

## ВЗРЫВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ С НЕОДНОРОДНОЙ ПРОЧНОСТНОЙ СТРУКТУРОЙ

## **ROCK EXPLOSION WITH A HETEROGENEOUS STRENGTH STRUCTURE**

## Эквист Борис Владимирович

доктор технических наук, доцент, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», borisekwist@mail.ru

Аннотация. Предложен метод оптимизации параметров буровзрывных работ с учетом физико-технических свойств горных пород в пределах взрываемого блока, с целью улучшения качества взрыва на карьерах со сложной геологической структурой. Изложены результаты лабораторных экспериментов, подтверждающие улучшение качества дробления образцов пород взрывом зарядов с переменными замедлениями и расположением, в зависимости от прочностных свойств образцов, относительно взрывов зарядов с неизменными параметрами. Предлагаемый способ может быть применен совместно с георадиолокационными просвечиваниями массива георадарами. Взрывное разрушение сложноструктурных массивов имеет ряд особенностей, связанных с изменением прочностных свойств, в пределах взрываемого блока. Для оптимизации эффективности дробления массивов со сложной геологической структурой требуется оценка физико-технических свойств пород и определение координат их залегания с различными прочностными свойствами в пределах взрываемого блока. Для оперативной оценки физико-технических свойств взрываемых пород подходит метод георадиолокации поверхностного слоя с применением георадаров. Результаты данного метода описаны в данной статье - это привязка координат георадарной сьемки к расположению и свойствам взрываемых пород, методика работы с георадаром, выбор типа антенных блоков в зависимости от размеров и свойств обнаруженных отдельностей, дается экономическое обоснование применения описанного метода. Новизна заключается в связи информации о взрываемых

**Ключевые слова:** сложноструктурные массивы, георадар, георадиолокация, градиент, прочностные свойства пород, параметры буровзрывных работ, результаты взрывов.

породах, полученной с помощью георадарной съемки с пара-

**Equist Boris Vladimirovich**Doctor of Engineering,
Associate Professor, Professor,
National research

National research MISiS Technological University, borisekwist@mail.ru

Annotation. The method of optimization of parameters of drillings and blasting Offers taking into account properties of mountain breeds within the limits of the blown up block, with the purpose of improvement of quality of explosion on careers with a difficult geological structure. The results of laboratory experiments are expounded, confirmative an improvement qualities of crushing of standards of breeds by the explosion of charges with variable decelerations and location, depending on properties of standards, in relation to the explosions of charges with unchanging parameters. The offered method can be applied together with the georadiolocation x-raying of array of georadr. Explosion destroyed. For optimization of efficiency of crushing of arrays with a difficult geological structure the estimation of properties of breeds and determination of coordinates of their bedding are required with different heterogeneous properties within the limits of the blown up block. For the operative estimation of properties of the blown up breeds the method of the georadiolocation x-raying of superficial layer befits with the use of georadr. The results of this method are described in this article.

The results of this method are described in this article – it is binding the coordinates of georadar shooting to the location and properties of the explosive rocks, the method of working with georadar, the choice of the type of antenna blocks depending on the size and properties of the detected individuals, the economic justification for the application of the described method. The novelty lies in the connection of information about the explosive rocks obtained by georadar survey with the parameters of drilling and blasting.

**Keywords:** heterogeneus arrays, georadr, georadio-location, a gradient, is properties of breeds, parameters of drillings and blasting, results of explosions.

ведение

метрами буровзрывных работ.

Метод радиолокации с применением георадаров серии «Око-2» разработка группы компаний «ЛОГИС-ГЕОТЕХ» с антенными блоками АБ-90 с глубиной зондирования до 16 м и разрешающей способностью 0,5 м по глубине и АБ-150 с глубиной зондирования 12 м и разрешающей способностью 0,35 м по глубине позволяет локализовать структуру взрываемых пород. Это обеспечит более качественное дробление взорванной горной массы. При плавном изменении крепости и трещиноватости горной породы параметры буровзрывных работ (БВР) (расстояние между зарядами, замедления, удельный расход ВВ и др.) изменяются плавно, при скачкообразном — скачкообразно. Лабораторными экспериментами показано лучшее качество взрыва, если параметры короткозамедленного взрывания связаны с расположением участков пород с разными свойствами.

