

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО СПОСОБА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ НЕГАБАРИТОВ И ОТКОЛА ОТ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ДОБЫЧЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

Н.В. Войтенко, А.С. Юдин, Н.С. Кузнецова

Научный руководитель профессор Г.Е. Ремнев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В настоящее время в горнодобывающей промышленности основным методом разрушения массива горных пород, в том числе и отбойки, является взрывной с использованием химических взрывчатых веществ (ВВ). Современная теория и практика взрывного разрушения направлены на совершенствование существующих приемов, методов, взрывчатых материалов, параметры которых в большинстве случаев находятся на пределе своих технических возможностей. Увеличение интенсивности и однородности дробления достигается путем усовершенствования конструкций зарядов, схем взрыва и выбора наиболее оптимального типа ВВ [1,3]. С учетом достигнутых успехов, коэффициент полезного действия взрыва составляет порядка несколько процентов, при этом ВВ позволяют обеспечить максимальную производительность разрушения в сравнении с другими технологиями и способами разрушения. При добыче полезных ископаемых часто возникает задача дробления негабаритов горных пород, образующихся при проведении буровзрывных работ. Негабаритные куски породы либо не помещаются в зев дробилки для последующего измельчения, либо не подлежат транспортировке из-за массогабаритных параметров. Для их разрушения использование ВВ не целесообразно, так как снижается экономическая эффективность способа, увеличиваются удельные показатели загрязнения окружающей среды газопылевыми компонентами взвешенных веществ, шумовой эффект от проведения взрывов, а также возрастает риск для персонала из-за возможного разлета осколков. В таких случаях широко используются механические способы разрушения, производительность которых, на сегодняшний день, достигает промышленных масштабов. Однако с ростом механической прочности (крепости) пород, энергоемкость традиционных механических способов увеличивается [4]. Короткий ресурс работы и высокая степень износа рабочих элементов породоразрушающих инструментов, приводящие к необходимости их замены, значительно увеличивают стоимость проведения таких работ.

Электроразрядный способ является одной из альтернативных технологий разрушения горных пород. Способ не имеет негативных последствий, свойственных взрывчатым веществам и более того, позволяет производить разрушение и осуществлять направленный откол без разлета осколков и эвакуации персонала с места проведения работ [3, 6]. Низкая производительность в сравнении с ВВ, препятствует широкому применению электроразрядных установок для проведения работ по отколу горных пород, при этом низкие энергозатраты, безопасность проведения работ, а также возможность регулирования ввода энергии, повышают актуальность их локального применения, например, для разрушения негабаритов. В электроразрядном способе инструментом для откола и разрушения горных пород является расширяющийся плазменный канал, инициируемый электрическим взрывом проводника. Расширение канала разряда сопровождается эффективным преобразованием энергии мощного импульса тока в энергию ударных волн, создающих поле механических напряжений и генерирующих трещины в разрушаемом материале.

Исследование возможностей электроразрядного разрушения активно ведутся в Томском политехническом университете на протяжении последнего десятилетия. За это время были сконструированы и успешно эксплуатировались лабораторные установки ГИТ-25/96, ГИТ 50/24 и ГИТ 25/168, основные параметры которых представлены в таблице 1. На основе многочисленных экспериментов по разрушению бетонных блоков и негабаритов горных пород [7, 8] была получена физико-математическая модель электровзрыва, описывающая динамику ударно-волновых возмущений в твердом теле [2].

Таблица 1

Технические параметры установок для электроразрядного разрушения

Параметр	ГИТ 25/96	ГИТ 50/24	ГИТ 25/168	Мобильная установка
Рабочее напряжение, кВ	25	50	25	15
Ёмкость конденсаторной батареи, мкФ	96	24	168	1120
Запасаемая энергия, кДж	30	30	52,5	126
Количество электродных систем, шт	1	1	до 2	до 4
Рабочая глубина шпуров, см	≤ 30	≤ 30	≤ 50	50-80
Разрушаемый объем за 1 разряд, м <sup>3</sup>	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,15	≤ 0,6

Картина разрушения горных пород и сценарий волновой динамики, прежде всего, зависят от вида и параметров генератора, от длины разрядного канала и свойств его плазмы. Накопленный опыт эксплуатации лабораторных установок позволил установить, что для создания оптимальных условий зарождения радиальных трещин, необходимо обеспечить «быстрый» режим ввода энергии в канал разряда т.е. требуется крутой фронт

импульса (0,1-10 мкс), при этом уровень механических напряжений, необходимый для роста трещин гораздо ниже, чем для их инициирования, поэтому для формирования магистральных трещин, необходимо обеспечить длительное выделение энергии ( $\geq 200-300$  мкс) [5]. С целью проведения экспериментов в полевых условиях, была создана мобильная установка, предназначенная для производства работ по электроразрядному шпуровому отколу горных пород и искусственных непроводящих материалов, в которой были учтены выше описанные требования. Основные технические характеристики установки представлены в таблице 1. Установка представляет собой генератор импульсных токов (ГИТ), накопитель энергии которого состоит из двух конденсаторных батарей. Конструкция токоведущих шин установки позволяет осуществлять коммутацию батарей на общую нагрузку и раздельную коммутацию, с подключением до четырех электродных систем одновременно.

