

УДК 622:621.926/.927
DOI 10.17513/use.38356

ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНЫХ ДРОБИЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОВКИХ МАРКЕРОВ

Осипов Д.А., Лебедев И.Ф.

*ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук» – Институт горного дела Севера
имени Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук,
Якутск, e-mail: Brelick@list.ru*

Цель исследования заключается в разработке методики определения рабочих параметров роторных дробильных установок на примере ДКД-300 с использованием ковких маркеров. В работе приводится методика исследования особенностей разрушения геоматериалов, где применен метод изучения поведения частиц в рабочей камере с применением ковких маркеров. В дробильную установку совместно с исходным материалом или в отдельности загружаются частицы свинца, обладающие свойством сохранения памяти в виде следов деформации. Авторами выбран кинематический способ определения скорости соударения маркеров с поверхностью рабочего органа, путем сопоставления экспериментальных результатов лабораторных стендов, где с помощью площади поверхности деформации сфероидного маркера определяется скорость столкновения с жесткой поверхностью. В результате экспериментальных исследований по изучению эффективности дробления рудного материала установлены максимальная скорость перемещения частиц в рабочей полости установки, оптимальная производительность, количество и характер динамических воздействий на геоматериал. В работе приводятся сопоставления результатов лабораторных стендов, которые показывают, что в дробильной установке ДКД-300 создаются условия для дезинтеграции особо крепких пород. При оптимальной производительности установки за счет интенсивных динамических воздействий и малых скоростей перемещения частиц, а также столкновений частиц друг с другом достигается режим селективного дробления. Путем регулирования подачи руды можно контролировать и задать определенное пространство для интенсивных перемещений частиц внутри рабочей полости. Предлагаемый метод с использованием частиц свинца в качестве маркеров в дробильных установках роторного типа дает возможность получить подробное описание происходящего процесса внутри рабочей полости дробильных аппаратов: виды деформации, интенсивность динамических нагрузок, скорости приложения ударной нагрузки в зависимости от производительности установки.

Ключевые слова: роторная дробилка, дезинтеграция, руда, твердость, дробление, горная порода, свинцовые маркеры, степень дробления, лабораторный стенд

POSSIBILITY OF DETERMINING THE OPERATING PARAMETERS OF ROTARY CRUSHING PLANTS USING FORGED MARKERS.

Osipov D.A., Lebedev I.F.

*Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center
“Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”,
Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: Brelick@list.ru*

The purpose of the study is to develop a methodology for determining the operating parameters of rotary crushing plants using the example of DKD-300 using malleable markers. The paper presents a methodology for studying the features of destruction of geomaterials, where the method of studying the behavior of particles in the working chamber using malleable markers is applied. Lead particles with the property of preserving memory in the form of deformation traces are loaded into the crushing plant together with the source material or separately. The authors selected a kinematic method for determining the velocity of collision of markers with the surface of the working element, by comparing the experimental results of laboratory stands, where the velocity of collision with a hard surface is determined using the surface area of the deformation of the spheroid marker. As a result of experimental studies on the efficiency of crushing ore material, the maximum velocity of particle movement in the working cavity of the plant, optimal productivity, and the number and nature of dynamic effects on the geomaterial were established. The paper presents comparisons of the results of laboratory stands, which show that the DKD-300 crushing plant creates conditions for the disintegration of especially hard rocks. At optimum plant performance, due to intensive dynamic effects and low particle movement speeds, as well as particle collisions with each other, a selective crushing mode is achieved. By regulating the ore feed, it is possible to control and set a certain space for intensive particle movements inside the working cavity. The proposed method using lead particles as markers in rotary crushing plants makes it possible to obtain a detailed description of the process occurring inside the working cavity of crushing devices: types of deformation, intensity of dynamic loads, speeds of application of impact load depending on the plant performance.

Keywords: rotary crusher, disintegration, ore, hardness, crushing, rock, lead markers, crushing degree, laboratory stand

Введение

Использование в рудоподготовке дробильных установок с принципом работы многократного динамического воздействия на геоматериал начинает вызывать научный и промышленный интерес. Основное внимание исследователей в процессе дробления руд в последние десятилетия направлено на селективное разрушение минеральных фаз. Возникает новое требование к разрушительным процессам – сохранение целостности кристаллической структуры [1–3].

