

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.74

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ОТБИТОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Т. Фрасцзак¹, Т. Мютце¹, Б. Люхац², О. Ортлепп³, У. А. Пойкер¹

¹Институт машиностроения и переработки полезных ископаемых
Технического университета Фрайбергской горной академии,

E-mail: Tony.Fraszczak@mvtat.tu-freiberg.de, Агриколаштрассе, 1, 09599, г. Фрайберг, Германия

²Институт технологии чугуна и стали

Технического университета Фрайбергской горной академии,
Ляйтцигерштрассе, 34, г. Фрайберг, Германия

³ООО “Вюниендорфский доломитовый завод”, Вюниендорф/Эльстер,
Герарштрассе, 34, г. Вюниендорф, Германия

Определение гранулометрического состава отбитой при массовых взрывах горной породы невозможно с помощью аналитической ситовой установки, которая дает достоверные результаты в диапазоне от 63 мкм до 125 мм. Другие сложные методы часто недоступны для измерения частиц в операциях с крупнозернистым материалом в горных работах среднего масштаба. Предложен альтернативный малозатратный метод изучения размеров кусков отбитой породы, который может охватывать диапазон с наименьшей границей 63 мкм без верхнего предела размера. Для определения полного ситового эквивалента гранулометрического состава отбитых кусков доломита использованы три метода. Сравнение результатов технического просеивания показывает, что предложенный метод дает хорошую аппроксимацию распределения по размерам, улучшая возможности проектирования оборудования для переработки полезных ископаемых.

Взрывная отбойка, гранулометрический состав, доломит, ситовая установка, щековая дробилка

DOI: 10.15372/FTPRPI20190105

Доломит — осадочная порода карбоната кальция, которая распространена во всем мире. Он встречается в различных модификациях и используется в качестве сырья в нескольких отраслях промышленности, в частности при производстве бетона, и как инертный заполнитель в дорожном строительстве. Доломит является главным компонентом минеральной ваты, технического стекла и применяется в качестве удобрения в сельском хозяйстве. Обожженный доломит служит для обработки воды и как добавка при производстве железа [1].

Обожженный доломит производится в шахтных печах, для которых требуется определенный размер частиц (25–63 мм), чтобы обеспечить достаточный поток газа через движущийся слой и полный обжиг доломита. В большинстве случаев при добыче доломита в качестве первого этапа фрагментации породы используются взрывные работы. Из-за различных морфоло-

гических свойств месторождения, при использовании доломитов в сельском хозяйстве, важно исследовать грансостав породы, а также поведение материала при дроблении, которое зависит от глубины шахты. При проектировании оптимального процесса переработки необходим надежный метод определения характеристик отбитого материала.

Конструкция дробилок для горнодобывающей промышленности рассчитана на максимальный размер кусков отбитой породы. Однако знания этого параметра недостаточно для точного проектирования перерабатывающей установки или оптимизации существующей. Гранулометрический состав отбитой породы чаще всего определяется методом визуального анализа, который заменяет традиционный ситовой [2–4]. Тем не менее большинство технических решений визуального анализа ограничены в информативности по сравнению с обычными техническими ситами. В этом случае ситовой анализ дает более точные результаты.

Таким образом, не существует общепринятого и устоявшегося метода определения гранулометрического состава отбитой породы [5, 6]. Данная работа посвящена определению гранулометрического состава отбитой породы в диапазоне размеров от 1 до 1000 мм для обоснованного выбора первичной дробилки и соответствующей конструкции последующей перерабатывающей установки (далее куски отбитой породы всех размеров называются частицами).

ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Материал, подаваемый в дробилку, и раздробленный продукт образуют большое количество частиц, полидисперсных по пределу прочности при сжатии, форме и размеру [7, 8]. Путем дробления меняется их дисперсность, т. е. физические характеристики отдельных частиц и материала в целом. Изменения физических свойств должны быть охарактеризованы на всех стадиях цикла дробления. Обладая знаниями физических свойств, можно оценить и сопоставить друг с другом действие различных механических воздействий. Кроме того, может быть найдена оптимальная разработка процесса в соответствии с техническими характеристиками продукта [8].

