УДК 622.271

Ю.И.ВИНОГРАДОВ, Г.П.ПАРАМОНОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), Россия

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПРОДУКТОВ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Экспериментальные исследования гранулометрического состава горной массы, полученной в результате взрывных работ и ударного разрушения, подтвердили хорошую сходимость экспериментальных данных с теоретическим логарифмически-нормальным законом распределения. Доказано, что логарифмическая дисперсия логнормального закона распределения кусков раздробленного массива горных пород является структурным инвариантом на уровне статистической совокупности блоков и кусков. Предложена модель разрушения полиминеральных пород энергией взрыва.

Pilot researches of grain-size composition of the rock mass obtained as a result of blasting operations confirmed good convergence of experimental data with theoretic logarithmic-normal distribution law. It was proved, that logarithmic variance of logarithmic normal distribution law of the fractured rock mass fragments' distribution is a structural invariant on the level of statistical universe of the block and fragments. There is offered a model of polymineral rock fracture by blasting energy.

Экономические показатели горно-добывающих предприятий во многом зависят от той части совокупности кусков горной массы, количество и гранулометрический состав которой определяет производительность машин погрузочно-транспортного комплекса.

В связи с этим методики определения гранулометрического состава горной массы, принятые на горных предприятиях, детально анализируют именно этот диапазон размеров кусков: 0,1-2 м. В пределах этого диапазона размеров трудно предположить существенное изменение физико-механических свойств кусков различного размера, что позволяет рассматривать формирование этой части совокупности кусков горной массы в соответствии с логарифмически-нормальным законом распределения (схемой Колмогорова). Экспериментальные исследования гранулометрического состава горной массы, полученной в результате взрывных работ и ударного разрушения, подтвердили хорошую сходимость экспериментальных данных с этим предельным законом распределения [1, 5, 7].

Результаты этих исследований также указывают на то, что в аналогичных по физико-механическим свойствам породах (в условиях одного массива) логарифмическая дисперсия сохраняется постоянной в широком диапазоне изменения параметров взрывной отбойки при условии значительной вариации (до порядка величины) математического ожидания логарифма размеров.

Установлено [3], что не только в пределах одного массива, но даже в широком диапазоне свойств разрушаемых пород значительная вариация математического ожидания размеров кусков (среднего размера куска) не сопровождается какой-либо существенной вариацией дисперсии.

Такое изменение логарифмической дисперсии распределения размеров кусков свидетельствует о том, что при разрушении разнородных массивов различными способами реализуется лишь очень малая часть возможных статистических моделей, т.е. практически результаты разрушения в исследованном диапазоне изменения математического ожидания – подобны.

Малая реализация возможных исходов, по-видимому, является результатом осреднения элементарных актов разрушения (разрыва межмолекулярных связей). Таким об-

