

with the further development of mining operations and the development of reserves.

**Originality.** The solution of the problem is provided by calculating the prism of possible collapse and the position of the slip plane in the dump rock massif at the specified maximum permissible dump parameters. After the construction of the prism of a possible collapse, its stability is calculated by the method of composition of forces. The obtained calculation result allows to judge the compliance of the selected profile of the dump wall with the resulting slope angle – the standard value of the safety factor for making a rational technological decision on ensuring the stability of the critical angle and height of the filled slope.

**Practical implications.** The results of calculations in the conditions of mining operations of the Poltava GOK PJSC performed using K-MINE allow preparing a feasibility study for the possibility of additional build-up of the wall heights by 5-7 stages (100-140 m) without changing the size of the dump borders in plan, which will allow to additionally allocate more than 500 million m<sup>3</sup> of overburden rocks in them.

**Keywords:** *geomechanical modeling, mines, dumps, stability calculation, mining operations*

УДК 622.235

© Э.И. Ефремов, В.А. Никифорова, И.Л. Кратковский,  
К.С. Ищенко, Е.В. Николенко

## **РАЗРУШЕНИЕ ТВЕРДЫХ СРЕД ПРИ ИХ РАЗНОГРАДИЕНТНОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ УДЛИНЕННЫМИ ЗАРЯДАМИ ПЕРЕМЕННОГО ДИАМЕТРА**

© E. Efremov, V. Niikiforova, I. Kratkovsky, K. Ishchenko, E. Nikolenko

## **BLASTED BREAKING OF HARD MEDIUMS UNDER DIFFEREND GRADIENT LOADING BY ELONGATED CHARGES OF VARIABLE DIAMETER**

**Цель.** Исследовать разрушающее действие взрыва удлиненных зарядов взрывчатых веществ (ВВ) переменного диаметра, обеспечивающих за счет разноградиентного нагружения твердых сред снижение энергоемкости их разрушения.

**Методика исследований.** Использован аналитический метод, основанный на фундаментальных положениях механики сплошных сред и физики взрыва, а также метод экспериментальных исследований на моделях с последующей обработкой результатов их взрывного разрушения.

**Результаты исследований.** Разноградиентное взрывное нагружение в объеме среды зависит от конструктивных особенностей удлиненных зарядов взрывчатых веществ и их расположения в разрушаемой среде. Экспериментами в полигонных условиях установлено, что при взрыве системы удлиненных зарядов ВВ переменного по их длине диаметра за счет пре-

валирования в силовом поле сдвиговых напряжений наибольший разрушающий эффект достигается при расположении заууженных и расширенных участков зарядов ВВ в смежных зарядных полостях в шахматном порядке по сравнению с оппозитным размещением (напротив друг друга) таких участков.

**Научная новизна.** При теоретическом рассмотрении учитывается, что основным механизмом разрушения среды при взрыве удлиненных зарядов ВВ переменного диаметра на контакте с разрушаемой средой является ее мгновенное разрушение под действием сдвиговых напряжений.

**Практическое значение.** Результаты работы позволяют обосновать эффективность способов отбойки горных пород взрывом удлиненных зарядов ВВ переменного диаметра за счет создания разноградиентных полей напряжений, позволяющих повысить коэффициент полезного действия взрыва, уменьшить затраты на взрывные работы, выход переизмельченных фракций и объемы пылегазовых выбросов.

**Ключевые слова:** *твердая среда, взрывное разрушение, удлиненный заряд переменного диаметра, разноградиентное нагружение*

**Вступление.** Взрывная отбойка крепких горных пород является весьма ответственной и дорогостоящей операцией при добыче скальных полезных ископаемых. В этой связи разработка новых способов взрывной отбойки горных пород и повышение эффективности существующих способов при низком коэффициенте полезного действия взрыва представляются весьма актуальными.

