



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.735

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-44-49

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАГЕНТОВ-ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ПОМОЛА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ

Гришин И.А.¹, Дегодя Е.Ю.¹, Гмызина Н.В.¹, Кутлубаев И.М.¹, Зотеев О.В.²¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия²Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В статье представлены результаты лабораторных исследований по повышению измельчаемости золотосодержащей руды, рекомендованные для внедрения. Рассмотрен один из наиболее эффективных методов повышения измельчаемости – реагентная обработка. Достижимый эффект при применении интенсификаторов помола объясняется снижением налипания мелких частиц на более крупные и эффектом Ребиндера. Объектом исследования являлась технологическая проба упорной золотосодержащей руды кварц-пиритового типа. **Цель работы.** Проведение технологических исследований для повышения производительности отделения измельчения золотоизвлекательной фабрики с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами, что объясняет выбор авторов в пользу реагентной обработки. **Используемые методы.** Пробоподготовка, заключающаяся в доведении представительной пробы до машинного класса крупности, пригодного для лабораторной мельницы –2+0 мм, ее усреднении, разделении на навески, определении вещественного состава пробы. Элементный и фазовый состав определяли химическим и рентгенофазовым методами. Комплекс методик по изучению физико-механических свойств проб с определением измельчаемости и удельной поверхности. **Результат.** Проведено три серии опытов для подбора времени измельчения и влияния реагентов на измельчаемость. Определено оптимальное время измельчения пробы в лабораторной мельнице без добавления реагентов. В качестве наиболее эффективного для данного материала по результатам предварительных исследований выбраны реагенты известь, Antiprex D и DP-ОМС 1127. Выявлено влияние расхода реагентов-интенсификаторов помола на содержание расчетного класса крупности –74 мкм в измельченном продукте. Установлена возможность повысить измельчаемость руды при применении интенсификатора помола Antiprex D совместно с добавлением извести. По результатам эксперимента принято решение отказаться от применения реагента DP-ОМС 1127. Оптимальный реагентный режим при измельчении руды позволит повысить удельную производительность мельниц, установленных на фабрике, в 1,12 раза, общую производительность действующей фабрики возможно увеличить на 42 тыс. т в год.

Ключевые слова: измельчаемость, золотосодержащая руда, поверхностно-активные вещества, интенсификаторы помола, расчетный класс крупности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект №FRZU-2023–0008).

© Гришин И.А., Дегодя Е.Ю., Гмызина Н.В., Кутлубаев И.М., Зотеев О.В., 2024

Для цитирования

Исследование влияния реагентов-интенсификаторов помола на результаты измельчения золотосодержащей руды / Гришин И.А., Дегодя Е.Ю., Гмызина Н.В., Кутлубаев И.М., Зотеев О.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 44-49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-44-49>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDY OF THE INFLUENCE OF GRINDING INTENSIFIER REAGENTS ON THE RESULTS OF GRINDING GOLD ORE

Grishin I.A.¹, Degodya E.Yu.¹, Gmyzina N.V.¹, Kutlubayev I.M.¹, Zoteev O.V.²

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The article presents the results of laboratory reseaches on increase the grindability of gold ore recommended for implementation. One of the most effective methods for increasing grindability such as reagent treatment is considered. The effect achieved when using grinding intensifiers is explained by a decrease in the adhesion of small particles to larger ones and the Reh binder effect. The object of the research was a technological sample of refractory gold-bearing ore of the quartz-pyrite type. **Objectives.** It's required to conduct technological research to increase the productivity of the grinding department of the gold recovery plant with minimal capital and operating costs, which explains the authors' choice in favor of reagent treatment. **Methods Applied.** Sample preparation, which consists in bringing a representative sample to a machine size class suitable for a laboratory mill -2 + 0 mm, averaging it, dividing it into samples, determining the material composition of the sample was used. The elemental and phase composition were determined by chemical and X-ray phase methods. A set of techniques for studying the physical and mechanical properties of samples with determination of the shreddability and specific surface area was applied. **Result.** Three sets of experiments were conducted to select the grinding time and the effect of reagents on grindability. The optimal time for grinding a sample in a laboratory mill without adding reagents was determined. Based on the results of preliminary studies, lime, Antiprex D and DP-OMC 1127 reagents were selected as the most effective for this material. The effect of reagent consumption of grinding intensifiers on the content of the estimated size of -74 microns class in the ground product was revealed. The possibility of increasing the grindability of ore using the Antiprex D grinding intensifier together with the addition of lime was established. Based on the experiment results, a decision was made to abandon the use of DP-OMC 1127 reagent. The optimal reagent mode for ore grinding will increase the specific productivity of the mills installed at the plant by 1.12 times, the total productivity of the existing plant can be increased by 42 thousand tons per year.

