

УДК 622.7

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ  
ГЕОМАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ МНОГОКРАТНОГО УДАРНОГО ДРОБЛЕНИЯ**

**А. И. Матвеев<sup>1</sup>, Е. С. Львов<sup>2</sup>**

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,  
E-mail: <sup>1</sup>andrei.mati@yandex.ru, <sup>2</sup>lvoves@bk.ru,  
просп. Ленина, 43, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия*

Дано обоснование методики и пример определения степени дезинтеграции геоматериалов с применением ударного способа дробления. Методика предлагает идентификацию двух одновременно протекающих процессов рудоподготовки: разрушения и дезинтеграции с помощью гранулометрического состава продуктов дробления. Получены количественные результаты степени дезинтеграции для ряда испытанных рудных геоматериалов разной текстуры и минерального состава. Показано, что дезинтеграция имеет важное значение при рудоподготовке, а степень дезинтеграции — важная характеристика процесса рудоподготовки, показатель эффективности работы аппаратов дробления.

*Дробление, дробилка, обогащение, гранулометрическая характеристика, извлечение, золото*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200216

Современная тенденция развития технологии в области переработки и обогащения руд, способствующая снижению затрат на рудоподготовку, связана с упрощением технологических схем и сокращением операций дробления и измельчения при снижении циркулирующих нагрузок в них. Это достигается за счет применения оборудования с высокой степенью дробления и высокой производительностью. Таким требованиям удовлетворяют аппараты, использующие ударный принцип дробления [1, 2].

Динамический характер процесса разрушения геоматериалов в режиме свободного высокоскоростного взаимодействия с рабочими органами аппаратов дробления и измельчения связан с использованием меньшего значения прочности минералов на растяжение, что является неоспоримым преимуществом способов разрушения, основанных на эффекте разрыва, в том числе ударных методов [3, 4]. Развитие центробежно-ударных и роторных дробилок подтверждает это. Они высокопроизводительны и обеспечивают высокую степень разрушения. Применение данного типа дробилок приводит к улучшению технологических и технико-экономических показателей работы рудообогатительных фабрик [5].

Эффективность ударного дробления и измельчения обусловлена также таким явлением, как дезинтеграция. Применительно к процессам рудоподготовки перед обогащением под процессом дезинтеграции понимается процесс разъединения геоматериала как сложного полиминер-

рального комплекса на отдельные части, т. е. на отдельные минеральные фазы и на более крепкие в механическом отношении компоненты или фрагменты. Дезинтеграция геоматериалов выступает как результат избирательного разрушения по наиболее слабым механическим связям, каковыми являются межминеральные и интергранулярные связи.

Рассматривая процесс разрушения твердого тела ударным способом с точки зрения механики, отметим, что в момент удара в нем возникает сложное поле напряжений и деформаций разной величины и направленности, которое сопровождается дезинтеграцией. Иногда данный процесс может быть охарактеризован как самопроизвольная диспергация материала со слабыми механическими связями, сопутствующими общему разрушению. Дезинтеграция все активнее проявляется при использовании способов многократного динамического воздействия.

Экспериментальные исследования по дезинтеграции геоматериалов разной текстуры и фазового состава на основе кварцевой матрицы (руд жильного типа) выполнены на экспериментальной дробилке ДЖД-300 конструкции ИГДС СО РАН. Установлено, что гранулометрическая характеристика продуктов дробления имеет двухмодальный характер (рис. 1). Формирование моды в области мелких классов крупности  $-5 + 2$  мм объясняется накоплением вскрываемых в процессе дробления наиболее слабых текстурных компонентов, в том числе мономинеральных фаз, а мода в области крупных классов  $-20 + 10$  мм формируется обломками кварцевой матрицы, имеющей более однородный состав [6].

Аналогичный эффект проявляется при испытании множества различных геоматериалов. Можно сказать, что такая картина распределения гранулометрического состава продуктов дробления характерна для ударных способов. Разновидность распределения зависит от текстурных особенностей горной породы. Эффект дезинтеграции усиливается при применении режима многократных динамических воздействий, при котором разрушение кусковых геоматериалов приобретает характер объемного разрушения [7]. В связи с этим возникает вопрос количественного определения доли дезинтеграции к общей картине процесса разрушения.

