

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ЗАГРУЗКИ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

В.С. БОЧКОВ, канд. техн. наук, К.В. БОЧКОВА, асп.,  
А.Г. БАБЕНКО, д-р техн. наук

Уральский государственный горный университет,  
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, e-mail: bochkof@list.ru

© Бочков В.С., Бочкова К.В., Бабенко А.Г., 2026

Повышение энергоэффективности шаровых мельниц, являющихся основными энергопотребляющими агрегатами на горно-обогатительных комбинатах, представляет собой актуальную научно-техническую задачу. Ключевой ограничивающий фактор – отсутствие надежных систем оперативного контроля степени заполнения барабана. Это приводит к работе в неоптимальных режимах (недогруз или перегруз) и значительным экономическим потерям. В статье предложен принципиально новый подход к определению уровня загрузки – «геометрический метод», основанный на анализе пространственного распределения вибрационных сигналов по поверхности барабана. В ходе лабораторных исследований на мельнице Бонда регистрировались параметры вибрации (виброскорость  $S$ , виброперемещение  $D$ ) при различных комбинациях загрузки (шары, песок, вода) и положении датчика относительно источника ударного воздействия. Методами временного, статистического и частотного анализа установлено, что зависимость статистических характеристик сигнала (среднего значения, медианы, максимума, стандартного отклонения) от угла между датчиком и ударником в большинстве случаев аппроксимируется полиномом второй степени. Выявлено существенное влияние типа загрузки на амплитуду сигналов: наличие сыпучей фазы (песка) приводит к многократному демпфированию колебаний вследствие диссипации энергии на трение. Результаты работы подтверждают принципиальную возможность создания системы прямого вибрационного контроля загрузки, не зависящей от косвенных технологических параметров. Сформулированы рекомендации по дальнейшим исследованиям для разработки промышленной методики.

*Ключевые слова:* шаровая мельница, уровень загрузки, контроль состояния, вибрационный анализ, виброскорость, виброперемещение, статистическая обработка сигналов, частотный анализ, геометрический метод, оптимизация технологического процесса.

**ВВЕДЕНИЕ**

Шаровые мельницы представляют собой критически важное оборудование на горно-обогатительных комбинатах, где оптимальный режим работы с точки зрения энергоэффективности достигается при максимальной загрузке барабана. Практический опыт эксплуатации мельниц типа МПСИ 70×23 на обогатительных фабриках российских золотодобывающих предприятий демонстрирует, что переход от проектной производительности 90 т/ч к фактической 130 т/ч требует особо точного контроля загрузки [1, 2].

В современных условиях добычи полезных ископаемых снижение качества руд (уменьшение содержания полезного компонента) вынуждает предприятия постоянно повышать производительность оборудования [1, 3]. Однако это создает парадоксальную ситуацию: технологически оптимальный режим работы оказывается критически

близок к границе перегруза, особенно при переработке руд с высоким содержанием глины, способной закупоривать разгрузочную решетку. В результате операторы вынуждены работать с недогрузом 5...15 %, что приводит к существенным потерям энергоэффективности.

Основная причина невозможности поддержания стабильного оптимального режима – отсутствие надежных методов прямого измерения уровня загрузки мельницы в реальном времени. Предыдущие исследования корреляционных связей с использованием данных системы «Сигнал-7М», давления в гидроподшипниках и вибрации на приводном валу продемонстрировали неустойчивость результатов. Это указывает на необходимость разработки новых подходов, не зависящих от косвенных параметров [4. 5].

Предлагаемый подход, основанный на «геометрическом методе» оценки загрузки, определяет границы насыпного объема материала в мельнице по параметрам виброакустических сигналов. Он имеет принципиальное преимущество перед традиционными методами, так как напрямую связан с физическим расположением материала в барабане, а не с косвенными параметрами, зависящими от множества факторов.

## **1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТРОЛЯ ЗАГРУЗКИ ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ**

Оптимизация работы шаровых мельниц является комплексной задачей [1], решение которой лежит на стыке механики, теории автоматического управления и современных методов обработки сигналов. Теоретической основой для разработки методов контроля служит анализ физических процессов, происходящих в барабане мельницы при различных режимах загрузки.

### **1.1. Физика процесса измельчения и генерации виброакустических сигналов**

Работа шаровых мельниц представляет собой динамический процесс, сопровождающийся соударениями мелющих тел (шаров) между собой, с внутренней поверхностью барабана и с измельчаемым материалом. Каждое соударение является источником импульсного возбуждения, вызывающего затухающие колебания (вибрации) в конструктивных элементах мельницы: барабане, цапфах, приводном валу. Характеристики этих колебаний (амплитуда, частота, форма сигнала) несут информацию о параметрах самого удара, который, в свою очередь, зависит от кинематики загрузки.

