

К.С. Ищенко, С.В. Коновал, И.Л. Кратковский, В.В. Круковская, А.П. Круковский

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАССИВЕ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВЕ ЗАРЯДОВ ВВ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ**

*Приведены результаты экспериментальных исследований по разрушению моделей взрывом зарядов, имеющих различную форму поперечного сечения. Исследованы процессы формирования поля напряжений в породном массиве при взрыве зарядов ВВ различной формы с использованием метода математического моделирования и конечных элементов. Проанализировано изменение распределения значений геомеханических параметров вокруг заряда.*

---

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У МАСИВІ МІЦНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ ВИБУХУ ЗАРЯДУ ВВ РІЗНОЇ ФОРМИ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ**

*Наведено результати експериментальних досліджень з руйнування моделей вибухом зарядів, що мають різну форму поперечного перерізу. Досліджено процеси формування поля напружень у породному масиві при вибуху зарядів ВВ різної форми з використанням методу математичного моделювання та скінченних елементів. Проаналізовано зміну розподілу значень геомеханічних параметрів навколо заряду.*

---

### **EXPERIMENTAL STUDIES OF GEOMECHANICAL PROCESSES IN HARD ROCK MASSIF DURING BLASTING OF EXPLOSIVE CHARGE IN DIFFERENT CROSSCUT SHAPE**

*Experimental studies on destruction of blast models of charges with different crosscut shape are conducted. The processes of the stress field formation in rock mass in the blast explosive charges of different shapes with using mathematical modelling and finite element method is reviewed. The change of distribution of values around geotechnical parameters of the charge is analysed.*

---

#### **ВВЕДЕНИЕ**

При разработке рудных и нерудных полезных ископаемых взрывоподготовка горных пород к выемке является основным звеном в последующей переработке полез-

ных ископаемых. Поэтому высокая эффективность работы карьеров и ГОКов в целом достигается при качественной отбойке горных пород взрывом с последующей высокопроизводительной работой дробильного и погрузочно-транспортного оборудования.

Изменением условий передачи энергии взрыва можно уменьшить потери энергии в ближней зоне на переизмельчение до пылевидных фракций и перераспределить ее на общий объем разрушения, что позволит повысить эффективность полезного действия взрыва. Поэтому важным звеном в управлении процессами передачи энергии взрыва горной породе и, как следствие, качеством дробления и экологической безопасности добычи полезных ископаемых являются конструкции заряда ВВ. В связи с этим учет условий передачи запасенной во взрывчатом веществе энергии, определяемых особенностями конструкции заряда ВВ, их действием на разрушаемую среду позволяют обоснованно подойти к выбору рациональных параметров БВР, способу инициирования зарядов ВВ и схем их соединения, обеспечивающих высокую эффективность взрывных работ.

*Цель работы* – исследование характера распределения поля напряжений в массиве при взрыве заряда ВВ различной формы и численное решение данной задачи.

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методикой исследований предусматривалось проведение двух этапов работ:

– экспериментальные исследования характера разрушения среды от взрыва заряда ВВ различной формы на моделях;

– имитационное моделирование и численное решение задачи распределения поля напряжений в массиве от взрыва заряда ВВ различной формы.

*Экспериментальные исследования характера разрушения среды от взрыва заряда ВВ различной формы на моделях.* Для изучения характера разрушения среды зарядами ВВ различной формы использовали оптически активный материал – листовое органическое стекло (полиметилметакрилат) со стабильными прочностными, механическими и оптическими константами. Для изготовления моделей применялось листовое органическое стекло постоянной

толщины 0,015 м. С помощью ленточной или дисковой пилы в лаборатории вырезали модели размером 0,2×0,2 м.

Методикой предусматривалось три серии экспериментальных исследований с различными формами зарядных полостей: цилиндрическая, квадратная и треугольная. На подготовленных моделях фломастером, для удобства, при изучении характера, оценки характера развития трещин и зоны переизмельчения проводили осевые линии, в местах пересечения которых, в центре одной из моделей, сверлом диаметром 5 мм сверлилась цилиндрическая взрывная полость на всю толщину модели, а в двух других – полости диаметром 4,5 мм. Затем лобзиком формировали полости квадратной и треугольной формы. В подготовленные взрывные полости размещали высокобризантное взрывчатое вещество массой 150 мг. Инициирование заряда осуществлялось электрическим разрядом высокой мощности. При проведении экспериментальных взрывов на моделях из органического стекла соблюдалось постоянство площади поперечного сечения заряда, его масса, расположение точки инициирования и типа применяемого ВВ. Виды моделей, разрушенных взрывом зарядов ВВ различной формы, приведены на рис. 1.

