

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВАНИЯ ПРИ ОТДЕЛЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КАМЕННЫХ БЛОКОВ ОТ ГОРНОГО МАССИВА

Г.А. Агаронян¹, А.Г. Агаронян²

1. ЗАО "ГЕТН" групп
2. ЗАО "Геоэкономика"

Аналитическим методом исследования определены динамические и квазистатические показатели взрыва, влияющие на процесс отделения монолитов от горного массива. На стадии образования и симметричного расширения трещин при взрыве рассчитаны величины длины и ширины линейных трещин, а также скорость смещения отделяемого блока. На основе расчета показателей процесса отделения монолитов выбраны оптимальные параметры взрыва при различных структурных особенностях массива и прочностных свойствах горных пород. Предложена методика по добыче каменных блоков взрывным способом, которая позволит увеличить объем выхода кондиционных блоков на 10...12%.

Ключевые слова: линейный заряд взрывчатого вещества, волна напряжения взрыва, трещиноватость массива, зарядная полость, процесс отделения монолитов.

Введение. Возрастающая потребность строительства в облицовочных плитах и в архитектурных изделиях природного камня требует существенного увеличения объема добычи каменных блоков. Однако ограниченные запасы природного камня в Армении, а также значительные потери кондиционного сырья при добыче монолитных блоков вызывают необходимость повышения выхода качественной продукции за счет уменьшения объема отходов минерального сырья. В этой связи необходимо выполнение условий по сохранению монолитности и целостности как отделяемого блока, так и массива. Наиболее актуальной эта проблема становится при отбойке каменных блоков взрывным способом, т.к. применение энергии взрыва приводит к образованию недопустимой трещиноватости массива.

В Армении существует более 50 карьеров блочного камня, разработка которых производится с применением энергии зарядов взрывчатого вещества (ВВ). Используемые технологии взрывной отбойки каменных блоков на этих карьерах обеспечивают не более чем 25...30% кондиционных блоков от объема добычи горной массы.

Анализ ведения взрывных работ на карьерах облицовочного камня в Армении показал, что отбойка монолитов в основном производится путем одновременного взрывания детонирующего шнура (ДШ) в шпурах, расположенных в один ряд. Выбор параметров взрывания выполняется, исходя из геометрических

размеров отбиваемого блока, без учета структурных особенностей массива (трещиноватость, слоистость, блочность) и прочностных характеристик горной породы. Подобная практика добычи блоков неизбежно приводит к увеличению радиуса зоны нарушения отделяемого камня, а следовательно, и к снижению выхода кондиционных блоков из горной массы. Поэтому проблема повышения эффективности взрывных работ при добыче блоков с достаточной степенью сохранности их монолитности весьма актуальна.

В этой связи цель работы заключается в совершенствовании энергии взрыва путем выбора оптимальных параметров взрывания, позволяющих прогнозировать объем выхода кондиционных блоков при различных структурных характеристиках массива и прочностных свойствах пород.

Методика исследования. Параметры взрывного отделения монолитов от массива определены аналитическим методом. За основу расчета был взят процесс отделения блока от массива и его смещения, обусловленного действием волн напряжения и давлением продуктов детонации.

При отделении каменных блоков от массива основной задачей является образование направленных отрезных щелей потребной ширины. В этом случае волна напряжений (σ_H) не должна превышать прочности пород по сжатию ($\sigma_{сж}$) [1]:

$$\sigma_H \leq \sigma_{сж}, \text{ Па.} \quad (1)$$

Это достигается применением линейных зарядов с воздушным радиальным зазором, т.е. между диаметром зарядов и шпуров должно соблюдаться соотношение [2]

$$d_{зар} \leq \frac{d_{шп}}{3}, \text{ м,} \quad (2)$$

где $d_{зар}$ - диаметр заряда, м; $d_{шп}$ - диаметр шпура, м.

При наличии воздушных радиальных зазоров время действия волны напряжения значительно меньше (на два порядка) периода действия продуктов детонации [3]. Поэтому волна напряжения, достигнув стенок шпуры вокруг заряда, разрушения почти не вызывает, она успевает только ослабить породу вследствие образования линейных трещин.

