

УДК 622.235

**Н.Н. Казаков, А.В. Шляпин**

**РАЗРУШЕНИЕ ПОРОДЫ КАМУФЛЕТНОЙ И ВОЛНОВОЙ  
ФАЗФМИ ВЗРЫВА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ КАРЬЕРНОГО  
УСТУПА\***

*Дано описание предложенной модели формы заряда, полости и зоны камуфлетного и волнового действия взрыва в верхней концевой части скважинного заряда. По разработанной методике, с использованием разработанной компьютерной программы, рассчитаны параметры процесса и крупность дробления породы камуфлетной и волновой фазами взрыва, в верхнем слое уступа.*

*Ключевые слова: конечная длина, камуфлетная фаза, волновая фаза, полость, массовая скорость, напряжение, энергия, энергия разрушения, трещинообразование, дробление.*

---

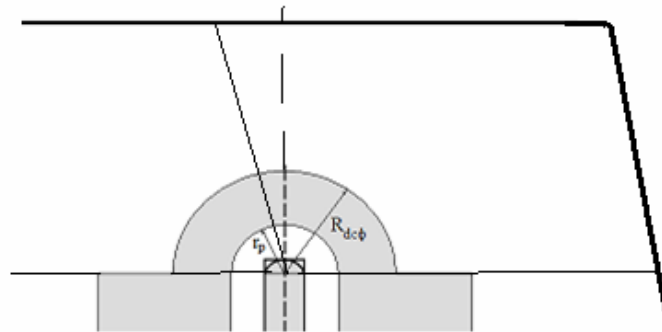
**В**оздействие взрыва на горный массив является процессом многофазным. В прилегающей к заряду зоне реализуется камуфлетная фаза взрыва. За ее пределами, как продолжение распространения волны напряжений, реализуется волновая фаза взрыва. С задержкой во времени на эти зоны накладывается после волновая (квазистатическая) фаза взрыва.

Нами предложены: сферическая модель формы верхней части цилиндрического заряда; модель верхней части газовой полости; модель верхней части зоны камуфлетного и волнового действия взрыва (рис. 1).

Модель формы заряда принимается в виде цилиндра с полусферами на концах заряда. Радиус полусфер  $r_0$  принимается равным радиусу скважинного заряда. Модель формы камуфлетной газовой полости принимается в виде цилиндра с полусферами на концах. Приняты одинаковые радиусы  $r_p$  цилиндрической и сферической частей газовой полости.

---

\* Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле (ОНЗ – 3) «Фундаментальные проблемы и перспективы использования потенциала комплексного освоения недр на основе развития ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих технологий», проект 2.1. «Теоретические предпосылки, экспериментальные исследования и методология разработки взрывного способа разрушения горных пород заданной степени нарушенности и дробления для реализации ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих технологий».



**Рис. 1. Модели формы заряда, полости и зоны камуфлетного действия взрыва в верхней концевой части скважинного заряда**

Объем камуфлетной полости, с достаточной для решения практических задач точностью, определяется по формуле [1]

$$V_p = \frac{38\mathcal{E}_3}{\rho c^2} \left( \frac{\rho c^2}{250\sigma_{сж}} \right)^{2/3},$$

где  $\rho$  – плотность горной породы;  $c$  – скорость продольной волны в породе;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности породы на сжатие;  $V_p$  – объем камуфлетной полости;  $\mathcal{E}_3$  – энергия скважинного заряда.

Радиус камуфлетной полости  $r_p$  определяется из совместного решения уравнений

$$V_{rc} = \pi r_p (L_3 - 2r_0); V_{рсф} = \frac{4\pi r_p^3}{3}; V_p = V_{rc} + V_{рсф},$$

где  $V_{rc}$  – объем цилиндрической части полости;  $V_{рсф}$  – объем сферической части полости;  $L_3$  – длина скважинного заряда.

Максимальная массовая скорость на внешней границе камуфлетной зоны определяется по условию равенства максимального напряжения в волне пределу прочности породы на сжатие. Этому условию отвечает максимальная массовая скорость, определяемая по формуле [2]

$$U = \frac{\sigma_{сж} (1 - \mu^2)}{E(1 - 0,36\mu)},$$

где  $E$  - модуль упругости горной породы;  $\mu$  - коэффициент Пуассона горной породы.

Эта максимальная массовая скорость в волне напряжений является критерием внешней границы камуфлетной зоны действия взрыва.

Радиусы внешних границ цилиндрической и сферической частей камуфлетной зоны являются радиусами излучения слабых волн напряжений, с цилиндрической и сферической симметрией.

Внешний радиус сферической части камуфлетной зоны является радиусом излучения сферической волны напряжений. Он определяется по формуле

$$R_{зсф} = r_p \sqrt[3]{\frac{\rho c^2}{4\sigma_{сж}}}.$$

На внешних границах камуфлетной полости, в цилиндрической и сферической частях, максимальная массовая скорость одинаковая. Но она формируется на разных расстояниях от центра взрыва, и в разное время. Внешний радиус цилиндрической зоны  $R_{ци}$  больше внешнего радиуса сферической зоны  $R_{зсф}$  камуфлетной фазы взрыва. Это обусловлено разными условиями расхождения волн в цилиндрической и в сферической зонах.

Определение параметров в камуфлетной зоне взрыва может быть выполнено в следующей последовательности. Процесс расширения газовой полости, с достаточной для практики точностью, описывается двумя сопряженными изэнтропами с разными фиксированными показателями изэнтроп [5].

