УДК 622.235

**Г.М.КРЮКОВ**
*Московский государственный горный университет, Россия*

# МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОГО ВЗРЫВНОГО ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА КАРЬЕРАХ

На основе экспериментальных данных и теоретического обобщения предложены соотношения для расчета параметров буровых и взрывных работ, обеспечивающие заданную степень взрывного дробления горной массы при производстве массовых взрывов на карьерах с учетом физико-технических свойств горных пород и термодинамических параметров взрывчатых веществ.

On the basis of experimental data and theoretical generalization parities for calculation of parameters of the chisel and explosive works, providing the set degree of explosive crushing of mountain weight are offered by manufacture of mass explosions on quarries in view of physicotechnical properties of rocks and thermodynamic parameters of explosives.

Настоящая работа является продолжением работы [1] с учетом феноменологической квазистатическо-волновой теории (ФКСВ) [2, 3].

Рассмотрим процесс взрывного дробления горных пород на карьерах со следующими характеристиками:

• физико-технические свойства горных пород в разрушаемом блоке на уступе: $\rho_{\text{їð}}$ – плотность, кг/м$^3$; $Å$ – модуль упругости, Па; $\mu$ – коэффициент Пуассона; $f$ – крепость пород по М.М. Протодьяконову; $\sigma_{\text{ñæ}}$ – предел прочности на одноосное сжатие, Па; $\tau_{\text{ñää}}$ – предел прочности на сдвиг, Па; $\sigma_{\text{ðàñ}}$ – предел прочности на одноосное растяжение, Па; $\tilde{N}_1$ – скорость распространения продольных волн, м/с; $\tilde{N}_2$ – скорость распространения поперечных (сдвига) волн, м/с; $H$ – высота уступа, м; $l_{\text{í}}$ – размер негабарита, м; $V_e^+$ – содержание негабарита в блоке, %; $l_{\text{ср}}$ – средний размер кусков породы в блоке, %;

• параметры зарядов ПВВ: $d_{\text{çð}}$ – диаметр скважинных зарядов, м; $l_{\text{çð}}$ – длина зарядов, м; $l_{\text{їá}}$ – длина перебура, м; $l_{\text{çá}}$ – длина забойки, м; $b$ – расстояние между рядами зарядов, м; $a$ – расстояние между зарядами в ряду, м; $\tau_{\text{çì}}$ – интервалы замедления инициирования групп зарядов, с;

• термодинамические параметры ПВВ: тип ПВВ; $\Delta$ – плотность заряжания, кг/м$^3$; $Q$ – теплота взрывного превращения ПВВ в продукте детонации (ПД), Дж/кг; $\gamma$ – показатель изоэнтропы; $D$ – скорость детонации, м/с.

Установление общих закономерностей начнем с рассмотрения процесса разрушения горных пород взрывом одного удлиненного заряда ПВВ.

**Общие соотношения.** Масса одного заряда (в килограммах)

$$\grave{I}_1 = 0{,}25\pi\Delta d_{\text{çð}}^2 l_{\text{çð}}. \qquad (1)$$

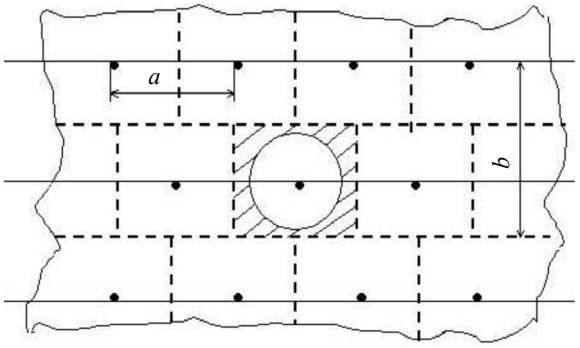
Объем породы (в кубических метрах) в развале, приходящийся на один взрываемый заряд,

$$V_1 = abH. \qquad (2)$$

Удельный расход в соответствии с (1) и (2)

$$q = M_1 / V_1. \qquad (3)$$

При взрывном воздействии на породу около взорванного заряда формируются две зоны: регулируемого и нерегулируемого дробления (см. рисунок). Объемы этих зон




