ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(11-1):171–178
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.73 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_171

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ШАРОВОЙ ЗАГРУЗКИ НА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ МЕЛЬНИЦЫ

Ю. А. Лагунова[1], В. С. Шестаков[1], Н. В. Савинова[1], А. Р. Мукатов[1]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Рассмотрена возможность повышения производительности существующих барабанных мельниц за счет увеличения шаровой загрузки. Увеличение шаровой загрузки по сравнению с паспортными значениями завода-изготовителя будет сопровождаться увеличением нагрузок на металлоконструкции мельницы и ее привод, потому необходимо провести соответствующие исследования. Проверочные прочностные расчеты элементов корпуса мельницы и металлоконструкций зубчатого венца проведены методом конечных элементов с помощью CAE-программы АПМ WinMachine, в специализированном модуле Structure 3D. Модели формы исследуемых элементов выполнены в CAD системе. Предпроцессорная подготовка проводилась в модуле АПМ Studio, где была выполнена генерация конечно-элементной сетки, использовались объемные конечные элементы. В статье приведены уравнения для расчета усилий на металлоконструкции мельницы, совокупность которых составляет модель нагружения. Описана методика подбора расчетных параметров. Выполненные расчёты металлоконструкций корпуса и зубчатого венца мельницы ММПС 7,0×5,2 показали возможность увеличения шаровой загрузки на 15% по сравнению с паспортной. Для окончательных выводов по мельнице в целом необходимы исследования возможностей элементов привода. Исследованиями доказана допустимость увеличения шаровой загрузки на 15% по сравнению с паспортной при обеспечении прочности узлов мельницы.

Ключевые слова: шаровая мельница, загрузка, производительность, расчет, модель, метод конечных элементов, корпусные детали.

Для цитирования: *Лагунова Ю. А., Шестаков В. С., Савинова Н. В., Мукатов А. Р.* Исследование влияния повышения шаровой загрузки на металлоконструкции мельницы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11-1. — С. 171–178. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_171.

Effect of increased ball mill feed on steel construction

Yu. A. Lagunova[1], V. S. Shestakov[1], N. V. Savinova[1], A. R. Mukatov[1]

[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: The article discusses feasibility of enhancing drum mill capacity owing to increased ball feed. The increase in the ball mill feed over the manufacturer's specifications can raise loads on steel structures of the mill and its drive. Thus the adequate investigation is required to be undertaken. The strength check calculations of the mill body components and the tooth ring are implemented using the finite element method in APM WinMachine's CAE, in module

© Ю. А. Лагунова, В. С. Шестаков, Н. В. Савинова, А. Р. Мукатов. 2021

Structure 3D. The test elements were modeled in CAD. The pre-processing preparation was performed in APM АПМ Studio, including generation of 3D finite element mesh. This article presents the equations for mill steelwork forces, which, in aggregate, provide the loading model. The procedure of selecting calculation parameters is described. The calculations performed for steel structures of the body and tooth ring of mill MMPS 7.0×5.2 real the feasible increase in the ball feed of the mill by 15% as against its specifications. The strength of the mill assemblies under the increased loading is preserved. For coming to a final conclusion, it is necessary to study drive capacities.

Key words: ball mill, feed, capacity, calculation, model, finite element method, body parts.

For citation: Lagunova Yu. A., Shestakov V. S., Savinova N. V., Mukatov A. R. Effect of increased ball mill feed on steel construction . *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11-1):171–178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_171.

Введение

Для увеличения производительности существующих мельниц можно оперировать скоростью вращения [1 — 6], обеспечивая рациональные режимы измельчения. Вторым направлением может быть увеличение загрузки мельницы измельчаемым материалом и шарами [7 — 11]. Здесь также существует рациональное значение. Как в первом варианте регулирования, так и во втором, нужно проводить расчеты, которые подтвердят возможность изменения параметров.

Цель и задачи работы

При изменении объема загрузки или частоты вращения изменяются нагрузки на конструкцию мельницы, поэтому нужно выполнить проверку прочности и долговечности ее корпусных элементов [9 — 14]. Для таких расчетов можно применить CAE систему APM *WinMachine*.

Модуль системы APM Structure 3D позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние объекта, анализ которого дает возможность оценить прочность корпусных деталей. Модуль предназначен для комплексного анализа трехмерных конструкций произвольной формы. В нем методом конечных элементов выполняются прочностные расчеты произвольно закрепленных моделей. Расчетная структура объекта может быть выполнена стержневыми, пластинчатыми и объемными solid-элементами. Исходные упруго-деформационные характеристики элементов при этом могут быть линейными, а также геометрически и физически нелинейными.