Одной из основных проблем исследований разрушения геоматериалов в дробильной установке является невозможность выявления основных рабочих показателей установки: скорость перемещения частиц в процессе дробления, виды деформаций, количество динамических контактов с рабочими органами, процент соударения друг с другом и т.д. Невозможность понять картину происходящего внутри дробильной установки не дает установить полный контроль над процессом дезинтеграции руд.

Цель исследования – показать возможность использования ковких маркеров для определения рабочих параметров роторных дробильных установок на примере ДКД-300.

Материалы и методы исследования

Предлагается метод изучения поведения частиц в рабочей камере с применением ковких маркеров [4].

Сущность идеи заключается в следующем. В дробильную установку совместно с исходным материалом или в отдельности

загружаются частицы, обладающие свойством сохранения памяти в виде следов деформации. Для изучения поведения в рабочей полости частиц различной плотности могут быть применены: свинец – 11,3 г/см³; олово – 7,3 г/см³; низкоуглеродистое отожженное железо – 7,8 г/см³; алюминий – 2,7 г/см³.

Выбор материала в качестве маркеров также предусматривает учет их физико-механических свойств: пределы параметров пластичности, форма и плотность частиц, информативность деформационных изменений поверхности маркеров с учетом возможных механических нагрузок в процессе дробления.

Соударение частиц с рабочим органом происходит с различной скоростью. Разработан кинематический способ определения скорости соударения маркеров с поверхностью рабочего органа путем сопоставления площади поверхности деформации сфероида маркера со скоростью его столкновения с ровной жесткой поверхностью.

Вполне очевидно – величина площади плоскости деформации маркера прямо коррелируется со скоростью его соударения с поверхностью рабочего органа [5]. Отсюда, если известна площадь плоскости деформации маркера, то можно определить, с какой скоростью произошло столкновение частицы с броней. С целью определения скорости соударения частиц с броней был изготовлен стенд (рис. 1).

Принцип работы стенда заключается в следующем. С помощью метателя 1 свинцовый маркер выстреливается в сторону неподвижно установленной плиты 2.

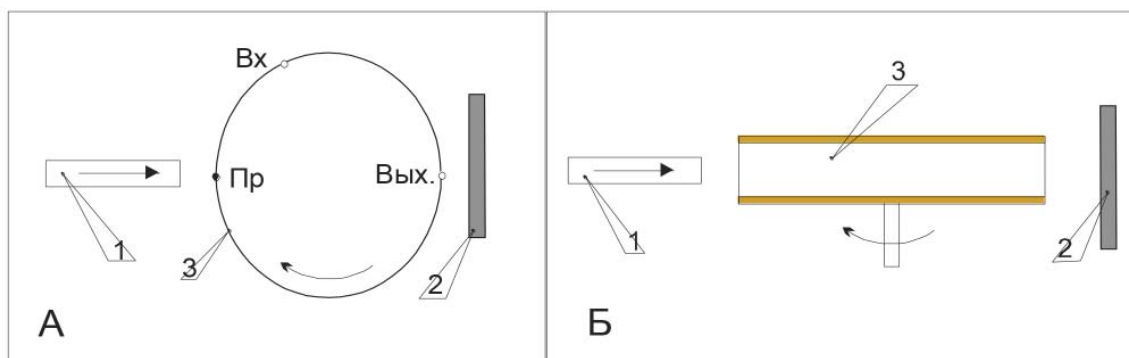


Рис. 1. Схема устройства стенда для сопоставления скорости соударения дробилок с броней и площади плоскости деформации: А – вид сверху; Б – разрез стенда по вертикали.

1 – метатель, 2 – стальная броня, 3 – полый цилиндр с бумажной стенкой.

Отверстия на стенке цилиндра: Вх – входящее, Вых – выходящее.

Пр – точка, диаметрально противоположная выходному отверстию

Испытуемый образец свинца проходит через тонкую бумагу вращающегося цилиндра 3 и оставляет на ней входное и выходное отверстия. Затем отверстия идентифицируются по направленности. Измеряется линейное расстояние, на которое провернулся цилиндр за время пролета маркера на расстояние равное его диаметру. Измеряется длина l от входного отверстия до точки, расположенной диаметрально против выходного отверстия. Линейная скорость стенки цилиндра, при его диаметре 22,8 см и частоте вращения 1500 об/мин, составляет 17,8 м/с.