● – скважинные заряды

Часть разрушаемого взрывом блока породы на уступе карьера:
*a* – расстояние между зарядами в ряду, *b* – расстояние между рядами зарядов

$V_{\text{ð.ä}}$ и $V_{\text{í.ä}}$ соответственно удовлетворяют очевидному равенству

$$V_1 = V_{\text{ð.ä}} + V_{\text{í.ä}} \ . \qquad (4)$$

где $V_{\text{ð.ä}}$ – зона регулируемого дробления породы около одного заряда; $V_{\text{í.ä}}$ – зона нерегулируемого дробления породы, приходящаяся на один зарад.

Для этих зон принимаются следующие предположения:

1. В зоне регулируемого дробления негабарита нет, а средний размер кусков раздробленной взрывом породы равен $d_1$ (в метрах) – характерному (однозначно детерминированному) параметру для заданной пары «заряд ПВВ – порода» при фиксированном значении $l_{\text{í}}$ .

2. В зоне нерегулируемого дробления заметных (значительных) разрушений не происходит, поэтому строение породы в этой зоне практически не отличается от ее строения в блоке до взрыва, т.е. средний размер кусков и содержание негабарита в этой зоне такие же, как и до взрыва заряда ПВВ в этом блоке.

**Выход негабарита.** Удельный расход, соответствующий нулевому выходу негабарита ($q^{\text{í}}_{\text{ýô}}$) для рассматриваемой пары «заряд ПВВ – порода» и фиксированного $l_{\text{í}}$ ,

$$q^{\text{í}}_{\text{ýô}} = V_{\text{ð.ä}} / \grave{I}_{\ 1} . \qquad (5)$$

Из (3) и (5) легко получить теоретическое обобщение известных зависимостей В.К.Рубцова [3], впервые установленных в [1]

$$V^{+}_{\text{í}} = V^{+}_{e}\left(1 - \overline{q}\right), \qquad (6)$$

где $V^{+}_{\text{í}}$ – выход негабарита, %; $\overline{q}$ – характерный безразмерный параметр, являющийся обобщенным удельным расходом,

$$\overline{q} = q / q^{\text{í}}_{\text{ýô}} = V_{\text{ð.ä}} / V_1 . \qquad (7)$$

Соотношения (6) и (7) хорошо согласуются с результатами опытно-промышленного и промышленного ведения взрывных работ.

Таким образом, надежная теоретическая оценка выхода негабарита по (6) и (7) при взрывном дроблении горных пород на карьерах сводится к установлению зависимости $V_{\text{ð.ä}}$ от физико-технических свойств пород и параметров БВР. Расчеты процессов и параметров зон разрушения горных пород взрывом зарядов ПВВ выполняются по ФКСВ-теории [3], в соответствии с которой радиус зоны регулируемого дробления пород (в метрах)

$$b_0 = 0{,}5 d_{\text{çô}} D \sqrt{\Delta / k_3 \left(\gamma + 1\right) \sigma_{\text{pac}}} \ , \qquad (8)$$

где $k_3 = 1 + 2\gamma\left(1 + \mu\right) Ð_{æ} / Å$ – коэффициент, с помощью которого учитывается влияние расширения зарядной полости на снижение давления ПД в ней.

Причем $b_0$ является детерминированным значением длин радиальных трещин, которым в действительности соответствует среднее их случайных значений. Линейный размер зоны регулируемого дробления породы взрывом одного заряда

$$W = 2 b_0 . \qquad (9)$$

По (8) объем $V^1_{\text{ð.ä}}$, формируемый взрывом единичной длины заряда ПВВ,

$$V^1_{\text{ð.ä}} = \pi b_0^2 = 0{,}25 \pi \Delta d^2_{\text{çô}} D^2 / k_3 \left(\gamma + 1\right) \sigma_{\text{pac}} . \qquad (10)$$