Для выполнения исследований составляется расчетная модель, в которую входят:

– виртуальная геометрическая модель корпуса мельницы, выполненная определенным типом конечных элементов с достаточным шагом дискретизации;

– модель нагружения, совокупность наложенных на расчетную модель нагрузок, имитирующих действующие внешние и внутренние усилия.

К внутренним усилиям относятся силы тяжести элементов мельницы, усилия, передаваемые от одних узлов мельницы другим. Силы тяжести в системе APM *WinMachine* определяются автоматически по размерам элементов и плотности материала, используются в расчетах с пересчетом через задаваемый коэффициент. Коэффициентами учитываются элементы, силы тяжести которых нагружают несущие конструкции, но сами эти элементы никак не участвуют в обеспечении прочности объекта. Для мельницы такими элементами будут брони. Брони

прикрепляются к корпусу барабана и торцевым крышкам, но не участвуют в обеспечении прочности указанных элементов. Коэффициент определяется делением действительной массы мельницы на массу модели.

Внутренними нагрузками будут инерционные силы при разгоне барабана и центробежные силы при вращении барабана. Инерционные моделируются крутящими моментами, задаваемыми в местах соединения барабана с крышками, зубчатого венца с корпусом барабана. Центробежные силы проявляются при вращении барабана от всех связанных с барабаном элементов (стенок корпуса, крышек, футеровок и др.). В расчетной схеме инерционные силы от футеровок прикладываются в виде распределенных по внутренней поверхности барабана сил.

Внешними нагрузками для барабана будут силы со стороны измельчаемого материала и шаров, усилие на зубчатый венец, реакции от подшипников.

Расчет инерционных нагрузок на корпус барабана

При вращении барабана мельницы в оболочке, бронях и измельчаемом материале возникают центробежные силы, которые должны учитываться при расчетах на прочность. Инерционная сила определяется по известной формуле:

$$F_{ин i} = m_i \cdot \omega_б^2 \cdot r_i, \qquad (1)$$

где m_i — масса i-го участка при расчете инерционной силы; r_i — радиус от оси вращения до i-го участка при расчете инерционной силы; $\omega_б$ — угловая скорость вращения барабана мельницы.

Масса i-го участка:

$$m_i = \gamma s_i h_i, \qquad (2)$$

где h_i — толщина i-го участка, м; s_i — площадь i-го участка, м^2; γ — плотность, кг/м^3.

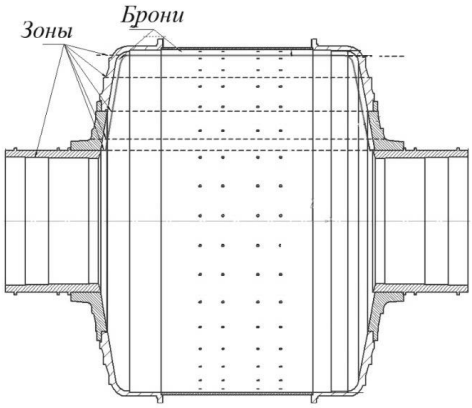

Рис. 1. Схема барабана мельницы с разбивкой на зоны
Fig. 1. Mill drum layout per zones

Инерционные силы для ввода в расчетную схему определяются по зонам: барабан с футеровками, участки стенок с футеровками загрузочных и разгрузочных крышек, цапфа. Разбивка по зонам выполняется по толщине i-го участка. В системе *APM WinMachine* распределенные нагрузки прикладываются в виде давления на поверхность. Для стенок, поверхности которых располагаются под углом к направлению инерционных сил, необходим перерасчет умножением на $sin\beta$ угла наклона поверхности к вертикали.

$$P_{ин} = F_{ин} \sin\beta. \qquad (3)$$

На рис. 1 приведена схема барабана дробилки с разбивкой на зоны.