Полезное действие разрушающих взрывных нагрузок в значительной степени зависит от условий передачи горным породам энергии, запасенной во взрывчатых веществах (ВВ), которые определяются особенностями конструкции скважинных зарядов ВВ [1,2]. Наиболее эффективное разрушение твердых сред под действием динамических нагрузок происходит в полях напряжений, отличающихся сильной неоднородностью и нестационарностью.

На практике условия передачи энергии взрыва разрушаемой среде и соответствующее повышение эффективности отбойки крепких горных пород взрывом скважинных зарядов ВВ возможно при размещении в объеме массива горных пород конструкций зарядов, обеспечивающих его неоднородное разноградиентное нагружение при взрыве.

В частности, это возможно при изменении площади контакта горной породы с ВВ и при наличии зазоров между ВВ и породой (стенками скважин). Такие заряды могут быть сформированы в цилиндрических зарядных полостях с помощью специальных оболочек для размещения взрывчатого вещества, в которых чередуются заууженные и расширенные участки (рис.1).

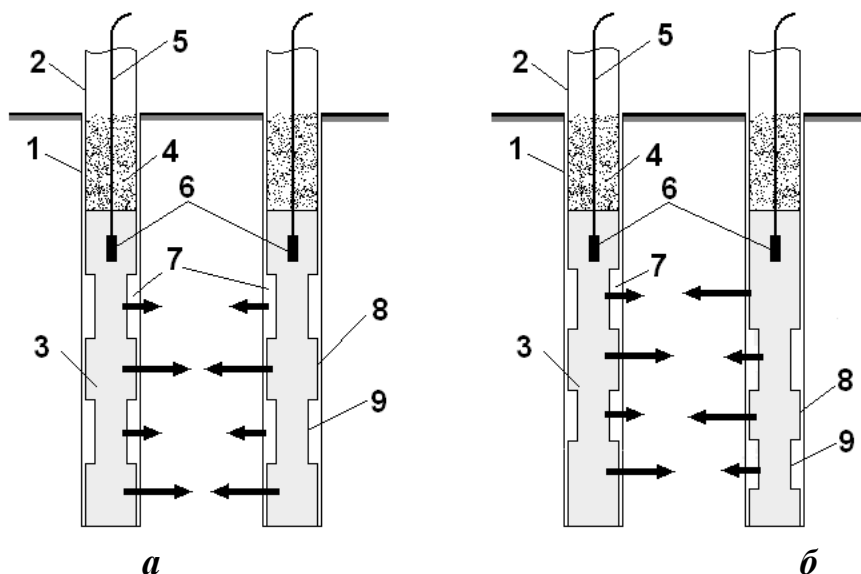


Рис. 1. Конструкции скважинных зарядов ВВ переменного диаметра по высоте уступа: размещение расширенных и зауженных участков ВВ в скважине в оппозитном (а) и в шахматном порядке (б): 1 – скважина, 2 – рукав, 3 – заряд ВВ, 4 – забойка, 5 – ДШ, 6 – боевик, 7 – инертный зазор, 8, 9 – расширенный и зауженный участки ВВ

В результате на зауженных участках удлиненного заряда между ВВ и стенкой скважины образуется кольцевой инертный промежуток (воздушный или водный), исключая непосредственный контакт взрывчатого вещества со стенкой скважины [3].

Инертные зазоры являются экраном для ударных волн, возникающих при взрыве, снижая интенсивность взрывного воздействия (давления) на стенки зарядной полости по сравнению с давлением при непосредственном контакте ВВ с породой. Как следствие, конструкции скважинных зарядов ВВ, изменяющие концентрацию энергии в зарядной полости по ее высоте, обеспечивают разноградиентное нагружение массива горных пород, при котором возрастает роль сдвигающих и растягивающих напряжений в их разрушении, энергоемкость разрушения которыми на два порядка ниже, чем сжимающими нагрузками [4].