Одновременно под действием давления продуктов детонации происходит осесимметрическое движение зарядной полости. Это вызывает окончательное расширение линейных трещин, способствующее отделению блока от массива и его смещению в сторону свободной поверхности (рис. 1).

Следует отметить, что процесс отделения монолитов от массива характеризуется тремя показателями:

- размером зоны линейных трещин ($R_{тр}$);
- шириной трещины откола (ΔX);
- скоростью смещения отделяемого блока (V_r).

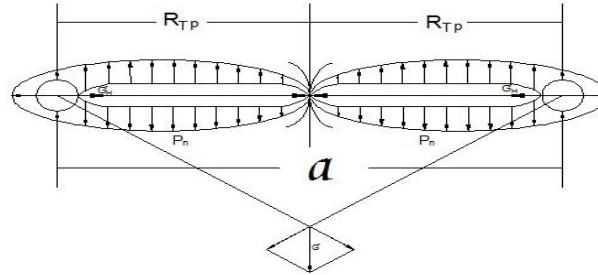


Рис.1. Схема процесса образования и расширения линейных трещин при взрывании двух зарядов ВВ под действием прямой волны сжатия и давления продуктов детонации

Размер зоны линейных трещин обусловлен динамическим действием волны напряжения и определяется из выражения [4]

$$R_{\text{тр}} = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\sigma_{\text{раст}}} \cdot R_{\text{см}}, \text{ м}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{тр}}$ - предел прочности пород на сжатие, Па; $\sigma_{\text{раст}}$ - предел прочности пород на растяжение, Па; $R_{\text{см}}$ - радиус зоны смятия, м.

Волна напряжения на стенке зарядной полости определяется согласно [3]

$$\sigma_{\text{н}} = \sigma_0 \left(\frac{d_{\text{зар}}}{2R_{\text{см}}} \right)^{2\gamma}, \text{ Па}, \quad (4)$$

где $d_{\text{зар}}$ - диаметр заряда ВВ, м; σ_0 - напряжение на фронте ударной волны на границе заряд-порода, Па:

$$\sigma_0 = \frac{1}{8} \cdot \rho_{\text{ВВ}} \cdot D^2, \quad (5)$$

где γ - коэффициент затухания напряжения, $\gamma=1,5$; $\rho_{\text{ВВ}}$ - плотность ВВ, кг/м³; D - скорость детонации ВВ, м/с.

Приняв $\sigma_{\text{н}} = \sigma_{\text{сж}}$ и определив $R_{\text{тр}}$ из выражений (3), (4) и (5), получим

$$R_{\text{тр}} = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\sigma_{\text{раст}}} \cdot \frac{d_{\text{зар}}}{4} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{ВВ}} \cdot D^2}{\sigma_{\text{сж}}}}, \text{ м}. \quad (6)$$

Величина ширины линейных трещин, а также скорость смещения отделяемого монолита обусловлены действием квазистатического давления продуктов детонации.

Под действием газообразных продуктов детонации ВВ зарядная полость расширяется осесимметрично радиусу $r_{\text{п}}$, что, в свою очередь, приводит к расширению линейных трещин, ширины ΔX и сообщает движение от отделяемого блока по направлению к оси ОХ (в сторону свободной поверхности) со скоростью $V_{\text{г}}$ (рис. 2).

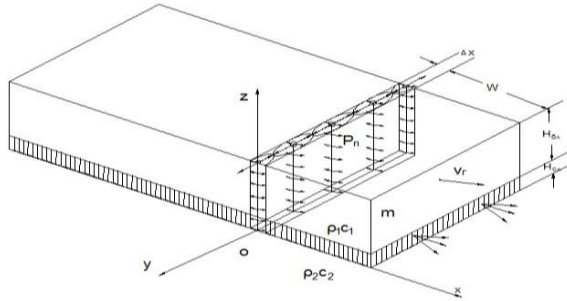


Рис. 2. Схема определения ширины линейных трещин (ΔX) и скорости смещения отделяемого блока V_g

