

Doi: [10.15863/TAS](https://doi.org/10.15863/TAS)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2014 Issue: 11 Volume: 19

Published: 30.11.2014 <http://www.T-Science.org>

SECTION 7. Mechanics and machine construction.

Konstantin Nifontovich Tkachuk
doctor of technical sciences, professor
Institute of energy saving and energy management
National Technical University of Ukraine "Kyiv
Polytechnic Institute"
(IEE NTUU "KPI")

Konstantin Konstantinovich Tkachuk
doctor of technical sciences, as. professor
IEE NTUU "KPI"

Oksana Yaroslavivna Tverda
PhD, senior Lecturer
IEE NTUU "KPI"
tverdaya@ukr.net

Sergei Vasilievich Dyniak
applicant
IEE NTUU "KPI"

MANAGEMENT OF EXPLOSION ENERGY

Abstract: Analytical method for the investigation, which has allowed approximately orientate in the nature of the influence of the elongated charge parameters and its location relative to the free surface on the results of the explosion is developed. Patterns of influence of the charge length and its removal from the free surface on nature of the fracture zone are set.

Key words: explosion, charge, fracture zone, free surface, parameters, removal, explosion energy.

Language: Russian

Citation: Tkachuk KN, Tkachuk KK, Tverda OY, Dyniak SV (2014) MANAGEMENT OF EXPLOSION ENERGY. ISJ Theoretical & Applied Science 11 (19): 77-83. doi: <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2014.11.19.15>

УДК 622.235

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГИЕЙ ВЗРЫВА

Аннотация: Разработан аналитический метод исследования, использование которого позволило приближенно ориентироваться в характере влияния параметров удлиненного заряда и его расположения относительно свободной поверхности на результаты взрыва. Установлены закономерности влияния длины заряда и его удаления от свободной поверхности на характер зоны разрушения среды взрывом.

Ключевые слова: взрыв, заряд, зона разрушения, свободная поверхность, параметры, удаление, энергия взрыва.

Введение

На протяжении последних десятилетий взрывные работы в карьерах получили существенное развитие. Значительно выросли масштабы массовых взрывов. При этом основной задачей использования энергии взрыва зарядов взрывчатых веществ при измельчении скальных пород является достижение необходимого качества горной массы с минимальным содержанием негабаритных и переизмельченных фракций, сохранением природной прочности кусков породы [1, с. 66-72].

В настоящее время существует много теорий действия взрыва на среду, каждая из которых дополняет или уточняет другие. Обоснованы методы управления энергией взрыва, основанные на учете природных и технологических факторов для различных горно-технологических условий разработки скальных пород открытым способом

[2; 3, с. 91-93; 4; 5, с. 48-52; 6-7]. Однако единой общепризнанной теории действия взрыва еще не создано, поэтому исходя из конкретно поставленной задачи можно применять упрощающие модели, которые основывались бы на учете основных факторов, определяющих рассматриваемые процессы и позволяли устанавливать некоторые закономерности действия взрыва в среде.

Так как в практике ведения взрывных работ действие взрыва на среду характеризуется его конечным результатом, то для практических расчетов целесообразно применить упрощенную модель, позволяющую получить приближенное решение поставленной задачи.

Известно, что во многих случаях однородную, находящуюся в твердом состоянии среду можно рассматривать как абсолютно несжимаемую жидкость, пренебрегая по малости

фактическим изменением объема [8]. При таких допущениях энергия взрыва передается среде и распространяется в ней мгновенно (в действительности же скорость волны конечна), однако это упрощение вполне приемлемо для установления общих закономерностей действия взрыва в среде. При этом разрушаемая среда от полученной энергии приходит в движение и в местах, где скорость этого движения превысит критическую, происходит разрушение массива и его дробление.

Решение задачи сводится к тому, чтобы определив потенциал на поверхности заряда, определить потенциал в любой точке поля.