Далее, на поверхности маркера под бинокулярной лупой с микролинейкой опре-

деляется площадь поверхности плоскости деформации. Таким образом, вычисляются основные необходимые данные для определения скорости соударения маркеров с рабочими элементами установки.

Вместе с тем выполненные сравнительные замеры величин деформации маркеров, установленных под различными углами, при соударении их с плитой (табл. 1) показали, что при изменении угла удара от 90° до 40° изменяется лишь конфигурация плоскостей деформации, а площади плоскостей их деформации оставались практически одинаковыми и соответствовали скоростям соударения.

Таблица 1

Площадь S (мм²) деформации частиц маркеров при различных скоростях V (м/с)

| № | Угол атаки свинцового маркера | | | | | |
|----|-------------------------------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|
| | 20° | | 40° | | 90° | |
| | V, м/с | S, мм ² | V, м/с | S, мм ² | V, м/с | S, мм ² |
| 1 | 18,4 | 1,5 | 17,5 | 5,9 | 19,0 | 6,1 |
| 2 | 22,5 | 1,9 | 21,5 | 7,2 | 21,0 | 6,5 |
| 3 | 24,3 | 2,0 | 23,7 | 7,9 | 24,0 | 7,4 |
| 4 | 25,6 | 2,2 | 24,9 | 8,3 | 25,4 | 8,0 |
| 5 | 28,9 | 3,2 | 26,0 | 9,0 | 28,0 | 8,5 |
| 6 | 30,9 | 4,3 | 29,6 | 9,7 | 31,7 | 9,7 |
| 7 | 34,6 | 4,5 | 32,8 | 10,5 | 35,5 | 10,7 |
| 8 | 35,5 | 5,9 | 35,4 | 11,7 | 37,4 | 12,8 |
| 9 | 37,0 | 6,5 | 36,7 | 13,5 | 38,5 | 13,0 |
| 10 | 39,0 | 9,0 | 39,4 | 13,9 | 39,0 | 13,7 |
| 11 | 47,0 | 9,2 | 45,0 | 14,4 | 46,3 | 14,3 |
| 12 | 50,0 | 9,8 | 52,0 | 15,1 | 55,1 | 15,3 |

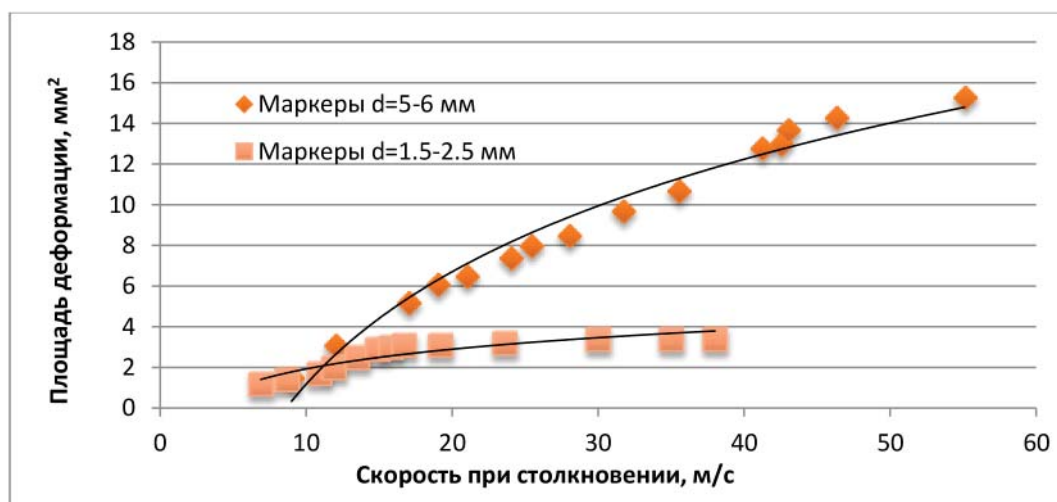


Рис. 2. Площадь деформации в зависимости от скорости столкновения под углом атаки 90°