Расчет массы загруженного в мельницу материала выполняется по следующим исходным данным: $V_м$ — объем мельницы, м^3; $\varphi_{гм}$ — степень заполнения барабана; $\gamma_{гм}$ — плотность мелющей горной массы, кг/м^3; $\delta_ш$ — загрузка барабана мелющими телами (доля от объема мельницы); $\gamma_ш$ — плотность шаров, кг/м^3.

$$V_{гм} = V_м \, \varphi_{гм}. \qquad (4)$$

Масса горной массы в мельнице

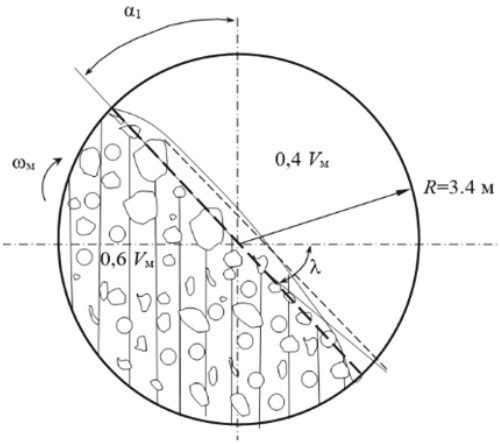

Рис. 2. Схема для расчета сил тяжести
Fig. 2. Gravity force calculation diagram

$$m_{гм} = V_{гм}\gamma_{гм}. \quad (5)$$

Объем мелющих тел (шаров)

$$V_ш = V_м\varphi_ш. \quad (6)$$

Масса мелющих тел

$$m_ш = V_ш\gamma_ш. \quad (7)$$

Суммарная масса измельчаемого материала и шаров

$$m_\Sigma = m_{гм} + m_ш. \quad (8)$$

Расположение измельчаемого материала и шаров в мельнице. Теория движения загрузки в барабанных мельницах (шары и измельчаемый материал) разработана рядом русских и зарубежных ученых: Э. В. Дэвисом, Л. Б. Левенсоном, В. А. Олевским, С. Е. Андреевым [2—5] и др. Для расчета усилий от материала и шаров использована схема водопадного режима, представленная на рис. 2.

Измельчаемый материал и шары занимают примерно 0,6 объема мельницы, причем материал и шары смещены на некоторую высоту от плоскости симметрии мельницы в сторону вращения. Угол смещения определяется формой профиля футеровки барабана и угловой скоростью вращения мельницы. Верхней пунктирной линией показана граница измельчаемого материала.

Угол наклона этой линии определяется по формуле

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{\pi^2 n^2 R_1}{900g}\right), \quad (9)$$

где α_1 — угол между радиусом, проведенным в центр отрывающегося шара, и вертикальной осью мельницы, рад; R_1 — радиус барабана мельницы в свету, м; — ускорение свободного падения (g = 9,81 м/с^2); n — действительная частота вращения барабана, мин$^{-1}$.

Силы тяжести действуют вертикально. Для приложения в расчетной схеме действия этих сил реализуется в виде давления. При расчетах напряжений давление можно определять по упрощенным формулам без учета криволинейной поверхности границы измельчаемого материала. На рис. 2 верхней пунктирной линией показана замена криволинейной границы прямым отрезком.

Расчет давления выполняется по текущей высоте измельчаемого материала, которая вычисляется по формулам геометрии.

Расчет центробежных сил от измельчаемого материала и шаров. Центробежные силы направлены от оси вращения на поверхность барабана и стенок. Объем, расположенный выше пунктирной линии, не оказывает давления на стенки барабана. Поэтому для расчета инерционных сил рассматривается только объем, занимаемый измельчаемым материалом. Для расчета давления рассматривается сектор с вершиной на оси вращения. Расстояние $R_{цт}$ до центра масс сектора от оси вращения

$$R_{цт} = (2/3)\,R. \quad (10)$$

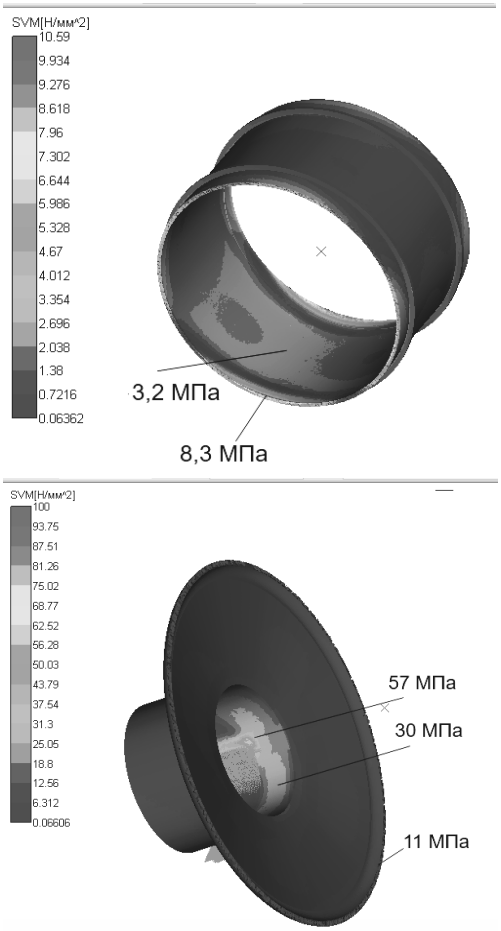

Рис. 3. Карта напряжений цапфы и корпуса
Fig. 3. Stress map of trunnion and body

Расчет давления производился исходя из принятых параметров: хорда 1 мм, радиус до броней 3400 мм.