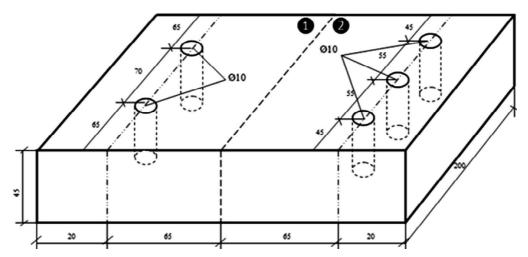
# Методы исследований

Взрывное разрушение сложноструктурных массивов имеет ряд особенностей, связанных сизменением прочностных свойств, в пределах взрываемого блока. Для оптимизации эффективности дробления массивов со сложной геологической структурой требуется оценка физико-технических свойств пород и определение координат их залегания с различными прочностными свойствами в пределах взрываемого блока.

Для оперативной оценки физико-технических свойств взрываемых блоков подходит метод георадиолокацииповерхностного слоя с применением георадаров [1, 2]. Георадарные технологии могут быть использованы для детального изучения сложноструктурных массивов, а также определения координат залегания пород с разными прочностными свойствами в пределах взрываемого блока, что позволит оптимизировать параметры буровзрывных работ (БВР) и подобрать необходимые размеры сетки расположения зарядов и замедления между их взрывами. Это обеспечит более качественное дробление взорванной горной массы.

Известно, что прочностные характеристики пород влияют на расположение зарядов на взрываемом блоке и замедления между их взрывами. Например, если крепость взрываемых пород уменьшается, то согласно существующим рекомендациям, замедления между взрывами возрастают, а расстояния увеличиваются [3, 4, 5]. На результаты взрыва влияют и другие параметры среды: вязкость, трещиноватость, обводненность и др. В данной статье приведены результаты влияния прочностных свойств на основе лабораторных экспериментов.

Для проверки теоретических исследований и изучения действия взрыва на сложноструктурные массивы, характеризующиеся как плавным переходом пород от одной крепости к другой, так и наличием в них твердых включений, проведены эксперименты на смоделированных разнопрочных блоках размером 20×17 см и толщиной 4,5 см, расположение зарядов в которых показано на рисунок 1, 2. Расстояния между зарядами, измененными с учетом прочностных характеристик взрываемых блоков, приведены на рисунке 1, 2 в масштабе относительно размеров взрываемых блоков. Количество зарядов менялось, в зависимости от прочностных характеристик и структуры взрываемых блоков. Незакрашенные части блоков имели коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова 1,5—2, а закрашенные 2,5—3. Модели блоков изготавливались из сухого кварцевого песка с частицами размером не более 0,25 мм с добавлением гипса и воды в различных соотношениях.



**Рисунок 1** – Расположение зарядов на модели: 1 – менее прочный участок, 2 – более прочный

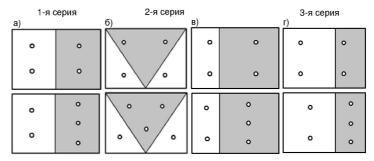


Рисунок 2 — Схемы взрывания модельных блоков, состоящие из разных по крепости пород, с неизменными параметрами расположения зарядов (верхний ряд) и измененными расстояниями между зарядами с учетом прочностных характеристик блоков (нижний ряд)

СБОРНИК

Взрывы моделей осуществлялись при помощи пятиканального генератора импульсов с использованием короткозамедленного взрывания путем разряда конденсаторов на пиротехнические взрыватели (рис. 3) [6].