Следует заметить, что применяемая модель не является универсальной, так как она не позволяет последовательно рассматривать процессы, протекающие в среде под действием взрыва, а лишь дает возможность судить о конечных результатах.

Несмотря на это до сих пор нет аналитических решений задач для данной модели, которые учитывали бы влияния свободной поверхности за исключением сферического заряда, подробно исследованного в работе [8].

Цель исследования

Разработка аналитического метода исследования, использование которого позволит приближенно ориентироваться в характере влияния параметров удлиненного заряда и его расположения относительно свободной поверхности на результаты взрыва, а также исследование влияния длины колонки заряда на конечные результаты взрыва.

Результаты исследований

При сделанных выше допущениях состояние среды после взрыва описывается уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где $\varphi = \frac{S}{\rho}$ – потенциал поля начальных скоростей;

S – величина удельного импульса в данной точке;

ρ – плотность среды.

При взрыве заряда в среде возникает сложное поле напряжений, которое аналитически описать очень трудно, поэтому будем рассматривать плоскую задачу. В такой постановке решение уравнения (1) упрощается, если учесть, что значение потенциала на

поверхности заряда и свободной поверхности постоянны.

Для решения уравнения применим метод конформных отображений, суть которого заключается в том, чтобы сложную область напряжений, возникающих при взрыве заряда в среде, отобразить на простую каноническую с помощью комплексного потенциала.

Изображая контуры заряда и свободной поверхности некоторыми линиями в плоскости z (рис. 1а), на которых потенциал принимает постоянные значения, подбираем аналитическую функцию:

$$\omega = f(z) = \psi(x, y) + i\varphi(x, y), \quad (2)$$

где $z = x + iy$, $\varphi(x, y)$ принимает заданное постоянное значение на поверхности заряда, а на свободной поверхности равняется нулю. При таких условиях $\varphi(x, y)$ можно принять за потенциал поля начальных скоростей, так как $\varphi(x, y)$ является гармонической функцией и удовлетворяет граничным условиям. Аналитическая функция (2) будет отображать исследуемую область (z) на полосу $\theta \leq \arg \omega \leq \theta_0$ плоскости (ω) и называться комплексным потенциалом поля начальных скоростей (рис. 1б).

Итак, решение поставленной задачи сводится к нахождению функции, отображающей исследуемую область плоскости z на полосу плоскости ω .

Мнимая часть комплексного потенциала (2) будет являться истинным потенциалом поля начальных скоростей.

Линии равного потенциала будут определяться уравнением

$$\varphi(x, y) = C, \quad (3)$$

а линии тока уравнением

$$\psi(x, y) = C'. \quad (4)$$

Величина вектора начальной скорости в каждой точке взрывающейся среды будет равна модулю производной комплексного потенциала

$$V = |\tilde{V}| = \left| \frac{d\omega}{dz} \right| = |f'(z)|. \quad (5)$$

Действительно, зная, что

$$V_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; V_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y},$$

(или, что тоже самое $\tilde{V} = \text{grad} \varphi$, вектор начальной скорости является отрицательным градиентом потенциала) и вычислив производную от функции (2)

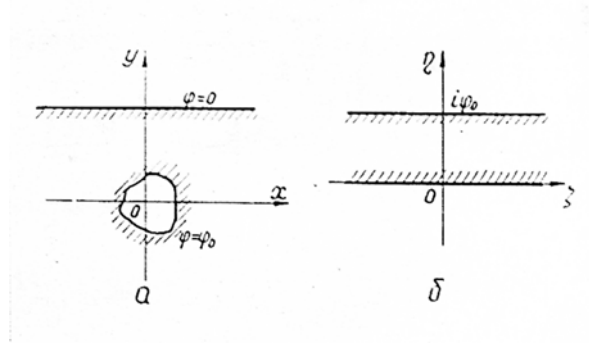


Рисунок 1 – Соответствие границ при конформном отображении: а) исследуемая область; б) каноническая.