Keywords: grindability, gold ore, surfactants, grinding intensifiers, calculated size class

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FRZU-2023-0008).

For citation

Grishin I.A., Degodya E.Yu., Gmyzina N.V., Kutlubayev I.M., Zoteev O.V. Study of the Influence of Grinding Intensifier Reagents on the Results of Grinding Gold Ore. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 44-49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-44-49>

Введение

В процессах обогащения минерального сырья около 70% энергии расходуется на дробление и измельчение руды. Расход электроэнергии на процесс измельчения до крупности 0,05-0,1 мм в зависимости от типа руд составляет от 20 до 80 кВт·ч/т [1, 2].

В то же время увеличение тонины помола обусловлено как вовлечением в переработку более сложных руд с минеральными комплексами, имеющими тонкое взаимопрорастание составляющих их минералов, так и необходимостью переработки техногенного, уже подвергнувшегося процессам уменьшения крупности сырья.

Одним из направлений повышения эффективности работы измельчительного оборудования является применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) [3]. Этот способ интенсификации помола не требует значительных капитальных затрат в условиях действующего производства и наиболее прост с точки зрения аппаратного оформления.

Эффект от измельчения сырья в присутствии ПАВ может заключаться в увеличении производительности мельниц при сохранении прежней тонины помола, уменьшении удельных расходов электроэнергии, шаров и футеровки. Иногда основную цель метода усматривают в увеличении количества извлеченного ценного компонента за счёт избирательности вскрытия минералов при неизменных затратах [4].

Механизм действия интенсификаторов помола основан на адсорбции молекул ПАВ на поверхности частиц, что позволяет:

- снять электростатические заряды с поверхности частиц, что предотвращает агрегирование мелких частиц (coating), устраняет проблему налипания материала на шары и бронефутеровку мельниц;
- понизить твердость измельчаемых продуктов (эффект П.А. Ребиндера), тем самым снизить энергозатраты на помол;

- изменить коэффициент сцепления (трения) между мелющими телами, бронефутеровкой и материалом, тем самым повысить силу удара и истирающего воздействия;

- повысить скорость продвижения материала по мельнице и циркуляцию в поперечном сечении [5].

Одной из главных особенностей эффекта Ребиндера является его избирательность. Она состоит в том, что требуемое изменение свойств твердого тела может обеспечить только родственное данному телу поверхностно-активное вещество [6, 7].

В работе использовались широкоизвестные интенсификаторы помола: известь, Antiprex D и DP-ОМС 1127.

Целью работы было проведение технологических исследований для повышения производительности отделения измельчения золотоизвлекательной фабрики с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлась проба золотосодержащей руды с массовой долей золота 2,2 г/т. Особенностью технологических испытаний являлось требование применения шаровых мельниц, так как такой тип мельниц установлен на действующей фабрике.

Лабораторные исследования включали следующие этапы:

1. Пробоподготовка по ОСТ 41-08-249-85. 9 и определение вещественного состава проб. Элементный и фазовый состав определяли химическим и рентгенофазовым методами с использованием рентгенового дифрактометра X'Pert PRO PANalytical.

2. Изучение физико-механических свойств проб в соответствии с государственными стандартами: влажность, гигроскопическая влажность по ГОСТ 5180-2015; истинная и насыпная плотность руды по ГОСТ 8269.0-97 и ГОСТ 5180-2015; гранулометрический состав с промывкой водой по ГОСТ 12536-2014.

3. Изучение измельчаемости руды. Исходная проба массой 25 кг высушивалась при нормальных условиях до постоянной массы, затем дробилась на лабораторных щековой и валковой дробилках до крупности -2+0 мм и измельчалась в лабораторной шаровой мельнице с объемом 1,1 дм³. Условия измельчения: степень заполнения мельницы – 40%, масса навески – 352 г, соотношение масс твердое : жидкое : шары – 1 : 0,5 : 6.

Полученные результаты и их обсуждение

По результатам минеральных анализов на трех пробах руды основным порообразующим компонентом является кварц. Полевых шпатов на порядок меньше. Главными рудными минералами являются пирит и блеклая руда, представленная теннантитом. В таблице представлен минеральный состав пробы руды.

После измельчения часть навески в виде пульпы отбиралась для дубликата, оставшаяся часть подвер-

галась ситовому анализу по классу -74 мкм мокро-сухим способом.