При теоретической оценке давления на стенки зарядной полости на расширенном участке было принято, что при непосредственном контакте ВВ со средой, давление на стенки полости ( $P_1$ ) равно половине давления на фронте детонационной волны  $P_1 = \rho_{ВВ} D^2 / 8$ , где  $\rho_{ВВ}$  и  $D$ , соответственно, плотность и скорость детонации ВВ.

На зауженных участках при наличии между стенкой полости и ВВ воздушных зазоров для теоретической оценки давления был использован известный закон расширения продуктов детонации, описываемый двумя адиабатами [5]. Были определены давление  $P_*$  и объем  $V_*$  продуктов детонации в точке сопряжения адиабат:

$$P_* = P_1(2Q\rho_{BB} / 7P_1 - 1/7)^{3/2}, \quad (1)$$

$$V_* = V_y \sqrt[3]{P_1 / P_*}, \quad (2)$$

где  $\rho_{BB}$ ,  $Q$  и  $V_y$  – соответственно, теплота взрыва ВВ и объём, занимаемый ВВ на зауженном участке заряда.

Поскольку расширение продуктов детонации происходит в цилиндрической полости, можно оценить радиус расширения продуктов детонации в точке сопряжения адиабат

$$r_* = r_y \sqrt[6]{\frac{P_1}{P_*}}, \quad (3)$$

где  $r_y$  – радиус заряда на зауженном участке.

Дальнейшее расширение продуктов детонации в зарядной полости радиусом  $r_0$  происходит по второй адиабате, что позволяет определить давление на стенки полости на заданном участке по формуле:

$$P_y = P_* \left( \frac{r_*}{r_0} \right)^{2,5}. \quad (4)$$

Расчеты давления газообразных продуктов на стенки зарядной полости на зауженных и расширенных участках заряда проведены для случая взрыва зарядов Аммонита № 6ЖВ в песчано-цементных моделях.

Для формирования зарядов переменного сечения в цилиндрических зарядных полостях диаметром 16 мм использовались бумажные гильзы. Внутренний диаметр гильзы на зауженных участках – 12 мм, а на расширенных – 14 мм (рис.2).

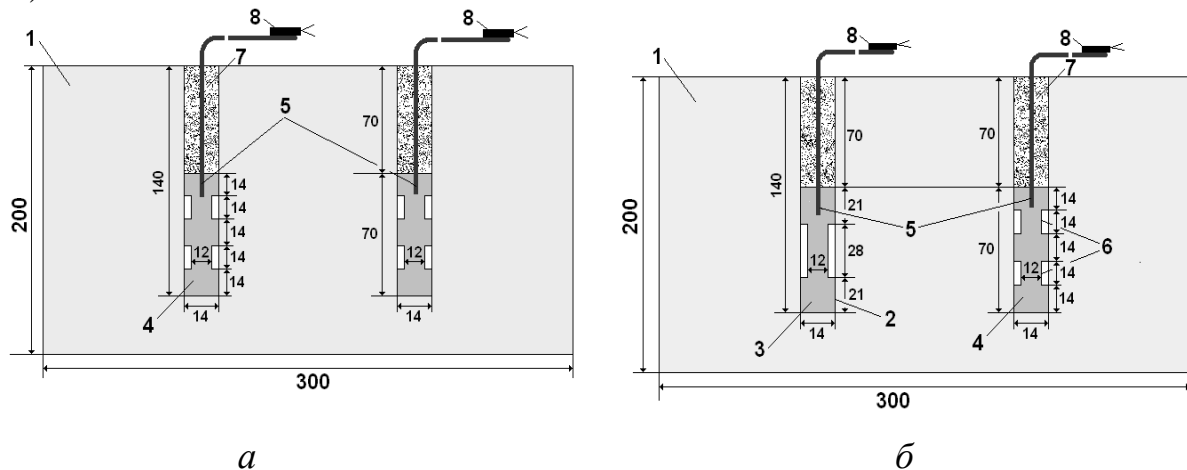


Рис. 2. Схема формирования зарядов ВВ в песчано-цементных моделях в форме параллелепипедов: 1 – песчано-цементная модель; 2 – зарядная полость; 3 – заряд ВВ переменного сечения с одним заужением; 4 – заряд ВВ переменного сечения с двумя заужениями; 5 – детонирующий шнур; 6 – заужения в цилиндрических зарядах; 7 – забойка; 8 – электродетонатор