Размер зерна x является тем физическим свойством, которое характеризует размер случайно сформировавшейся частицы. Объекты правильной формы, такие как сферы, кубы и тетраэдры, можно описать тремя главными измерениями. Однако правильные формы играют лишь второстепенную роль в обогащении полезных ископаемых. Поэтому понятие эквивалентных диаметров введено для описания частиц неправильной формы [7]. Выбор эквивалентного диаметра зависит от конкретной технологической операции и метода измерения. Кроме того, различные измерительные методы используют разные и не всегда сопоставимые свойства частиц [7–9].

Размер частицы описывается характеристической длиной. Важный параметр — ширина сетки w , которая обеспечивает основу ситового анализа. Частица, меньшая ширины сетки ($x < w$), пропускается через нее. Частицы $x \geq w$ удерживаются ситом.

Другими важными характеристическими длинами являются основные параметры a , b и c частицы (рис. 1). Эти параметры измеряются перпендикулярно к частице в устойчивом положении. Основные оси выбираются так, чтобы задать значение $a \geq b \geq c$. Из этих параметров можно определить различные длины хорд наряду с максимальной хордой [7, 10, 11].

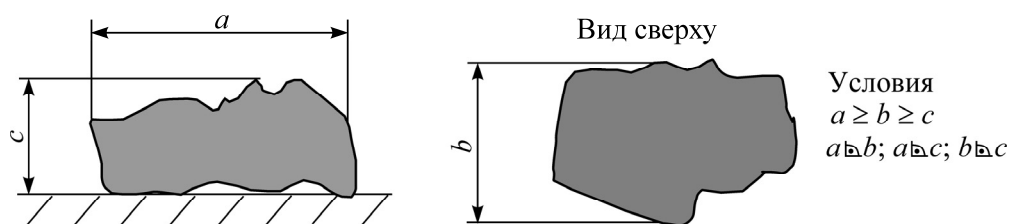


Рис. 1. Характеристические длины анализируемых частиц [7]

Кроме этого, возможность для измерения фрагментации породы отбитого материала обеспечивает метод визуального анализа. Существуют онлайн и стационарные устройства. Последний, например HAVER CPA 4 CONVEYOR, используется для частиц размером до 220 мм, что не подходит для измерения породы с размерами до 1 м. Онлайн измерение не ограничено максимальным размером частицы. Для этого метода камеру устанавливают над конвейерной лентой подаваемого материала до первой стадии измельчения. Однако для целей данного исследования это было экономически нецелесообразно. Транспортировка породы с места взрыва в загрузочный бункер дробилки осуществлялась исключительно автопогрузчиком и фронтальным погрузчиком. Реализация визуального анализа оказалась дорогостоящей для компании, поэтому был рассмотрен альтернативный метод для характеристики отбитой породы [12–14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гранулометрический анализ отбитой породы выполнен для образцов из двух различных мест взрывной добычи доломитового месторождения в Кашвице (Германия). Проблема состояла в том, чтобы получить репрезентативный образец отбитой породы в каждом месте, так как грансостав породы зависит от схемы взрывания и геологических условий, т. е. от локализации месторождения. Схема взрывания была одинаковой для двух мест, чтобы минимизировать ошибки; различным было только расположение (загрузка 1 — западная область, загрузка 2 — восточная область). Также образцы брались по одной и той же схеме из разных мест взрывания, для чего использован фронтальный погрузчик с емкостью ковша 3 м³ (до 5 т).

Совокупная масса образца составила приблизительно 20 т для каждого места, где проводились взрывные работы, что соответствовало 0.1 % от дневной выработки перерабатывающей установки и около 6.7 % от массы отдельных участков. Размер пробы оценивался по модели Gy [15] и имел диапазон от 0.1 до 10 % от объема. С учетом экономически оправданных усилий выбирался минимальный размер.

После взвешивания образцы распределяли тонким слоем, чтобы обеспечить ручную сортировку (рис. 2). Частицы больше 200 мм отсортированы по размерным классам с шириной 100 мм. Сортировка проводилась по наибольшему размеру самой большой стороны каждой частицы. Учитывая большое количество частиц (473 шт.), для одного образца каждого участка определены три основных размера (рис. 2).