С теоретической точки зрения барабан мельницы можно рассматривать как тонкостенную упругую оболочку, на которую действуют распределенные и сосредоточенные силы. Распространение колебаний по такой оболочке описывается уравнениями в частных производных, решения которых зависят от граничных условий и физико-механических свойств системы. Между пространственно-временными характеристиками виброакустического поля на поверхности барабана и параметрами загрузки существует принципиальная физическая связь. Наличие загрузки (пульпы, шаров) существенно изменяет эти условия, вызывает:

демпфирование (рассеяние энергии): загрузка, особенно содержащая твердую фазу и воду, выступает в роли диссипативного элемента. Часть энергии упругих колебаний преобразуется в тепло за счет внутреннего трения в материале и трения о стенки барабана, что приводит к затуханию вибрационного сигнала;

изменение эффективной массы и жесткости системы: прилегающий к стенке слой материала изменяет локальную инерционность и жесткость оболочки, влияя на ее собственные частоты и формы колебаний;

модификацию спектра возбуждения: изменение уровня и состава загрузки влияет на характер ударов (их энергию и частоту следования), что отражается в амплитудном и частотном составе генерируемых вибросигналов.

Таким образом, существует принципиальная физическая связь между пространственно-временными характеристиками виброакустического поля на поверхности барабана и параметрами загрузки.

### **1.2. Обзор существующих методов контроля загрузки**

Сложность прямого наблюдения за процессом внутри вращающегося барабана привела к разработке множества косвенных методов контроля, которые можно разделить на несколько групп [1–3]:

электрические и мощность-методы для измерения потребляемой двигателем мельницы мощности двигателя мельницы. Теоретической основой является зависимость момента сопротивления от массы загрузки. Недостаток – сильная зависимость от состояния футеровки, износа шаров, характеристик руды, что снижает точность;

акустические методы, применяемые для анализа шума. При недогрузе преобладают удары шаров о футеровку, при перегрузе – глухой шум каскадного движения. Метод чувствителен к внешним помехам и требует сложной обработки для выделения информативных признаков;

виброметрические методы на основе анализа подшипниковых опор, используемые для контроля вибрации на цапфах или корпусах подшипников. Данный подход, как отмечено во введении, часто демонстрирует неустойчивые корреляции, поскольку сигнал сильно фильтруется и трансформируется массивными элементами конструкции фундамента и корпуса;

радиоизотопные и рентгеновские методы, основанные на прямом сканировании сечения барабана. Являются наиболее точными, но при этом высокзатратны, предполагают использование сложных в эксплуатации приборов, а также необходимость соблюдения требований радиационной безопасности и не подходят для непрерывного оперативного контроля;

методы анализа сигнала с датчиков на корпусе барабана. Относительно новое направление, включающее анализ вибраций, ультразвука или звукового удара непосредственно на барабане. Теоретическое преимущество – близость точки измерения к источнику возбуждения, что позволяет регистрировать менее искаженный сигнал.

### **1.3. Обоснование выбранного подхода и его теоретическая новизна**

Предлагаемый в статье подход относится к последней группе методов и развивает идею «геометрического» («волнового») анализа. Его теоретической основой является предположение о том, что распространение вибрации от точки локального удара по периметру барабана носит закономерный характер и однозначно зависит от степени и типа загрузки.

В отличие от методов, анализирующих интегральные характеристики (общую мощность, спектр), данный подход фокусируется на пространственном распределении параметров сигнала (виброскорости, виброперемещения). В первом приближении, при упругом ударе по незагруженному барабану, затухание колебаний с удалением от источника должно описываться известными законами распространения волн в оболочках. Наличие загрузки, как теоретически обосновано выше, выступает в роли

распределенного демпфера и инерционной нагрузки, модифицирующей это затухание. Следовательно, профиль затухания сигнала по угловой координате (зависимость амплитуды от угла относительно источника) становится уникальной характеристикой текущего состояния загрузки.

Новизна предлагаемой методики заключается, во-первых, в отказе от поиска единого косвенного параметра, такого как давление или вибрация на валу, в пользу анализа пространственной картины вибрационного поля; во-вторых, в прямой связи с геометрией загрузки: уровень засыпки материала теоретически должен влиять на границу, после которой демпфирование резко возрастает (когда точка удара погружена в загрузку); в-третьих, в возможности использования простой физической модели, такой как аппроксимация профиля затухания полиномом второй степени, коэффициенты которого несут информацию о загрузке.