В качестве ВВ использовался Аммонит № 6ЖВ [6] со следующими свойствами: плотность  $\rho_{\text{ВВ}}=1000$  кг/м<sup>3</sup>, скорость детонации  $D = 3600$  м/с, теплота взрыва  $Q = 4315,7$  кДж/кг.

Это дало возможность рассчитать давление на стенки зарядной полости на расширенном участке  $P_1 = 1620$  МПа и давление на зауженном участке в точке сопряжения адиабат  $P_* = 790$  МПа, а также по формуле (3) найти  $r_* = 1,13 r_y$ .

Давление на стенки зарядной полости на зауженных участках рассчитывалось по формуле (4), которая может быть переписана в виде:

$$P_y = 790 \left( \frac{1,13 r_y}{r_0} \right)^{2,5}. \quad (5)$$

Рассчитанное по этой формуле давление на стенки зарядной полости на зауженных участках зарядов переменного диаметра (рис.2) при  $r_0 = 8$  мм,  $r_y = 6$  мм составило  $P_y = 520$  МПа.

Таким образом, теоретическая оценка давлений на расширенных и зауженных участках удлиненных зарядов переменного диаметра показала, что давление на стенки полости на зауженных участках в 3 раза ниже, чем при непосредственном контакте ВВ со стенками полости. При этом обеспечивается разноградиентное нагружение среды.

Зная перепад давлений  $P_1 - P_y$  на расширенных и зауженных участках, можно оценить размер элемента среды, разрушенного взрывом на расстоянии  $r$  от оси заряда [7]:

$$\Delta a(r) = \frac{\sigma_c}{P_1 - P_y} \left( \frac{r}{r_0} \right)^n \cdot h_y, \quad (6)$$

где  $\sigma_c$  – динамический предел прочности среды на сдвиг;

$h_y$  – длина зауженного участка зарядной полости;

$n$  – коэффициент затухания напряжений в среде с удалением от заряда.

Из формулы (6) следует, что с увеличением разности давлений на расширенных и зауженных участках зарядов переменного диаметра уменьшается размер кусков, на которые разрушается среда.

Экспериментальные исследования разрушающего действия удлиненных зарядов, обеспечивающих разноградиентное нагружение среды, были проведены на полигоне предприятия ЧАО «Промвзрыв» на песчано-цементных моделях.

Модели имели форму параллелепипедов размерами 200×300×300 мм, в которых создавали по две цилиндрические полости диаметром 16 мм и длиной 140 мм. В цилиндрических полостях с помощью бумажных гильз переменного сечения формировались заряды Аммонита № 6 ЖВ переменного диаметра по их длине. Длина колонки заряда составляла 70 мм. Над зарядом размещали песчаную забойку.

Изменение условий нагружения материала моделей при взрыве зарядов переменного сечения достигалось путем расположения расширенных и зауженных участков удлиненных зарядов в смежных зарядных полостях друг против друга (оппозитное расположение) и в шахматном порядке (см. рис. 2).

Масса ВВ в каждом заряде составляла 8,6 г. Суммарная масса ВВ в моделях – 17,2 г, а удельный расход ВВ – 1,43 кг/м<sup>3</sup>. Инициирование зарядов осуществлялось детонирующим шнуром ДШ-9.

Гранулометрический состав разрушенных взрывом моделей исследовался методом ситового анализа [8]. Обработка гранулометрического состава моделей разрушенных взрывом сформированных в цилиндрических полостях зарядов ВВ переменного по их длине диаметра показала, что характер взрывного дробления зависит от расположения расширенных и зауженных участков в смежных зарядных полостях.