Рис. 2. Ручная сортировка фракции на карьере в Кашвице

После ручной сортировки определялась масса каждой частицы. Оставшиеся частицы с размерами меньше 200 мм собирали и разделяли на меньшее количество, чтобы получить репрезентативный образец приблизительно 400 кг для аналитического просеивания. Для измерения частиц больше 45 мм при ручной сортировке использовались штампованные решета с квадратными отверстиями. Материал менее 45 мм просеивали с помощью аналитической ситовой установки HAVER EML 400 digital T (Haver & Boecker) в соответствии с DIN 66165. Далее приведены все параметры процесса анализа размеров:

— характеристика длины частиц по наибольшей хорде при ручной сортировке в карьере, мм: 200/300/400/500/600/700/800/900/1.000;

— размер отверстий сита при ручной сортировке (квадратное сито), мм: 125/90/63/45.

— размер отверстий сита в аналитической ситовой установке (квадратное сито), мм: 31.5/25/20/16/12.5.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гранулометрический состав $Q(x)$ двух образцов (загрузка 1 и загрузка 2) показан на рис. 3. Кривые являются непрерывными, поскольку при распределении рассчитаны двумя разными методами. Частицы больше 200 мм определены по их наибольшей хорде, так как это — наиболее быстрое решение на месте работ. Первоначальное сравнение двух образцов предназначено для того, чтобы увидеть различия между двумя местами взрывания с восточного и западного полей месторождения. Все частицы меньше 200 мм проанализированы при помощи аналитического сита. Однако полученные результаты дали приблизительную оценку грансостава для первичной дробилки и позволили оценить различия между двумя участками на всей территории месторождения.

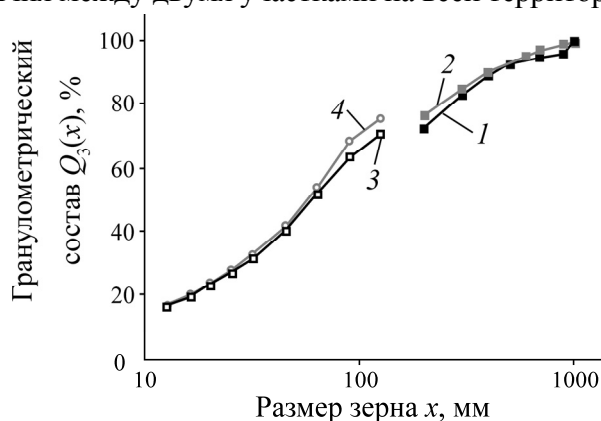


Рис. 3. Гранулометрический состав отбитого материала: 1 — загрузка 1 (наибольшая хорда); 2 — загрузка 2 (наибольшая хорда); 3 — загрузка 1 (просеивание); 4 — загрузка 2 (просеивание)

В соответствии с рис. 3 гранулометрические составы загрузки 1 (западное поле месторождения) и загрузки 2 (восточное поле месторождения) близки друг к другу и не зависят от положения месторождения. Доля фракции с размером продукта 25–63 мм составляет 25.5 % отбитого материала. Примерно 28.2 % породы являются слишком мелкими ($x < 25$ мм), 46.4 % — более крупными (> 63 мм) и нуждаются в дальнейшей обработке. При этом для удаления большого количества мелкого материала перед первичным дроблением рекомендуется грохот с размером ячейки сита 65 мм. Это уменьшает массовую нагрузку и износ первичной дробилки и препятствует ненужному дроблению материала, который имеет технические характеристики требуемого класса крупности.

Определение характеристической длины. Ситовой анализ классифицирует частицы путем сравнения их с шириной ячейки w сита. Грубые, вручную отсортированные частицы оценивали по размеру a самой большой стороны каждой частицы (рис. 4). Такая характеристическая длина использована в качестве данных для расчета гранулометрического состава на рис. 3.

Наибольший размер a представляет собой одномерный параметр частицы, сильно зависящий от плоскости измерения и устойчивого положения отдельной частицы. Размер a не равен наибольшему размеру частицы. Чтобы устранить расхождение двух интервалов грансоставов на рис. 3 путем нахождения эквивалентного диаметра сита для каждой частицы, необходимо рассмотреть два других основных размера b и c частиц. Для этого вручную измеряли все три параметра отсортированных частиц. Оценивался эквивалентный диаметр сита с учетом геометрических расчетов трех основных размеров частиц. На рис. 4. приведены три варианта определения размера частиц