Таким образом, теоретический анализ подтверждает принципиальную возможность оценки уровня загрузки путем исследования зависимостей вибрационных характеристик от положения датчика на барабане относительно условного источника ударов. Экспериментальное исследование направлено на верификацию этой теоретической гипотезы и количественную оценку выявленных зависимостей.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

### 2.1. Объект и схема эксперимента

Объектом исследования служила лабораторная мельница Бонда (рис. 1). 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...2 700 об/мин) и перемещаемыми по периметру сечения барабана датчиками с контролем их положения.



(а)



(б)

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

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Измерения проводились на поверхности барабана с одним сечением в 7 точках с шагом  $45^\circ$  (от  $315$  до  $45^\circ$ ) относительно неподвижного ударника. Синхронно фиксировались данные с вибродатчика (WitMotion WTVB02-485, рис. 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.

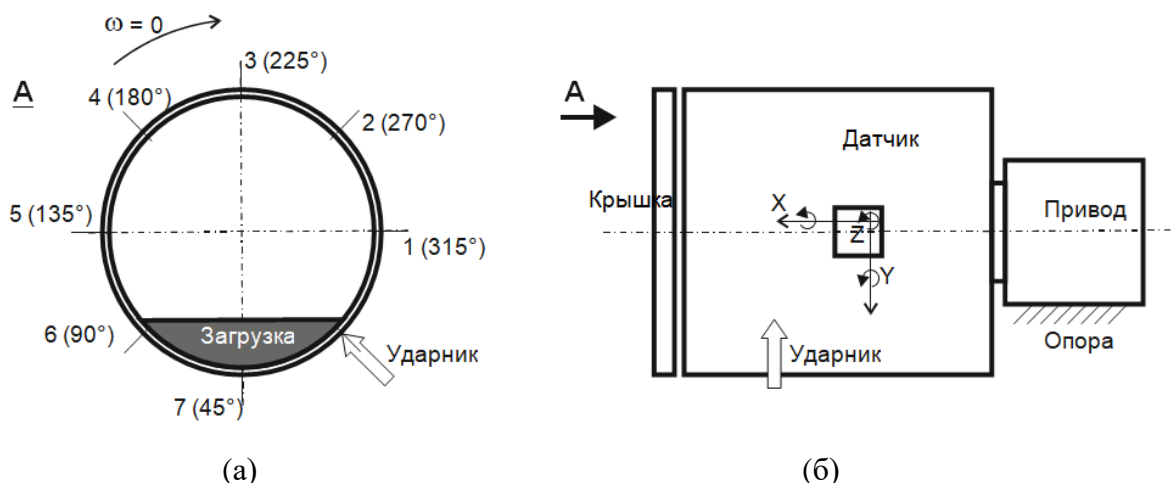


Рис. 2. Схема лабораторной установки: вид спереди (а) и сбоку (б)

## 2.2. План экспериментов

Было проведено 8 серий опытов (А–Н) с различной комбинацией загрузки: серии отличались видом и степенью загрузки (таблица), а опыты соответствуют углу между ударником и датчиком (см. рис. 2).

### 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.

## 3. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

При проведении статистического анализа зависимостей характеристик вибросигнала от его положения были рассчитаны в разработанном программном обеспечении в пакете MATLAB средние значения относительного вибросигнала от угла установки вибродатчика относительно ударника и построены графики для серий Г и Н (рис. 3, 4). Априорно предполагалось, что сигнал будет затухать по мере удаления от ударника по степенной зависимости второго порядка (параболическая функция). Как видно из представленных на рис. 3 и 4 графиков, данное предположение подтвердилось. Графики для остальных опытов не показаны, так как характер зависимости в целом аналогичен.

