

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ЗАГРУЗКИ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

**Бочков В.С., Бочкова К.В., Бабенко А.Г., Клюкин Д.О.**

*Уральский государственный горный университет, Екатеринбург*

**Ключевые слова:** шаровая мельница, уровень загрузки, вибрационный сигнал, виброскорость, виброперемещение, статистический анализ, частотный анализ, управление технологическими параметрами.

**Аннотация.** В настоящей статье рассматривается проблема управления шаровыми мельницами на горно-обогатительных комбинатах, где отсутствие точного метода измерения уровня загрузки приводит к работе в неоптимальных режимах (недогруз или перегруз), что влечет значительные экономические потери не только из-за снижения производительности, но и из-за снижения энергетической эффективности. Проведенные ранее исследования экспериментальных данных выявили неустойчивую корреляционную связь между массой материала в мельнице и давлением в гидropодшипниках и вибрацией на приводном валу. По этой причине принято решение в необходимости разработки средств «прямого» определения границ объема материала в мельнице. Целью исследования являлось выявление зависимостей характеристик вибрационных и акустических сигналов, возбуждаемых в барабане мельницы, от степени и типа ее загрузки. В ходе лабораторных экспериментов на мельнице Бонда регистрировались вибросигналы (виброскорость  $S$ , виброперемещение  $D$ ) при различных комбинациях загрузки (шары, песок, вода) и расстояния между датчиками и местом удара по барабану. Проведен временной, статистический и частотный анализ сигналов. Установлено, что статистические характеристики сигналов (mean, median, max, std) демонстрируют зависимость от угла между датчиком и ударником, которая в большинстве случаев аппроксимируется степенной функцией второго порядка. Выявлено значительное влияние типа загрузки на амплитуду сигналов: добавление песка к шарам приводит к многократному уменьшению сигналов SX, SZ, DX, DZ, что связывается с потерями энергии на трение в материале и между материалом и барабаном. На основании результатов сформулированы рекомендации по проведению дальнейших исследований для разработки метода оперативного контроля загрузки мельницы.

## INVESTIGATION OF VIBRATION SIGNALS FOR DETERMINING THE LOAD LEVEL OF A BALL MILL

**Bochkov V.S., Bochkova K.V., Babenko A.G., Klyukin D.O.**

*Ural State Mining University, Yekaterinburg*

**Keywords:** ball mill, load level, vibration signal, vibration velocity, vibration displacement, statistical analysis, frequency analysis, process parameter control.

**Abstract.** This article discusses the problem of controlling ball mills at mining and processing plants, where the lack of an accurate method for measuring the load level leads to suboptimal operating conditions (underloading or overloading), which entails significant economic losses not only due to reduced productivity, but also due to reduced energy efficiency. Previous studies of experimental data have revealed an unstable correlation between the mass of the material in the mill and the pressure in the hydraulic bearings and vibration on the drive shaft. For this reason, it was decided that it was necessary to develop means of "direct" determination of the boundaries of the volume of material in the mill. The aim of the study was to identify the dependences of the characteristics of the vibration and acoustic signals excited in the mill drum on the degree and type of its loading. During laboratory experiments at the Bond mill, vibration signals (vibration velocity  $S$ , vibration displacement  $D$ ) were recorded at various loading combinations (balls, sand, water) and the distance between the sensors and the drum impact site. Time, statistical and frequency analysis of the signals is carried out. It is established that the statistical characteristics of the signals (mean, median, max, std) demonstrate a dependence on the angle between the sensor and the impactor, which in most cases is approximated by a second-order power function. A significant effect of the loading type on the amplitude of the signals has been revealed: the addition of sand to the balls leads to a multiple decrease in the signals SX, SZ, DX, DZ, which is associated with energy losses due to friction in the material and between the material and the drum. Based on the results, recommendations are formulated for further research to develop a method for operational control of mill loading.