Объем полости в точке сопряжения изэнтроп можно определить по формуле

$$V_c = V_3 \sqrt{\frac{P_{cp}}{0.35\rho_0 \left( 427Qg - \frac{D^2}{16} \right)}},$$

где  $V_3$  - объем заряда;  $P_{cp}$  - среднее давление в зарядной полости;  $g$  - ускорение силы тяжести;  $Q$  - масса заряда в кг.

Давление в точке сопряжения изэнтроп определяется из выражения

$$P_c = \left( \frac{V_3}{V_c} \right)^3.$$

Зная объем заряда, давление в полости и объем полости в точке сопряжения изэнтроп, можно определить давление продуктов детонации в предельной камуфлетной полости. Давление в предельной камуфлетной полости определяется по формулам.

$$P_p = P_{cp} \left( \frac{V_3}{V_p} \right)^3 \text{ при } V_p \leq V_c; \quad P_p = P_c \left( \frac{V_c}{V_p} \right)^{1.3}, \text{ при } V_p > V_c.$$

Энергия в камуфлетной полости, оставшаяся в продуктах детонации к концу развития камуфлетной фазы, определяется из решения уравнений

$$\mathcal{E}_o = \frac{P V_c}{2} - \frac{P V_c}{2} + \frac{P V_c}{0,3} \text{ при } V_p < V_c; \quad \mathcal{E}_o = \frac{P V_c}{0,3} \text{ при } V_p < V_c.$$

Энергия, затраченная на разрушение породы в камуфлетной зоне взрыва, определяется по следующей формуле [4]

$$\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_3 - (\mathcal{E}_o + \mathcal{E}_B),$$

где  $\mathcal{E}_B$  - энергия, излученная в слабую волну напряжений.

Энергия, поглощенная в сферической части камуфлетной зоны (энергия разрушения), определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{рсф} = \mathcal{E}_P \frac{V_{рсф}}{V_p}.$$

Задача распределения энергии разрушения по объему зоны и задача дробления породы решается на основе условного разбиения зоны на сферические слои толщиной  $\Delta R$ . Толщина слоя может выбираться разная, в зависимости от цели исследования.

При прохождении сильной волны напряжений по зоне камуфлетного действия взрыва, энергия волны поглощается слоями породы. При выходе сильной волны напряжений на внешнюю границу камуфлетной зоны, и при ее вырождении в слабую волну напряжений, вся энергия  $\mathcal{E}_{рсф}$  поглощается породой. В слабую сферическую волну напряжений излучается энергия  $\mathcal{E}_{всф}$ .

Изменение энергии в зависимости от радиуса камуфлетной зоны рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{рсф} \left[ 1 - k \left( \frac{R - r_0}{R_{дсф} - r_0} \right)^{0,5} \right] - \mathcal{E}_{всф},$$

где  $R$  — переменное значение радиуса положения расчетного слоя в пределах камуфлетной зоны.

Энергия разрушения в каждом расчетном слое определяется по формуле

$$\Delta \mathcal{E} p = \mathcal{E}_{Ri} - \mathcal{E}_{R(i+1)}.$$

При  $R$  больше  $R_{зсф}$  слагаемое  $\mathcal{E}_{R(i+1)}$  нужно принимать равным нулю.

Плотность энергии разрушения в расчетном слое толщиной  $\Delta R$  определяется по формуле

$$\Pi_{эсф} = \frac{\Delta \mathcal{E} p}{\frac{4\pi}{3} [(R + \Delta R)^3 - R^3]}.$$

Линейный размер куска породы в расчетном слое толщиной  $\Delta R$ , разрушенной действием камуфлетной фазы взрыва, определяется по формуле

$$d_{ксф} = \frac{18e}{\Pi_{эсф}},$$

где  $e$  — энергия образования единицы новой поверхности при разрушении породы взрывом.

С использованием изложенных формул составлена компьютерная программа в оболочке MathCad, позволяющая рассчитать многие параметры развития камуфлетной фазы взрыва в

верхнем концевом сферическом слое, вплоть до крупности дробления породы, при взрыве скважинного заряда конечной длины в карьерах. В статье приводятся, в качестве иллюстрации, расчетные результаты для условий взрывания скважинного заряда тротила, диаметром 250 мм в граните.

На рис. 2 представлены расчетные результаты распределения энергии разрушения по условно выделенным расчетным слоям в иллюстрационном варианте взрыва скважинного заряда. Результаты представлены в виде четырех столбиков-векторов. В первом столбике-векторе представлены расстояния от центра верхней сферической камуфлетной зоны. Размер сферической камуфлетной зоны 0,943 м. Ширина расчетных слоев принята равной 0,1 м. Расчетные слои доходят до отметки 0,925 м.

Во втором столбике-векторе представлены объемы породы в м<sup>3</sup>, в расчетных слоях. Объем породы в слоях интенсивно нарастает от 4 см<sup>3</sup> до 1,2 м<sup>3</sup>. В третьем столбце-векторе представлено изменение энергии с расстоянием. В нижней части рисунка представлено численное значение энергии, излученной в слабую волну напряжений в нашем примере. Ее величина хорошо продолжает изменение энергии в столбце-векторе.

В четвертом столбце-векторе представлена энергия, поглощенная в каждом расчетном слое.