Было проведено три серии опытов: подбор времени измельчения, изучение влияния расхода реагента Antiprex D на измельчаемость пробы руды, влияние расхода реагента Antiprex D с добавкой реагента DP-ОМС 1127 на измельчаемость пробы руды.

Таблица. Минеральный состав руды
Table. Mineral composition of ore

Минералы, группы минералов	2016 г	
	Массовая доля, %	
Кварц	61,9	
Слюдистые (серицит, браммалит, мусковит)	16,4	
Глинисто-гидрослюдистые (пирофиллит, иллит, гидробраммалит, гидросерицит)		
Полевые шпаты (плагиоклаз, КПШ)	7,4	
Карбонаты (кальцит, доломит, сидерит)	1,0	
Пирит	9,1	
Халькопирит	Редкие зерна	
Арсенопирит	0,1	
Сфалерит, пирротин, антимонит	Редкие зерна	
Блеклая руда	1,2	
Оксиды, гидроксиды железа	2,0	
Оксисленные минералы меди, куприт	Редкие зерна	
Сульфосоли серебра, теллуриды золота и серебра	Единичные знаки	
Акцессорные минералы: рутил, ильменит, касситерит, гранат, циркон, магнетит, алтаит, барит	0,3	
Итого:	100,0	

Первая серия опытов проводилась с целью установления времени измельчения руды до 70-80 % класса крупности -74 мкм, что объясняется степенью раскрытия минеральных сростков. Серия проводилась без добавления реагентов. Гранулометрический состав исходной руды приведен на **рис. 1**, а результаты исследований по изучению времени измельчения представлены на **рис. 2**.

Как видно из графика на **рис. 2**, массовая доля класса крупности -74 мкм в исходной пробе составляет 4,7%. Оптимальное время измельчения при заданных условиях составляет 25 мин. При этом времени массовая доля класса -74 мкм составляет 72,4%. В дальнейших опытах время измельчения не изменялось и составляло 25 мин.

Вторая серия опытов проводилась при оптимальном и постоянном расходе извести 5 кг/т руды и с изменяющимся от 0 до 1000 г/т расходом реагента Antiprex D. Реагенты добавлялись непосредственно в мельницу перед измельчением. Результаты второй серии опытов представлены на **рис. 3**.

Анализ результатов показывает, что массовая доля класса крупности -74 мкм в измельченном продукте при добавлении извести возрастает до 74%. Добавление реагента Antiprex D в количестве 100 г/т повышает это значение до 80,43%. Дальнейшее увеличение расхода Antiprex D эффекта не оказывает и наблюдается постепенное снижение доли класса -74 мкм до 75,2%.

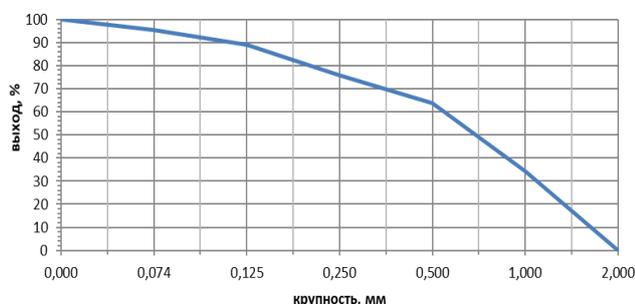


Рис. 1. Результаты гранулометрического состава пробы исходной руды

Fig. 1. Results of the particle size distribution of the original ore sample

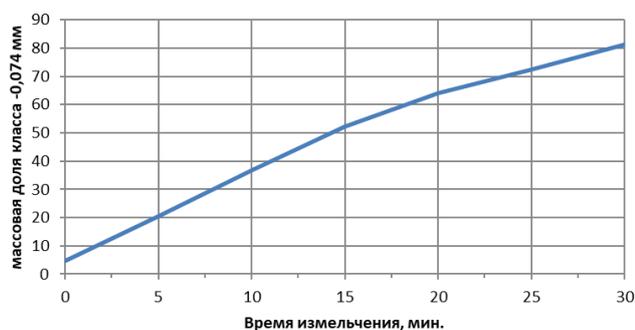


Рис. 2. Влияние времени измельчения на массовую долю класса -74 мкм

Fig. 2. Effect of grinding time on the mass fraction of the -74 microns class

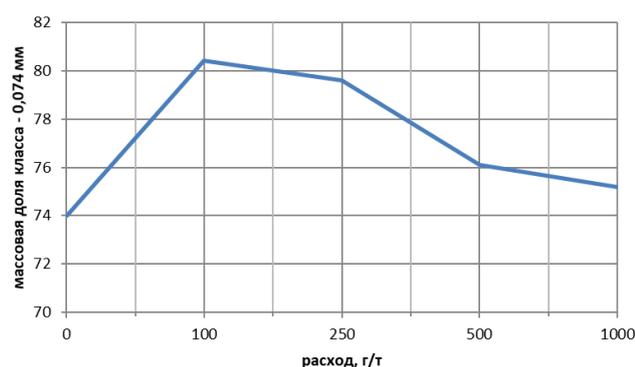


Рис. 3. Влияние расхода Antiprex D на массовую долю класса -74 мкм в измельченном продукте