### Введение

Шаровые мельницы являются ключевым оборудованием на горно-обогатительных комбинатах (ГОК). Оптимальный с точки зрения удельного расхода энергоресурсов режим

работы достигается при максимально возможной загрузке барабана, при которой наблюдается наибольшая производительность по готовому классу, ярким примером данного решения является работа мельницы МПСИ 70х23 в условиях обогащательной фабрики одного из ведущих производителей золота и серебра в России. В первые годы работы фабрики проектная и фактическая загрузка мельницы составляла 90 т/ч, после изменения состава обогащаемой руды (в сторону уменьшения содержания полезного компонента), для сохранения рентабельности фактическая производительность мельницы была увеличена до 130 т/ч. Соответственно, управление мельницей при такой высокой производительности требует от мельника высокой концентрации внимания и наличие автоматических средств для контроля загрузки мельницы и недопущения перегруза, который при высокой производительности наступает за гораздо меньший промежуток времени, чем при работе с недогрузом, который также является серьезной проблемой при эксплуатации мельниц. Технологически оптимальный режим 130 т/ч критически близок к состоянию перегруза особенно при закупоривании разгрузочной решетки материалом с высоким содержанием глины. Перегруз сопровождается выносом неизмельченной руды, резким падением производительности и необходимостью остановки агрегата, что ведет к существенным экономическим потерям. Из-за того, что переход от технологически оптимального режима в состояние перегруза происходит на короткий промежуток времени, сейчас для избежания перегруза операторы вынуждены работать с нагрузкой на 5-15% ниже технологически оптимальной. Учитывая высокую мощность привода мельницы (3-4 МВт), даже 5% недогруза означают значительные потери. Повышение же производительности на 1% может принести предприятию существенную прибыль [1, 2].

Основная проблема невозможности устойчивого технологически оптимального управления заключается в отсутствии надежного метода измерения, способного в реальном времени точно определять уровень заполнения мельницы для замыкания контура управления. Ранее авторами были проведены исследования корреляционных связей сигналов от эксплуатируемой системы автоматизации мельницы, которые предположительно могут содержать полезную информацию о степени загрузки мельницы. При этом в качестве эталонной степени загрузки использовался сигнал от аппаратуры «Сигнал-7М», а оценивались давление в гидropодшипниках, вибрации на приводном валу, параметров работы приводного двигателя, производительности питателя и пр. Такой подход оказался порочным по следующим причинам: во-первых, отсутствуют объективные подтверждения того, что «Сигнал-7М» можно рассматривать как достоверный показатель загрузки мельницы; во-вторых, при рассмотрении нескольких временных периодов (по 100-120 часов) в одних случаях были обнаружены значимые корреляционные связи между эталонным сигналом и давлением в гидropодшипниках и вибрацией, в других эти взаимосвязи не подтверждались. Был сделан вывод о том, что перечисленные выше и известные другие косвенные «весовые» методы оценки количества материала и, соответственно, загрузки мельнице недостаточно точны и достоверны или не адаптированы к изменяющемуся составу обогащаемой руды, что характерно для многих «старых» месторождений [1, 3] и конкретных технологических особенностей эксплуатации мельниц. Далее в качестве альтернативы рассматриваются «геометрические» методы оценки, которые основаны на гипотезе о том, что загрузка может быть определена по границам насыпного объема материала в мельнице. Эти границы могут быть обнаружены по параметрам вибро-акустических сигналов, регистрируемых стационарно закрепленными на внешней поверхности барабана мельницы датчиками. Барабан мельницы с закрепленными на нем датчиками вращается, датчики сканируют некоторый периметр сечения, регистрируя вибро-акустические сигналы. Характеристики этих сигналов зависят от расстояния по поверхности барабана до источника возбуждения, уровня и типа загрузки (шары, песок, вода) [4, 5]. Целью настоящего исследования являлось изучение возможности использования вибрационных и акустических сигналов, возбуждаемых в барабане мельницы, для определения коэффициента ее загрузки.

## 1. Методика эксперимента

### 1.1. Объект и схема эксперимента

Объектом исследования служила лабораторная мельница Бонда (рис. 1, а). Для создания контролируемых условий эксперимента вместо вращения барабана и ударов шаров по его внутренней поверхности использовался неподвижный барабан мельницы со стационарной установкой внешнего ударника (с регулируемой скоростью 0-2700 об/мин) и перемещаемыми по периметру сечения барабана датчиками (рис. 1, б) с контролем их положения.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2. Измерения проводились на поверхности барабана в одном сечении в 7 точках с шагом  $45^\circ$  (от  $315^\circ$  до  $45^\circ$ ) относительно неподвижного ударника. Синхронно фиксировались данные с вибродатчика (WitMotion WTVB02-485, рисунок 1) по трем осям (0X, 0Y, 0Z) и микрофона. Регистрировались виброскорость (S), виброперемещение (D) и частота вибраций (F). В каждой точке измерения проводились в течение  $60 \pm 10$  с при включенном ударнике.