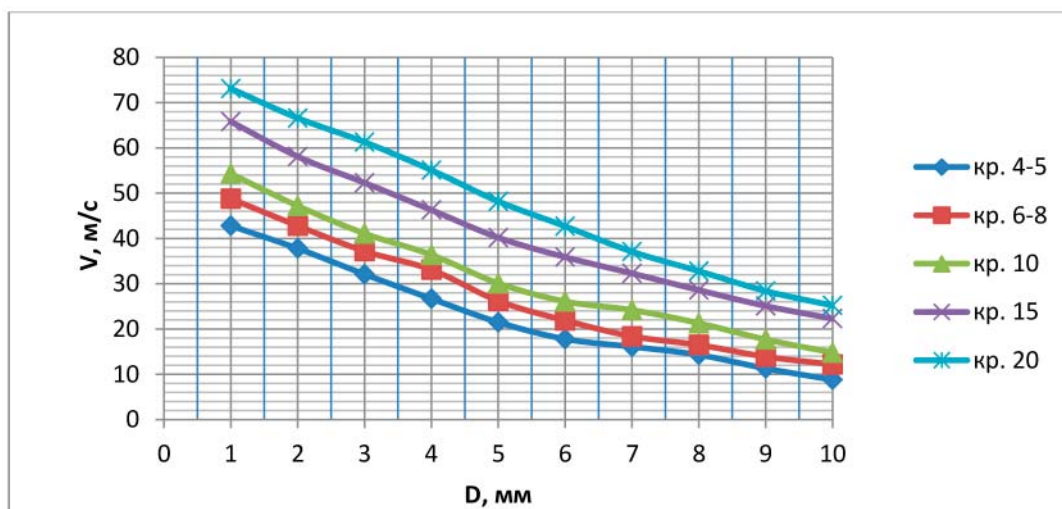


Рис. 3. Зависимость половинчатого разрушения частиц разной крепости от скорости столкновения

Далее, как это показано на рис. 2, величина площади деформации зависит не только от скорости и угла соприкосновения маркера с плитой, но и от диаметра дробины.

Отсюда становится вполне очевидным – определение скоростей соударения маркеров лучше всего производить с шариками свинца с наиболее большим диаметром.

Масса дробины равна 0,45 г. Скорость соударения находим по корреляционному графику, к примеру, отображенному на рис. 3. Промежуток времени контакта определяем следующим образом. Высоту смятия дробины от ее первоначальной сферической поверхности до плоскости деформации, равной h , принимаем за путь, пройденный маркером, от начала контакта маркера с биллом и до прекращения контакта. При расчете импульса силы удара через сопоставление плоскостей деформации соударением и статического давления установлено, что при скорости 35 м/с время контакта дробин с плоскостью рабочего органа составляет 0,01 с, а скорость деформации 0,02 м/с.

В институте горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН ранее была проведена работа по выявлению подбора оптимальной скорости столкновения материала с рабочим органом установки на специальном лабораторном стенде. Основным критерием является разрушение единичной рудной частицы более двух раз. В качестве испытуемых образцов были использованы частицы с крупностью от 1 до 10 мм, различной крепости по шкале Протодьяконова [6].

Возможность получения подробного описания происходящего внутри установки процесса дезинтеграции можно рассчитать из графиков (рис. 2 и 3), сопоставив результаты. Например, для разрушения частиц крепостью $f=6$ (крепкие руды) крупностью от 3 до 1 мм необходимо обеспечить скорости воздействия на частицу: 30, 40, 50 м/с.

Испытуемая дробильная установка комбинированного ударного действия ДКД-300 состоит из корпуса, бункера приема рудной массы, питающего патрубка в нижней части, пары роторов первичного, дополнительного (нижнего) и вторичного дробления, разгрузочного патрубка и представляет сложный аппарат с точки зрения возможных вариантов столкновения исходных кусков геоматериалов с рабочими органами, так и между собой. Следует отметить, что на данной установке ранее была достигнута высокая степень дробления кимберлитовых руд, изометризация форм частиц свободного золота, а также возможность производства изометризованных частиц щебня [7].