Движение отделяемого блока описывается дифференциальным уравнением

$$m V_g \frac{dV_g}{dr_{зар}} = S_{п} P_{п}, \quad (7)$$

где $S_{п}$ - площадь продольного сечения зарядной полости, m^2 :

$$S_{п} = \pi \cdot r_{п} \cdot l_{зар}; \quad (8)$$

$P_{п}$ - предельное давление продуктов детонации на стенке зарядной полости, Па:

$$P_{п} = P_{н} \left(\frac{r_{зар}}{r_{п}} \right)^3 = \frac{1}{8} \rho_{ВВ} D^2 \left(\frac{d_{зар}}{2r_{п}} \right)^3, \quad (9)$$

где m и V_g - соответственно масса (m) и скорость (m/c) отделяемого массива; $r_{п}$ - предельный радиус зарядной полости, м; $l_{зар}$ - длина заряда ВВ, м; $r_{зар}$ - радиус заряда ВВ, м; $P_{н} = \sigma_0$ - начальное давление продуктов детонации, Па.

Подставляя в уравнение (7) значения $P_{п}$, $S_{п}$ и проинтегрировав его, получим

$$V_g = \frac{D}{4} \cdot d_{зар} \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho_{ВВ} \cdot l_{зар} \cdot d_{зар}}{2 \cdot \Delta X \cdot m}}, \quad m/c, \quad (10)$$

где $\Delta X = 2r_{п}$ с учетом того, что $Q_{ВВ} = \frac{\pi}{4} l_{зар} \cdot d_{зар}^2 \cdot \rho_{ВВ}$;

$$m = V_{бл} \cdot \rho_{п}; \quad q_{ВВ} = \frac{Q_{ВВ}}{V_{бл}}.$$

В результате получим

$$V_g = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{q_{ВВ} \cdot d_{зар}}{2 \cdot \Delta X \cdot \rho_{п}}}, \quad m/c, \quad (11)$$

где $Q_{ВВ}$ - масса заряда ВВ, кг; $q_{ВВ}$ - удельный расход ВВ, $кг/м^3$; $\rho_{п}$ - плотность породы, $кг/м^3$; $V_{бл}$ - объем отделяемого блока, $м^3$.

Скорость смещения отделяемого блока согласно [5] определяется в виде

$$V_g = \frac{\sigma_{сж}}{\rho_{п} \cdot C_{пр}}, \quad m/c, \quad (12)$$

где $C_{пр}$ - скорость продольной волны, м/с.

Приравняв выражения (11) и (12), получим

$$\Delta X = \left(\frac{DC_{пр}}{2\sigma_{сж}} \right)^2 \cdot \frac{q_{ВВ} \cdot d_{зар} \cdot \rho_{п}}{2}, \text{ м.} \quad (13)$$

Уравнения (6), (10) и (13) характеризуют весь процесс отделения монолитов от массива. Выражения (10) и (13) позволяют определить величину ширины линейных трещин и скорость смещения отделяемого блока в зависимости от типа и удельного расхода ВВ и физико-механических свойств горных пород.

Многолетняя практика работы карьеров показывает, что весьма важным технологическим параметром при добыче блоков взрывным способом является расстояние между шпурами. Уменьшение расстояния между шпурами по сравнению с оптимальным приводит к росту объемов буровых работ и расхода ВВ, а увеличение межшпуровых расстояний ухудшает качество оконтуривания блоков.

Оптимальные расстояния межшпуровых зарядов ВВ зависят от диаметра заряда, прочностных свойств породы, структурных особенностей массива, геометрического размера отбиваемого блока, типа ВВ, линии наименьшего сопротивления (ЛНС), конструкции заряда ВВ.

Используя уравнение (6), с учетом рис.1 нами определено расчетное расстояние между шпурами ВВ:

$$a = 2R_{пр} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{раст}} \cdot \frac{d_{зар}}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_{ВВ} D^2}{\sigma_{сж}}}, \text{ м.} \quad (14)$$

Однако приведенная формула не отражает особенности структуры трещиноватости массива, т.к. технология отделения от массива облицовочного камня определяется в основном качеством исходного сырья и структурными особенностями массива.

Месторождения каменных блоков по характеру трещиноватости и особенностям внутреннего строения массива обычно представлены горизонтальными трещинами.