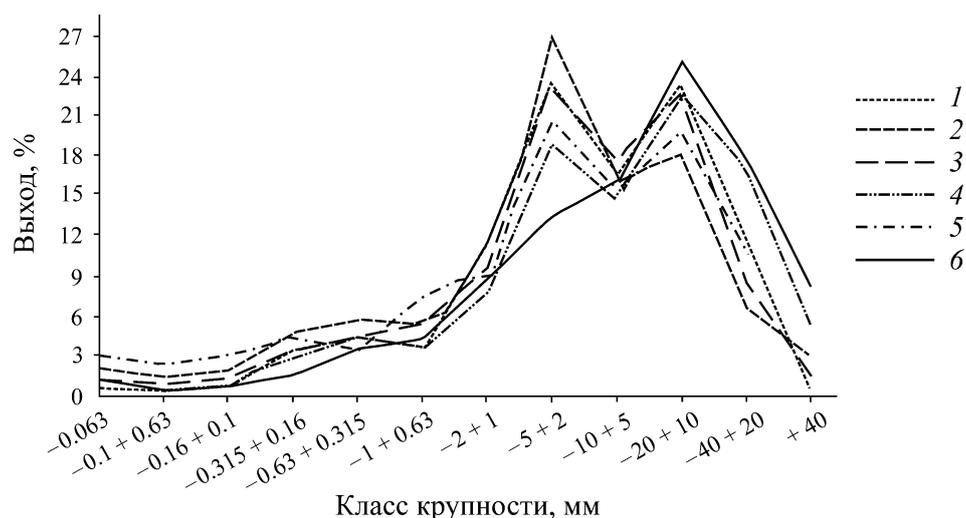


Рис. 1. Сравнительная гранулометрическая характеристика продуктов дробления руд различных текстур: 1 — кварц-антимонитовая руда полосчатой текстуры; 2 — антимонитовая руда с прожилками кварца; 3 — кварц-антимонитовая руда прожилковой текстуры; 4 — кварцевая руда массивной текстуры; 5 — биотит-кварцевая руда сланцевой текстуры; 6 — базальтовая руда массивной текстуры

Предлагается методика определения степени дезинтеграции по идентификации двух одновременно протекающих процессов при дроблении: дезинтеграции и собственно разрушения. В спектре распределения гранулометрического состава продуктов дробления дезинтеграция идентифицируется образованием мод в области мелких классов крупности, имеющих самую разнообразную форму. Собственно, разрушение геоматериала представляется одной характерной модой в области крупных классов крупности. Образование или накопление материала в этих классах крупности зависит от энергии динамического воздействия, сообщаемой рабочими органами аппарата дробления, и от механических свойств более крепкой и однородной части геоматериала или степени их сопротивляемости к механическим воздействиям. Методика определения степени дезинтеграции предусматривает, что данная мода подчиняется логнормальному закону распределения аналогично процессам дробления в других аппаратах и при дроблении более однородных и монолитных геоматериалов. При таких допущениях и такой идентификации двух процессов можно определить степень дезинтеграции любого неоднородного по текстуре и структуре геоматериала по разнице площади общего распределения гранулометрического состава и доли разрушения, подчиняющегося логнормальному распределению.

Суть методики расчета степени дезинтеграции показана на рис. 2, где представлена гранулометрическая характеристика продуктов дробления двухмодального вида: одна — в области мелких классов, вторая — в области крупных. Мода в области крупных фракций имеет форму логнормального распределения, другая часть (заштрихованная) — это доля материала, разрушенного вследствие дезинтеграции, т. е. самопроизвольной диспергации наиболее слабой части геоматериала. Соотношение заштрихованной площади к общей площади (массе) распределения дробленого материала и есть степень дезинтеграции.

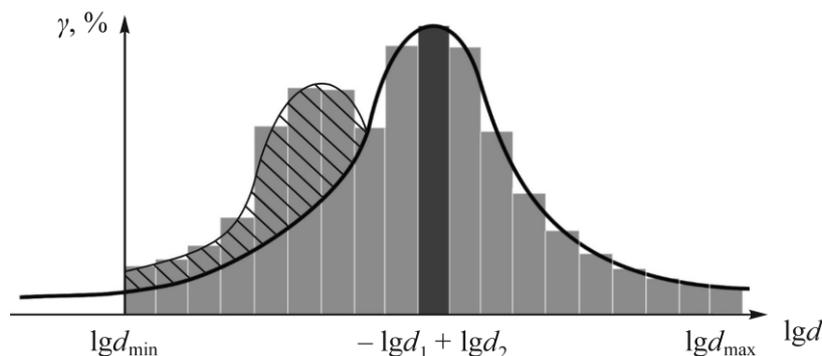


Рис. 2. К методике определения степени дезинтеграции

Алгоритм расчетной части методики выглядит следующим образом. Выявляются параметры моды в области крупных фракций, ограниченных максимальным выходом класса и фракциями  $d_1$  и  $d_2$  в логарифмической шкале, площадь которого