Результаты исследования и их обсуждение

Кварцевая руда со свинцовыми маркерами подвергалась дезинтеграции в дробильной установке ДКД-300. Для оценки степени дробления полученные продукты разделены по классам крупности, гранулометрический состав наглядно представлен на рис. 4.

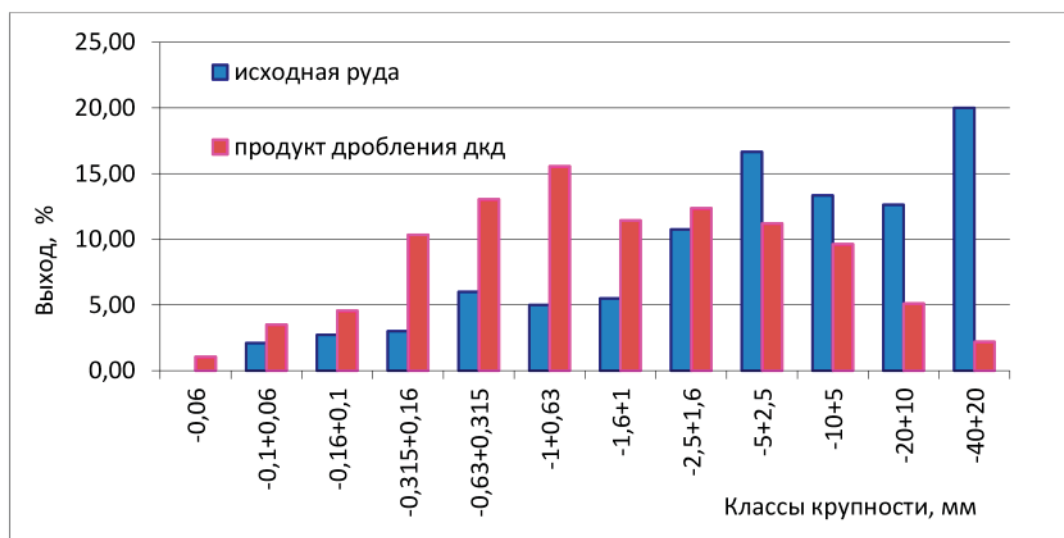


Рис. 4. Гранулометрический состав исходной руды и продуктов дробления

Таблица 2

Зависимость скорости от площади деформации частиц при совместной загрузке с горной породой

| № | Площадь деформации, мм | Скорость, м/с | № | Площадь деформации, мм | Скорость, м/с |
|----|------------------------|---------------|----|------------------------|---------------|
| 1 | 6 | 18,3 | 11 | 7,4 | 24 |
| 2 | 5,5 | 17,5 | 12 | 6,2 | 18,6 |
| 3 | 4,2 | 15,2 | 13 | 4,6 | 15,9 |
| 4 | 7,2 | 22,5 | 14 | 5,3 | 17,3 |
| 5 | 4,8 | 16 | 15 | 5,5 | 17,5 |
| 6 | 5,6 | 17,8 | 16 | 7,2 | 22,5 |
| 7 | 6,3 | 18,8 | 17 | 4,7 | 15,9 |
| 8 | 7,3 | 23,5 | 18 | 6 | 18,3 |
| 9 | 4,5 | 15,8 | 19 | 6,5 | 19,2 |
| 10 | 6,7 | 19,5 | 20 | 5,5 | 17,5 |

Исследования процессов дробления с использованием свинцовых дробин-маркеров размером 5–6 мм показали, что после одного цикла дробления в дробилке ДКД-300 маркеры в количестве 95 % сохранили свой первоначальный размер. Остальные дробины, 5 %, были сплюснены, это объясняется тем, что за время дробления частицы свинца попадали между роторами, толщина маркеров составляет 2–4 мм. За один цикл было загружено 100 шт. маркеров. На рис. 4 приведены частицы маркеров после разгрузки, где основная часть частиц несут следы кручения. Следует отметить, что в испытанных маркерах полностью отсутствуют разорванные частицы.

Расчет параметров деформаций маркеров на скорости перемещения частиц в моменты столкновения (табл. 2) показал, что максимальная скорость соударения частиц свинца в дробильной установке, при загрузке в режиме «без рудной массы», достигает 24–36 м/с. Средняя скорость перемещения частиц составляет 30,6 м/с. Количество вмятин на дробинах различно и составляет: 1–5 плоскостей – 10 %; 5–10 плоскостей 15 %; 10–15 плоскостей – 25 %; 15 и более плоскостей – 50 %.