При их расположении в шахматном порядке наблюдается уменьшение выхода крупных фракций (3-8) см и, соответственно диаметра среднего куска, по сравнению с оппозитным расположением расширенных и зауженных участков, однако выход мелких фракций (0-0,1) см при этом увеличивается.

Таким образом, результаты полигонных экспериментов подтвердили полученный теоретическим путем вывод о том, что создание неоднородного взрывного нагружения в объеме твердой среды и по длине зарядов способствует улучшению качества ее взрывного дробления.

На практике формирование удлиненных зарядов переменного по их длине диаметра достигается при использовании полиэтиленовых оболочек переменного диаметра. Эффективность рассматриваемых конструкций скважинных зарядов ВВ была подтверждена при производстве взрывных работ в промышленных условиях [9]. При этом область их рационального применения с позиции качества дробления пород и экономии ВВ необходимо рассматривать с учетом типа полезных ископаемых. Если при разработке железорудных месторождений фактор переизмельчения пород (мелкие фракции) при взрыве является положительным (снижаются затраты в процессе обогащения руд), то при взрывном дроблении нерудного сырья (граниты, флюсовые известняки и доломиты) переизмельченная порода – это практически потери полезных ископаемых.

**Выводы.** В результате теоретических и экспериментальных исследований характера разрушения твердых сред при разноградиентном взрывном нагружении установлено, что основным механизмом разрушения является действие сдвиговых напряжений. С увеличением разности давлений на расширенных и зауженных участках удлиненных зарядов переменного диаметра за счет разноградиентного нагружения твердой среды при взрыве зарядов ВВ повышается интенсивность ее разрушения.

При расположении зауженных и расширенных участков в смежных цилиндрических зарядных полостях в шахматном порядке, по сравнению с оппозитным их расположением, качество дробления твердой среды улучшается.

Учитывая тенденцию замены сыпучих взрывчатых смесей эмульсионными ВВ (ЭВВ), используемых для разрушения горных пород как на карьерах, так и в подземных условиях, наиболее перспективными с точки зрения технологической надежности является размещение ЭВВ в гидроизолирующие полиэтиленовые оболочки переменного диаметра. Такие конструкции зарядов позволяют при уменьшенном расходе ВВ создавать интенсивное разноградиентное нагружение горного массива и, как следствие, повысить качество его дробления.

#### Перечень ссылок

1. Закалинский, В.М. (2012) «Перспективные взрывные технологии», ГИАБ, № 2, Москва, Россия, с. 301-307.
2. Ефремов, Э.И. Никифорова, В.А. (2012) Влияние конструкции скважинного заряда ВВ на изменение условий передачи энергии взрыва разрушаемой породе. *Взрывное дело*, № 108/65, ЗАО МВК по взрывному делу при АГН, 157-173.
3. Єфремов, Е.І., Пономарьов, А.В., Баранник, В.В. *Спосіб формування свердловинного заряду вибуховими речовинами* Патент на корисну модель № 6518, Україна, 2005, МВК<sub>7</sub> F 42D 3/04, E 21C 37/00., заявник і власник патенту ВАТ «ДФДК», 20040907557; замовл. 16.09.2004; надрук. 16.05.2015. – Бюл. № 5.
4. Гончаров, С.А., Клюка, О.Ф., Чурилов, Н.Г. (2003) Стратегия ресурсосбережения при разрушении горных пород, *Горн. журн.* – 2003. - № 5, 26-30.
5. Ефремов, Э.И., Никифорова, В.А., Ромашко, А.М. (2010) Способ управления размерами зоны переизмельчения твердых сред при их взрывном разрушении, *Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва*. – Кременчук: КДПУ, 2010 - № 1(5), 7-10.
6. Дубнов, А.В., Бахаревич, Н.С., Романов, А.И. (1988) *Промышленные взрывчатые вещества*, М.: Недра, 1988. – 360 с.
7. Курінний, В.П. (2009) *Фізичні аспекти руйнування гірських порід вибухом*. – Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т, 2009. – 158 с.
8. Перов, В.А., Андреев, Е.Е., Биленко, Л.Ф. (1990) *Дробление, измельчение, грохочение*, М.: Недра, 1990. – 302 с.
9. Ефремов, Э.И., Белоконь, М.П., Николенко, Е.В., Пономарев, А.В. (2005) Опытные промышленные испытания технологии заряжения и эффективности взрывания необводненных горных пород зарядами переменного диаметра. *Межведомственный сборник научных трудов, Геотехническая механика*, вып. 58, 2005, 13-18.