**1.2. План эксперимента.** Было проведено 8 серий опытов (А-Н) с различной комбинацией загрузки: серии отличались видом и степенью загрузки (табл. 1), а опыты соответствует углу между ударником и датчиком (рис. 2).

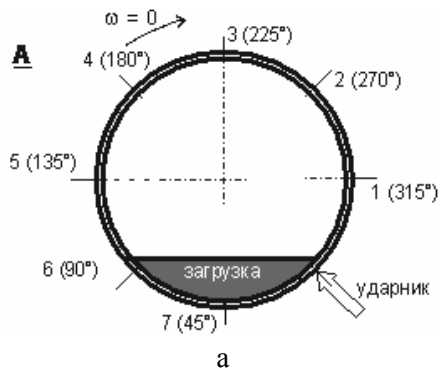


а

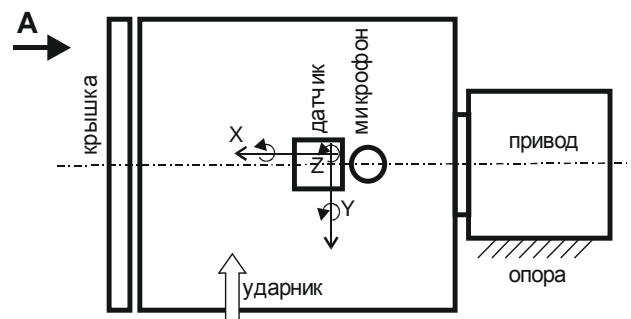


б

Рис. 1. Фотографии лабораторной установки (а) и вибродатчика (б)



а



б

Рис. 2. Схема лабораторной установки: вид спереди (а) и сбоку (б)

Табл. 1. План проведения опытов

| Серия (№№) опытов | Загрузка |           |         |
|-------------------|----------|-----------|---------|
|                   | Шары, %  | Песок, кг | Вода, % |
| А (1...7)         | 0        | 0         | 0       |
| В (1...7)         | 20       | 0         | 0       |
| С (1...7)         | 20       | 3         | 0       |
| Д (1...7)         | 0        | 3         | 0       |
| Е (1...7)         | 0        | 0         | 30-35   |
| Ф (1...7)         | 0        | 0         | 15      |
| Г (1...7)         | ~15      | 0         | ~30     |
| Н (1...7)         | ~15      | ~5        | ~15     |

*Примечание.* В качестве шаровой загрузки использовались стальные шары диаметром 40 мм.

## 2. Обработка и анализ данных

Статистический анализ зависимостей характеристик вибросигнала от его положения. При обработке были рассчитаны в разработанном программном обеспечении в пакете MATLAB следующие статистические характеристики вибросигналов: среднее (mean), медиана (median), максимум (max) и стандартное отклонение (std) и построены графики зависимостей mean, median, max и std для  $S$  и  $D$  по осям  $0X$ ,  $0Y$ ,  $0Z$  от угла между ударником и вибродатчиком для различных серий (рис. 3-6), на рисунках обозначение зависимостей имеет вид «aaaaB», где aaaa – наименование характеристики (mean, median, max и std),  $B$  – параметр вибросигнала ( $S$ ,  $D$ , предварительный анализ показал, что параметр  $F$  не является информативным). Априорно предполагалось, что сигнал будет затухать по мере удаления от ударника по степенной зависимости второго порядка (параболическая функция). Графики для опытов  $D-F$  были не показаны, т.к. характер зависимости не меняется.

Результаты анализа полученных данных показали следующее:

- максимальные значения параметров вибросигнала соответствуют ближайшим к ударнику положениям датчика (углам  $45^\circ$  и  $-45^\circ$ );
- в большинстве случаев полученная зависимость может быть аппроксимирована параболической, что соответствует априорному предположению о затухании вибросигнала при удалении от ударника; при этом линейные зависимости можно рассматривать как вырожденный случай параболических;
- проявляются явные эффекты увеличения затухания наблюдаются при наличии «сплошной» загрузки (вода+шары+песок) с объемом, при котором место нанесения удара оказывается ниже уровня загрузки;
- отклонение от ожидаемого затухания, проявляющееся в наблюдаемом рост параметров вибросигнала в точке, противоположной ударнику ( $180^\circ$ ) может быть объяснено синфазным сложением вибросигналов, распространяющихся по верхней и нижней полуокружностям барабана;
- при недостаточной или несплошной загрузке зависимость часто имеет S-образный характер.