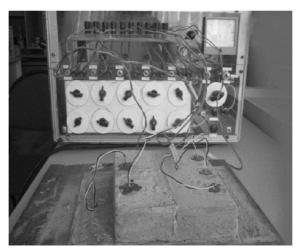


Рисунок 3 – Пятиканальный генератор импульсов и модель взрываемого блока

Максимальное напряжение, до которого заряжаются конденсаторы генератора 260 В. В пятиканальном генераторе емкость конденсатора в каждом из пяти каналов 3 000 мкФ. Остаточное напряжение после имитации взрыва равно 50 В. Выделенная энергия при разряде конденсатора одного канала в пятиканальном генераторе:

$$W_{esp} = \frac{CU^2}{2} - \frac{CU_{ocm}^2}{2} = \frac{3000 \cdot 10^{-6} \cdot 260^2}{2} - \frac{3000 \cdot 10^{-6} \cdot 50^2}{2} = 101,4 - 3,75 = 97,65$$
 Дж,

где  $W_{esp}$  – энергия, выделенная при имитации действия взрыва, Дж; C – емкость конденсатора,  $\Phi$ ; U – напряжение, до которого заряжается конденсатор, B;  $U_{ocm}$  – напряжение, которое осталось на конденсаторах после имитации взрыва, B.

Выделенная энергия может быть уменьшена снижением напряжения, до которого заряжаются конденсаторы. Для увеличения мощности взрыва одного заряда каждый конденсатор разряжался на пиротехнический взрыватель, вставленный в отверстие модельного блока. Тогда мощность взрыва одного заряда:

$$W = W_{e3p} + W_{пиp} = 97,65 + 300 = 397,65$$
 Дж,

где  $W_{nup} = 300$  — энергия взрыва пиротехнического взрывателя, Дж.

Общая максимальная энергия  $W_{oбщ}$ , которая получена при имитации взрыва:  $W_{oбщ} = 5 \cdot 97,65 + 5 \cdot 300 = 1988,25 \, \text{Дж}.$ 

Чтобы эксперимент в лабораторных условиях приближался к натурным исследованиям, взрывы в менее прочной части блоков происходили одновременно в первую очередь, а затем через 5 мс происходили одновременно взрывы в более прочной части модельных блоков.

Лабораторные исследования включают в себя три серии опытов с различной вариацией изменения прочностных характеристик моделей блоков. В каждой изготавливалось по две модели образцов: одна взрывалась одновременно зарядами без учета изменения физико-технических свойств пород блока, а вторая — с учетом меняющихся свойств, т.е. с изменением расстояния между зарядами и их количеством, а также с замедлением 5 мс между взрывами в более прочной части моделей относительно взрывов в менее прочной части.

В первой серии опытов (рис. 4а) граница раздела пород проходила по центру блока, во второй (рис. 4б) твердые породы располагались внутри модели в виде клина, а слабые по бокам. Клин твердых пород в образце имитировал хаотичное расположение включений твердых пород внутри породного массива. В третьей серии опытов (рис. 4в) граница раздела крепости пород была смещена в одном случае в сторону крепких пород, а в другом — в сторону слабых.

По опытным данным проводилась оценка качества дробления породы. В качестве критериев эффективности дробления приняты выход крупных фракций и средний размер кусков раздробленных образцов.



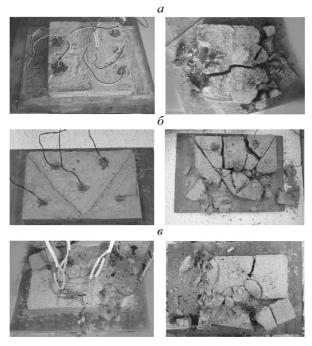


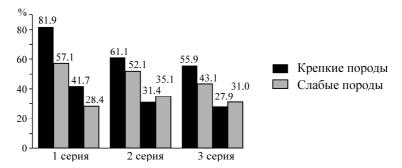
Рисунок 4 – Серия опытов: а – первая; б – вторая; в – третья

Такие вариации расположения твердых пород в образцах, имитировавших сложноструктурный взрываемый массив, позволили оценить эффективность изменения параметров БВР в зависимости от геометрии включений и объемов разрушения крепких и слабых пород. Так как прочностные характеристики пород влияют на выбор параметров взрывных работ, то эти параметры напрямую будут зависеть от изменения свойств горных пород. То есть, если изменение свойств происходит плавно, то параметры меняются плавно, а если изменение свойств резкое, то параметры меняются скачкообразно. Если в породном массиве имеются твердые включения, то необходимо располагать заряды так, чтобы линия наименьшего сопротивления до границы раздела пород соответствовала радиусу регулируемого дробления [6].