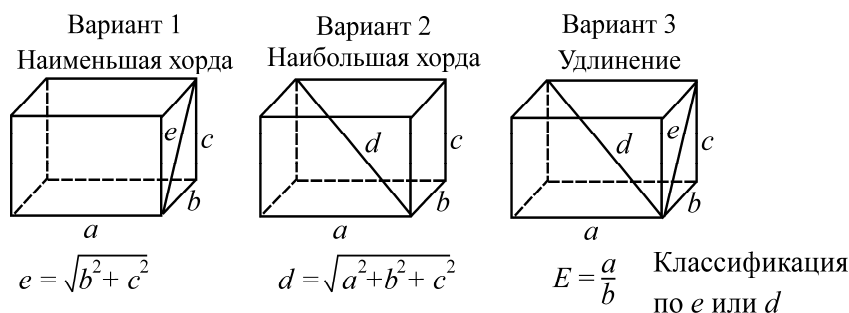


Рис. 4. Варианты определения размера отдельной частицы

Рассматриваются три измерения отдельных частиц при перпендикулярной ориентации характеристических длин a , b и c (рис. 1). При этом предполагается форма параллелепипеда, которая ближе всего к реальной форме частиц (рис. 2). Вариант 1 основан на определении наименьшей хорды e частиц (рис. 4). Характеристическая длина e и вычисляется с помощью выражения

$$e = \sqrt{b^2 + c^2}.$$

Наименьшая хорда характеризует наименьшую двумерную площадь поперечного сечения частиц. Эта область позволяет частице в форме параллелепипеда проходить через отверстия сита с минимальной шириной w .

Вариант 2 (рис. 4) имеет тот же подход, что и вариант 1. Однако в этом случае наибольшая хорда зерна d определяет характеристическую длину. Для расчета наибольшей хорды учитываются все три размера частицы:

$$d = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}.$$

Частицам присваиваются, в соответствии с их наибольшим трехмерным размером, классы размеров частиц. Этот размер будет иметь значение, если частица слишком тяжелая, чтобы подняться в вертикальное положение и, следовательно, ей необходим больший диаметр эквивалентного сита.

Для обоих вариантов масса частиц, а значит, и массовая доля размерных фракций, определяется массой частиц в форме параллелепипедов:

$$m = \sum_{i=1}^N V_{\text{cub},i} \rho,$$

где i — номер класса размера зерна; $V_{\text{cub},i}$ — объем одиночного параллелепипеда; ρ — плотность частиц доломита.

В связи с предположением, что частицы имеют однородную и идеальную форму параллелепипеда, а в действительности гладкие края, масса теоретических классов крупности частиц варианта 1 и 2 существенно выше по сравнению с массой фактических образцов, показанных на рис. 2. Поэтому расчетные массовые доли гранулометрического состава адаптированы к фактической массе фракции, определенной аналитической системой взвешивания. Такая адаптация формы привела к выравниванию соотношения между массовыми долями просеянного образца и массой, вручную отсортированной, по отношению к исходной. Следовательно, эти два грансостава могут быть объединены в один.

Варианты 1 и 2 представляют собой случаи просеивания, которые часто совмещаются на практике. Определение размера частицы с помощью технического просеивания зависит от нескольких факторов: формы частицы, времени пребывания на сите, интенсивности просеивания и нагрузки на сито. Эти факторы определяют вероятность перехода единичных частиц через

ячейки сит, т. е. гранулометрический состав материала. Что касается оценки размера частицы по 1-му или 2-му варианту, то оба устанавливают границы конкретных зон, в которых находится гранулометрический состав и который может быть определен аналитическим просеиванием. Вариант 3 основывается на варианте 1 и 2 и использует удлинение E (также известное как соотношение сторон) в качестве дополнительного критерия классификации для отдельных частиц. Удлинение описывает форму частиц, используя отношение наибольшего размера a к среднему b (рис. 4). Согласно DIN EN 933-4, все частицы с $E \leq 3$ относятся к кубическим [10, 16]. Для классификации размера частиц предлагаются следующие соотношения: $E = a / b$, ($E \leq 3$ — характеристическая длина частицы, определяемая наименьшей хордой (вариант 1); $E > 3$ — характеристическая длина частицы, определяемая наибольшей хордой (вариант 2)).