R	$\Delta V(R)$	$\Xi(R)$	$\Delta \Xi(R)$
0.125	0.04	23796285	6439524
0.225	0.096	17356761	2667338
0.325	0.178	14689423	2046721
0.425	0.285	12642703	1725465
0.525	0.417	10917237	1520165
0.625	0.574	9397072	1374335
0.725	0.756	8022737	1263831
0.825	0.963	6758906	1176345
0.925	1.196	5582561	1104848

19386830

$\sum_R \Delta \Xi(R) = 19318572$

$\Xi_{сф} = 4409455$

**Рис. 2. Распределение энергии разрушения по расчетным слоям**

В верхних правых строчках сравнивается распределяемая поглощенная энергия с суммой поглощенной энергии в расчетных слоях. Их значения близки.

Линейный размер куска в расчетном слое является размером среднего куска в слое. Когда толщина расчетного слоя больше расчетного линейного размера куска, порода в слое дробится. Процесс дробления породы обеспечен энергетически. Чем ближе расчетный линейный размер куска приближается к ширине расчетного слоя, тем точнее он совпадает с фактическим размером кусков в реальном процессе.

Когда расчетный линейный размер куска больше ширины расчетного слоя, порода в слое не дробится. Процесс дробления породы не обеспечен энергетически.

В таком случае необходимо суммировать ширину соседних расчетных зон, определять средневзвешенную по суммарному объему слоев плотность энергии и рассчитывать размер куска в суммарном объеме.

Если при суммировании слоев линейный размер куска в суммарном слое возрастает быстрее, чем толщина суммарного расчетного слоя, дробление породы энергетически не обеспечено. В слое развиваются только трещины до внешней границы камуфлетной зоны.

На рис. 3 представлены расчетные результаты плотности энергии разрушения и линейных размеров кусков породы в условно выделенных расчетных слоях. Столбики-векторы на рис. 3 составлены из кусков, извлеченных из столбиков-векторов, рассчитанных при разной ширине расчетных зон.

Верхняя часть столбцов-векторов на рисунке получена при толщине расчетных слоев в 0,00001 м, (10 микрон). Представлено 3 слоя, прилежащих к заряду. Плотность энергии разрушения в первом слое превышает 315 000 МДж/м<sup>3</sup>. Линейный размер кусков в этих 3 слоях 4-7 микрон.

Ниже расположены 3 слоя с расчетной толщиной 0,0001 м, (0,1 мм). Плотность энергии в этих слоях, в нашем примере, изменяется от 3 351 МДж/м<sup>3</sup> до 2 985 МДж/м<sup>3</sup>. Линейный расчетный размер кусков в этих слоях 86 – 96 микрон.

Ниже расположены три слоя с расчетной толщиной 0,001 м (1 мм). В этих слоях плотность энергии снижается до 292 МДж/м<sup>3</sup>. Линейный размер кусков в этих слоях 0,9 мм до 0,99 мм.

В еще ниже расположенных трех слоях, с расчетной толщиной 0,01 м (1 см), плотность энергии снижается до 32 МДж/м<sup>3</sup>. Линейный размер кусков в этих слоях 6,7 мм до 9 мм.

Линейные размеры расчетных кусков во всех верхних слоях составной таблицы меньше ширины расчетных слоев. Следовательно, такая крупность дробления породы в нашем примере энергетически обеспечивается.

Нижние 3 строк столбцов-векторов на рис. 3 рассчитаны при толщине расчетного слоя 10 см. Плотность энергии разрушения в этих слоях изменяется 8,8 МДж/м<sup>3</sup> до 0,55 МДж/м<sup>3</sup>. Линейный размер кусков породы в первом слое нижней части таблицы равен 3,3 см. Во втором слое он равен 6,7 см. В этих расчетных слоях порода дробится на куски.

R	$\Pi_{эсф}$	$d_{ксф}$	
0.125	315021201162	0	
0.12501	72803742135	0.000004	$\Delta R := 0.00001$
0.12502	50149426162	0.000006	
0.12503	39461843688	0.000007	
0.1262	3351318746	0.000086	
0.1263	3156122897	0.000091	$\Delta R := 0.0001$
0.1264	2985725476	0.000096	
0.146	319873708	0.0009	
0.147	305664417	0.000942	$\Delta R := 0.001$
0.148	292518107	0.000985	
0.225	42771523	0.006733	
0.235	36855725	0.007814	$\Delta R := 0.01$
0.245	32038987	0.008989	
0.325	8782763	0.033	
0.425	4317698	0.067	$\Delta R := 0.1$
0.525	2470056	0.146	
0.625	1557310		
0.725	1050949		
0.825	745878	Трещины	
0.925	550340		

**Рис. 3. Плотность энергии разрушения и линейные размеры кусков породы**



В последующих слоях линейные размеры кусков больше толщины расчетных слоев. Их нужно в нарастающем порядке объединять и пересчитывать линейные размеры кусков, используя средневзвешенную по объему плотность энергии разрушения. В третьем и четвертом объединенных слоях размер кусков породы 14,6 см.

В данном примере, при дальнейшем объединении слоев до границы камуфлетной зоны, линейный размер кусков остается больше толщины объединенных слоев. А это значит, что в этой части зоны дробление породы энергетически не обеспечивается. Напряжения высокие, порода разрушается с образованием трещин, но не дробится на куски.