#### АНОТАЦІЯ.

**Мета.** Дослідити руйнуючу дію вибуху подовжених зарядів вибухової речовини (ВР) змінного діаметру, що забезпечує за рахунок різноградієнтного навантаження твердих середовищ зниження енергоємності їх руйнування.

**Методика дослідження.** Використаний аналітичний метод, заснований на фундаментальних положеннях механіки суцільного середовища і фізики вибуху, а також метод експериментальних досліджень на моделях з наступною обробкою результатів їх вибухового руйнування.

**Результати досліджень.** Різноградієнтне вибухове навантаження в об'ємі середовища залежить від конструктивних особливостей подовжених зарядів вибухових речовин та їх розміщення у руйнуючому середовищі. Експериментами у полігонних умовах встановлено, що під час вибуху системи подовжених зарядів ВР змінного по їх довжині діаметру за рахунок пре-

валювання у силовому полі зсувних напружень найбільший руйнуючий ефект досягається при розміщенні звужених та розширених ділянок зарядів ВР у суміжних зарядних порожнинах у шахматному порядку у порівнянні із опозитним розміщенням (напроти один одного) таких ділянок.

**Наукова новизна.** При теоретичному розгляді враховується, що основним механізмом руйнування середовища під час вибуху подовжених зарядів ВР змінного діаметру на контакті із руйнуючим середовищем є його миттєве руйнування під дією зсувних напружень.

**Практичне значення.** Результати роботи дозволяють обґрунтувати ефективність способів відбійки гірських порід вибухом подовжених зарядів ВР змінного діаметру за рахунок створення різноградієнтних полів напружень, що дозволить підвищити коефіцієнт корисної дії вибуху, зменшити витрати на вибухові роботи, вихід перездрібнених фракцій і обсяги пилогазових викидів.

**Ключові слова:** *тверде середовище, вибухове руйнування, подовжений заряд змінного діаметру, різноградієнтне навантаження*

### ABSTRACT

**Purpose.** To investigate the destructive action of elongated explosive charges of variable diameter which reduces the solid media failure energy consuming.

**The methodology.** Methods based on the fundamental principles of continuum mechanics and explosion physics are used, as well as the method of experimental studies on models with subsequent processing of the results of their explosive destruction.

**Finding.** The different gradient explosive loading in the volume of the medium depends on the design features of the elongated explosive charges and their location in the environment being destroyed. Experiments in the polygon conditions have established that when a system of elongated explosive charges of variable diameter along their length, is blasted due to the prevalence of shear stresses in the force field, the greatest destructive effect is achieved when the narrowed and expanded sites of explosive charges are located in adjacent charging cavities in a staggered manner in comparison with oppositic placement (opposite each other) of such sites.

**The originality.** It is taken into account that the main mechanism for the destruction of the medium during the explosion of elongated explosive charges of variable diameter at the contact with the destroyed medium is its instantaneous destruction under the action of shear stresses.

**Practical implications.** The results of the work make it possible to justify the effectiveness of rock breaking methods by blasting elongated explosive charges of variable diameter due to the creation of different gradient stress fields, which will improve the efficiency of the explosion, reduce the costs of blasting, the yield of small-sized fractions and the amount of dust and gas emissions.

**Keywords:** *hard medium, blasted breaking, elongated charge variable diameter, different gradient loading*