#### Результаты

В результате опытов установлено, что при взрывании образцов, с учетом изменяющихся свойств пород блока, а соответственно с изменением параметров БВР, в слабых породах образуются трещины и сколы, проходящие по границе раздела пород разных по крепости. Это способствует разгружению крепких пород и облегчает разрушающее действие взрывов зарядов в них. Таким образом происходит более интенсивное дробление твердых пород в массивах со сложной геологической структурой [7, 8, 9, 10, 11, 12].

На рис. 5 приводится сравнение выхода крупных фракций при взрыве слабых и крепких пород при взрывании экспериментальных блоков без учета и с учетом изменяющихся свойств пород. Очевидно, что во втором случае эффективность дробления выше, чем в первом. При этом эффективность дробления в твердых породах возрастает, выход крупных фракций снижается на 26 %. Так же при изменении параметров взрывных работ наблюдается более равномерное дробление как слабых пород, так и крепких включений и увеличение выхода средних фракций.



**Рисунок 5** – Гистограмма выхода крупных фракций в зависимости от свойств образцов: две первые колонки при неизменных параметрах взрыва, две следующие – при измененных

При плавном изменении свойств необходимо учитывать градиент их изменения в пространстве (рис. 6). Картину изменения свойств взрываемых пород можно составить на основе георадиолокационных просвечиваний используя, к примеру, георадары серии «ОКО» [1, 2, 11].

Получение полевой информации при георадарной съемке возможно при перемещении антенн георадара по заданному маршруту на взрываемом блоке. При передвижении антенны георадара вдоль профиля регистрируется дифракционная картина по глубине и перемещению антенн по блоку, и формируется непрерывный временной разрез изучаемой среды. Дифракционная картина представляет собой условный, в виде волновой картины, разрез изучаемой среды (рис. 6). Основными параметрами, определяющими методику съемки, и соответственно выбор антенных блоков являются: необходимая глубина исследования и размер структурных элементов (слоев или локальных объектов) которые необходимо выявить. В соответствии с этими величинами выбираются антенные блоки с определенной глубиной зондирования и разрешающей способностью [1, 2, 6].

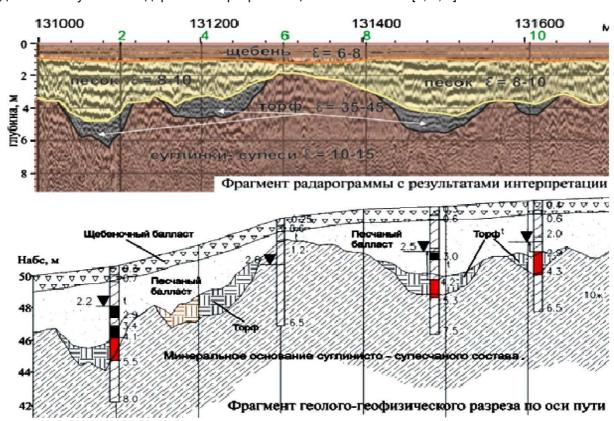


Рисунок 6 – Пример дифракционной картины слагающих пород с различной диэлектрической проницаемостью, полученной с помощью георадара серии «Око» с приёмной антеной АБ-400

Глубина зондирования – максимальная глубина отражающего объекта. Например, если задача состоит в определении местоположения объекта, расположенного приблизительно на глубине 3 м, обнаружить его возможно с помощью антенн, глубина зондирования которых превышает заданную глубину.

Так же существует понятие разрешающей способности. Разрешающей способностью называют минимальное расстояние по глубине, на котором могут быть различимы два отражающих объекта или их детали. В практическом значении, для успешного решения задачи необходимо, чтобы толщина слоев превышала значение разрешающей способности по глубине для выбранной антенны.

Широкое распространение в России получили георадары компании «ЛОГИС» серии «ОКО». Они характеризуются широким спектром предоставляемого основного и вспомогательного оборудования.

Антенный блок, включает в свой состав приёмо-передающие антенны, передающие и приёмные устройства и системы обработки информации. Тип антенного блока определяет глубину зондирования и разрешающую способность георадара. Прибор может комплектоваться несколькими антенными блоками для выполнения разных задач. Блок обработки, управления и индикации, как правило, ноутбуки различных типов с операционной системой Windows.