Около конца удлиненного заряда ПВВ (в районе забойки) формируется еще полусферический объем регулируемого дробления породы радиуса $b_0$ :

$$V_{\text{ð.ä}}^2 = \frac{3}{2}\pi b_0^3. \qquad (11)$$

Таким образом, полный объем регулируемого дробления породы при взрыве одного удлиненного заряда ПВВ в блоке породы составляет

$$V_{\text{ð.ä}} = V_{\text{ð.ä}}^1 \acute{I} + V_{\text{ð.ä}}^2 \approx 4b_0^2 H = \frac{\Delta H d_{\text{çð}}^2 D^2}{k_3(\gamma+1)\sigma_{\text{ðàñ}}}. \qquad (12)$$

Из (7) и (12) устанавливается функциональный вид параметра $\overline{q}$:

$$\overline{q} = \frac{4b_0^2}{ab} = \frac{\Delta d_{\text{çð}}^2 D^2}{k_3(\gamma+1)ab\sigma_{\text{ðàñ}}}, \qquad (13)$$

зависящий от параметров БВР ($d_{\text{çð}}, à, b$), ПВВ ($D, \gamma$) и свойств породы ($E, \sigma_{\text{ðàñ}}$).

Условия $a = 2b_0$ и $b = 2b_0$ физически означают, что расстояния между зарядами в ряду и между рядами равны размеру зоны регулируемого дробления *W*. Следовательно, в этом случае выхода негабарита не происходит. Установленные выше теоретические зависимости полностью согласуются с этой априорной оценкой, поскольку при $a = b = 2b_0$ по (13) параметр $\overline{q} = 1$, при этом по (6) выход негабарита $V_{\text{í}}^+ = 0$.

**Взрыв группы зарядов.** Определим рациональные (по дроблению) условия рыхления горных пород на карьерах взрывом групп зарядов ПВВ. Предварительно отметим ряд известных фактов.

1. При интервалах замедления инициирования групп зарядов ($\tau_{\text{çì}} \geq 10$ ìñ) напряжения, сформированные в породе около взорванных в данной группе зарядов ПВВ, практически полностью релаксируются к моменту взрыва последующей группы зарядов. Поэтому можно пренебречь взаимным влиянием последовательно взрываемых групп зарядов ПВВ на процессы разрушения ими горных пород. Это значит, что в этом случае взаимное влияние взрываемых зарядов ПВВ на процесс разрушения ими горных пород имеет место только лишь при взрывах этих зарядов в одной ступени замедления.

2. Взаимное влияние взрываемых в одной группе зарядов ПВВ приводит только к ухудшению процесса разрушения ими пород.

3. Заметное взаимное влияние, ухудшающее процесс разрушения пород на 10 % и более (по сравнению с их разрушением при одиночном взрыве соответствующего удлиненного заряда) имеет место только в области между соседними зарядами при $a \leq 2b_0$.

4. Процессы разрушения породы около заданного сечения взорванных удлиненных зарядов ПВВ завершаются очень быстро: так, для $d_{\text{çð}} = 42$ мм $\tau_{\text{ðàñ}} = 200$ мкс, а для $d_{\text{çð}} = 250$ мм $\tau_{\text{ðàñ}} = 600$ мкс.

Таким образом, наибольшая эффективность взрывного рыхления горных пород на карьерах с учетом изложенных положений возможна при следующих условиях:

$$a = b = 2b_0;$$
$$\tau_{\text{çì}} \geq 10 \text{ мс}; \qquad (14)$$
$$\tau_{\text{çì, c}} \geq \tau_{\text{ðàñ}} + à / \tilde{N}_1,$$

где $\tau_{\text{çì, c}}$ – время замедления последовательного инициирования каждого заряда по сравнению с моментом инициирования соседнего заряда в каждой ступени замедления, с.

При выполнении условий (14) исключается отрицательное взаимное влияние на процесс разрушения породы взрывов зарядов ПВ в одной ступени замедления. В то же время при выполнении (14) будет обеспечено регулируемое дробление породы во всей области между зарядами (т.е. при нулевом выходе негабарита).