Таким образом, с некоторыми оговорками зависимость параметров вибросигнала ( $v$ ) от угла ( $\alpha$ ) может быть в первом приближении описана степенной функцией второго порядка (параболической):

$$v = a \cdot \alpha^2 + b \cdot \alpha + c, \quad (1)$$

где коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  зависят от степени и типа загрузки.

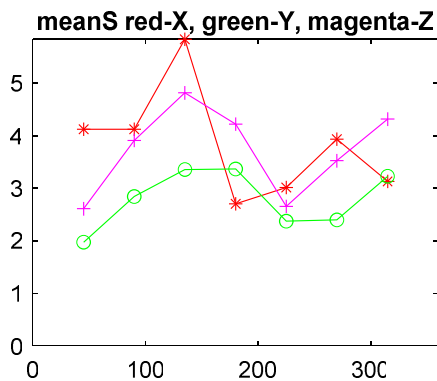


Рис. 3. Зависимости для серии В:

$$\begin{aligned} X - v &= 0,000241\alpha^2 + 0,0605\alpha + 1,18, R^2 \approx 0,78; \\ Y - v &= -0,000123\alpha^2 + 0,0307\alpha + 1,5, R^2 \approx 0,92; \\ Z - v &= -0,000221\alpha^2 + 0,0552\alpha + 1,02, \\ &R^2 \approx 0,81 \end{aligned}$$

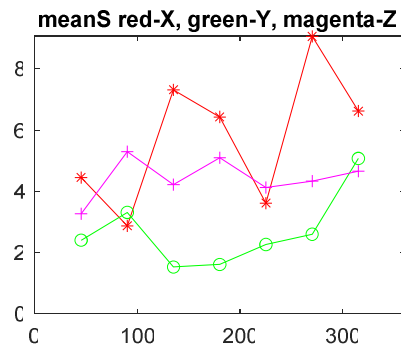


Рис. 4. Зависимости для серии С:

$$\begin{aligned} X - v &= -0,00029\alpha^2 + 0,11\alpha + 0,5, R^2 \approx 0,83; \\ Y - v &= 0,00015\alpha^2 - 0,04\alpha + 4,5, R^2 \approx 0,68; \\ Z - v &= -0,00008\alpha^2 + 0,01\alpha + 4,0, \\ &R^2 \approx 0,76 \end{aligned}$$

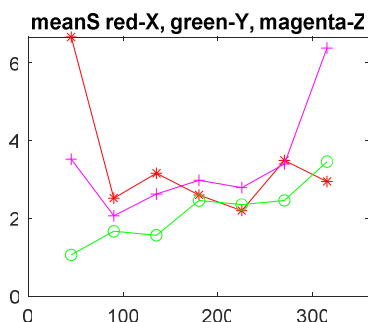


Рис. 5. Зависимости для серии G:  
 $X - v = -0,00019\alpha^2 + 0,04\alpha + 4,0, R^2 \approx 0,71;$   
 $Y - v = 0,00005\alpha^2 - 0,005\alpha + 1,5, R^2 \approx 0,89;$   
 $Z - v = 0,000012\alpha^2 + 0,03\alpha + 4,5, R^2 \approx 0,94.$

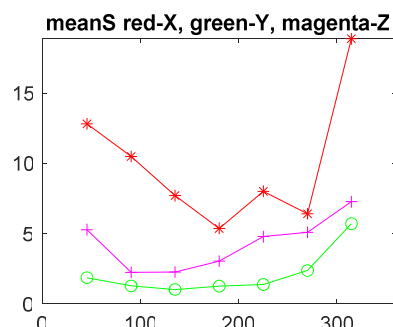


Рис. 6. Зависимости для серии H:  
 $X - v = 0,0008\alpha^2 + 0,5\alpha + 15,0, R^2 \approx 0,65;$   
 $Y - v = 0,0001\alpha^2 - 0,01\alpha + 2,0, R^2 \approx 0,85;$   
 $Z - v = 0,00005\alpha^2 - 0,005\alpha + 4,5, R^2 \approx 0,92.$

**3. Обсуждение результатов.** Проведенное исследование подтвердило априорное предположение принципиальную возможность использования вибрационных сигналов [5-7], снимаемых с поверхности барабана мельницы, для оценки загрузки мельницы [8, 9]. Ключевым фактором является зависимость параметров вибросигнала от угла между вибродатчиком и ударником, которая в условиях, имитирующих реальную работу (наличие «сплошной» загрузки), может описываться полиномом второго порядка.