Телескопическая штанга, служит для перемещения георадара. Датчик перемещения, позволяет осуществлять точную привязку по расстоянию на местности. Измеритель пути, позволяет определять расстояние на местности. Соединительные оптические кабели, служат для передачи информации и сигналов и позволяют повысить качество радиолокационного сигнала.

Антенныеблоки георадара «Око-2» – сменные, состоят из приемного и передающего блоков. Обработка данных георадиолокации, полученных при помощи георадара, осуществляется при помощи программы «GeoScan 32» [1].

Сущность обработки состоит, прежде всего, в выделении полезного сигнала на фоне помех и шума и расшифровки дифракционных снимков. С помощью разнообразных приемов преобразования сигналов помехи ослабляются или удаляются с записи, а полезные сигналы выделяются.

В процессе интерпретации дифракционных снимков выделяются границы слоев в обследуемой толще. Для определения мощностей полученных слоев необходимо знать свойства слагающих их пород [3, 5, 7].

Для того чтобы указанный способ был реализован в промышленности, он должен давать существенный экономический эффект и быть достаточно технологичным. Особенно это важно для месторождений, где резко выражены различия в прочностных свойствах горных пород, слагающих массивы.

## Предложение по дальнейшим исследованиям

Получение георадарных сьемок с горных объектов сложенных породами с разными прочностными свойствами и изучение результатов взрывов полученных от взрывов зарядов расположенных в соответствии с расположением залегающих пород.

#### Заключение

Выполненные лабораторные эксперименты подтверждают более качественное дробление при изменении параметров буровзрывных работ в зависимости от геологических особенностей неоднородного массива.

На основе выше изложенного можно сформулировать способ работы с георадаром, позволяющим локализовать, разрушаемые взрывом породы, слагающие взрываемый массив. Основные операции работы с георадаром:

- в соответствии с необходимой глубиной исследований и размером структурных элементов выбирается антенный блок с определенной глубиной зондирования и разрешающей способностью;
- при перемещении антенного блока георадара вдоль профиля производится георадарная съемка;
- при проведении георадарной съемки производится замер длины выполненного профиля измерительным колесом;
- при использовании геологической информации о существующих на данном месторождении породах производится привязка полученных дифракционных снимков к строению взрываемого блока;
- на основе полученных данных о геологическом строении блока, производят выбор параметров БВР в зависимости от прочностных характеристик участков взрываемого блока, при этом параметры БВР для разных по крепости пород выбираются как для блоков пород с разными свойствами [8, 9, 10, 11].

## Выводы

В результате изменения параметров взрывных работ в пределах разрушаемых блоков (расположение зарядов, последовательность взрывания, замедление между взрывами) в соответствии с изменяющимися физико-техническими свойствами пород возможно достижение более качественного дробления, чем при неизменных параметрах.

Выполненные лабораторные эксперименты подтверждают эффективность изменения параметров буровзрывных работ в зависимости от геологических особенностей неоднородного массива.

Предложена методика взрывания массивов пород на основе их георадиолокационных просвечиваний.

## Благодарность

Генеральному директору предприятия разработчику георадаров компании «ЛОГИС-ГЕОТЕХ» Семейкину Н.П.

## Литература:

- 1. Семейкин Н.П. [и др.]. Геофизические приборы нового поколения // ГИАБ. 2008. № 12. С. 203–210.
- 2. Кулижников А.М., Бурда С.Н., Белозеров А.А. Применение георадаров для разведки и оценки запасов дорожно-строительных материалов // Горный журнал. М., 2004. № 3. С. 86–87.
  - 3. Совмен В.К. [и др.]. Сейсмическая безопасность при взрывных работах. М. : Горная книга, 2012. 228 с.
- 4. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Разрушение горных пород взрывом : учебник для вузов. М. : Горная книга. 2009. 2-е изд. Ч. 1. 471 с.
- 5. Gorokhov N.L. The mathematical formulation and numerical implementation of dynamic problems of geomechanics using finte element method // Scientfic Reports on Resource Issues. Frierberg: Internaational University of Resources, 2011. Vol 1. P. 205–211.