Внешняя граница зоны дробления, в нашем примере распространяется до 0,625 м.

Следует отметить, что зона радиальной трещиноватости выходит за пределы камуфлетной зоны. Критерием ее внешней границы является равенство растягивающих тангенциальных напряжений в волне пределу прочности породы на растяжение. Но этот вопрос в данной статье не рассматривается.

Если использовать гипотезу многоуровневого дробления породы взрывом, то в расчетных слоях, рядом с микронными расчетными линейными размерам кусков породы, будут присутствовать наноразмерные куски (частицы) [6].

Полностью столбцы-векторы, рассчитанные со слоями малой толщины, представит в статье, не представляется возможным из-за больших размеров таблицы.

Так, как показано на рис. 3, порода дробится камуфлетной фазой взрыва. В производственных условиях в чистом виде камуфлетная фаза не реализуется. В реальных условиях на камуфлетную зону, с миллисекундными замедлениями, накладывается квазистатическая фаза взрыва. Плотность энергии разрушения в камуфлетной зоне при их наложении возрастет. В камуфлетной зоне под совместным действием камуфлетной и квазистатической фаз порода будет раздроблена мельче.

С целью изучения закономерностей развития камуфлетной и волновой фаз взрыва, авторы выполнили большой объем работ [1, 2, 4, 8]. Волновая фаза взрыва является естественным продолжением камуфлетной фазы взрыва.

Кривая максимальных скоростей в волне напряжений имеет точку перелома, которая разделяет кривую на два отрезка с разными коэффициентами поглощения. Радиус до точки перелома для сосредоточенного заряда определяется по формуле

$$R_p = 0,73 \sqrt[3]{\frac{4\pi r_0^3 \rho_0}{3}}.$$

Изменение максимальной массовой скорости для сферических зарядов определяется по формулам:

$$U = U_H \left( \frac{R_{зсф}}{R} \right)^{2,1} \quad \text{при } R \leq R_p;$$

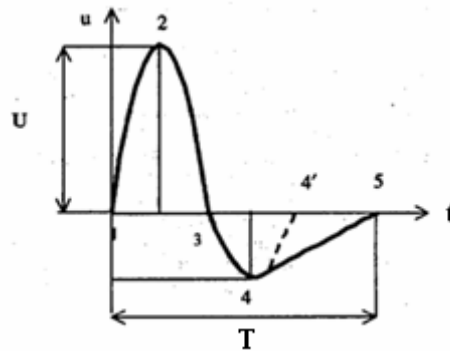
$$U = U_H \left( \frac{R_{зсф}}{R_p} \right)^{2,1} \left( \frac{R_p}{R} \right)^{1,6} \quad \text{при } R > R_p.$$

Для определения энергии волны напряжений нужно знать не только амплитуду волны, но и ее форму.

При распространении волны по породному массиву на сотни и тысячи метров от заряда ее форма изменяется, что серьезно затрудняет ее изучение.

Технологическое дробление породы взрывом осуществляется в весьма узком диапазоне распространения волны, до 100 радиусов заряда. В этом диапазоне можно принять форму волны неизменной. Мы выбрали график экспериментально регистрируемой формы волны для этой зоны [7]. Его схема представлена на рис. 4.

Принятую форму волны аппроксимировали трехкусочной функцией. Первый кусок функции опи-



**Рис. 4.** Обобщенная по экспериментам, принятая форма слабой волны напряжений в зоне технологического дробления породы взрывом

сывает кусок кривой, лежащей выше оси X. Второй кусок функции описывает кусок кривой от точки 3 до точки 4. Третий кусок функции описывает кусок кривой от точки 4 до точки 5.

Принятую форму слабой волн напряжений, распространяющуюся в пределах зоны технологического дробления породы взрывом, в координатах «период колебаний – массовая скорость» предложено описывать зависимостями:

$$u = U \left( \frac{2t}{0,18T} - \left( \frac{t}{0,18T} \right)^2 \right), \text{ при } 0 \leq \frac{t}{T} \leq 0,36;$$

$$u = 0,4U \left( \left( \frac{t-0,36T}{0,18T} \right)^2 - \frac{2t-0,36T}{0,18T} + 2 \right),$$

$$\text{при } 0,36 \leq \frac{t}{T} \leq 0,54;$$

$$u = 0,4U \left( \frac{t}{0,46T} - 2,17 \right), \text{ при } 0,54 \leq \frac{t}{T} \leq 1,$$

где  $U$  — максимальная массовая скорость в волне;  $T$  — период колебаний;  $u$  — массовая скорость;  $t$  — время.

Проинтегрировав эти формулы, подобрав постоянные интегрирования и коэффициенты, исключаящие разрыв функции в точках сопряжения, получили формулы, которые описывают изменение смещения частиц  $a$  во времени:

$$a = U \left( \frac{t^2}{0,18 \cdot T} - \frac{t^3}{3 \cdot 0,18^2 \cdot T^2} \right), \text{ при } 0 \leq t \leq 0,36T;$$

$$a = -0,4U \left( \frac{3t^2}{0,18 \cdot T} - \frac{t^3}{3 \cdot 0,18^2 \cdot T^2} - 8t + 0,6T \right),$$

$$\text{при } 0,36T \leq t \leq 0,54T;$$

$$a = 0,4U \left( \frac{t^2}{2 \cdot 0,46 \cdot T} - 2,17 \cdot t + 1,335 \cdot T \right), \text{ при } 0,54T \leq t \leq T.$$