Давление на поверхность брони

$$P_{цб} = m_{\Delta}\omega_{м}^{2}R_{цт}, \qquad (11)$$

где m_{Δ} — масса треугольной призмы высотой R.

$$m_{\Delta} = 0{,}5\gamma AR, \qquad (12)$$

где A — площадь основания призмы, для расчета принята 1 мм^2.

Для мельницы ММПС 7,0×5,2 выполнены проверочные расчеты при увеличении шаровой загрузки на 15% по сравнению с паспортной. Карты напряжений корпуса и цапф приведены на рис. 3.

Расчетные значения напряжений для цапфы не превышает 57 МПа, для корпуса — 11 МПа, что значительно ниже допустимого напряжения стали (180 МПа). Эти два основные узла мельницы удовлетворяют условию прочности.

Модель нагружения металлоконструкции зубчатого венца, жёстко связанного с корпусом мельницы, включает силы, передаваемые на металлоконструкцию от зубчатого зацепления. Величины нагрузок принимались по номинальному крутящему моменту и с учетом возможных перегрузок.

Окружное усилие

$$F_t = \frac{2T_б}{d_2}, \qquad (13)$$

где $T_б$ — крутящий момент на барабане; d_2 — делительный диаметр зубчатого венца.

Радиальная сила

$$F_r = F_t \frac{tg\alpha_w}{\cos\beta}, \qquad (14)$$

где α_w — угол зацепления; β — угол наклона зубьев косозубой передачи.

Осевая сила

$$F_a = F_t \operatorname{tg}\beta \qquad (15)$$

Рассматривались два положения нагрузки от зацепления: над ребром жесткости и в межреберном пространстве, над отверстием четырехугольной формы. В CAE системе такая нагрузка прикладывалась сосредоточенно, в узлах конечно-элементной модели. При наложении нагрузок предполагалось, что нагрузка по контактной линии расположена равномерно. Закрепление модели в виртуальном пространстве выполнялось по поверхности стыка болтового соединения. На рис. 4 приве-

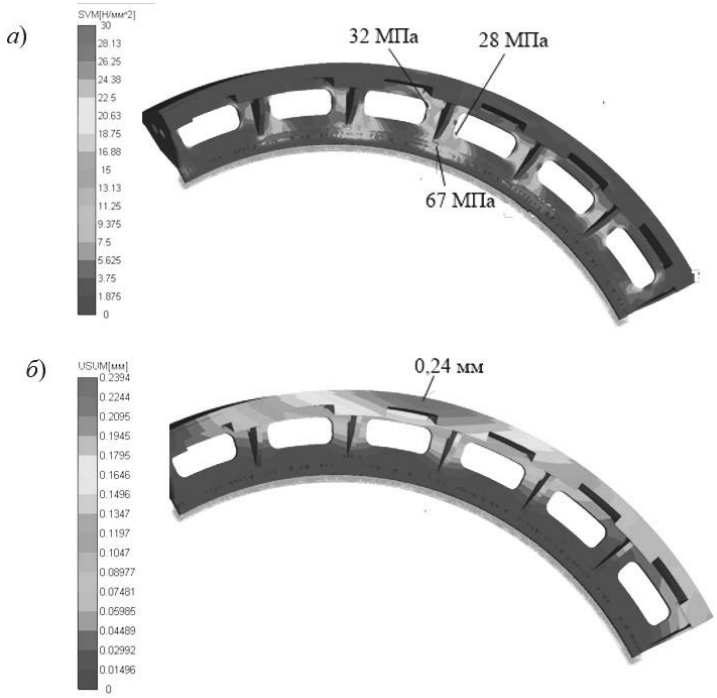

Рис. 4. Карты напряжений (а) и перемещений (б) зубчатого венца
Fig. 4. (a) Stress map and (b) displacement map of tooth ring

дены результаты расчетов напряжений и перемещений.