В результате частицы, которые имеют кубическую форму, ранжируются согласно их наименьшей хорде, а некубические зерна — согласно наибольшей хорде. Это предположение позволяет избежать появления удлинённых частиц, которые классифицируются в низкоуровневом классе. Из-за игольчатой структуры эти частицы не способны подняться перпендикулярно во время просеивания и пройти размер ячейки самой короткой стороной.

С помощью трех вариантов проведено визуальное просеивание частиц больше 200 мм. Оно проводилось путем сравнения диагонали визуальной квадратной ячейки сита и характеристической длины каждого из трех вариантов (рис. 4). На рис. 5 показаны первичный гранулометрический состав загрузки 2 и три грансостава, определенные по вариантам 1, 2 и 3. Благодаря аналитическому просеиванию, форма всех трех грансоставов идентична до частиц с размером 90 мм. Свыше 90 мм гранулометрические составы частиц всех трех вариантов смещаются до более мелких частиц по сравнению с первоначальным грансоставом материала, отсортированного вручную. Это связано с комплексным анализом в первоначальном одиночном измерении частиц. Гранулометрические составы слегка смещаются к меньшим размерам частицы по сравнению с загрузкой 2. Ожидалось, что грансостав варианта 2 будет более грубым, но для классификации размера частицы следует учитывать характеристическую длину, сравнивая ее с наибольшей хордой ширины сетки. По сравнению с первоначальным расчетом гранулометрического состава ширина сетки служила эталонным значением.

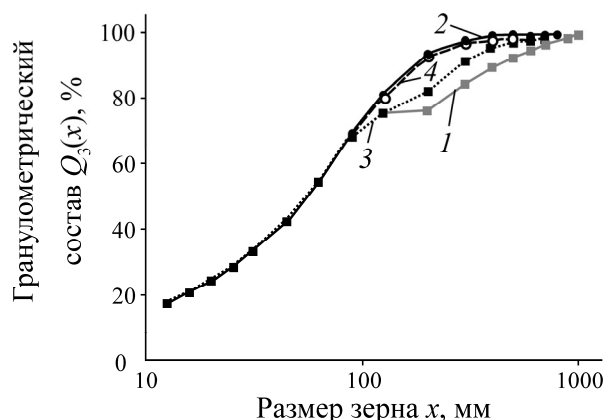


Рис. 5. Гранулометрические составы по трем различным вариантам для оценки размеров отдельных частиц: 1 — загрузка 2; 2 — вариант 1; 3 — вариант 2; 4 — вариант 3

Результат варианта 1 показывает максимальный размер частицы 400 мм, который достаточно мал для соответствующей конструкции первичной дробилки. Вариант 2 имеет максимальный размер частицы 800 мм. Это значение соответствует реальному максимальному раз-

меру частицы отбитого материала и может быть рассмотрено при проектировании процесса дробления. Несмотря на это, массовые доли размерных классов привели к преувеличению содержания крупнозернистой фракции между 200 и 500 мм в грансоставе.

Принимая щековую дробилку как основную стадию первичного дробления, единственный расчет максимального размера зерна не является достаточным для оптимальной разработки схемы дробления из-за фиксированной связи между минимальной шириной разгрузочной щели выхода и зазором между щеками дробилки. Чем больше зазор между щеками, тем больше минимально возможная ширина разгрузочной щели.

Следствием превышения номинального размера для соответствия самой большой частице было бы не оптимальная работа дробилки, а увеличение инвестиций и эксплуатационных расходов. Гранулометрический состав варианта 3 представляет собой комбинацию варианта 1 и 2. Поэтому при меньших размерах частицы кривая показывает высокое сходство с вариантом 1 и приближается к форме варианта 2 при увеличении размера частицы. Общий максимальный размер частицы 800 мм. До размера 300 мм частицы имеют кубическую форму, более крупные — вытянутую. Массовая доля материала между 400 и 800 мм составила приблизительно 1.4 %, что эквивалентно 9 кускам породы для 20 т материала. Таким образом, максимальные доли образцов для загрузки 1 и 2 показали достаточно точные данные 98 % грансостава отбитого материала. Наконец, вариант 3 может быть использован для двух этапов проектирования. Максимальный размер частицы 800 мм подходит для проектировки первичной дробилки. После этого проект всего процесса переработки доломита может быть рассмотрен и улучшен [17].