Fig. 3. The effect of Antiprex D consumption on the mass fraction of the -74 microns class in the crushed product

Третья серия опытов имела целью установить влияние расхода реагента Antiprex D на измельчаемость при постоянных расходах извести и реагента DP-ОМС 1127. При этом расход извести поддерживался на уровне 5 кг/т, расход DP-ОМС 1127 составлял 50 г/т. Расход Antiprex D изменялся от 0 до 1000 г/т. Результаты исследований приведены на рис. 4.

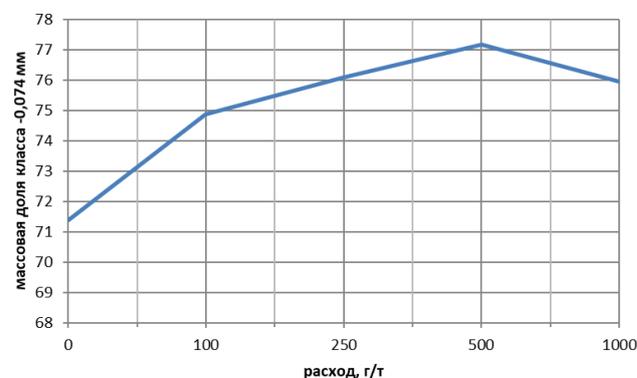


Рис. 4. Влияние расхода реагента Antiprex D в присутствии реагента DP-ОМС 1127 и извести на массовую долю класса -74 мкм в измельченном продукте

Fig. 4. Effect of Antiprex D consumption in the presence of DP-ОМС 1127 and lime to a mass fraction of class -74 microns in the ground product

Заключение

Анализ результатов показывает, что массовая доля класса -74 мкм в измельченном продукте в данных опытах несколько ниже, чем в опытах без добавления реагента DP-ОМС 1127. Однако наблюдается постепенное повышение массовой доли класса -74 мкм с 71,38 до 77,18% при увеличении расхода Antiprex D до 500 г/т. Дальнейшее увеличение расхода ведет к незначительному снижению этого показателя до 75,97%. Следует отметить, что добавление реагента DP-ОМС 1127 оказывало влияние на эффективность отмывки мельницы и шаров от измельченного продукта: отмывка происходила намного быстрее и с меньшим расходом промывной воды. В целом показатели измельчения с добавлением DP-ОМС 1127 хуже, поэтому его добавление считаем нецелесообразным.

Наилучшим результатом (80,43% класса -74 мкм) обладает опыт, проведенный при расходах: извести – 5 кг/т и Antiprex D – 100 г/т.

Оптимизированный реагентный режим позволит увеличить производительность шаровых мельниц на 11% и повысить общую производительность зодотизвлекающей фабрики на 42 тыс. т в год по исходной руде.

Список источников

1. Чантурия В.А. Инновационные процессы в технологиях переработки труднообогатимого минерального сырья // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 6. С. 558-568.
2. Khurmamatov A., Sultanova M., Mukhamedbaev A. Intensifying the cement grinding process // *Universum: технические науки*. 2024, no. 5-8(122), pp. 57-62. EDN XNXAEI.
3. Гмызина Н.В. Интенсификация процесса измельчения конвертерных шлаков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 3(27). С. 13-14. EDN KVLIDL.
4. Замотин П.А., Лобанов В.Г. Интенсификация процесса измельчения золотосодержащей руды с использованием поверхностно-активных веществ и дополнительной обработкой ультразвуком // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 25-32. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-25-32.
5. Классификации технологических добавок при помоле цемента / Л.Д. Шахова, Р.А. Черкасов, Н.М. Березина, Д.Б. Манелюк // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 12-2. С. 295-299.
6. Горюнов Ю.В., Перцов Н.В., Сумм Б.Д. Эффект Ребиндера. М., 1966.
7. Ребиндер П.А., Шукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // *Успехи физических наук*. 1972. Т. 108. Вып. 1. С. 3.
8. Pretreatment of rocks prior to comminution - A critical review of present practices / Somani A., Nandi, T.K., Pal, S.K., Majumder, A.K. // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, no. 2, pp. 339-348.
9. Chakka V. M., Altuncevahir B., Jin Q., Li Y., Liu J. P.. Surfactant assisted ball milling // *Journal of applied physics*. 2006, vol. 99, pp. 99-101.
10. Mahbub Ullah, Md. Edqub Ali, Sh. Bee. Abd Hamid. Surfactant-assisted ball milling // *Universiti Malaya*. 2013.
11. Использование интенсификаторов помола при переработке железосодержащих руд / Г.В. Митрофанова, Е.В. Черноусенко, В.Ю. Голубев, Е.В. Матвеева // *Обогащение руд*. 2020. № 3. С. 3-7. DOI: 10.17580/or.2020.03.01. EDN GBEYBM.