- 6. Mehdi Hosseini, Mehdi Seifi Baghikhani. Analysing the Ground Vibration Due to Blasting at Alv and Qoly Limestone Mine // International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing. 2013. № 2 (2). P. 17–23. DOI: 10.5923/j.mining.20130202.01.
- 7. Chan Kuang Hiyeu, Nguyen Din Ahn, Nkhy Van Fuk, Belin V.A. Pilot studies of influence of diameter of explosive wells on seismic action of explosions on Nuybeo coal mine / Explosive technologies : conference materials. Hanoi, Vietnam, 2015. P. 252–255.
- 8. Аленичев И.А. Корректировка удельного расхода взрывчатого вещества // ГИАБ. 2016. №7. C. 364–373.
- 9. Казаков Н.Н., Шляпин А.В., Лапиков И.Н. Дробление породы в верхнем слое карьерного уступа, с учетом трещиноватости горных пород : Сборник «Взрывное дело». изд. МВК по взрывному делу, 2015. № 114/71. С. 56–70.
- 10. Hudaverdi T., Kulatilake P., Kuzu S. Prediction of blast fragmentation using multivariate analysis procedures // Int. J. Anal. Meth. Geomech. 2010. P. 957. DOI: 10.1002.
- 11. Самсонов Б.Г. Основы объективного мониторинга геологической среды на предприятиях по разведке, добычи и использованию атомного сырья. М.: Центр содействия социально-экологическим инициативам атомной отрасли. 2010. 120 с.
- 12. Ouchterlony F. The Swebrec function: Linking fragmentation by blasting and crushing. Mining technology (Trans of the inst of Mining and Metallurgy A). 2005. Vol 114. P. 29–44.

#### References:

- 1. Semeykin N.P. [and other]. Geophysical instruments of a new generation // GIAB. 2008. № 12. P. 203–210.
- 2. Kulizhnikov A.M., Burda S.N., Belozerov A.A. GPR application for the road-building materials exploration and estimation // Gornyi Zhurnal. M., 2004. № 3. P. 86–87.
  - 3. Sovmen V.K. [and other]. Seismic safety during blasting operations. M.: Mining book, 2012. 228 p.
- 4. Kutuzov, B.N. Blasting methods. Destruction of rocks by explosion : textbook for universities. M. : Mining book. 2009. 2nd edition Ch. 1. 471 p.
- 5. Gorokhov N.L. The mathematical formulation and numerical implementation of dynamic problems of geomechanics using finte element method // Scientfic Reports on Resource Issues. Frierberg: Internaational University of Resources, 2011. Vol 1. P. 205–211.
- 6. Mehdi Hosseini, Mehdi Seifi Baghikhani. Analysing the Ground Vibration Due to Blasting at Alv and Qoly Limestone Mine // International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing. − 2013. − № 2 (2). − P. 17–23. − DOI: 10.5923/j.mining.20130202.01.
- 7. Chan Kuang Hiyeu, Nguyen Din Ahn, Nkhy Van Fuk, Belin V.A. Pilot studies of influence of diameter of explosive wells on seismic action of explosions on Nuybeo coal mine / Explosive technologies : conference materials. Hanoi, Vietnam, 2015. P. 252–255.
  - 8. Alenichev I.A. Correction of specific explosive consumption // GIAB. 2016. №7. P. 364–373.
- 9. Kazakov N.N., Shlyapin A.V., Lapikov İ.N. Crushing of rocks in the upper layer of the quarry ledge, taking into account the fractures of rocks: Collection of «Explosive business». Published by MVK on Explosives, 2015. № 114/71. P. 56–70.
- 10. Hudaverdi T., Kulatilake P., Kuzu S. Prediction of blast fragmentation using multivariate analysis procedures // Int. J. Anal. Meth. Geomech. 2010. P. 957. DOI: 10.1002.
- 11. Samsonov B.G. Fundamentals of objective monitoring of geological environment at the enterprises on exploration, production and use of atomic raw materials. M.: Center for Assistance to Social and Environmental Initiatives of the Nuclear Industry. 2010. 120 p.
- 12. Ouchterlony F. The Swebrec function: Linking fragmentation by blasting and crushing. Mining technology (Trans of the inst of Mining and Metallurgy A). 2005. Vol 114. P. 29–44.