Заменив в этих формулах временные параметры на параметры длины волны, получили формулы, описывающие смещение частиц по длине волны:

$$a = \frac{U}{0.18 \cdot c \cdot \Lambda} \left( \lambda^2 - \frac{\lambda^3}{0.54 \cdot \Lambda} \right), \text{ при } 0 \leq \lambda \leq 0.36\Lambda;$$

$$a = \frac{0.4U}{0.18 \cdot c \cdot \Lambda} \left( \left( \frac{\lambda^3}{0.54 \cdot \Lambda} - 3\lambda^2 \right) + 1.44\lambda\Lambda - 0.108\Lambda^2 \right),$$

при  $0.36\Lambda \leq \lambda \leq 0.54\Lambda$ ;

$$a = \frac{0.4U}{c\Lambda} \left( \frac{\lambda^2}{0.92} - 2.17 \cdot \lambda\Lambda + 1.335 \cdot \Lambda^2 \right), \text{ при } 0.54\Lambda \leq \lambda \leq \Lambda,$$

где  $c$  — скорость волны в породе;  $\Lambda$  — длина волны;  $\lambda$  — расстояния по длине волны.

Продифференцировав уравнения смещения частиц по  $\lambda$ , получили уравнения относительной радиальной и тангенциальной деформации по длине волны:

$$\varepsilon_r = \frac{-U}{0.18 \cdot c \cdot \Lambda} \left( 2\lambda - \frac{3\lambda^2}{0.54 \cdot \Lambda} \right), \text{ при } 0 \leq \lambda \leq 0.36\Lambda;$$

$$\varepsilon_r = \frac{-2.222 \cdot U}{c \cdot \Lambda} \left( \left( \frac{3\lambda^2}{0.54 \cdot \Lambda} - 6\lambda \right) + 1.44\Lambda \right),$$

при  $0.36\Lambda \leq \lambda \leq 0.54\Lambda$ ;

$$\varepsilon_r = \frac{-0.4U}{c\Lambda} \left( \frac{2\lambda}{0.92} - 2.17 \cdot \Lambda \right), \text{ при } 0.54\Lambda \leq \lambda \leq \Lambda.$$

На сферической поверхности формируется два равных по величине тангенциальных составляющих тензора деформации

$$\varepsilon_{\theta 1} = \varepsilon_{\theta 2} = \varepsilon_{\theta};$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{U}{0.18 \cdot c \cdot \Lambda \cdot R} \left( \lambda^2 - \frac{\lambda^3}{0.54 \cdot \Lambda} \right), \text{ при } 0 \leq \lambda \leq 0.36\Lambda;$$

$$\varepsilon_{\Theta} = \frac{0.4U}{0.18 \cdot c \cdot \Lambda \cdot R} \left( \left( \frac{\lambda^3}{0.54 \cdot \Lambda} - 3\lambda^2 \right) + 1.44\lambda\Lambda - 0.108\Lambda^2 \right),$$

при  $0.36\Lambda \leq \lambda \leq 0.54\Lambda$ ;

$$\varepsilon_{\Theta} = \frac{0.4U}{c\Lambda \cdot R} \left( \frac{\lambda^2}{0.92} - 2.17 \cdot \lambda\Lambda + 1.335 \cdot \Lambda^2 \right), \text{ при } 0.54\Lambda \leq \lambda \leq \Lambda,$$

где  $\varepsilon_r$  — радиальная относительная деформация;  $\varepsilon_{\Theta}$  — тангенциальная относительная деформация.

Зная относительные деформации и упругие свойства породы, традиционными методами определили изменение составляющих тензора напряжений вдоль длины волны:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_r + \mu\varepsilon_{\Theta}); \quad \sigma_{\Theta} = \sigma_{\Theta 1} = \sigma_{\Theta 2} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{\Theta} + \mu\varepsilon_r),$$

где  $\sigma_r$ ,  $\sigma_{\Theta}$  — составляющие тензора напряжений;  $E$  — модуль упругости;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Энергия волны напряжений, которую волна пронесит через сферическую поверхность с радиусом  $R$ , определяется по формуле

$$\mathcal{E} = \frac{2\pi R^2}{E} \left[ \int_0^{\Lambda} (\sigma_r^2 + 2\sigma_{\Theta}^2) - 2\mu(2\sigma_r\sigma_{\Theta} + \sigma_{\Theta}\sigma_{\Theta}) d\lambda \right].$$

Энергия разрушения в каждом расчетном слое определяется по формуле

$$\Delta \mathcal{E} p = \mathcal{E}_{Ri} - \mathcal{E}_{R(i+1)}.$$

Плотность энергии разрушения в расчетном слое толщиной  $\Delta R$  определяется по формуле

$$P_{\mathcal{E}} = \frac{\Delta \mathcal{E} p}{\frac{4\pi}{3} \left[ (R + \Delta R)^3 - R^3 \right]}.$$

Линейный размер куска породы в расчетном слое толщиной  $\Delta R$ , разрушенной действием камуфлетной фазы взрыва, определяется по формуле

$$d_K = \frac{18e}{\Pi\lambda},$$

где  $e$  – энергия образования единицы новой поверхности при разрушении породы взрывом.