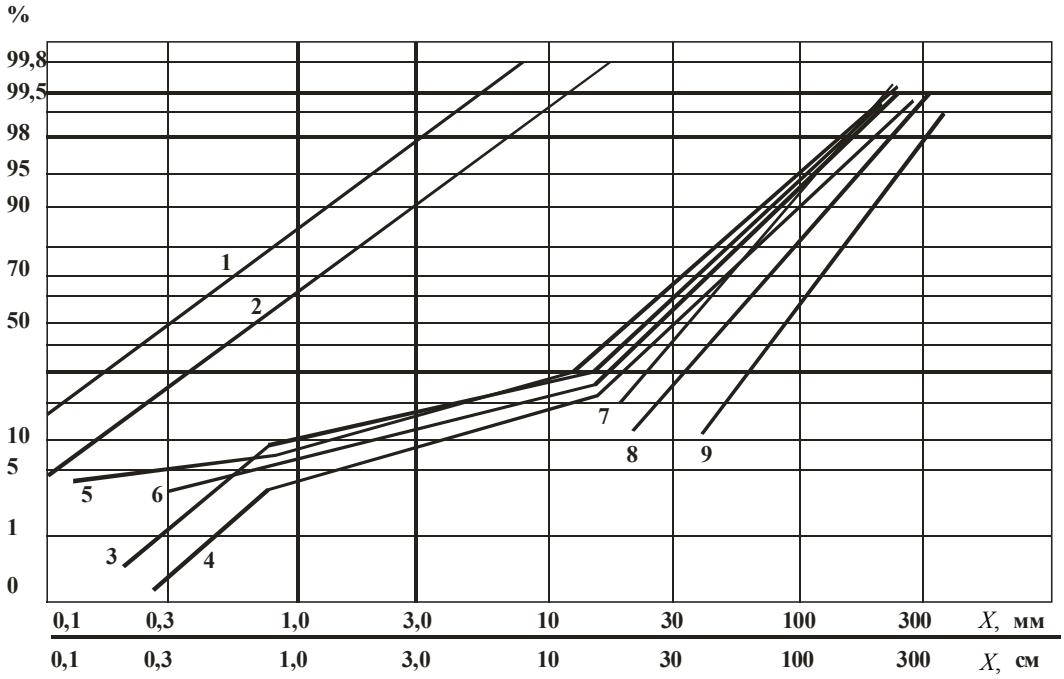


Рис.1. Распределение гранулометрического состава (кривые 1-6, ось *X* в миллиметрах) и блоков в гранитном массиве (кривые 7-9, ось *X* в сантиметрах)

1, 2 – буровой шлам соответственно для СБШ-250, ROC-L8; 3, 5, 6 – взорванная горная масса на карьере ОАО «Гранит-Кузнечное»; 4 – взорванная горная масса на карьере ОАО «Каменогорское карьероуправление»

разом, можно объяснить, например, практическую однозначность результатов многовекового нагружения массива, реализующихся образованием систем блоков и трещин, и взрывное разрушение того же массива с получением идентичных статических характеристик кусковатости (рис.1). В этом случае необходимо отметить, что разрушение не просто копирует систему блоков массива, но и затрагивает практически нетронутые его части.

Подобие одной из характеристик статистической системы продуктов разрушения горных пород (логарифмическая дисперсия) при существенно разных процессах, вызывающих это разрушение, свидетельствует о том, что эта статистическая система характеризует кинетику стохастического процесса проявления элементарных актов разрушения массива на молекулярном уровне. Эти экспериментальные факты позволяют утверждать, что логарифмическая дисперсия логнормального закона распределения является структурным инвариантом на уровне статистической совокупности блоков и кусков.

Отмеченную особенность процесса разрушения горных пород необходимо учитывать при решении чисто технологических задач горного производства (в частности для обеспечения равномерного дробления массива), а также при оценке надежности эмпирических зависимостей, полученных при использовании различных параметров распределения кусковатости взорванной горной массы.

Согласно вышеизложенному, задача получения регулярного или более равномерного дробления путем изменения условий разрушения массива взрывом практически не разрешима. Узкий диапазон и случайный характер изменения логарифмической дисперсии распределения размеров кусков позволяют получить большую или меньшую степень дробления, оцениваемую средним размером куска. При этом большая равномерность дробления соответствует обычно простому уменьшению содержания крупных фракций за счет увеличения количества мелочи, т.е. той доли совокупности кусков, которая не оказывает существенного

влияния на работу горно-транспортного и погрузочного оборудования.

Результаты исследований гранулометрического состава взорванной горной массы на гранитных карьерах свидетельствуют о трехмодальности аппроксимирующей функции распределения кусковатости (рис.1). Попытки объяснить эти распределения были выполнены рядом исследователей [1-8, 9]. Так, в основу объяснения многомодального распределения кусковатости взорванной горной массы Н.Н.Фадеенковым положены представления об иерархической организации процесса взрывного разрушения массива за счет скачкообразного изменения характера и степени дробления в различных зонах, доминирования активизированной дефектности различных структурных уровней начиная от низшего (трещины, отдельности) и кончая высшими типами микротрещин и дислокаций. То есть, согласно Н.Н.Фадеенкову, в основном объеме кусков можно выделить области, разрушения в которых происходят по различным для трещин массива иерархическим уровням. Вокруг заряда ВВ выделяется зона «регулируемого» (активного) дробления, в которой трещины развиваются по границам зерен материала естественных отдельностей. Зона «практически нерегулируемого» действия взрыва обусловлена расчленением массива на блочность по вторичной минерализации граней отдельностей.