Наибольшее расчетное значение напряжения в зубчатом венце 67 МПа, что примерно в три раза меньше допустимого. Выполненный расчет перемещений используется для анализа работы зубчатой передачи. Полученное расчетное значение перемещения 0,24 мм показывает, что условия для нормальной работы зубчатой передачи обеспечиваются.

Заключение

1. Результатами расчета напряжений и деформаций для корпуса барабана и стенок доказана возможность увеличения шаровой загрузки мельницы на 15% по сравнению с паспортной. Расчетные значения напряжений имеют величину менее 60 МПа, что значительно меньше допустимого напряжения для используемых сталей.

2. Расчет металлоконструкции зубчатого венца показал достаточный запас прочности для использования этой конструкции при большей загрузке барабана мельницы.

3. Для окончательных выводов возможности повышения шаровой загрузки необходимы расчеты по проверке возможности повышения крутящего момента на валу двигателя привода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бауман В. А.* и др. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций: Учебник для строительных вузов. / А. В. Бауман, Б. В. Клушанцев, В. Д. Мартынов. — 2-е изд., пераб. — М.: Машиностроение, 1981. — 324 с.

2. *Олевский В. А.* Размольное оборудование обогатительных фабрик: Справочное пособие по расчету и эксплуатации шаровых и стержневых мельниц. — М.: Госнаучтехиздат, 1963, 418 с.

3. *Андреев С. Е.*, *Перов В. А.*, *Зверевич В. В.* Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. — М.: Недра, 1980, 415с.

4. *Загустин А. М.* Теория измельчения в шаровой мельнице. Сб. ин-та «Механобр», Л., 1985.

5. *Яшин В. В.*, *Туманян В. А.*, *Беленко Л. Ф.* Влияние длины барабанных мельниц на их производительность. // Обогащение руд, 1973, № 3. С. 17—19.

6. *Фадин Ю. М.*, *Тишакова И. С.*, *Еремченко С. М.*, *Исаев В. С.* Шаровая мельница со сверхкритической скоростью вращения барабана // В сборнике: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Межвузовский сборник статей. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова; под ред. В. С. Богданова. Белгород, 2015. С. 334—336.

7. *Амосов Е. А.* Модель определения оптимального заполнения шаровой мельницы // Современные материалы, техника и технологии. 2020. № 4 (31). С. 4—9.

8. *Осипов Д. А.*, *Филиппов В. Е.* Шаровая мельница с винтообразным углублением // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S24. С. 193—201.

9. Ball mill simulation in wet grinding using a tumbling mill and its correlation to grinding rate / H. Mori, H. Mio, J. Kano, F. Saito // Powder Technology. — 2004. — Vol. 143—144. — P. 230—239. — DOI: 10.1016/j.powtec.2004.04.029.

10. *Reichardt R.*, *Wiechert W.* Event driven simulation of a high energy ball mill. In Proceedings ASIM 2003, p. 249. ASIM 2003.

11. *Benzer H.* Modeling and simulation of a fully air swept ball mill in a raw material grinding circuit. Powder Technology. 2005. Vol. 150. no.3. pp. 145—154.

12. *Ханин С. И.*, *Старченко Д. Н.*, *Мордовская О. С.*, *Хахалев П. А.*, *Харин Н. П.* Определение прочностных параметров энергообъемных устройств шаровых мельниц с применением систем автоматизированного проектирования Наука и бизнес: пути развития. 2019 № 11 (101). С. 86—93.

13. Применение систем автоматизированного проектирования для расчета прочностных параметров классифицирующих устройств шаровых мельниц / С. И. Ханин, Д. Н. Старченко, О. С. Мордовская, Н. П. Харин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2017. — № 12. — С. 181—187. — DOI: 10.12737/article_5a27cb8de48688.43489417.

14. *Povetkin V. V.*, *Sushkova O. A.*, *Ibragimova Z. A.*, Shukhanova Zh. K., *Assan A. E.* Determination of stiffness of structural elements drive ball mill. Naukovij Visnik Nacionalnogo Girnichogo universitetu. 2014. no. 6, pp. 92—96. ГИАБ

REFERENCES

1. Bauman A. V., Klushantsev B. V., Martynov V. D. *Mekhanicheskoe oborudovanie predpriyatij stroitel'nyh materialov, izdelij i konstrukcij* [Mechanical equipment of enterprises of building materials, products and structures]: A textbook for university of civil engineering. 2nd ed., revised. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1981. 324 p. [In Russ]