Максимальное радиальное напряжение в волне, на любом расстоянии в зоне ее действия, при принятой форме волны, формируется в фазе  $\lambda = 0,18\Lambda$  и определяется из совместного решения уравнений:

$$\varepsilon_{r1} = \frac{-U}{0.18 \cdot c \cdot \Lambda} \left( 2 \cdot 0,18\Lambda - \frac{3(0,18\Lambda)^2}{0.54 \cdot \Lambda} \right);$$

$$\varepsilon_{\Theta 1} = \frac{0.4U}{0.18 \cdot c \cdot \Lambda \cdot R} \times \left( \left( \frac{(0,18\Lambda)^3}{0.54 \cdot \Lambda} - 3(0,18\Lambda)^2 \right) + 1.44(0,18\Lambda)\Lambda - 0.108\Lambda^2 \right)$$

$$\sigma_{r \max} = \frac{E}{1-\mu} 2 \left( \varepsilon_{r1} + \mu \varepsilon_{\Theta 1} \right).$$

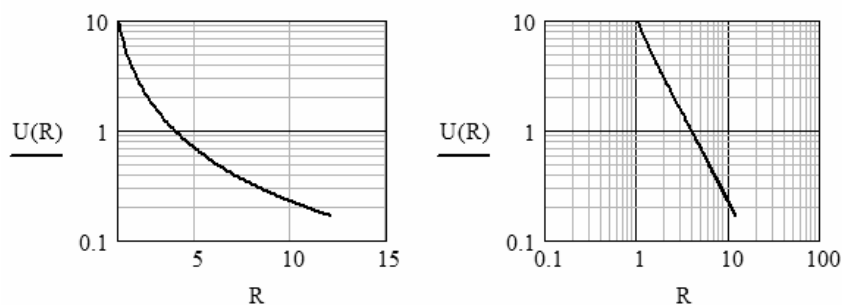
Максимальное тангенциальное напряжение в волне, на любом расстоянии в зоне ее действия, при принятой форме волны, формируется в фазе  $\lambda = 0,54\Lambda$  и определяется из совместного решения уравнений:

$$\varepsilon_{r2} = \frac{-U}{0.18 \cdot c \cdot \Lambda} (2 \cdot 0,54\Lambda - 3 \cdot 0,54\Lambda);$$

$$\varepsilon_{\Theta 2} = \frac{0.4U}{0.18 \cdot c \cdot \Lambda \cdot R} \left( (-2(0,54\Lambda)^2) + 1.44(0,54\Lambda)^2 - 0.108\Lambda^2 \right);$$

$$\sigma_{\Theta \max} = \frac{E}{1-\mu} 2 \left( \varepsilon_{\Theta 2} + \mu \varepsilon_{r2} \right).$$

Максимальная массовая скорость является наиболее часто измеряемым в экспериментах параметром слабой волны напряжений. Именно на основе анализа максимальных массовых скоростей часто предпринимаются попытки определить конечные результаты взрыва.



**Рис. 5. График изменение максимальной массовой скорости в сферической волне в концевой части цилиндрического заряда**

С использованием приведенных зависимостей, разработана компьютерная программа в оболочке MathCad, для расчета параметров воздействия слабой волны напряжений на верхний слой уступа, при скважинной отбойке горных пород. Проведем численный анализ изменения параметров волнового процесса по расчетным результатам для примера взрыва заряда тротила диаметром 250 мм в граните.

На рис. 5, в полулогарифмической и логарифмической системах координат, представлен график изменения максимальной массовой скорости слабой, падающей, сферической волны напряжений с расстоянием от центра концевой сферической части заряда, построенный программными средствами.

В нашем примере максимальная массовая скорость в волне напряжений, при ее прохождении до ста радиусов заряда, уменьшается от 11,8 м/с до 0,2 м/с.

Изменение максимальной массовой скорости имеет большое значение при определении других параметров процесса воздействия взрыва на горный массив. Но для определения конечных результатов взрыва необходимо учитывать много других факторов.

В литературе отводится существенная роль разрушающему действию отраженной волны напряжений. Но сравнивая маленькие массовые скорости в отраженной волне со скоростями в падающей волне, трудно с этим утверждением согласиться.

Таблица 1

**Максимальная массовая скорость в сферической, слабой падающей и отраженной волне напряжений**

Расстояние от центра сферической части зоны возмущения, $R$ , м	Максимальные массовые скорости $U$ , м/с		
	Падающая волна	Отраженная волна	Максимально возможная сумма при их наложении
0,94	11,8	0,17	11,97
1,94	3,1	0,19	3,29
2,94	1,6	0,22	1,82
3,94	1,0	0,26	1,26
4,94	0,69	0,32	1,01
5,94	0,52	0,39	0,91

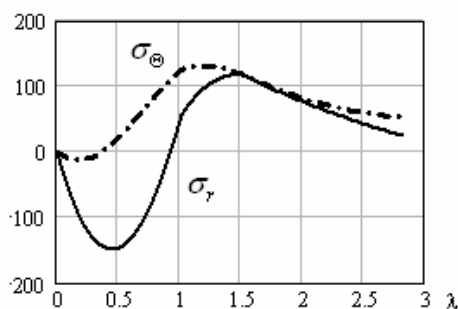
В табл. 1 представлены, выбранные через 1 метр значения максимальных массовых скоростей падающей и отраженной волн по самому короткому и самому нагруженному волной направлению от центра сферической зоны до свободной поверхности (обуриваемой площадки) на уступе карьера.