$$S = \int_{lg d_1}^{lg d_2} f(x) dx.$$

Из условия  $S_1 = f(x)$ , приравненной к функции логарифмически нормального распределения:

$$e^{-\frac{lg(x-a)^2}{2\delta^2}} = f(x), \quad e^{-\frac{\left(x - \frac{d_1+d_2}{2}\right)^2}{2\delta^2}} = f(x)$$

определяется значение  $\delta$ , затем вычисляется площадь под функцией логарифмически нормального распределения:

$$S_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} \int_{n_i}^{N_i} e^{-\frac{\lg(x-a)^2}{2\delta^2}} dx.$$

Степень дезинтеграции

$$D = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} \int_{n_i}^{N_i} e^{-\frac{\lg(x-a)^2}{2\delta^2}} dx.$$

Сложность идентификации моды под логнормальным распределением заключается в определении параметра  $\delta$ . На практике вычислить его затруднительно, требуется система допусков, позволяющая достоверно описывать реальную моду. Вместе с тем упрощенно можно сделать следующее. Выбираем три значения  $y$ , характеризующие выход продуктов дробления в области больших классов крупности, на основе которых определяем функцию логнормального распределения материала, попадающего под основную моду распределения.

Пиковое или максимальное значение  $y_2$  по оси ординат в области крупных классов соответствует оси абсцисс со значением  $x_2$ , величина  $y_3$  следует за пиковым значением в сторону увеличения крупности материала по оси абсцисс в точке  $x_3$ . Значение  $y_1$  и точку  $x_1$  принимаем по симметрии с точкой  $x_3$  и  $y_3$  в соответствии с гипотезой о логнормальном распределении, где графически описанная область представляет собой параболу с вершиной  $y_2$  в точке  $x_2$ . В итоге получаем следующие выражения:

$$A = 1 \cdot \frac{\ln\left(\frac{y_1}{y_2}\right)(x_3^2 - x_2^2) - \ln\left(\frac{y_2}{y_3}\right)(x_2^2 - x_1^2)}{2 \left[ \ln\left(\frac{y_2}{y_3}\right)(x_1 - x_2) - \ln\left(\frac{y_1}{y_2}\right)(x_2 - x_3) \right]},$$

$$B = \frac{1}{\ln\left(\frac{y_1}{y_2}\right)} [(x_2 - A)^2 - (x_1 - A)^2],$$

$$C = y_1 e^{-\frac{(x_1 - A)^2}{B}}. \quad (1)$$

Определив значения величин  $A$ ,  $B$  и  $C$ , найдем область, выраженную функцией (1), т. е. параметры моды логарифмически нормального распределения материала:

$$Y(X) = C e^{-\frac{(X-A)^2}{B}}.$$

Далее вычисляем площадь кривой логарифмически нормального распределения

$$S = \int_{-x_0}^{x_0} Y(X) dX.$$

Следовательно, степень дезинтеграции, согласно формулам, представленными выше, определяется как  $D = 1 - S$ .