$$f'(z) = \frac{\partial \psi}{\partial x} + i \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} + i \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} + i \frac{\partial \varphi}{\partial x},$$

получим

$$V = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2} = |f'(z)|. \quad (6)$$

А вектор начальной скорости определяется по выражению [9]

$$\vec{V} = -i \overline{f'(z)}.$$

Плотность энергии в каждой точке среды будет определяться по формуле

$$g = \frac{\rho}{2} |f'(z)|^2. \quad (7)$$

Так как принятая модель не позволяет рассматривать процесс взрыва во времени, то действие его на среду можно оценивать конечными результатами, а именно:

а) параметрами зоны разрушения, которая определяется геометрическим местом точек, в которых плотность энергии равна удельной работе разрушения

$$\frac{\rho}{2} |f'(z)|^2 = a, \quad (8)$$

где a – удельная работа разрушения;

б) воронкой рыхления, которая определяется линией тока проходящей через край воронки разрушения на свободной поверхности. Уравнение контура воронки рыхления имеет вид:

$$\psi(x, y) = \psi(x_1, y_1), \quad (9)$$

где x_1, y_1 – координаты точки края зоны разрушения на свободной поверхности;

в) величиной вероятно возможного куска.

Величину вероятно возможного куска, который может образоваться в данной области взрывающей среды, определяем по формуле [8]

$$a = \frac{U_s \sqrt{3}}{\sqrt{D}},$$

где U_s – критическая скорость разрушения;

$$D = \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial z}\right)^2.$$

В случае плоскопараллельного поля величина куска в данной точке среды определяется по формуле [10]

$$a = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{U_s}{|f''(z)|}. \quad (10)$$

С помощью комплексного потенциала можно определить верхний предел времени разрушения вдоль указанной линии по формуле [8]

$$t_{\text{нов}} = \int_{AB} \frac{dz}{|f'(z)|}. \quad (11)$$

Воспользовавшись разработанной методикой решения задачи, исследуем влияние параметров заряда, его расположения относительно свободной поверхности, свойств взрывающей среды на результаты взрыва.

Теоретическое решение поставленной задачи, согласно разработанной методике сводится к нахождению комплексного потенциала исследуемой области (рис. 2а). Для нахождения комплексного потенциала отобразим исследуемую область на плоскость с разрезами (рис. 2б).

Функция, осуществляющая это отображение имеет вид:

$$z_1 = z^2. \quad (12)$$

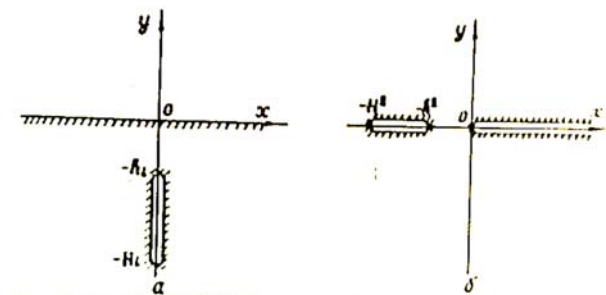


Рисунок 2 – Соответствие границ при конформном отображении: а) схема расположения заряда относительно свободной поверхности; б) промежуточная область.

Отображая область плоскости z_1 на полосу (рис. 1б), получим:

$$\omega = \frac{\varphi_0}{\pi} \ln \frac{H \sqrt{z^2 + h^2} - z \sqrt{H^2 - h^2}}{H \sqrt{z^2 + h^2} - z \sqrt{H^2 + h^2}}, \quad (13)$$

где H – длина скважины;

h – удаление заряда от свободной поверхности.