В наиболее близкой к центру точке, на границе излучения слабой волны напряжений, максимальная массовая скорость в волне, в нашем примере, равна 11,8 м/с. Около поверхности уступа, максимальная скорость в падающей волне равна 0,52 м/с. На отрезке в 5 м максимальная массовая скорость уменьшилась в 20 раз. В отраженной волне у обнаженной поверхности максимальная массовая скорость равна 0,39 м/с. Скорость в вернувшейся к заряду волне равна 0,17 м/с.

В последнем столбце таблицы представлена максимально возможная сумма максимальных скоростей. Такая сумма могла бы быть, если бы волны накладывались во всех точках зоны возмущения в максимальной фазе. Но такие условия не реализуются. Волны накладываются в разных фазах, и сумма максимальных скоростей будет почти всегда меньше цифр, указанных в четвертом столбце.

На рис. 6 представлены рассчитанные графики фазовых изменений составляющих тензора напряжений на границе излучения волны. Сплошной линией представлено фазовое изменение радиального сжимающего напряжения. Штрихпунктир-





**Рис. 6. Графики фазовых изменений составляющих тензора напряжений на границе излучения волны**

ной линией представлено фазовое изменение тангенциального растягивающего напряжения. В нашем примере в тензоре напряжений два главных составляющих тензора представлены тангенциальными напряжениями, отображаемыми штрихпунктирной линией.

На рис. 7. представлена таблица, составленная из фрагментов столбцов-векторов, полученных при толщине расчетных слоев 0,5 м.

В первом столбце-векторе представлены расстояния в метрах расчетных слоев от центра распространения сферической волны. Последняя строка столбца-вектора примыкает к верхней поверхности, с которой производится бурение скважин в карьере. Длина забойки в скважине шесть метров.

Во втором столбце-векторе максимальная массовая скорость (в м/с) в волне напряжений.

$R$	$U$	$\sigma_{r \max}$	$\sigma_{\ominus \max}$	$\Delta \mathcal{E} p$	$\Pi_{\mathcal{E}}$	$d_{\kappa}$
0.9	11.8	-157	220.8	0	0	0
1.4	4.97	-69	78.4	501711	27658	10.4
1.9	3.09	-43	44.3	213887	7048	40.9
2.4	2.14	-30	28.9	115019	2517	114.4
2.9	1.59	-23	20.5	71048	1107	260.2
3.4	1.24	-18	15.5	48020	560	514.7
3.9	1			34544	312	922.1
4.4	0.82			26003	188	1534.1
4.9	0.69			20259	119	2410.6
5.4	0.59			16214	80	3619.6
5.9	0.52			13259	55	5237.2

**Рис. 7. Фрагмент столбцов-векторов изменения с расстоянием максимальных радиальных и тангенциальных напряжений в Па, в слабой волне напряжений**

В третьем столбце-векторе максимальное значение радиального сжимающего напряжения в МПа/м<sup>2</sup>. Граница излучения волны напряжений определяется по условию  $\sigma_{r \max} = \sigma_{сж}$ . В нашем примере предел прочности гранита на сжатие 160 МПа/м<sup>2</sup>.

В четвертом столбце-векторе максимальное значение тангенциального растягивающего напряжения в МПа/м<sup>2</sup>. По этому параметру определяется внешняя граница формирования радиальных трещин при распространении волны, по условию  $\sigma_{\theta \max} = \sigma_{рас}$ . В нашем примере предел прочности гранита на растяжение 15 МПа/м<sup>2</sup>. В шестой строке четвертого столбца расчетное максимальное тангенциальное напряжение в волне равно 15,5 МПа/м<sup>2</sup>. В нашем примере отдельные радиальные трещины будут доходить до поверхности с радиусом 3,4 м. За пределами этой поверхности волна напряжений породу не разрушает. Дальше могут «оживляться» ранее существовавшие и залеченные трещины.

Но судить о факте дробления породы внутри объема с радиусом 3,4 м и о крупности дробления по численным значениям параметров напряжения не представляется возможным. Следует различать понятия разрушение породы и дробление породы, тем более технологическое дробление породы. В наших представлениях технологическое дробление породы это дробление заданного объема породы, при заданных технологических параметрах до технологически приемлемой крупности.

В пятом столбце-векторе представлена энергия, поглощенная в каждом расчетном слое в Дж.

В шестом столбце-векторе представлена плотность энергии в каждом расчетном слое в Дж/м<sup>3</sup>.

Дробление породы взрывом на куски происходит при обязательном выполнении двух условий:

- в дробимом объеме напряжения должны быть выше предела прочности породы;
- дробление породы на куски с линейным размером меньше линейного размера дробимого объема должно быть обеспечено энергетически.

В седьмом столбце таблицы представлены расчетные линейные размеры кусков породы при плотности энергии разрушения, представленной в пятом столбце. Линейный размер дробимого объема 6 метров. Линейные размеры кусков во много раз больше не только толщины расчетных слоев 0,5 метра, но больше линейного размера всего дробимого объема. А это значит, что дробление породы в зоне действия слабой волны напряжений не обеспечено энергетически. Не могут же куски породы быть больше дробимого объема.

Наложение падающих и отраженных волн, наложение волн от соседних взрывааемых зарядов не изменяет положения. Слабые волны напряжений разрушают породу, формируют радиальные трещины, но не дробят породу на куски.