Известно [6], что на формирование поля напряжения существенное влияние оказывают горизонтальные трещины (слоистость) массива. В слоистых средах давление продуктов детонации в зарядной полости падает более быстро, чем в монолитных за счет проникновения сжатых газов в трещины. Поле напряжения в этом случае менее интенсивно и характеризуется высокой степенью затухания. Основным фактором, обуславливающим резкое снижение параметров волн напряжения и затухания, является отличие в акустических жесткостях монолитных отдельностей и разделяющих их различного рода трещин.

При отбойке каменных блоков в слоистых средах необходимо учитывать акустическую жесткость в разделяющих (вмещающих) породах и отделяемом монолите. Если акустическая жесткость вмещающих пород меньше, чем акустическая жесткость отделяемого блока, то дробящее действие заряда будет распространяться на вмещающие породы. Поэтому для сохранности монолитности

камня необходимо размещать заряд ВВ в разделяющих породах (рис. 3) при условии

$$H_{\text{разд.}} \geq 0,1H_{\text{бл.}}, \quad (15)$$

где $H_{\text{разд.}}$ - мощность разделяющих пород, м; $H_{\text{бл.}}$ - высота отделяемого блока, м.

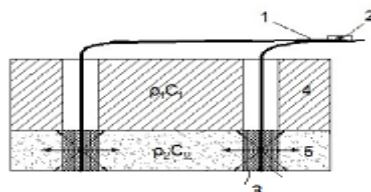


Рис. 3. Схема размещения заряда ВВ в разделяющих породах: 1- ДШ, 2 - электродетонатор (ЭД), 3 - заряд ВВ, 4 - отделяемый блок, 5 - разделяющие породы

Процесс двух одновременно взрывааемых зарядов, как отмечалось выше, представляет волновую картину суммарного их действия, которая усложняется при встрече на пути распространения волны различного рода трещин – преград (рис. 4).

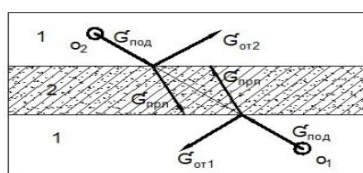


Рис. 4. Схема определения амплитуды волны напряжения на разделе двух неоднородных сред: 1- отделяемые блоки, 2- разделяющие породы

При переходе через трещину амплитуда прямой волны напряжения уменьшается по зависимости [7]

$$\sigma_{\text{под}} = (\sigma_{\text{пр}} - \sigma_{\text{от}}) k_{\text{п}}, \quad \text{Па}, \quad (16)$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ – величина преломленной волны напряжений в преграде, Па; $\sigma_{\text{от}}$ – величина отраженной волны напряжений в монолите, Па; $k_{\text{п}}$ - коэффициент падения напряжения вследствие различия акустических жесткостей массива отдельности ($C_1\rho_1$) и заполнителя трещины ($C_2\rho_2$):

$$k_{\text{п}} = \frac{2C_2\rho_2}{C_1\rho_1 + C_2\rho_2}, \quad (17)$$

ρ_1, ρ_2 - плотность соответственно отделяемого монолита и заполнителя трещин; кг/м^3 ; C_1, C_2 - скорость продольных волн соответственно в монолите и в трещине, м/с.

Учитывая трещиноватость массива, оптимальное расстояние межшпуровых зарядов ВВ определяется в виде

$$a = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{раст}} \cdot \frac{d_{зар}}{2} \cdot k_{п} \sqrt[3]{\frac{\rho_{ВВ} \cdot D^2}{\sigma_{сж}}}, \text{ м.} \quad (18)$$

На рис. 5 показана схема отбойки монолита, широко применяемая при разработке месторождений с разбитыми горизонтальными и вертикальными трещинами (на отдельных блоках). Высота отделяемого монолита определяется глубиной прохождения горизонтальных трещин ($H_{бл}$). Ширина отделяемого монолита - линия наименьшего сопротивления (ЛНС) - определяется из условия

$$W = (50-100) \cdot d_{зар}, \text{ м.} \quad (19)$$

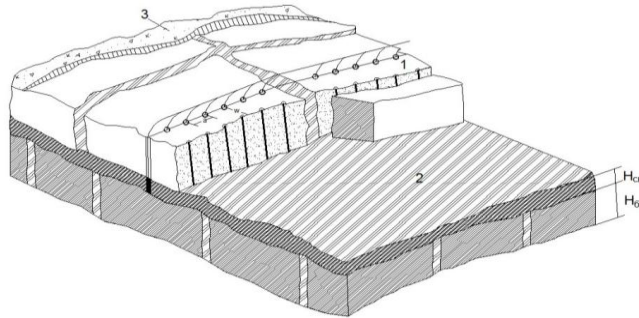


Рис. 5. Схема отделения каменных блоков взрывом в крупноблочных массивах: 1 - отделяемые блоки, 2 - вмещающие породы, 3 - вскрышные породы