Оценка результатов анализа методом технического просеивания. Чтобы обосновать аналитические результаты, выполнено техническое просеивание с помощью двухуровневого грохота для первичного грохочения (Lokotrack ST2.8, Metso). Установка оборудована перфорированными пластинами с квадратными отверстиями 70 мм на верхнем уровне грохота (сита) и 28 мм на нижнем. Материал транспортировался из загрузочного бункера ленточным конвейером и цепным экскаватором к двухуровневому грохоту. Продукты выгружались на ленточный конвейер. Материал технического просеивания, полученный на двух дополнительных участках месторождения, соответствовал общей массе образца ~ 600 т. Массы просеянных продуктов определялись интегрированной системой взвешивания. Во время технического просеивания крупнозернистой фракции с размерами больше 400 мм количество частиц оценивалось методом случайного измерения отдельных частиц.

На рис. 6 представлены гранулометрический состав технического просеивания и гранулометрический состав аналитического просеивания и ручной сортировки с учетом варианта 3. Ввиду меньшего числа классов крупности технического просеивания, кривые прямо не связаны друг с другом. Техническое просеивание показывает грубый гранулометрический состав из-за небольшого времени нахождения породы на сите. Кроме того, аналитические сита не наклоняются и материал подается порциями. При этом не учитывается взаимное засорение отдельных отверстий сита зернами, которое наблюдалось во время технического просеивания. Грубые частицы имели более короткое время пребывания и контакта на ситовом ярусе, особенно в сравнении с мелкими кусками ручной сортировки или аналитическим просеиванием (вариант 3). В целом это привело к виртуальному увеличению негабаритного материала на каждом ярусе грохота и препятствовало частицам целевого размера проходить ярус грохота и попадать в более мелкие фракции продукта. Следовательно, аналитическое просеивание обеспечивает лучшую возможность прохода через сетку, чем техническое.

Однако сравнение массовых долей возможно, если использовать линейную интерполяцию гранулометрического состава варианта 3 (таблица). Массовые доли технического просеивания легкой фракции (< 28 мм) и целевой фракции (28–70 мм) были ниже, чем для аналитического просеивания. Тем не менее, аналитическое просеивание показало хорошую аппроксимацию

гранулометрического состава сырья. Этот метод дал детальную характеристику отбитого материала и был пригоден для оптимизации используемой дробилки, а также для определения размеров новой. Кроме того, эта информация использовалась для разработки нового процесса переработки доломита [17].

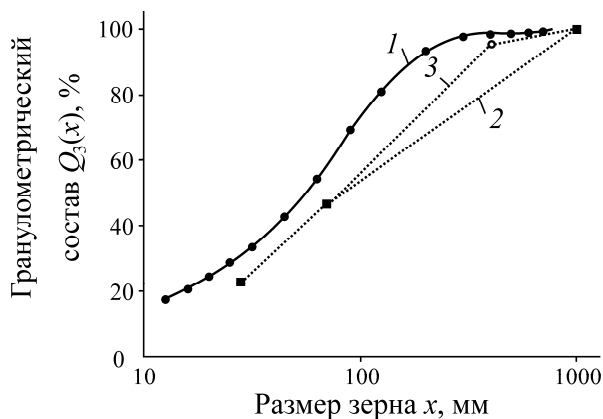


Рис. 6. Сравнение аналитического результата (вариант 3) и технического просеивания: 1 — аналитическое просеивание и ручная сортировка (вариант 3); 2 — техническое просеивание; 3 — техническое просеивание с рассчитанной величиной >400 мм

Сравнение технического и аналитического просеивания, %

Размерный класс, мм	Массовая доля	
	Аналитическое просеивание и ручная сортировка (вариант 3)	Техническое просеивание (Lokotrack ST2.8)
<28	30.9	23
28–70	27.4	24
>70	41.7	53

В итоге представлен пример гранулометрического состава отбитого взрывом доломита. В процессе производства массовый выход отдельных фракций нестабилен и необходимо учитывать случайные его колебания. Однако такие колебания незначительны в отношении суточной добычи сырья. Следовательно, использовался вполне достоверный гранулометрический состав для оценки существующей перерабатывающей установки и разработки новой схемы обработки. Размеры первичных дробилок основываются на максимальном размере частицы и ожидаемой пропускной способности исходного материала. Новая схема обработки включает грохот для отделения крупной фракции, который увеличил выход фракции целевого размера на 14 % [11]. Так как предложенный метод основан на геометрических размерах, он может быть применим к другим материалам, другим формам и другим размерам частиц.