**Средний размер кусков породы в развале.** Учитывая (4), (9) и принятые предположения, легко установить, что при $\overline{q} \leq 1$, $a \leq W$, $b \leq W$ средний размер кусков породы в развале после взрыва зарядов ПВВ на уступе

$$d_{\text{ср}} = d_1 \overline{q} + l_{\text{ср}}(1 - \overline{q}), \qquad (15)$$

где $d_1$ – средний размер кусков породы в зоне регулируемого дробления, м.

Этот линейный характер уменьшения $d_{\text{ср}}$ с увеличением $q$ по (15) впервые был зафиксирован в экспериментальных исследованиях В.К.Рубцова [3], а затем неоднократно подтвержден в последующих промышленных и опытно-промышленных исследованиях разных авторов. Теоретическое обоснование зависимости (15) дано только теперь.

Введем два безразмерных параметра: $\overline{d}_{\text{ср}} = d_{\text{ср}} / l_{\text{ср}}$ и $\overline{d}_1 = d_1 / l_{\text{ср}}$. Тогда соотношение (15) преобразуем к виду

$$\overline{d}_{\text{ср}} = 1 - \overline{q}\left(1 - \overline{d}_1\right),\ \overline{q} \le 1. \qquad (16)$$

Это соотношение универсально и справедливо при взрывном рыхлении любых пород на карьерах взрывом зарядов любых ПВВ.

Случай $\overline{q} > 1$, ($a \le W$, $b \le W$), при котором $V_1 < V_{\text{ð.ä}}$, соответствует условиям интенсивного переизмельчения пород. Увеличение $\overline{q}$ и в этом случае приводит к линейному уменьшению

$$d_{\text{ср}} = d_1 - \left(d_1 - d_2\right)\frac{q-1}{\overline{q}_* - 1}, \qquad (17)$$

где $d_2$ – средний размер кусков породы только части $V_1$ зоны регулируемого дробления пород, чему соответствует $\overline{q}_* = V_{\text{ð.ä}} / V_1$.

Параметры $d_1$ и $d_2$, входящие в (15)-(17), определяются с учетом общих закономерностей формирования гранулометрического состава горной массы в зоне регулируемого дробления пород взрывом зарядов ПВВ. Также учитывалось, что эта зона формируется двумя процессами разрушения пород: интенсивным мелкодисперсным дроблением и развитием в ней радиальных и сдвиговых трещин.

В зоне интенсивного мелкодисперсного дробления порода разрушается на частицы менее 0,5 мм, а внешний радиус этой зоны (в метрах)

$$b_* = 0{,}5 d_{\text{çð}} \sqrt{\Delta D^2 / \left(\gamma + 1\right) k_3 \sigma_{\text{ìä}}}\ , \qquad (18)$$

где

$$\sigma_{\text{ìä}} = 13[1 + -0{,}079(f - 15) + \\ + 0{,}0019\,(f - 15)^2] \cdot 10^8$$

– напряжение, при котором происходит процесс мелкодисперсного дробления пород, Па; $f$ – крепость пород по М.М.Протодьяконову.

Распределение частиц по размерам в этой зоне $\left(r \le b_*\right)$ при взрывах удлиненных зарядов (в метрах)

$$l_{\div\text{ñò}} = l_{\div\text{ñò},1}^{\max}\left(\frac{r}{b_*}\right)^{4\alpha_1}, \qquad (19)$$

где $l_{\div\text{ñò},1}^{\max}$=0,5 мм; $\alpha_1$ – характерный параметр, определяемый по взрывному дроблению образцов в лабораторных условиях, на полигоне или при взрывном дроблении негабаритов.

Средний размер частиц в этой зоне (при $r \le b_*$)

$$d_{\text{ср},\div\text{ñò}} = \frac{l_{\div\text{ñò}}}{2\alpha_1 + 1}. \qquad (20)$$