Сильное влияние на параметры вибросигналов оказывает тип загрузки: наличие твердой фазы в загрузке (песок, шары) увеличивает трение между частями загрузки и между загрузкой и барабаном и, следовательно, затухание; изменение общей массы загрузки (добавление/удаление шаров, изменение уровня воды) напрямую влияет на распространение упругих колебаний (вибраций) по поверхности барабана, что согласуется с физической природой распространения колебаний в упругой системе с диссипативными элементами [10, 11].

В ходе исследований выявлены очевидные недостатки, основными из которых являются:

а) несоответствие неподвижных лабораторной мельницы с внешним ударником и перемещаемого вибродатчика промышленному оборудованию по размеру; использование шаровой загрузки, диаметр которой не соответствует размерам лабораторной мельницы по критерию геометрического подобия; параметрам ударных воздействий и пр.;

б) слишком большая дискретность по углу между вибродатчиком и ударником для соседних опытов ( $45^\circ$ );

в) отсутствие данных для различных загрузок, которые соответствуют технологическому оптимуму и стандартному составу загрузки и отклонению до 25% от них.

Дальнейшие исследования подразумевают продолжение работ на лабораторной мельнице для исправления недостатков по пунктам б) и в), создание опытного образца системы контроля вибрации и продолжение сбора данных на реальной шаровой мельнице [12, 13].

### Выводы

1. Экспериментально подтверждена зависимость статистических характеристик (mean, median, max, std) виброскорости и виброперемещения от угла между датчиком и ударником и от типа загрузки лабораторной мельницы. При комплексной загрузке (шары, песок и вода) эта зависимость параметров вибросигналов от угла может быть аппроксимирована степенной функцией второго порядка.

2. Для разработки работоспособного метода необходимы дальнейшие исследования в следующих направлениях:

– проведение однофакторных экспериментов с комбинированной загрузкой в диапазоне 75-125 % от номинальной;

- уменьшение дискретности по углу между вибродатчиком и ударником с 45° до 5°;
- увеличение количества серий измерений для каждого фактора;
- проведение измерений на реальной промышленной мельнице в рабочих условиях для валидации лабораторных данных и разработки частотных или комбинированных методов анализа.

#### Список литературы

1. Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И., Пожарский Ю.М. О возможности определения уровня загрузки шаровой мельницы в результате нейросетевого анализа спектра сигнала виброускорения ее цапфы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №1. – С. 38-47.
2. Гончаров Ю.Г. Автоматический контроль и регулирование технологических процессов на железорудных обогатительных фабриках. – М.: Недра, 1968. – 227 с.
3. Jian Tang, Li-jie Zhao, Jun-wu Zhou, Heng Yue, Tian-you Chai. Experimental analysis of wet mill load based on vibration signals of laboratory-scale ball mill shell // Minerals Engineering. 2010, vol. 23, iss. 9, pp. 720-730.
4. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. – 320 с.
5. Улитенко К.Я., Маркин Р.П., Соколов И.В. Виброакустический анализ процессов дробления и измельчения на горно-обогатительных предприятиях // Горный журнал. – 2009. – №10 – С. 72-76.
6. Сибирцева Н.Б., Потапенко А.Н., Семилетов Н.А. Методы измерения уровня загрузки мельниц, основанные на физических процессах современных централизованных систем смазки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, №4(3). – С. 694-697.
7. Улитенко К.Я., Маркин Р.П., Соколов И. В. Виброакустический анализ процессов дробления и измельчения на горно-обогатительных предприятиях // Горный журнал. – 2009. – №10. – С. 72-76.
8. Леонов Р.Е. Контроль заполнения мельницы по отношению долей частотных составляющих // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – №3. – С. 111-113.
9. Jian Tang, Tianyou Chaia, Lijie Zhaoa, etc. Soft sensor for parameters of mill load based on multi-spectral segments PLS sub-models and on-line adaptive weighted fusion algorithm // Neurocomputing. 2012, vol. 78, pp. 38-47. DOI: 10.1016/j.neucom.2011.05.028.
10. Gugel K., Moon R.M. Automated mill control using vibration signal processing // IEEE Cement Industry Technical Conference. 2007, pp. 17-25. doi.org/10.1109/CITCON.2007.358983.
11. Gugel K., Palcios G., Ramirez J., Parra M. Improving ball mill control with modern tools based on digital signal processing technology // IEEE Cement Industry Technical Conference. 2003, pp. 311-318. DOI: 10.1109/CITCON.2003.1204732.
12. Гринман И.Г. Измерения степени загрузки мельницы рудой с помощью телеизмерительного датчика // Обогащение руд. – 1962. – №1. – С. 27-29.
13. Пожарский Ю.М., Полещенко Д.А., Подковыров И.Ю. Определение степени заполнения мельницы мокрого самоизмельчения с применением беспроводных технологий // Горный журнал. – 2013. – №2. – С. 115-118.