Сюда же можно добавить еще одну область, разрушение в которой происходит за счет радиальной составляющей компоненты давления. Материал в этой зоне после взрыва имеет наименьшее математическое ожидание размера куска, поэтому зону всестороннего сжатия будем называть зоной измельчения. Радиус ее составляет до 5 R_0 (где R_0 – радиус заряда). Очевидно, объем этой зоны разрушения в общем объеме взорванной горной массы невелик, поэтому, чтобы оценить параметры распределения этой зоны, необходимо значительно увеличить объем отбираемой на фракционный анализ породы.

В зоне активного разрушения (радиус до 30 R_0 в зависимости от естественной трещиноватости массива) за счет тангенциальной – растягивающей волны напряжений происходит образование радиальных трещин, а следующая за фронтом сжатия область разряжения вызывает образование концентрических трещин. На расстоянии, большем 30 R_0, волна напряжений не может вызывать разрушения существующих естественных отдельностей, однако поступательное движение горной массы сохраняется и за зоной активного разрушения. За счет этого, при условии существования обнаженной поверхности происходит развал породы по существующей блочности. Некоторые из микротрещин в этой зоне начинают расти и даже могут сливаться, обеспечивая дополнительное дробление, но разрушения в этой зоне происходят лишь за счет неоднородностей макроуровня.

Как указывает в своей работе Л.И.Барон [2], показатели сопротивляемости разрушению полиминеральных горных пород зависят не столько от количественного содержания «слабого» минерала, сколько от той роли, которую он играет в структуре породы и текстурных особенностях последней. При этом имеют значение крупность зерен, слагающих породу, характер межзеренных контактов, степень нарушенности структуры и другие факторы.

С другой стороны известно [6], что при многократном действии упругих волн (многократные взрывные нагрузки) в гранитах происходит накопление нарушенностей, существенное снижение прочности гранита как на сжатие, так и на растяжение. При этом под действием каждого импульса в породе накапливается определенное число нарушений. Они возникают в результате развития существующих в породе микронарушений, а также вследствие образования новых нарушений в местах концентраций напряжений, дислокаций, включений, ослабленной прочности и т.д.

Сопоставляя эти два неоспоримых факта, можно представить следующую картину разрушения гранитного массива. Многократное воздействие взрывных нагрузок вызывает разупрочнение массива горных пород за счет возникновения микронарушений

в механически слабом материале. Последний массовый взрыв вызывает разрушение породы в зоне активного дробления по уже существующим плоскостям ослабления. Таким образом, показатели распределения гранулометрического состава взорванной горной массы из зоны активного дробления определяются для данного типа пород параметрами распределения неоднородностей третьего порядка (неоднородности горных пород, петрографические разности, распределения цемента и пор, характер контактов между зернами, а также наличие микротрещин и пространственная ориентировка слабого компонента).

Для лучшего понимания организации дробления горных пород взрывом приведем некоторые геологические сведения о гранитах на примере гранитов месторождения «Кузнечное». К главным минералам, определяющим физико-механические свойства и характер дробления гранитов, относятся: кварц, калиевый полевой шпат, плагиоклаз и биотит. Биотит имеет таблитчатый габитус с весьма совершенной пинакоидальной спайностью, что обеспечивает весьма слабую сопротивляемость минерала физико-механическим воздействиям, направленным вдоль таблиц. В сечениях поперек таблиц можно увидеть трещины спайности. Биотит может являться слабым минералом для гранита, определяющим его дробимость в зоне активного разрушения. Однако этот минерал является наиболее идиморфным по отношению к другим минералам. Это, а также исследование изломов осколков горных пород из зоны активного разрушения дает основание предположить, что определяющим степень дробимости во второй зоне минералом может являться не только биотит, но и калиевый полевой шпат (его содержится в граните до 50 %). Калиевый полевой шпат (обычно микроклин) имеет твердость 5-6, хрупок. Большей частью зерна калиевого полевого шпата неправильной формы, ксеноморфные по отношению к плагиоклазу, т.е. находятся в промежутках между его зернами. Поэтому можно предположить что эти два минерала: биотит и калиевый полевой шпат, – определяют параметры распределения горной массы из зоны активного разрушения.

