1007/s11148-018-0136-1
2. Lyaptsev S.A., Akhlyustina N.V. Simulation of particle movement in a grinder // *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal*. 2007, no. 8, pp. 107-110. [In Russ].
3. Lyaptsev S.A., Potapov V.Ya. Mathematical description of the behavior of ore particles in the air flow of the separation apparatus // *Sovremennye problem nauki i obrazovaniya*. 2012, no 1. pp.7-10. [In Russ].
4. Volkov E.B., Lyaptsev S.A. Bond between the probability of rock particles passing through the screen of the screen with screening efficiency // *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014, no. 3. pp. 463-466. [In Russ].
5. Panovko Ya.G. Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara [Introduction to the theory of mechanical shock], Moscow, Nauka, 1977, 224 p. [In Russ].
6. Potapov V.Ya. Development of a mathematical model of particle motion in a friction and elasticity separator // *Izv. vuzov. Gornyzhurnal*. 2011, No. 3. pp.60-66. [In Russ].
7. Rzhetskii V.V., Novik G.Ya. Osnovy fiziki gornykh porod [Fundamentals of the physics of rocks], Leningrad: Nedra, 1984, 359 p. [In Russ].
8. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]: textbook for universities // ed. A.V. Alexandrova. Moscow, Higher school, 2004, 560 p. [In Russ].
9. Afanasev A.I., Simisinov D.I., Potapov V.Ya. Strengthening the Blades of a High-Speed Mixer on the Basis of Wear Curves // *Refractories and Industrial Ceramics*, Jan. 2016, Vol. 56, Issue 5, pp. 452-455. DOI: 10.1007/s11148-016-9867-z.
10. Ugol'nikov A.V., Makarov V.N., Makarov N.V. Optimization of the geometric parameters of the hydro-turbulent inertial Venturistratifier. *Zapiski gornogo instituta*. 2019. vol. 240. pp. 638-648. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.638. [In Russ].
11. Tauger V.M. Konstruirovaniye mekhatronnykh modulei [Construction of mechatronic modules], Yekaterinburg: UrGUPS, 2009, 336 p. [In Russ].
12. Akhlyustina N.V., Zubov V.V. Oncoming impact chopper rotor aerodynamics. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014, no. 8. pp. 1279-1282. [In Russ].
13. Kononenko V.N., Khalkechev K.V. Resonant destruction of rocks during crushing and grinding // *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2010. no. 1. pp. 231 - 235. [In Russ]
14. Khalkechev K.V., Khalkechev R.K. Mathematical model of the destruction of polycrystals under quasi-static and shock loads. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (Nauchno-tekhnicheskii zhurnal). Otdelnye stati (spetsialnyi vypusk)*. 2011, pp. 22-26. [In Russ]
15. Weglarczyk J. / Optymalizacja ukadowrozdrabniania. / J.Weglarczyk // Rudy: Metale Niezelazne - Warszawa, 1987/ pp.97-99.
16. Tsherbakova S.A. Tchervyakov, S.P. Ivanova. Modern methods of ultrafine grinding and selective disclosure of minerals. *XV Anniversary Balkan Mineral Processing Congress, Bulgaria*, pp. 123 - 127.
17. Pande G., Beer, G. and Williams, J.R. Numerical Modeling in Rock Mechanics // John Wiley and Sons. - 1990.
18. Tumashev A.S., Avvakumov E.G. Patent RU2381070 C1, 10.02.2010. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Афанасьев Анатолий Ильич:
 профессор кафедры технической механики,
 доктор технических наук,
 Федеральное государственное бюджетное
 учреждение науки «Уральский государственный
 горный университет»,
 г. Екатеринбург, Россия,
 e-mail: anatoli.afan1948@yandex.ru



Зубов Владимир Владимирович:
 доцент кафедры эксплуатации горного
 оборудования,
 кандидат технических наук,
 Федеральное государственное бюджетное
 учреждение науки «Уральский государственный
 горный университет»,
 г. Екатеринбург, Россия,
 e-mail: v.zubov.r66@yandex.ru



Потапов Валентин Яковлевич:
 профессор кафедры горной механики,
 доктор технических наук,
 Федеральное государственное бюджетное
 учреждение науки «Уральский государственный
 горный университет»,
 г. Екатеринбург, Россия,
 e-mail: 2c1@inbox.ru



Потапов Владимир Валентинович:
 доцент кафедры горного дела,
 кандидат технических наук,
 Федеральное государственное бюджетное
 учреждение науки «Уральский государственный
 горный университет»,
 г. Екатеринбург, Россия,
 e-mail: 2c1@inbox.ru



Упоров Сергей Александрович:
 проректор УМК УГГУ,
 кандидат технических наук,
 Федеральное государственное бюджетное
 учреждение науки «Уральский государственный
 горный университет»,
 г. Екатеринбург, Россия,
 e-mail: uporovsa@m.ursmu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Afanasyev Anatoly Ilyich:
 professor of the department of tech mechanics,
 doctor of technical sciences,
 Ural State Mining University,
 Yekaterinburg, Russia,
 e-mail: anatoli.afan1948@yandex.ru

Zubov Vladimir Vladimirovich:
 associate professor of the department of operation
 of mining equipment,
 candidate of technical sciences,
 Ural State Mining University,
 Yekaterinburg, Russia,
 e-mail: v.zubov.r66@yandex.ru

Potapov Valentin Yakovlevich:
 professor of the department of tech mechanics,
 doctor of technical sciences,
 Ural State Mining University,
 Yekaterinburg, Russia,
 e-mail: 2c1@inbox.ru

Potapov Vladimir Valentinovich:
 associate professor of the department of operation
 of mining equipment,
 candidate of technical sciences,
 Ural State Mining University,
 Yekaterinburg, Russia,
 e-mail: 2c1@inbox.ru

Uporov Sergey Aleksandrovich:
 prorektor URSMU,
 candidate of technical sciences,
 Ural State Mining University,
 Yekaterinburg, Russia,
 e-mail: uporovsa@m.ursmu.ru

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.