References

1. Chanturia V.A. Innovative processes in technologies for processing refractory mineral raw materials. *Geologiya rudnyh mestorozhdenij* [Geology of ore deposits], 2008;50(6):558-568. (In Russ.)
2. Khurmamatov A., Sultanova M., Mukhamedbaev A. Intensifying the cement grinding process. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences]. 2024;(5-8(122)):57-62. EDN XNXAEI.
3. Gmyzina N.V. Intensification of the converter slag grinding process. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of the Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009;(3(27)):13-14. (In Russ.) EDN KVLIDL.
4. Zamottin P. A., Lobanov V.G. Intensification of the process of grinding gold-bearing ore using surfactants and additional ultrasound treatment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of the Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018;16(3):25-32. (In Russ.). DOI:10.18503/1995-2732-2018-16-3-25-32.
5. Shakhova L.D., Cherkasov R.A., Berezina N.M., Manelyuk D.B. Classification of technological additives in cement grinding. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2014;(12-2):295-299. (In Russ.)
6. Goryunov Yu.V., Pertsov N.V., Summ B.D. Rehbinder effect. Moscow, 1966. (In Russ.)
7. Rehbinder P.A., Shchukin E.D. Surface phenomena in solids in the processes of their deformation and destruction. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 1972;108(1):3. (In Russ.)
8. Somani A., Nandi T.K., Pal S.K., Majumder, A.K. Pretreatment of rock prior to communion - A critical review of present practices. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017;27(2):339-348.
9. Chakka V.M., Altuncevahir B., Jin Q., Li Y., Liu J.P. Surfactant assisted ball milling. *Journal of applied physics*. 2006;99:99-101.
10. Mahbub Ullah, Md. Edqub Ali. Surfactant-assisted ball milling. University of Malaya. 2013.
11. Mitrofanov G.V., Chernousenko E.V., Golubev V.Yu., Matveeva E.V. Use of grinding intensifiers in the processing of iron-containing ores. *Obogashchenie rud* [Ore enrichment], 2020;(3):3-7. (In Russ.) DOI: 10.17580/or.2020.03.01. EDN GBEYBM.

Поступила 01.11.2024; принята к публикации 22.11.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 01/11/2024; revised 22/11/2024; published 24/12/2024

Гришин Игорь Анатольевич – кандидат технических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: igorgri@mail.ru. ORCID 0000-0001-8010-7542

Дегодя Елена Юрьевна – кандидат технических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: magur@mail.ru. ORCID 0000-0002-4220-7371

Гмызина Наталья Викторовна – кандидат технических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: gmnat1307@mail.ru. ORCID 0000-0002-7959-4504

Кутлубаев Ильдар Мухаметович – доктор технических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: Ptmr74@mail.ru. ORCID 0000-0002-1761-4258

Зотеев Олег Владимович – доктор технических наук,
Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.
Email: zoteev.o@mail.ru. ORCID 0009-0003-8521-0372

Igor A. Grishin – PhD (Eng.),
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: igorgri@mail.ru. ORCID 0000-0001-8010-7542

Elena Y. Degodya – PhD (Eng.),
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: magur@mail.ru. ORCID 0000-0002-4220-7371

Natalya V. Gmyzina – PhD (Eng.),
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: gmnat1307@mail.ru. ORCID 0000-0002-7959-4504

Ildar M. Kutlubayev – DrSc (Eng.),
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: Ptmr74@mail.ru ORCID 0000-0002-1761-4258

Oleg V. Zoteev – DrSc (Eng.),
Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
Email: zoteev.o@mail.ru. ORCID 0009-0003-8521-0372