При этом влияние отраженных волн несущественно, следовательно, и отраженная волна в этой зоне (в зоне свободной поверхности) не приводит к образованию трещин; большее участие в процессе отделения монолитов от массива принимают продукты детонации ВВ.

В зависимости от межшпуровых зарядов ВВ ЛНС определяется в виде

$$W = (4,5-5,5) a, \text{ м.} \quad (20)$$

Расстояние между шпурами рассчитано по выражению (18).

Результаты исследования. Проверка теоретических расчетов определения оптимальных параметров взрывания проводилась опытно-промышленными взрывами на карьерах: Гораванском травертинном и Севкарском витрокластическим туффитном. Отбойка монолитов была произведена при одновременном взрывании зарядов ВВ в шпурах, расположенных в один ряд.

На Севкарском карьере добыча блоков осуществлена линейным зарядом ВВ с воздушным радиальным зазором. В качестве линейных зарядов ВВ применяли ДШ. На Гораванском карьере добыча блоков произведена сплошными зарядами, в качестве ВВ использовали аммонит бЖВ и аммиачную селитру (в соотношении 1:4).

Выход отделяемого блока определен по выражению

$$k_6 = \frac{V_M - V_{эп}}{V_M}, \text{ \%}, \quad (21)$$

где V_m – объем добытых блоков в массиве, m^3 ; $V_{\text{эп}}$ – эксплуатационные потери, m^3 .

Анализируя полученные зависимости, приведенные на рис. 6, приходим к выводу, что предлагаемая технология по добыче блоков от массива является оптимальной. При взрывании линейных зарядов ВВ (ДШ) с воздушным радиальным зазором в шпурах выход качественных блоков на 3...7% больше, чем при отбойке монолитов со сплошными зарядами ВВ.

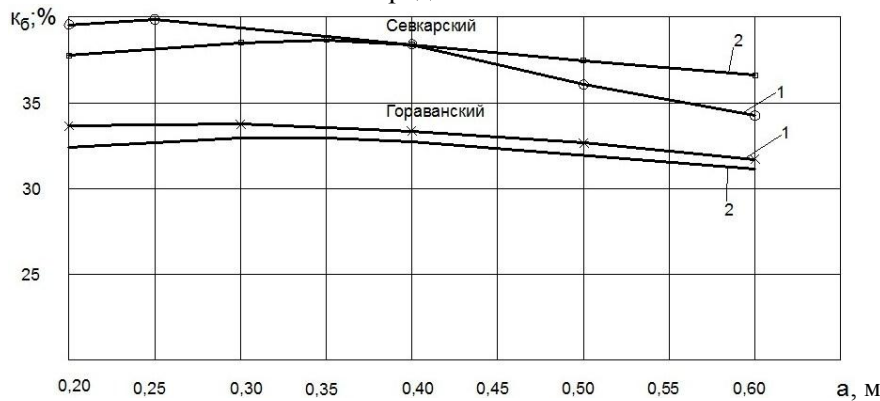


Рис. 6. Зависимость выхода блоков облицовочного камня (K_6) от расстояния межшпуровых зарядов ВВ (a): 1 - предлагаемая технология, 2 - существующая технология

Оптимальное расстояние между шпурами составляет 0,30...0,35 м.

Предложенная технология по добыче каменных блоков увеличивает качество откола камня на 10...12%.

Выводы

При прочих равных условиях расстояние между шпурами является основным технологическим параметром, предопределяющим качество откола отбиваемого блока. Оптимальное же расстояние межшпуровых зарядов ВВ зависит от прочностных свойств породы, структурных особенностей массива, диаметра и конструкции заряда, типа ВВ.