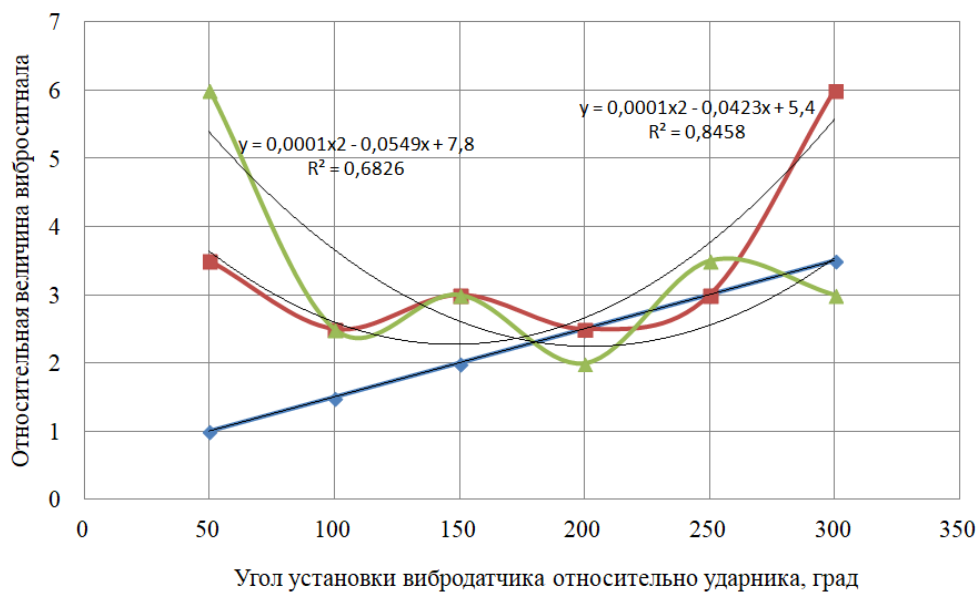


Рис. 3. Зависимости для серии G. —X— Y— Z

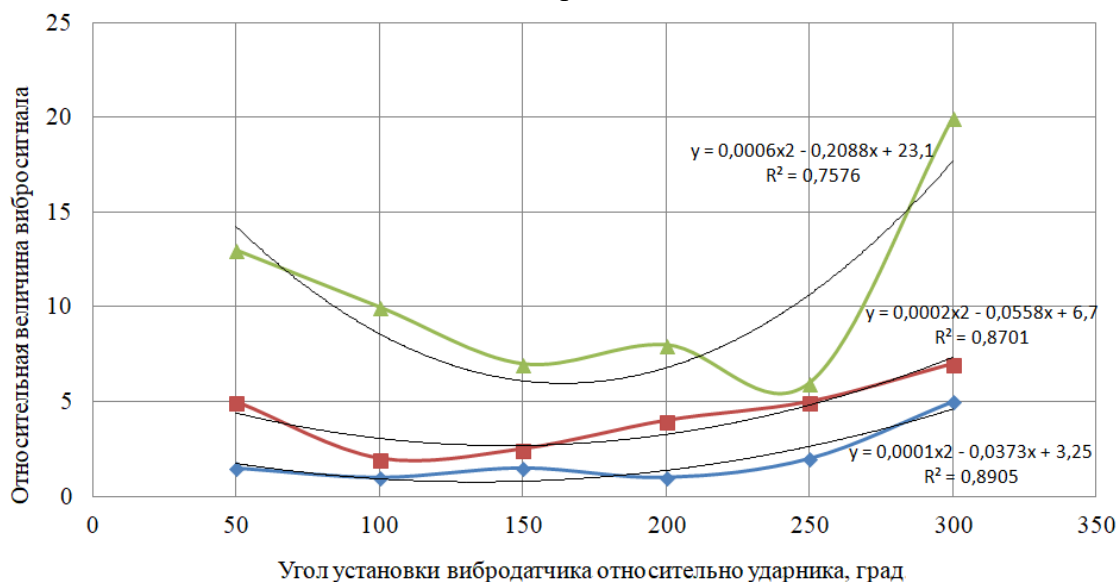


Рис. 4. Зависимости для серии H. —X— Y— Z

Результаты анализа полученных данных показали следующее:

- максимальные значения параметров вибросигнала соответствуют ближайшим к ударнику положениям датчика (углам 45 и  $-45^\circ$ );
- в большинстве случаев полученные зависимости могут быть аппроксимированы параболической, что соответствует априорному предположению о затухании вибросигнала при удалении от ударника. При этом линейные зависимости можно рассматривать как вырожденный случай параболических;
- 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 росте 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):

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

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

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование подтвердило априорное предположение и 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 (песка, шаров) увеличивает трение между частями загрузки и между загрузкой и барабаном и, следовательно, вызывает затухание сигнала; 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 метода, основными из которых являются:

а) разного рода несоответствия: неподвижных лабораторной мельницы с внешним ударником и перемещаемого вибродатчика – промышленному оборудованию по размеру; диаметра используемой шаровой загрузки – размерам лабораторной мельницы по критерию геометрического подобия; параметров ударных воздействий, создаваемых применяемым ударником, – реальным ударам от шаровой загрузки 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.