В зоне переизмельчения энергетическое воздействие взрыва больше, чем в остальных зонах, и, как следствие, разрушение горной породы в этой зоне происходит за счет активизации дефектов более высокого уровня. Полагаем, что разрушение в этой зоне происходит по контактам зерен кварца и плагиоклаза. Как известно, ксеноморфизм кварца в гранитах отчетливо не выражен [4]. Кристаллы кварца имеют бипирамидальную правильную форму, но обычно оплавлены и потому округлы. Спайность у кварца отсутствует. Плагиоклазы чаще имеют призматический габитус, являются более идиоморфными по отношению к кварцу и калиевому полевому шпату. Размер зерен кварца и плагиоклаза в гранитах месторождения «Кузнечное» колеблется от 1 до 5 мм. Из анализа гранулометрического состава разрушенных взрывом гранитов (рис.1) видно, что первая мода логнормального распределения соответствует размеру частицы 2-3 мм, что указывает на справедливость сделанного предположения.

Аналогичная ситуация, как и в ближней зоне взрыва, возникает при бурении. Это подтверждает на только примерное равенство напряжений, возникающих в ближней зоне взрыва и на контакте бурового инструмента с породой, но и одинаковое распределение результатов этих процессов разрушения. Напротив, логарифмически-нормальное распределение гранулометрического состава взорванной горной массы из зоны активного дробления имеет совершенно другое значение логарифмической дисперсии (рис.2).

Надо полагать, что предложенная модель разрушения полиминеральных пород энергией взрыва – наличие трех зон разрушения и дробление в активной зоне по слабым минералам или включениям – предусматривает, что полученные в результате дробления куски должны разрушаться в дальнейшем по тем же законам. Это означает, что результат последующего дробления

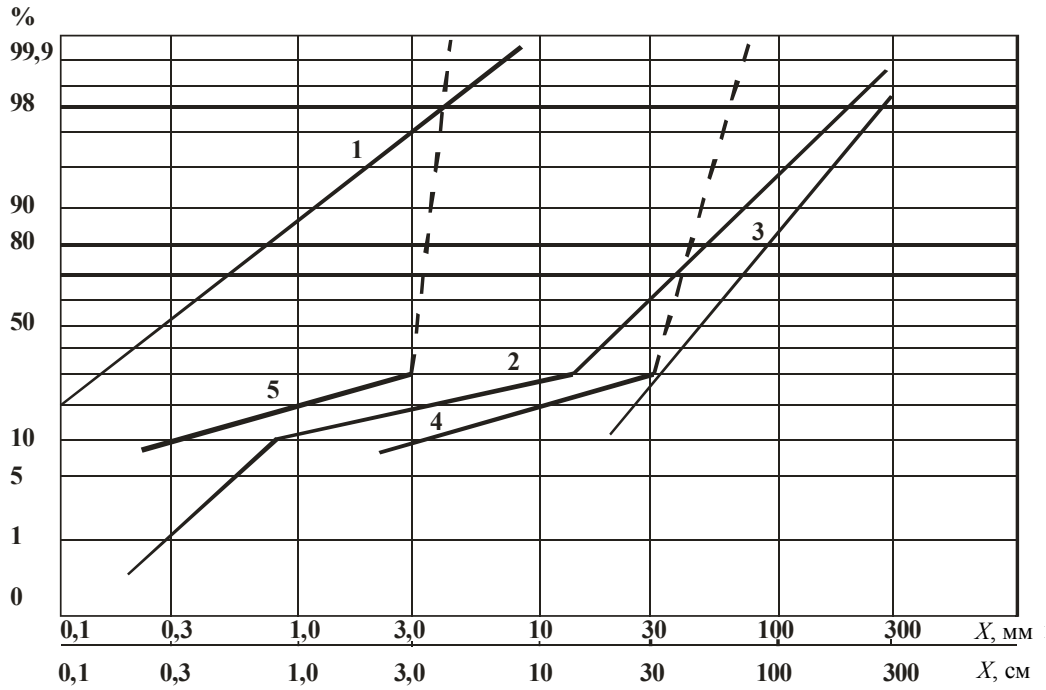


Рис.2. Распределения:
1 – бурового шлама; 2 – гранулометрического состава взорванной горной массы; 3 – блочности массива горных пород; 4 – горной массы после первой стадии дробления; 5 – горной массы после второй стадии дробления. Для кривых 1, 2, 4, 5 ось X в миллиметрах, для кривой 3 в сантиметрах

на обогатительной фабрике кусков взорванной горной массы должен подчиняться такому же закону распределения, что и распределения кусков из активной зоны разрушения.