Масса фракций с частицами $0{,}5 \le l_{\div\text{ñò}} \le 1$ мм незначительна (на порядок меньше массы фракций с размерами $l_{\div\text{ñò}} \le 0{,}5$ мм) и соответствует переходу к режиму разрушения пород путем формирования отдельных трещин. Устойчивому режиму второго процесса разрушения пород соответствуют куски породы $l_{\text{êñê}} \ge 5$ мм. Поэтому в качестве опорных значений для этой зоны разрушения приняты параметры $l_{\text{êñê}}^{\text{îï}} = 5$ мм и $r_{\text{îï}} = k_{\text{îï}} b_*$. При этом распределение кусков породы по размерам во всей зоне образования отдельных трещин ($d_{\div\text{ñò}} > 0{,}5$ мм) при взрывах удлиненных зарядов ПВВ можно определить по формуле (при $r \ge b_*$)

$$l_{\text{êñê}} = l_{\text{êñê}}^{\text{îï}}\left(\frac{r}{r_{\text{îï},\,1}}\right)^{4\alpha_2}. \qquad (21)$$

Средний размер кусков в зоне $r \le r_*$ (при любом $r_*$ в этой зоне) рассчитывается по формуле

$$d_{\text{ср,êñê}} = \frac{l_{\text{êñê}}}{2\alpha_2 + 1}. \qquad (22)$$

И в этом случае параметры $l_{\text{êñê}}^{\text{îï}}$, $k_{\text{îï}}$ и $\alpha_2$ должны определяться в опытах либо по взрывному дроблению кусков, либо при разделке негабарита.

Приведенные соотношения легко позволяют рассчитывать параметры $d_1$ и $d_2$ (в метрах) для любого значения $b_* \le r_* \le b_0$ по соотношениям

$$d_1 = \frac{l_{\text{êñê}}^{\text{îï}}}{2\alpha_2 + 1}\left(\frac{b_0}{r_{\text{îï}}}\right)^{4\alpha_2};$$
$$d_2 = \frac{l_{\text{êñê}}^{\text{îï}}}{2\alpha_2 + 1}\left(\frac{r_*}{r_{\text{îï}}}\right)^{4\alpha_2}. \qquad (23)$$

Кроме рассмотренных выше параметров БВР при ведении взрывных работ на карьерах рассчитываются еще $l_{\text{ïá}}$ и $l_{\text{çá}}$. В [1] на основе теоретического обобщения известных зависимостей установлены следующие соотношения для этих параметров:

$$l_{\text{çá}} = (0{,}9 \div 1)W;\ l_{\text{ïá}} = (0{,}25 \div 0{,}35)W. \qquad (24)$$

На основе экспериментальных данных и теоретического обобщения в настоящей статье предложены соотношения для расчета параметров БВР, обеспечивающие заданную степень взрывного дробления горной массы при производстве массовых взрывов на карьерах с учетом физико-технических свойств горных пород и термодинамических параметров применяемых ПВВ. Эти расчеты выполняются в следующей последовательности: $b_0$ – по (8); $W$ – по (9); $a, b$, $\tau_{\text{çì}}$, $\tau_{\text{çì, ñ}}$ – по (14); $l_{\text{çá}}, l_{\text{ïá}}$ – по (24); $\overline{q}$ – по (13); $V_{\text{í}}^{+}$ – по (6); $d_{\text{ср}}$ – по (16) или (17).

Необходимо отметить, что в настоящее время при расчетах $d_{\text{ср}}$ по (16) или по (17) приходится использовать результаты опытно-промышленных и промышленных исследований для зависимостей параметров $d_1$ и $d_2$ от физико-технических свойств горных пород и термодинамических параметров ПВВ. Однако соответствующие теоретические соотношения (18)-(23) уже установлены и начато экспериментальное определение параметров $\alpha_1$, $k_{\text{îï}}$ и $\alpha_2$.

**ЛИТЕРАТУРА**


1. *Крюков Г.М.* Модель взрывного рыхления пород на карьерах. Выход негабарита. Средний размер кусков в развале // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 2.

2. *Крюков Г.М.* Теоретические оценки по ФКСВ теории процессов разрушения горных пород камуфлетным взрывом удлиненных зарядов / Г.М.Крюков, Ю.В.Глазков, С.Н.Жаворонко / Записки Горного института. СПб, 2007. Т.171.

3. *Рубцов В.К.* Исследование дробимости горных пород взрывами на карьерах: Автореф. … дис. д-ра техн. наук / МГИ. М., 1971