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

#### ВЫВОДЫ

Экспериментально подтверждена зависимость статистических характеристик 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 может быть аппроксимирована степенной функцией второго порядка.

Полученные результаты открывают путь к созданию системы прямого измерения уровня загрузки шаровых мельниц без использования сложных и экономически

невыгодных методов, таких как радиоизотопные или рентгеновские. Предложенный подход потенциально позволяет создать систему на базе относительно недорогих вибродатчиков, закрепленных на внешней поверхности барабана, что значительно упрощает ее внедрение и обслуживание.

Для разработки работоспособного метода необходимы дальнейшие исследования в следующих направлениях:

выполнение 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.

Успешная реализация предложенного метода позволит создать систему автоматического контроля и управления загрузкой шаровых мельниц, которая обеспечит работу оборудования в оптимальном режиме при любых изменениях состава руды. Это не только повысит на 5...15 % производительность, но и снизит на 10...20 % удельный расход энергии, что сделает предприятие более конкурентоспособным на рынке. Кроме того, предотвращение перегрузов сократит износ оборудования и количество аварийных остановок, дополнительно увеличивая экономическую эффективность решения.

Таким образом, данное исследование представляет собой важный шаг на пути к решению многолетней проблемы контроля загрузки шаровых мельниц. Дальнейшие работы в этом направлении могут принести значительную пользу горнодобывающей промышленности.

## ЛИТЕРАТУРА

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 (научно-технический журнал)*. 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. Tang J., Zhao L.J., Zhou J.W., Yue H., Chai T.Y. Experimental analysis of wet mill load based on vibration signals of laboratory-scale ball mill shell // *Minerals Engineering*. 2010. V. 23. № 9. С. 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. Tang J. Chai T., Zhao L., Yu W., Yue H. Soft sensor for parameters of mill load based on multi-spectral segments PLS sub-models and on-line adaptive weighted fusion algorithm // *Neurocomputing*. 2012. V. 78. № 1. P. 38–47.
10. Gugel K., Moon R.M. Automated mill control using vibration signal processing // *IEEE Cement Industry Technical Conference*, Charleston, SC, USA, 2007. P. 17–25.
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*. Dallas, TX, USA. 2003. P. 311–318.
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.

**Для цитирования:** Бочков В.С., Бочкова К.В., Бабенко А.Г. Методика определения уровня загрузки шаровой мельницы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 2 (30). С. 94–102.

## THE METHOD OF DETERMINING THE LOADING LEVEL OF A BALL MILL

V.S. BOCHKOV, Cand. Sc., K.V. BOCHKOVA, Postgraduate,  
A.G. BABENKO, Dr. Sc.

Ural State Mining University  
30, Kuibyshev St., Yekaterinburg, 620144, e-mail: bochkof@list.ru

Improving the energy efficiency of ball mills, which are the main power-consuming units at mineral processing plants, is an urgent scientific and technical task. The key limiting factor is the lack of reliable systems for operational monitoring of the drum filling degree, leading to suboptimal operating modes (underloading or overloading) and significant economic losses. The article proposes a fundamentally new approach to determining the load level, based on the analysis of the spatial distribution of vibration signals over the drum surface – the "geometric method". During laboratory studies on a Bond mill, vibration parameters (vibration velocity  $S$ , vibration displacement  $D$ ) were recorded for various loading combinations (balls, sand, water) and sensor positions relative to the impact source. Using time-domain, statistical, and frequency analysis methods, it was established that the dependence of the statistical characteristics of the signal (mean, median, max, std) on the angle between the sensor and the impactor is approximated in most cases by a second-order polynomial. A significant influence of the load type on the signal amplitude was revealed: the presence of bulk material (sand) leads to a multiple damping of oscillations due to energy dissipation through friction. The results confirm the fundamental possibility of creating a direct vibration-based load monitoring system independent of indirect process parameters. Recommendations for further research to develop an industrial methodology are formulated.

**Keywords:** ball mill, load level, condition monitoring, vibration analysis, vibration velocity, vibration displacement, statistical signal processing, frequency analysis, geometric method, process optimization.

Поступила в редакцию/received: 03.02.2026; после рецензирования/revised: 11.02.2026;  
принята/accepted: 16.02.2026

*Вестник Тверского государственного технического университета.*  
*Серия «Технические науки». № 2 (30), 2026*