В верхнем шести метровом слое уступа, который примыкает к забойке, порода дробится до отметки 0,625 м от центра распространения верхней сферической волны напряжений, далее развиваются радиальные трещины до отметки 3,4 м. За пределами 3,4 м и до 6 м, в слое толщиной 2,6 м, порода не подвергается разрушающему действию волновой фазой взрыва. Но на зону действия волн напряжений накладывается, с отставанием во времени, квазистатическая фаза взрыва. В этой статье не рассматривается вопрос о влиянии квазистатической фазы на конечные результаты взрыва.

### **Выводы**

1. Предложена модель сферической формы заряда, полости и зоны камуфлетного действия взрыва в верхней концевой части скважинного заряда конечной длины.


2. Разработаны индивидуальные математические зависимости для определения объемов и параметров камуфлетной фазы взрыва в верхнем слое карьерного уступа, расположенного выше скважинного заряда.

3. Разработана методика и компьютерная программа расчета распределения энергии разрушения и распределения плотности энергии разрушения камуфлетной и волновой фаз взрыва в верхней части камуфлетной зоны.

4. Разработана методика расчета крупности дробления породы и трещинообразования камуфлетной и волновой фазами взрыва в пределах верхней части камуфлетной зоны.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В. Модельные исследования разрушения горных пород взрывом. «Физические проблемы взрывного разрушения массивов горных пород». – М.: ИПКОН РАН, 1999. – С.18-29.
2. Казаков Н.Н. Массовая скорость частиц в волне на границе излучения. Сборник «Взрывное дело» № 106/63. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу при АГН», 2011. – С. 27-32.
3. Викторов С.Д., Казаков Н.Н., Шляпин А.В. Геометрические параметры камуфлетной зоны при взрыве скважинного заряда в карьере. Сборник «Взрывное дело» Выпуск № 108/65. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу при АГН», 2012. – С.8-15.
4. Викторов С.Д., Казаков Н.Н., Шляпин А.В., Лапиков И.Н. Энергетические параметры камуфлетной зоны при взрыве скважинных зарядов в карьерах. Сборник «Взрывное дело» Выпуск № 108/65. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу при АГН», 2012. – С.73-80.
5. Казаков Н.Н. Параметры процесса камуфлетного действия взрыва скважинного заряда конечной длины. Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск №1. – М.: Мир горной книги, 2013. – С.109-119.
6. Казаков Н.Н. Многоуровневое дробление горных пород. Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск №1. – М.: Мир горной книги, 2011. – С. 197-202.
7. Казаков Н.Н., Копылов С.В. Уравнение формы волны в породе при взрыве. Горный информационно-аналитический бюллетень. МГУ, 2003, № 10. С. 39-40. 

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

---

*Казаков Николай Николаевич* — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, kazakov32@mail.ru,  
*Шляпин Алексей Владимирович* — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Shlyapin@mail.ru.  
Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

---

UDC 622.235

### ROCK DESTRUCTION BY THE CAMOUFLAGE PHASE OF EXPLOSION IN THE TOP PART OF THE BLAST HOLE CHARGE

*Kazakov N.N.*<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Lead Research Associate, kazakov32@mail.ru,

*Shlyapin A.V.*<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Senior Research Associate, Shlyapin@mail.ru,

<sup>1</sup>Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

---

*In article the description of the offered model of a form of a charge, a cavity and camouflage and wave zone in action of explosion in the top part of a blast hole charge is given. By the developed technique, with use of the developed computer program, parameters of process and fineness of crushing of rock by a camouflage and wave phases of explosion, in the top layer of a ledge are calculated.*

*Key words: finite length, camouflage phase, wave phase, density, mass speed, tension, energy, energy of destruction, cracks made, crushing.*

## REFERENCES

1. Adushkin V.V. Simulation studies of rock breakage by blast. «Physical problems of rock mass breakage by blast». Moscow, IPKON RAS, 1999, pp. 18-29.
2. Kazakov N.N. Particle mass velocity in a wave at the emission boundary. Collected works «Vzryvnoe Delo», Issue No106/63. Moscow, MVK Po Vzryvnomu Delu ZAO, Academy of Mining Sciences, 2011, pp. 27-32.
3. Victorov S.D., Kazakov N.N., Shlyapin A.V. Geometrical parameters of a camouflage zone at explosion of a blast hole charge in career. Collected works «Vzryvnoe Delo», Issue No108/65. Moscow, MVK Po Vzryvnomu Delu ZAO, Academy of Mining Sciences, 2012, pp. 8-15.
4. Victorov S.D., Kazakov N.N., Shlyapin A.V., Lapikov I.N. Power parameters of a camouflage zone at explosion of blast hole charges in career. Collected works «Vzryvnoe Delo», Issue No108/65. Moscow, MVK Po Vzryvnomu Delu ZAO, Academy of Mining Sciences, 2012, pp. 73-80.
5. Kazakov N.N. Parameters of process of camouflage action of explosion of a blast-hole charge of final length. Mining information and analytical bulletin. Separate release No. 1. Moscow, World of the mining book, 2013, pp. 109-119.
6. Kazakov N.N. Multilevel crushing of rocks. Mining information and analytical bulletin. Separate release No. 1. Moscow, World of the mining book, 2011, pp. 197-202.
7. Kazakov N.N., Kopylov S.V. A wave form formula in breed at explosion. Mining information and analytical bulletin No. 10. Moscow, MGGU, 2003, pp. 39-40.