Подставляя в формулу (7) значение производной комплексного потенциала (13), получим:

$$g = \frac{\rho}{2} \left(\frac{2\varphi_0}{\pi U_s} \right) \times \frac{H^2(H^2 - h^2)}{\sqrt{(x^2 - y^2 - h^2)^2 + 4x^2y^2} [(x^2 - y^2 + H^2)^2 + 4x^2y^2]}.$$

Тогда уравнение зоны разрушения согласно (8) будет иметь вид:

$$\left[(x^2 - y^2 + h^2)^2 + 4x^2y^2 \right] \times \left[(x^2 - y^2 + H^2)^2 + 4x^2y^2 \right]^2 = b_1^4, \quad (14)$$

где

$$b_1 = \frac{2\varphi_0 H \sqrt{H^2 - h^2}}{\pi U_s}.$$

Границы зоны разрушения определялись уравнениями:

а) вдоль оси x

$$x^6 + (h^2 + 2H^2)x^4 + 2H^2(H^2 + h^2)x^2 + h^2H^4 - b_1^2 = 0; \quad (15)$$

б) вдоль оси y

$$y^6 - (h^2 + 2H^2)y^4 + 2H^2(H^2 + h^2)y^2 - h^2H^4 - b_1^2 = 0. \quad (16)$$

Из анализа уравнений следует, что с изменением длины заряда и удаления его от свободной поверхности изменяются и параметры зоны разрушения. Из выражения (15) следует, что при $h^2H^4 - b_1^2 = 0$ уравнение имеет единственный корень $x = 0$, т.е. разрушения на свободной поверхности не возникают.

При

$$h^2H^4 - b_1^2 > 0 \quad (17)$$

разрушение не достигает свободной поверхности, следовательно, при таком условии взрыв заряда – камуфлетный. Неизбежность камуфлетного взрыва при любом значении H наступает при условии $H \gg h$. После незначительных преобразований неравенства (17) получим:

$$\frac{\varphi_0}{h} \leq \frac{\pi U_s}{2}.$$

В результате аналитических исследований уравнения (14) были установлены характерные формы зоны разрушения, которые изображены на рис. 3 при различных удалениях заряда от свободной поверхности и его длине.

В расчетах $\frac{2\varphi_0}{\pi U_s}$ принимали равным 10 м.

Анализ зон разрушения показывает, что основное разрушение при взрывании удлиненных зарядов наблюдается в верхней его части. С увеличением длины заряда зона разрушения увеличивается только в верхней части заряда.

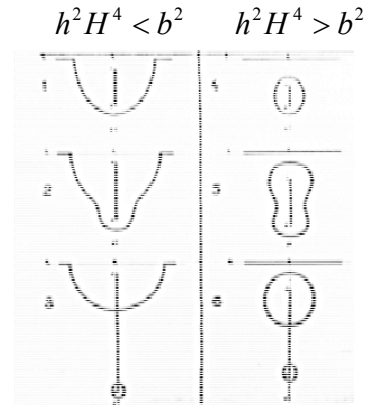


Рисунок 3 – Характерные зоны разрушения при взрывании удлиненного заряда:

$$1-3 \quad \begin{cases} H = 10, 15, 25 м \\ h = 3 м \end{cases}$$

$$4-6 \quad \begin{cases} H = 6, 9, 18 м \\ h = 6 м \end{cases}$$

Подставляя в уравнение (9) координаты края контура зоны разрушения на свободной поверхности, получим уравнение контура воронки рыхления:

$$\frac{[(2H^2 + h^2)(x^2 + y^2)^2 + 2H^4(x^2 - y^2) + H^4h^2]^2}{d_1^2} + \frac{16x^2y^2H^4(H^2 - h^2)^2}{d_1^2 - 1} = \quad (18)$$

$$= h^4 [(x^2 - y^2 + H^2)^2 + 4x^2y^2]^2,$$

где

$$d_1 = \frac{(2H^2 - h^2)R^2 + h^2H^2}{h^2(R^2 + H^2)},$$

R – половина раствора воронки разрушения на свободной поверхности определяется по уравнению (15).