2. Olevsky V. A. *Razmol'noe oborudovanie obogatitel'nyh fabrik: Spravochnoe posobie po raschetu i ekspluatacii sharovyh i sterzhnevyh mel'nic* [Grinding equipment of processing plants]. Reference manual for the calculation and operation of ball and rod mills. Moscow, Gosnauchtekhizdat. Publ, 1963, 418 p. [In Russ]

3. Andreev S. E., Perov V. A., Zverevich V. V. *Droblenie, izmel'chenie i grohochenie poleznyh iskopaemyh* [Crushing, grinding and screening of minerals]. Moscow, Nedra Publ, 1980, 415 p. [In Russ].

4. Zagustin A. M. *Teoriya izmel'cheniya v sharovoj mel'nice* [Ball mill grinding theory]. Collection of scientific papers «Mechanobr», Leningrad, 1985. [In Russ].

5. Yashin V. V., Tumanyan V. A., Belenko L. F. Influence of the length of drum mills on their productivity. *Obogashchenie rud*, 1973, no. 3, pp. 17—19. [In Russ].

6. Fadin Yu. M., Tishakova I. S., Eremchenko S. M., Isaev V. S. *Sharovaya mel'nica so sverhkriticheskoj skorost'yu vrashcheniya barabana* [Ball mill with supercritical drum rotation speed]. Energosberegayushchie tekhnologicheskie kompleksy i oborudovanie dlya proizvodstva stroitel'nyh materialov Interuniversity collection of articles. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 2015. pp. 334—336 [In Russ].

7. Amosov E. A. Model for determining the optimal filling of a ball mill. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2020. no 4 (31). pp. 4—9 [In Russ].

8. Osipov D. A., Filippov V. E. Ball mill with screw-shaped recess. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017. no S24. pp. 193—201 [In Russ].

9. Ball mill simulation in wet grinding using a tumbling mill and its correlation to grinding rate. H. Mori, H. Mio, J. Kano, F. Saito. Powder Technology. 2004. Vol. 143—144. P. 230—239. DOI 10.1016/j.powtec.2004.04.029.

10. Reichardt R., Wiechert W. Event driven simulation of a high energy ball mill. In Proceedings ASIM 2003, p. 249. ASIM 2003.

11. Benzer H. Modeling and simulation of a fully air swept ball mill in a raw material grinding circuit. Powder Technology. 2005. Vol. 150. no.3. pp. 145—154.

12. Khanin S. I., Starchenko D. N., Mordovskaya O. S., Khakhalev P. A., Kharin N. P. Determination of strength parameters of energy-volume devicess of ball mills using computer-aided design systems. Nauka i biznes: puti razvitiya. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019. no 11 (101). pp. 86—93 [In Russ].

13. Khanin S. I., Starchenko D. N., Mordovskaya O. S., Kharin N. P. Application of computer-aided design systems for calculating the strength parameters of classifying devices of ball shoals. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova*. 2017. no 12. pp. 181—187. DOI 10.12737/article_5a27cb8de48688.43489417.

14. Povetkin V. V., Sushkova O. A., Ibragimova Z. A., Shukhanova Zh. K., Assan A. E. Determination of stiffness of structural elements drive ball mill. *Naukovij Visnik Nacional'nogo Girnichogo universitetu.* 2014. no. 6, pp. 92—96.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лагунова Юлия Андреевна[1] — докт. техн. наук, профессор кафедры «Горных машин и комплексов», e-mail: yu.lagunova@mail.ru;
Шестаков Виктор Степанович[1] — канд. техн. наук, профессор кафедры «Горных машин и комплексов»;
Савинова Наталья Владимировна[1] — канд. техн. наук, доцент кафедры «Горных машин и комплексов»;
Мукатов Аскар Рауифович[1] — аспирант кафедры «Горных машин и комплексов»;
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lagunova Yu. A.[1], Dr. Sci. (Eng.), professor, department of Mining machines and complexes, e-mail: yu.lagunova@mail.ru;
Shestakov V. S.[1], Cand. Sci. (Eng.), professor, department of Mining machines and complexes;
Savinova N. V.[1], Cand. Sci. (Eng.), associate professor department of Mining machines and complexes
Mukatov A. R.[1], graduate student department of Mining machines and complexes;
[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 01.06.2021; получена после рецензии 03.09.2021; принята к печати 10.10.2021.
Received by the editors 01.06.2021; received after the review 03.09.2021; accepted for printing 10.10.2021.