В дальнейших экспериментах в ДКД-300 загружались свинцовые маркеры с диаметром 5–6 мм в количестве 100 шт. вместе с рудной массой. Дробление производи-

лось при максимальной производительности дробилки 15 т/ч. Исходная крупность руды менее 100 мм.

Как и предполагалось, основная часть свинцовых маркеров более 90 % сосредоточена в классах крупности продуктов дробления -5+2, следовательно, 10 % маркеров за счет истирания перешли в более мелкие классы.

После замеров плоскостей деформации была установлена средняя скорость перемещения частиц в процессе дробления пород – 20 м/с. В табл. 2 приведены данные 20 маркеров, где максимальная скорость достигает 24 м/с, а минимальная – 14 м/с. Максимальное количество вмятин всего 8. Следовательно, количество приложенных соударений с достаточно высокой энергией заметно уменьшилось по сравнению с вариантом «без загрузки горной породы». Поверхность у всех маркеров исцарапана обломками породы, что свидетельствует об интенсивном взаимодействии частиц между собой, элементы истирания.

Дробилка комбинированного ударного действия ДКД-300 по сравнению с другими роторными аппаратами имеет невысокую скорость соударения частиц в рабочей полости. Высокая эффективность дезинтеграции пород достигается за счет многократных динамических воздействий на материал, как с рабочей поверхностью роторов, так и кусков друг с другом. Кроме того, высокая степень дробления при меньшей производительности дробилки 7–8 т/ч (максимальная 12 т/ч) объясняется наличием высоких скоростей столкновения за счет более свободного движения частиц внутри рабочей камеры дробильной установки.

Заключение

Использование частиц свинца в качестве маркеров исследования в дробильных установках роторного типа дает возможность получить подробное описание происходящего внутри рабочей полости дробильных аппаратов роторного типа: виды

деформации, интенсивность динамических нагрузок, скорости приложения ударной нагрузки в зависимости от производительности установки. Сопоставление результатов лабораторных стендов показывает, что данная дробильная установка ДКД-300 может быть использована для особо крепких пород, так как скорость столкновения частиц с рабочими элементами дает возможность разрушить даже мелкие частицы. При оптимальной производительности установки, за счет интенсивных динамических воздействий и малых скоростей перемещения частиц, а также столкновений частиц друг с другом достигается режим селективного дробления. Путем регулирования подачи руды можно контролировать и задать определенное пространство для интенсивных перемещений частиц внутри рабочей полости.

Список литературы

1. Юсупов Т.С., Бакшеева И.И., Ростовцев В.И. Исследование влияния различных видов механических воздействий на селективность разрушения минеральных ассоциаций // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых 2015. № 6. С. 182–188.
2. Уракаев Ф.Х., Шумская Л.Г., Кириллова Е.А., Кондратьев С.А. Совершенствование технологии тонкого измельчения техногенного сырья на основе его дозированного стадийного разрушения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 5. С. 165–174. DOI: 10.15372/FTPRPI20200519.
3. Львов Е.С., Матвеев А.И. Изучение формирования гранулометрического состава и раскрытия минералов при дроблении руд с использованием дробилки многократного динамического действия ДКД-300 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 10. С. 112–116.
4. Осипов Д.А. Изменение аэродинамических свойств частиц полезного компонента в двухступенчатой конусной мельнице // Успехи современного естествознания. 2023. № 11. С. 180–185. DOI: 10.17513/use.38161.
5. Зотиков А.С., Лашков В.А. Коэффициент восстановления скорости при ударе абсолютно упругой частицы в форме эллипсоида вращения // Вестник СПбГУ. 2014. Т. 1, № 2. С. 245–253.
6. Винокуров В.Р., Матвеев А.И. Разработка методики расчета рабочих параметров работы центробежных аппаратов измельчения многократного динамического воздействия // Наука и образование. 2012. № 1. С. 32–34.
7. Матвеев А.И., Лебедев И.Ф., Винокуров В.Р., Львов Е.С. Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 613–622. DOI: 10.31897/PMI.2022.90.