В силу громоздкости уравнения (18), а, следовательно, и непригодности его для инженерных расчетов необходимо заменить контур воронки рыхления, определяемый уравнением (18), более простым контуром, практически мало отличающимся от данного.

В приближенной форме контур воронки рыхления описывается уравнением:

$$\frac{x^2}{R^2} + \frac{y^2}{H_{рых}^2} = 1. \quad (19)$$

Глубина воронки рыхления определяется из уравнения (18) при $x = 0$, $y = H_{рых}$, при этом

$$H_{рых} = \frac{H^2 \sqrt{R^2 - h^2}}{\sqrt{H^2(2R^2 + H^2) - h^2 R^2}}.$$

Как следует из сравнения полученных площадей воронки рыхления при сделанном упрощении максимальное отклонение контура, определяемое уравнением (18) от контура, полученного по уравнению (19), не превышает 3-5% для зарядов, при взрывании которых величина раствора воронки рыхления $H \geq R$.

В уравнение (19) входит величина раствора воронки разрушения, которая определяется непосредственным решением уравнения (15).

Площадь поперечного сечения воронки рыхления определяем по формуле:

$$S_{рых} \approx \frac{\pi R H^2}{2} \sqrt{\frac{R^2 + h^2}{(2R^2 + H^2)H^2 - h^2 R^2}}. \quad (20)$$

Из формулы (20) следует, что изменение длины заряда и удаление его от свободной поверхности оказывает существенное влияние на зону рыхления.

Исследуем изменение площади поперечного сечения зоны рыхления в зависимости от удаления заряда от свободной поверхности.

Пусть величина $H - h$ остается постоянной, а при этом изменяется только удаление заряда от свободной поверхности, тогда воронка рыхления при уменьшении h увеличивается и достигает при $h = 0$ максимального значения.

Удаление заряда от свободной поверхности при постоянной его длине влияет на проработку подошвы уступа только до определенных пределов.

Сделанные выводы справедливы только для случая, когда величина потенциала на поверхности заряда не меняется при изменении его параметров.

При исследовании влияния параметров заряда на величину воронки рыхления и разрушения было установлено, что с увеличением отношения $\frac{H}{h}$

площадь поперечного сечения ее увеличивается (рис. 4) и в пределе стремится к постоянной величине. Как показали теоретические исследования, основное разрушение наблюдается в верхней части заряда, следовательно, с увеличением длины заряда, качество проработки подошвы уступа ухудшается.

Из полученных графических зависимостей (рис.

4) следует, что для каждой породы существует отношение $\frac{H}{h}$ при котором изменение площади поперечного сечения воронки рыхления незначительно. Чем выше критическая скорость разрушения, тем меньше отношение $\frac{H}{h}$ при постоянной величине $\frac{2\varphi_0}{\pi U_s}$, при котором качество проработки подошвы ухудшается.

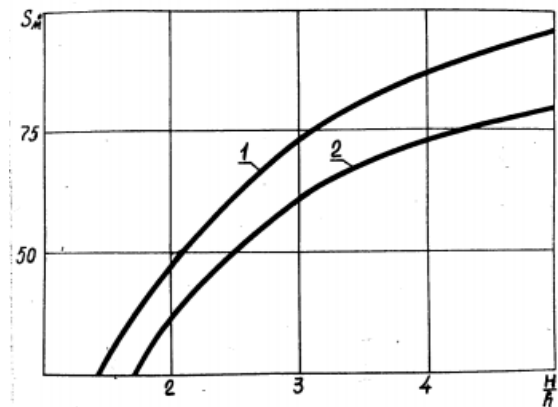


Рисунок 4 – Зависимость площади поперечного сечения воронки рыхления от отношения $\frac{H}{h}$ при $h = 5$ м

$$1 - \frac{2\varphi_0}{\pi U_s} = 10 \text{ м}, \quad 2 - \frac{2\varphi_0}{\pi U_s} = 7 \text{ м}.$$

Следовательно, для каждого диаметра заряда и типа пород отсутствует оптимальная длина заряда. Используя разработанную методику, исследуем влияние длины заряда на характер дробления среды.