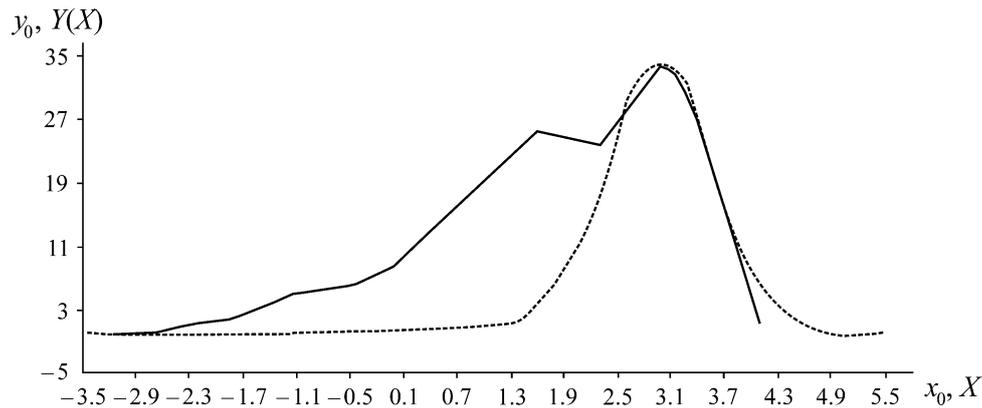


Рис. 3. Определение степени дезинтеграции кварц-антимонитовой руды месторождения “Сарылах”

Графическая часть определения степени дезинтеграции кварц-антимонитовой руды месторождения “Сарылах” на дробилке ДКД-300 представлена на рис. 3. Пунктирной линией изображена предполагаемая мода, характеризующая разрушение геоматериала непосредственно ударной нагрузкой от рабочих органов дробилки. Степень дезинтеграции рассчитана с использованием формул, описанных выше, и составляет 0.49. Это означает, что руда в равной степени склонна как к дезинтеграции, так и к разрушению, т. е. около половины (49 %) процесса уменьшения крупности геоматериала при дроблении происходит в режиме объемной дезинтеграции (диспергации).

Ниже приведены результаты расчетов степени дезинтеграции руд различных текстур с применением ударного способа дробления, осуществляемого в аппарате ДКД-300:

Кварц-антимонитовая руда полосчатой текстуры	0.49
Антимонитовая руда с прожилками кварца	0.68
Кварц-антимонитовая руда прожилковой текстуры	0.56
Кварцевая руда массивной текстуры	0.35
Биотит-кварцевая руда сланцевой текстуры	0.52
Базальтовая руда массивной текстуры	0.43

Видно, что степень дезинтеграции руды зависит от текстуры и минерального состава геоматериала. Предложенная методика определения степени дезинтеграции геоматериалов в процессе дробления с использованием динамических воздействий дает количественную характеристику процесса дезинтеграции как составного процесса рудоподготовки.

## ВЫВОДЫ

Предложена методика определения степени дезинтеграции геоматериалов при ударном дроблении по гранулометрическому составу продуктов дробления. Идентифицированы два одновременно протекающих процесса при рудоподготовке: разрушения и дезинтеграции. Результаты расчетов степени дезинтеграции, определяемой вычитанием из общей суммы распределения гранулометрического состава доли разрушаемого геоматериала, на примере дробления ряда горных пород с разной текстурой и минеральным составом с изменением ее значения от 0.35 до 0.68 показывают существенную разницу в характере разрушения геоматериалов. Степень дезинтеграции — важная технологическая характеристика рудоподготовки (минерального сырья) и аппаратов дробления и измельчения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баранов В. Ф.** Обзор мировых достижений и проектов рудоподготовки новейших зарубежных фабрик // Обогащение руд. — 2008. — № 1. — С. 3–12.
2. **Gogain K.** Innovative process development in metallurgical industry, Phys. Proc.: Innovations in Miner. Proc., 2015. — P. 9–65.
3. **Шер Е. Н., Ефимов В. П.** Трехмерное моделирование развития трещины в твердом теле при внедрении жесткого клина // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 43–49.
4. **Ефимов В. П.** Применение интегрального критерия разрушения для определения прочности на растяжения и трещиностойкости горных пород // ФТПРПИ. — 2019. — № 3. — С. 44–53.
5. **Газалеева Г. И., Цыпин Е. Ф., Червяков С. А.** Рудоподготовка. Дробление, грохочение, обогащение. — Екатеринбург: ООО “УЦАО”, 2014. — 914 с.
6. **Пат. 2111055 РФ.** Дробилка комбинированного ударного действия / А. И. Матвеев, В. П. Винокуров, А. Н. Григорьев, А. М. Монастырев // Оpubл. в БИ. — 1998. — № 14.
7. **Львов Е. С., Матвеев А. И.** Изучение формирования гранулометрического состава и раскрытия минералов при дроблении руд с использованием дробилки многократного динамического действия ДКД-300 // ГИАБ. — 2014. — № 10. — С. 112–116.

*Поступила в редакцию 02/III 2020*

*После доработки 22/III 2020*

*Принята к публикации 10/IV 2020*