Для осуществления электроразрядного разрушения, важную роль играет наличие свободной поверхности, которая обеспечивает суперпозицию прямой и отраженной ударных волн, создающих растягивающие тангенциальные напряжения внутри твердого тела. При разрушении крупных кусков горных пород объемом  $0,5 \text{ м}^3 - 0,6 \text{ м}^3$  практически любая грань обеспечивает волновые процессы. Для получения наилучшего результата целесообразно подключать весь накопитель энергии к одной электродной системе, что способствует развитию максимальной мощности энерговыделения в 1 канале разряда, позволяя получить высокую объемную плотность энергии. Схема электроразрядного разрушения негабаритов горных пород представлена на рис.1а. Разрушение негабаритов объемом более  $1 \text{ м}^3$  и откол от массива горных пород осуществляется поэтапно, как показано на рис.1б. В этом случае разрушение нужно начинать вблизи свободной поверхности, параллельной оси шпуров, при этом подключив две или четыре электродные системы. В отдельных случаях может использоваться схема с так называемым “холостым” шпуром. Это означает, что между основными шпурами, бурится дополнительный шпур, он служит своеобразным концентратором растягивающих напряжений.

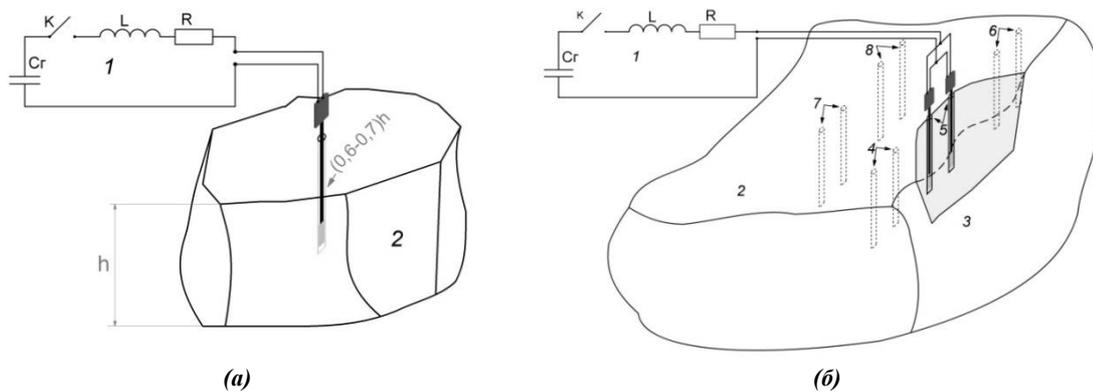


Рис. 1. Схема электроразрядного разрушения горных пород, (а) – разрушение негабаритов, (б) – откол от массива горных пород. 1-ГИТ, 2-разрушаемый объект, 3-свободная поверхность, 4–8-сетка шпуров

Электроразрядный способ является одной из перспективных и экологически чистых технологий разрушения горных пород, которая позволяет производить разрушение и осуществлять направленный откол с относительно низкими удельными энергозатратами, и может применяться там, где механические способы разрушения малоэффективны и дорогостоящи. Экспериментальное исследование возможностей данной технологии на различных электроразрядных установках позволило определить оптимальные параметры электрического импульса для зарождения и роста трещин в твердых непроводящих материалах. На основе данных, полученных экспериментальным путем, составлены рекомендации для производства работ по разрушению негабаритов и отколу от массива горных пород.

#### Литература

1. Андриенко С.С. Современные проблемы науки и производства в области горного дела, учебное пособие. – Пермь: Издательство Пермского научного исследовательского университета, 2010. – 338 с.
2. Буркин В.В., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В. Волновая динамика электровзрыва в твердых диэлектриках // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79.– № 5.– С. 42 – 48.
3. Протасов Ю.И. Разрушение горных пород, 2-е издание стер. – М: Издательство Московского государственного университета, 2001. – 453 с.
4. Сёмкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – СПб.: Наука, 1995. – 276 с.
5. Burkin V.V., Kuznetsova N.S. Lopatin V.V. Dynamics of electro burst in solids: I. Power characteristics of electro burst // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – Vol. 43. – P. 185 –204.
6. Silva C.M.M., Stellin A., Hennies W.T., Costa E.G. Electrohydraulic Rock Blasting: An Alternative for Mining in Urban Areas // INT. J. MINING ENG. – 2002. – P. 261 –269.