Величина вероятно возможного куска, который может образоваться в данной области среды, определяется по формуле (10):

$$a = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{[(x^2 - y^2 + h^2)^2 + 4x^2 y^2]}{b_1 \sqrt{x^2 + y^2}} \times \frac{[(x^2 - y^2 + H^2)^2 + 4x^2 y^2]^{\frac{3}{4}}}{\sqrt{[3(x^2 - y^2) + 2h^2 + H^2]^2 + 36x^2 y^2}}. \quad (21)$$

Для упрощения вычислений величину вероятно возможного куска определяли только на свободной поверхности.

Величина вероятно возможного куска на свободной поверхности определяется по выражению, которое получим подставляя в формулу (21) $y=0$

$$a = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{(x^2 + h^2)^2 \sqrt{(x^2 + H^2)^3}}{b_1 x \cdot (3x^2 + 2h^2 + H^2)}. \quad (22)$$

Из выражения (22) следует, что с

увеличением длины заряда и при постоянных значениях h и $\frac{2\varphi_0}{\pi U_s}$ величина вероятно возможного куска на свободной поверхности уменьшается. Однако это уменьшение несущественно при больших длинах зарядов. Если же длина колонки заряда остается постоянной, то качество дробления на свободной поверхности самое лучшее при $h=0$. Однако следует заметить, что при $h=0$ коэффициент передачи энергии взрыва среде уменьшается и поэтому может наблюдаться несоответствие

теоретических исследований экспериментальным.

Для качественного подтверждения полученных теоретических выводов были проведены экспериментальные исследования по замеру параметров воронки рыхления удлиненными цилиндрическими зарядами, расположенными перпендикулярно свободной поверхности диаметром $d=42$ мм в магнетито-маритовых роговиках крепостью $f=12-14$ по шкале профессора М.М. Протодыконова. Результаты экспериментов и параметры применяемых зарядов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные исследования параметров зоны разрушения при взрывании удлиненных цилиндрических зарядов

№ пп	Количество взрывов	Глубина шпура, м	Величина заряда, кг	Длина заряда, м	Радиус воронки, м	Объем разрушения, м ³	Выход горной массы с погонного метра, м ³
1	3	0,62	0,40	0,40	0,320	0,066	0,106
2	4	0,73	0,50	0,50	0,400	0,122	0,167
3	5	0,80	0,60	0,60	0,410	0,141	0,176
4	4	0,90	0,65	0,65	0,430	0,183	0,202
5	3	1,00	0,70	0,70	0,440	0,201	0,210
6	6	1,10	0,80	0,80	0,420	0,210	0,190
7	3	1,20	0,85	0,85	0,360	0,171	0,142
8	2	1,30	0,90	0,90	0,340	0,162	0,125
9	4	1,50	1,00	1,00	0,340	0,182	0,121
10	3	1,70	1,20	1,20	0,340	0,213	0,122

Анализ данных таблицы показывает, что с увеличением длины колонки заряда радиус разрушения на свободной поверхности увеличивается. Однако увеличение не пропорционально длине заряда и в пределе ($H \rightarrow \infty$) остается постоянным. Аналогично изменяется и глубина зоны рыхления. При малых глубинах заложения заряда с увеличением длины колонки выход горной массы с погонного метра скважины увеличивается более интенсивно, чем расчетный выход. Это объясняется тем, что при экспериментах коэффициент передачи энергии взрыва среде при малых значениях h уменьшается.

Полученные выводы подтверждаются не только экспериментами при взрывании удлиненных шпуровых зарядов, а и практикой ведения взрывных работ на карьерах ГОКов Кривбасса при взрывании сдвоенных и строенных уступов.