Степень нарушенности каменных блоков зависит существенным образом от размеров воздушных зазоров между зарядом и стенками шпура. Увеличение размеров этих зазоров за счет уменьшения линейной массы заряда позволяет снизить нарушения монолитности отделяемого блока.

Литература

1. Ханукаев Н.А. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. – М.: Недра, 1974. – 224 с.
2. Азаркович А.Е., Шуйфер М.И., Тихомиров А.П. Взрывные работы вблизи охраняемых объектов. – М.: Недра, 1984. – 213 с.

3. **Кук М.А.** Наука о промышленных взрывчатых веществах / Пер. с англ.; Под ред. Г.П. Демидюка и Н.С. Бахаревич. – М.: Недра, 1980. – 453 с.
4. Расчет зон разрушения при взрыве цилиндрических зарядов в скальных породах / **М.Ф. Друкованый, В.С. Кравцов** и др. // ФТПРПИ. – Киев, 1976. - №3. - С. 70-74.
5. **Ефремов Э.И.** Подготовка горной массы на карьерах. – М.: Недра, 1980. – 271 с.
6. **Воробьев В.Д., Перегудов В.В.** Взрывные работы в скальных породах. - Киев: Наукова думка, 1984. – 233 с.
7. Буровзрывные работы на угольных разрезах / **Я.М. Репин, В.П. Богатырев, В.Д. Буткин** и др. – М.: Недра, 1987. – 254 с.

*Поступила в редакцию 17.11.2014.
Принята к опубликованию 02.04.2015.*

**ԼԵՆԱՅԻՆ ԶԱՆԳՎԱԾԻՑ ՇԻՆԱՐԱՐԱԿԱՆ ՄԵՆԱՔԱՐԵՐԻ ՊԱՅԹԵՑՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼ
ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԸՆԴՈՒՄԸ ԱՐԴՅՈՒՆԱՀԱՆՄԱՆ ԴԵՊՁՈՒՄ**

Գ.Ա. Ահարոնյան, Ա.Գ. Ահարոնյան

Հետազոտման անալիտիկ մեթոդով որոշվել են լեռնային զանգվածից մենաքարերի անջատման գործընթացի վրա ազդող պայթեցման դինամիկ և քվազիստատիկ ցուցանիշները: Պայթեցման ժամանակ ճեղքերի առաջացման և դրանց սիմետրիկ լայնացման փուլում հաշվարկվել են գծային ճեղքերի երկարության և լայնության մեծությունները, ինչպես նաև անջատվող բլոկի տեղաշարժման արագությունը: Մենաքարերի անջատման գործընթացի ցուցանիշների հաշվարկման հիման վրա ընտրվել են պայթեցման օպտիմալ պարամետրերը ըստ զանգվածի տարբեր կառուցվածքային առանձնահատկությունների և լեռնային ապարների ամրության հատկությունների: Առաջարկված է պայթեցման մեթոդիկա, որը հնարավորություն է տալիս մեծացնելու որակյալ մենաքարի ելքը 10...12% -ով:

Առանցքային բառեր. պայթուցիկ նյութի գծային լիցք, պայթեցման լարվածության ալիք, զանգվածի ճեղքավորվածություն, լիցքի խոռոչ, մենաքարերի անջատման գործընթաց:

**SELECTING THE OPTIMAL PARAMETERS OF EXPLOSION AT SEPARATING
CONSTRUCTION MONOLITHS FROM A ROCK MASS**

G.A. Aharonyan, A.G. Aharonyan

By the method of analytical investigation, the indices influencing the process of separating monoliths from a rock mass by means of explosion are shown. The length of linear slotting in the initial phase of explosion, the width of the slots in their symmetric widening phase, as well as the horizontal transmission speed of the separated monolith from the mass as a result of the slot widening are calculated. Based on the calculation of the mentioned indices, depending on the rock strength characteristics, and the structural peculiarities of the mass, optimal explosion parameters for separating monoliths from the mass are selected. An explosion method allowing to increase the output of the quality monolith by 10...12% is proposed.

Keywords: linear charge of an explosive, the explosion stress wave, rock mass slotting, charge hole, process of separating the monolith.