#### References

1. Eremenko Yu.I., Poleshchenko D.A., Glushchenko A.I., Pozharsky Yu.M. On the possibility of determining the load level of a ball mill as a result of neural network analysis of the spectrum of the vibration acceleration signal of its trunnion // Mining Information and Analytical Bulletin. 2016, no. 1, pp. 38-47.
2. Goncharov Yu.G. Automatic control and regulation of technological processes at iron ore processing plants. – M.: Nedra, 1968. – 227 p.
3. Jian Tang, Li-jie Zhao, Jun-wu Zhou, Heng Yue, Tian-you Chai. Experimental analysis of wet mill load based on vibration signals of laboratory-scale ball mill shell // Minerals Engineering. 2010, vol. 23, iss. 9, pp. 720-730.
4. Andreev S.E. Crushing, crushing and screening of minerals. – M.: Nedra, 1980. – 320 p.
5. Ulitenko K.Ya., Markin R.P., Sokolov I.V. Vibroacoustic analysis of crushing and grinding processes at mining and processing plants // Mining Journal. 2009, no. 10, pp. 72-76.
6. Sibirtseva N. B., Potapenko A. N., Semiletov N.A. Methods for measuring the loading level of mills based on the physical processes of modern centralized lubrication systems // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2010, vol. 12, no. 4(3), pp. 694-697.
7. Ulitenko K.Ya., Markin R.P., Sokolov I.V. Vibroacoustic analysis of crushing and crushing processes at mining and processing plants // Mining Journal. 2009, no. 10, pp. 72-76.
8. Leonov R. E. Control of mill filling in relation to fractions of frequency components // News of universities. Mining Journal. 2012, no. 3, pp. 111-113.
9. Jian Tang, Tianyou Chaia, Lijie Zhaoa, etc. Soft sensor for parameters of mill load based on multi-spectral segments PLS sub-models and on-line adaptive weighted fusion algorithm // Neurocomputing. 2012, vol. 78, pp. 38-47. DOI: 10.1016/j.neucom.2011.05.028.
10. Gugel K., Moon R.M. Automated mill control using vibration signal processing // IEEE Cement Industry Technical Conference. 2007, pp. 17-25. doi.org/10.1109/CITCON.2007.358983.

11. Gugel K., Palcios G., Ramirez J., Parra M. Improving ball mill control with modern tools based on digital signal processing technology // IEEE Cement Industry Technical Conference. 2003, pp. 311-318. DOI: 10.1109/CITCON.2003.1204732.
12. Grinman I.G. Measuring the degree of ore loading of a mill using a tele-measuring sensor // Ore enrichment. 1962, no. 1, pp. 27-2.
13. Pozharsky Yu. M., Poleshchenko D.A., Podkovyrov I.Yu. Determination of the degree of filling of a wet self-grinding mill using wireless technologies // Mining Journal. 2013, no. 2, pp. 115-118.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

|                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Бочков Владимир Сергеевич</b> – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации и компьютерных технологий | <b>Bochkov Vladimir Sergeevich</b> – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Department of automation and computer technologies      |
| <b>Бочкова Ксения Викторовна</b> – аспирант                                                                                       | <b>Bochkova Ksenia Viktorovna</b> – postgraduate student                                                                                                       |
| <b>Бабенко Александр Григорьевич</b> – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации и компьютерных технологий | <b>Babenko Aleksandr Grigorievich</b> – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of automation and computer technologies |
| <b>Клюкин Денис Олегович</b> – аспирант                                                                                           | <b>Klyukin Denis Olegovich</b> – postgraduate student                                                                                                          |
| bochkof@list.ru                                                                                                                   |                                                                                                                                                                |

Получена 29.10.2025