7. Voitenko N.V., Yudin A.S., Kuznetsova N.S. Evaluation of energy characteristics of high voltage equipment for electro-blasting destruction of rocks and concrete // Journal of Physics: Conf. Series. – 2015. – Vol. 652. – Article number 012011.
8. Yudin A.S., Kuznetsova N.S., Lopatin V.V. and Voitenko N.V. Multi-borehole electro-blast method for concrete monolith splitting off // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 552. – Article number 012028.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СУММАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРУПНОСТИ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ

**В.А. Кандинский**

Научный руководитель профессор В.И. Удовицкий

**Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия**

Гранулометрический состав полезных ископаемых может быть изображен в виде кривых характеристик крупности, как частных, так и суммарных. Для углей характеристику чаще строят по «плюсу», в этом случае по оси ординат откладывают суммарные значения выходов всех классов крупности, которые больше данного размера сита. Суммарные характеристики можно строить и по «минусу». Тогда суммарные выходы классов показывают количество материала, который меньше заданного размера сита.

Гранулометрические характеристики могут быть представлены в аналитической форме. Многими исследователями установлено, что характер распределения зерен по крупности дает возможность предполагать о закономерности такого распределения, несмотря на различие в физических свойствах полезных ископаемых.

В монографии [3] наиболее полно представлен обзор результатов исследований, связанных с закономерностями распределения частиц по классам крупности в продуктах дробления и измельчения.

Аналитическую зависимость между крупностью зерен продукта и их выходом первым предложил в 1916 г. А.О. Гейтс [3, 6], который обнаружил, что кумулятивные характеристики продуктов имеют вид гипербола. Это позволило описать закономерности измельчения в виде уравнения

$$y^{a_0} = a_1 x, \quad (1)$$

где  $y$  – суммарный остаток на сите;  $x$  – размер зерна;  $a_0, a_1$  – здесь и далее параметры функции.

А.М. Годэн [3, 7], исследовав большое количество экспериментальных данных гранулометрического состава продуктов дробления и измельчения, в 1926 г. получил графики характеристик, описываемых функцией

$$y = a_0 x^{a_1}, \quad (2)$$

где  $y$  – выход класса по массе;  $x$  – размер отверстия сита, на котором остаются зерна данного класса

С.Е. Андреев [1] применил уравнение Годэна для прогнозирования массовой кумулятивной характеристики по «минусу». В дальнейшем функцию (2) стали именовать уравнением Годэна-Андреева.

П. Розин и Е. Раммлер [3, 9] (1932 г.) изучали ситовый состав продуктов измельчения и строили их кривые распределения. Анализируя данные своих опытов, П. Розин и Е. Раммлер заметили, что в системе координат  $\ln(\ln(100/y))$ ,  $\ln(x)$  большинство опытных точек ложится на одну прямую, уравнение которой имеет вид  $\ln(\ln(100/y)) = \ln(a_0) + a_1 \cdot \ln(x)$ , отсюда

$$y = 100 / \exp(a_0 \cdot x^{a_1}), \quad (3)$$

где  $y$  – суммарный остаток на сите, %;  $x$  – размер отверстия сита, мм.

П. Роллер [3, 8] (1941 г.) предложил выражать зависимость массовых выходов от крупности частиц в виде формулы

$$y = \frac{a_0 \sqrt{x}}{\exp(a_1/x)}, \quad (4)$$

где  $y$  – массовый кумулятивный выход продукта по «минусу».

Н. К. Белоглазов [3, 2] (1956 г.) путем преобразований уравнения Розина-Раммлера (3) получил уравнение характеристики крупности продуктов измельчения мономинеральных руд по «минусу»

$$y = 2a_0 x^{a_1} / (1 + a_0 x^{a_1}), \quad (5)$$

где  $x$  – крупность частиц продукта,  $y$  – массовый кумулятивный выход по «минусу».

А. М. Погосов [3, 5] (1960 г.) пытался расширить диапазон фактической крупности материала, описываемого уравнением Белоглазова (5), за счет замены коэффициента «2» на «1». Предложенная им формула

$$y = 1a_0 x^{a_1} / (1 + a_0 x^{a_1}), \quad (6)$$

где  $x$  – крупность частиц продукта;  $y$  – суммарный выход по «минусу».

Известно также применение уравнения Шуманна [10]

$$y = (x / a_0)^{-1}, \quad (7)$$

где  $y$  – суммарный выход продукта, размером меньше диаметра отверстий сита  $x$ .

В данной работе для решения задачи по определению лучших функций первой степени, аппроксимирующих суммарные характеристики крупности каменных углей Кузнецкого бассейна, экспериментальные значения выходов классов взяты из работы [4]. Количество классов крупности шахтопластов