ВЫВОДЫ

Для оптимизации процесса обработки доломита проанализирован гранулометрический состав отбитого материала. Грансостав определяли методом ручной сортировки для всех кусков, больших 200 мм, и аналитического просеивания для меньших кусков. Из-за широкого диапазона размеров кусков и ограниченности отдельных методов использован метод совмещения результатов, который позволяет получить более точную характеристику исходного материала и включить оптимизирование производственного процесса с нуля. Сравнение результатов нового метода с техническим просеиванием показало, что полученное распределение по размерам представляет

собой хорошую аппроксимацию гранулометрического состава исходного материала из карьера. Установлено, что приблизительно 25 % отбитой породы находилось в пределах целевого размера куска, почти 30 % не требовало дополнительного дробления. Максимальный размер куска составил около 800 мм. Это новая и более подробная информация позволяет оптимизировать существующие установки, а также проектировать по-новому все процессы обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gorenjski T.** Mineralien und Edelsteine, Klagenfurt, Neuer Kaiser Verlag, 1998.
2. **Vogt W., Assbrock O., Havermann T.** Automatic image analysis of blasted debris, Gluckauf, 1994, Vol. 130, No. 6. — P. 388–394.
3. **Bagde M. N., Raina A. K., Chakraborty A. K., Jethwa J. L.** Rock mass characterization by fractal dimension, Eng. Geol., 2002, 63, 1–2. — P. 141–155.
4. **Sameit B., Ziraknejad N., Azmin A., Bell I., Chow E., Tafazoli S.** A portable device for mine face rock fragmentation analysis, Min. Eng., 2015, Vol. 67, No. 1. — P. 16–23
5. **Kanchibotla S. S., Valery W. and Morrell S.** Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding, Proc. of Explo '99, 1999. — P. 137–144
6. **Cho S. H., Nishi M., Yamamoto M., Kaneko K.** Fragment size distribution in blasting, Mater. Trans., 2003, Vol. 44, No. 5. — P. 951–956.
7. **Schubert H.** Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Bd. I, 4. Aufl. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1989.
8. **Mütze T., Hirte A., Kuhn T., Peuker U.** Comminution behavior of ferromanganese nodules, Proc. of XXVII International Mineral Processing Congress, Santiago de Chile, 2014.
9. **Pahl M. H., Rumpf H., Schaedel G.** Zusammenstellung von Teilchenformbeschreibungsmethoden, Aufbereitungstechnik, 1973, Vol. 14. — P. 257–264, 672–683, 759–764.
10. **Leschonski K.** Kennzeichnung disperser Systeme, Teilchengrößenanalyse, Chemie Ingenieur Technik 1973, Vol. 45, No. 1. — P. 8–18.
11. **Star U. and Müller A.** Korngröße und Kornform von Recyclingbaustoffen — schnelle und effektive Methoden zur Beurteilung, RatgeberAbbruch& Recycling, 2004. — P. 78–84.
12. **Sanchidrian J. A., Segarra P., Ouchterlony F., Lopez L. M.** On the accuracy of fragment size measurement by image analysis in combination with some distribution functions, Rock Mech. Rock Eng., 2009, Vol. 42, No. 1. — P. 95–116.
13. **Franklin J. A.** Measurement of blast fragmentation, Proc. Fragblast — 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal & Quebec, 1996.
14. **Zlatev M.** Beitrag zur quantitativen Kornformcharakterisierung unter besonderer Berücksichtigung der digitalen Bildaufnahmetechnik (Dissertation), Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, 2005.
15. **Schubert H.** Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Bd. III, 2. Aufl. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1984.
16. **DIN EN 933-4.** Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Berlin, Beuth Verlag, 2008.
17. **Fraszczak T., Mütze T., Peuker U. A., Lychatz B., Ortlepp O.** Optimizing an existing dolomite processing plant, Cem. Int., 2016, Vol. 14, No. 5. — P. 44–50.

Поступила в редакцию 15/XI 2016

После доработки 20/VIII 2018

Принята к публикации 29/I 2019