Для подтверждения или опровержения вышеизложенных предположений были проведены исследования распределения гранулометрического состава продукта механического разрушения взорванной горной массы после трех стадий дробления на обогатительной фабрике ОАО «Гранит-Кузнечное». Исследовалось прохождение взорванной горной массы, по всем стадиям дробления обогатительной фабрики.

Анализ этих результатов (рис.2) свидетельствуют о том, что логарифмические дисперсии распределений кусков горной массы после механического дробления на обогатительной фабрике равны логарифмической дисперсии распределения кусков взорванной горной массы в «активной» зоне дробления.

Эти исследования и анализ результатов распределения грансостава взорванной горной массы, зернового состава буровой мелочи и блочности гранитного массива являются подтверждением предположения о формировании всей совокупности кусков из трех зон дробления. Первая зона – зона всестороннего сжатия, переизмельчения, где разрушение происходит за счет радиальной составляющей компоненты давления. Радиус ее составляет до $5R_0$. Вторая зона – зона активного дробления. Здесь за счет тангенциальной – растягивающей составляющей волны напряжения происходит образование радиальных трещин, а следующая за фронтом сжатия область разряжения вызывает образование концентрических трещин. Радиус этой зоны $(12\text{-}30)R_0$. И, наконец, на расстоянии, большем $(12\text{-}30)R_0$, волна напряжений не может вызвать разрушения существующих естественных отдельностей. Однако поступательное движение горной массы сохраняется, поэтому происходит развал породы по существующей блочно-

сти. Причем некоторые макротрещины в этой зоне начинают расти и даже сливаться, обеспечивая дополнительное дробление.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Андреев С.Е.* Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава / С.Е.Андреев, В.В.Товаров, В.А.Перов. М.: Изд-во черной и цветной металлургии, 1959. 300 с.

2. *Барон С.И.* Проверка применимости уравнения Розина-Раммлера для исчисления диаметра среднего куска при взрывной отбойке горных пород / С.И.Барон, Г.Н.Сиротюк // Взрывное дело. 1967. № 62/19. С.121-125.

3. *Виноградов Ю.И.* Об оценке дробления горных пород взрывом / Ю.И.Виноградов, Т.А.Тухашева // Новые исследования в горном деле / Ленинградский горный ин-т. Л., 1975. Вып.8. С.92-98.

4. *Заварицкий В.А.* Петрография. Изверженные горные породы / Ленинградский горный ин-т. Л., 1969. Т.1. 201 с.

5. *Макарьев В.П.* К вопросу о законе распределения взорванной горной массы на подземных работах / В.П.Макарьев, Ю.А.Коротков // Труды института «Гипроникель». 1972. Вып.52. С.54-58.

6. *Новикова М.А.* Разработка способа производства массовых взрывов с попутной добычей гранитных блоков: Автореф. … канд. техн. наук / Московский горный ин-т. М., 1984. 23 с.

7. *Падуков В.А.* Характеристики продуктов разрушения горных пород при ударе и взрыве и прогнозирование гранулометрического состава горной массы / В.А.Падуков, В.П.Макарьев // Труды института «Гипроникель». 1972. Вып.54. С.59-64.

8. *Фадеенков Н.Н.* О методическом подходе к управлению при взрывном дроблении горных пород / Н.Н.Фадеенков, Э.П.Таран // Взрывное дело. 1984. № 86/43. С.213-219.

9. *Хохлов С.В.* Методика прогнозирования гранулометрического состава при буровзрывной отбойке гранита на щебень: Автореф. … канд. техн. наук / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 2000. 21 с.