Так, например, на карьере СевГОК было проведено три массовых взрыва сдвоенных уступов в трудновзрываемых породах крепостью

$f=14-16$. Глубина скважин составляла 30-32 м, сетка 7*8 м. В результате взрывов хорошо разрушенной оказалась только верхняя часть уступа, а нижняя была слабо разрушенной и с трудом поддавалась экскавации. Завышение подошвы уступа достигало 3-4 м. Это вызвало необходимость в повторном обурировании и взрывании нижней части уступа.

Ухудшение качества взрыва и проработки подошвы при взрывании сдвоенных уступов в крепких породах в зажатой среде имело место и на других карьерах. Так, на карьере ИнГОКа был взорван блок с высотой уступа 27 м. В результате взрыва хорошо разрушенной оказалась только верхняя часть уступа. Значительное увеличение высоты взрываемого уступа (48 м) в крепких породах также не дало положительных результатов.

В неокисленных роговиках крепостью $f=12-14$, был произведен экспериментальный взрыв. Высота уступа составляла 45 м. Основываясь на анализе предыдущих взрывов, сетку скважин уменьшили на 9%, перебур и удельный расход

взрывчатого вещества были соответственно увеличены на 10% и на 24% по сравнению с поуступным взрыванием.

Анализ результатов взрыва показал, что как и в предыдущем случае, верхние два подустапа были хорошо разрушены, а третий – нижний – был вторично обурен и взорван. Несмотря на уменьшение сетки скважин, увеличение удельного расхода взрывчатого вещества, показатели взрыва не улучшились, в связи с увеличением уступа до 45 м.

Опыт взрывания сдвоенных и строенных уступов на других карьерах подтвердил факт завышения подошвы уступа, ухудшение качества дробления нижнего подустапа и увеличение выхода негабарита при увеличении длины заряда, когда расстояния между скважинами

увеличивали по сравнению со взрыванием одинарных уступов.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено влияние длины заряда и его удаления от свободной поверхности на характер зоны разрушения среды взрывом. Установленные качественные закономерности подтверждены производственным опытом ведения взрывных работ. Поэтому, полученные закономерности действия взрыва удлиненного заряда в зависимости от его длины, могут служить основанием для выбора тенденции изменения зоны разрушения в производственных условиях при изменении параметров.

References:

1. Rozhdestvenskii VN (2005) Osnovnye napravleniia kachestvennoi podgotovki gornoj massy vzryvom na sovremennykh glubokikh karerakh. Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal No. 1.
2. Kurinnyi VP (2009) Phizychni aspekty ruinovannia girskykh porid vybukhom. Dnipropetrovsk: NGU, 158.
3. Lykhin PA, Maltsev VM (2001) Raschet parametrov tsylindricheskikh zariadov vzryvchatykh veschestv. Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal No. 2.
4. Sukhanov AF, Kutuzov BN (1983) Razrushenie gornykh porod vzryvom. Moscow: Nedra, 344.
5. Bibik IP, Sytenkov VN (2007) Optimizatsiya parametrov burovzryvnykh работ. Gornyi zhurnal No. 5.
6. Kutuzov BN (1994) Razrushenie gornykh porod vzryvom (Vzryvnye tekhnologii v promyshlennosti). Moscow: MGGU, 448.
7. Kravets VG, Vorobev VD, Kuzmenko AO (1994) Pidryvni roboty na karerakh. Kiev: NDO, 375.
8. Vlasov OE (1957) Osnovy teorii deistviia vzryva. Moscow: VIA, 407.
9. Lavrentev NA, Shabat BV (1973) Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo. Moscow: Nauka, 749.
10. Tkachuk KN, Vlasov OE, Bondarenko NA (1971) Nekotorye zakonomernosti deistviia vzryva tsylindricheskogo zariada v ogranichennoi tverdoi srede. Vzryvnoe delo No. 70/27.