Как видно из данных рис. 1 вокруг зарядной полости наблюдается неравномерное распределение различных видов деформаций, характер которых зависит от формы поперечного сечения заряда. Разрушение представлено зоной переизмельчения, а также густой сетью криволинейных радиальных трещин.

Рассмотрим действие заряда, имеющего круговую форму поперечного сечения (рис. 1, а). Ближняя к заряду зона характеризуется весьма большими по объему деформациями, что выражено в образовании значительной по размерам зоны переизмельчения. В то же время наблюдается разветвленная сеть радиальных трещин, распространяющихся до границ модели. Основные трещины распространяются равномерно от заряда во все стороны.



Рис. 1. Характер разрушения модели из органического стекла взрывом заряда ВВ различной формы: а – цилиндрическая; б – треугольная; в – квадратная

Таким образом, действие зарядов кругового поперечного сечения обуславливает равномерное распределение напряжений в разрушаемой взрывом среде. Однако при взрывании в зажатой среде равномерно распределенные напряжения не обеспечивают желаемого качества дробления горных пород, вызывает образование заколов в тылу разрушаемого массива. При следующих взрывах данное обстоятельство осложняет условия взрывания, что приво-

дит к увеличению выхода негабаритных фракций.

При взрывании заряда, имеющего треугольное сечение (рис. 1, б), картина разрушения модели несколько иная, чем при действии сплошного цилиндрического заряда. Оценивая результаты разрушения модели, можно выделить следующие характерные особенности работы такой формы заряда. В данном случае характер распределения трещин имеет четко выраженную асимметрию. В вершинах треугольника концентрируются максимальные напряжения, которые способствуют формированию более густой сети трещин в этих зонах. Анализ максимальной длины трещин показал, что вектор максимальной плотности потока энергии заряда такой конструкции направлен перпендикулярно граням треугольной призмы, создавая интенсивную сеть трещин вокруг зарядной полости с радиусом  $5 - 10 R_z$  ( $R_z$  – радиус заряда). Сформировавшееся разноградиентное поле напряжений создает в модели разветвленную сеть трещин, также ориентированных перпендикулярно граням зарядной полости в форме треугольной призмы.

На рис. 1, в представлена картина разрушения плоской модели зарядом, имеющую квадратную форму поперечного сечения. Как и для треугольной призмы, радиальные трещины, образовавшиеся при взрыве, характеризуются четко выраженной направленностью. Наибольшая их длина с максимальным их раскрытием до границ модели наблюдается в местах максимальной концентрации напряжений – в углах квадрата. Основная сеть трещин формируется также перпендикулярно боковой поверхности зарядной полости в виде квадратной призмы. При этом зона пластических деформаций незначительна и равна  $2 - 3 R_z$ , а зона переизмельчения составляет  $3 - 5 R_z$ . Анализируя конфигурацию зоны разрушения заряда с квадратным сечением, можно отметить ее совпадение по форме с зоной разрушения от взрыва цилиндрического заряда.

Имитационное моделирование и численное решение задачи распределения поля напряжений в массиве от взрыва заряда ВВ различной формы. При моделировании взрывного воздействия необходимо учитывать как изменения напряженного состояния породного массива, так и участие

газообразных продуктов детонации в процессе разрушения.

Напряженно-деформированное состояние породного массива в окрестности горной выработки, проницаемость среды и нестационарное движение газа в нарушенном массиве описываются системой уравнений

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + Y_i(t) + T_i(t) + P(t) = \rho_n \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right), \quad i, j = x, y;$$

$$\mu_e \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0; \quad k = f(\sigma_{ij}, t), \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij,j}$  – производные от компонент тензора напряжений по  $x, y$ ;

$t$  – время;

$X_i(t)$  – проекции внешних сил, действующих на единицу объема твердого тела;

$Y_i(t)$  – проекции сил от действия взрыва;

$T_i(t)$  – проекции сил, вызванных внутренним трением, действующих на единицу объема тела,  $T_i(t) = -c_g \partial u_i / \partial t$ ;  $c_g$  – коэффициент демпфирования;  $u_i$  – перемещения;

$P(t)$  – проекции сил, обусловленных давлением флюидов в трещинно-поровом пространстве;

$\rho_n$  – плотность породы;

$\mu_e$  – вязкость газа;

$p$  – его давление;

$k$  – поле коэффициентов проницаемости.

Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора, которое учитывает возможность возникновения разрушения как в результате сдвига, так и в результате отрыва.

Ранее авторами была разработана математическая модель [1, 2] взрывания шпуровых зарядов в забое горной выработки с применением эмпирических формул В.А. Боровикова и И.Ф. Ванягина для расчета радиальной и тангенциальной со-

ставляющих взрывной волны [3]. Однако эти эмпирические соотношения справедливы только для взрыва сосредоточенных зарядов, изменение поля напряжений при взрыве зарядов другой формы не исследовалось. Поэтому взрывное воздействие зарядов сложной формы моделируется иначе. Как отмечает Л. Белопухов в [4], «разрыв функций давления, плотности и скорости движения среды при взрыве», т.е. мгновенный скачок параметров получил название ударной волны. Но слово «волна» не совсем точно передает характер явления, поскольку в обычном понимании волна характеризуется периодичностью, частотой, а скачок – это однократное резкое изменение». Поэтому автор работы [4] считает, что правильнее называть явление ударным импульсом. На наш взгляд, действие взрыва необходимо моделировать путем приложения соответствующей нагрузки в узлах, принадлежащих контуру заряда.

Расчеты проводились с применением метода конечных элементов. Расчетная схема участка горных пород со свободной поверхностью и зарядом ВВ квадратной формы поперечного сечения показана на рис. 2.

Взрывание происходит на первой временной итерации.

Рассмотрим случаи, когда заряд имеет квадратную, треугольную и круговую форму поперечного сечения (рис. 3), причем масса ВВ во всех трех случаях одинакова.

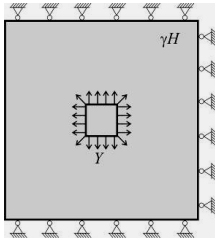


Рис. 2. Расчетная схема

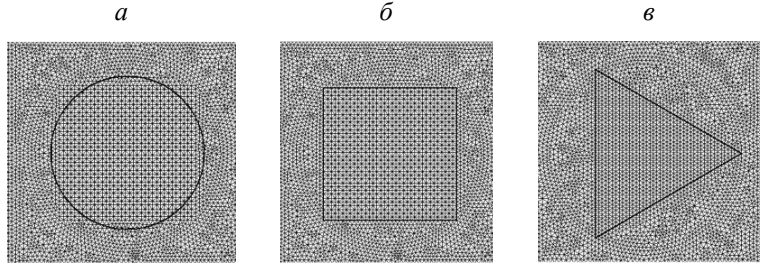


Рис. 3. Центральные фрагменты конечно-элементной сетки для зарядов ВВ разной формы: а – цилиндрический; б – квадратный; в – треугольный

Начальные и граничные условия для данной задачи:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma h; & p|_{\Omega_1(t)} &= p_0; \\
 \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \gamma h; & p|_{\Omega_2} &= 0,1 \text{ МПа}; \\
 p|_{t=0} &= p_0; & u_x|_{\Omega_3} &= 0; \\
 p|_{t=t_{взр}, x=x_{взр}, y=y_{взр}} &= \frac{P_d}{2}; & u_y|_{\Omega_4} &= 0,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $\gamma$  – усредненная плотность вышележащих горных пород;

$h$  – глубина разработки;

$\lambda$  – коэффициент бокового распора;

$p_0$  – начальное давление газа в трещинно-поровом пространстве;

$t_{взр}$  – момент взрыва;

$x_{взр}, y_{взр}$  – координаты узлов заряда;

$P_d$  – детонационное давление;

$\Omega_1(t)$  – изменяющаяся во времени граница области фильтрации;

$\Omega_2$  – свободная поверхность;

$\Omega_3$  – правая вертикальная граница внешнего контура;

$\Omega_4$  – горизонтальные границы внешнего контура.

Исходя из полученных авторами [6] данных, можно сказать, что детонационное давление для основных ВВ, применяемых

на практике, изменяется в пределах  $p_d = 1500 - 24000$  МПа.

Чтобы получить решение системы (1) с начальными и граничными условиями (2) на определенном временном промежутке применяется конечно-разностный метод. При этом считается, что в начальный момент времени  $t = 0$  распределение напряжений и давления задано, и для достаточно малых значений  $\Delta t$  с помощью итерационных соотношений получаем распределение напряжений, давления газов взрыва, скоростей их течения и расходов на момент времени  $t + \Delta t$ . Этот процесс продолжается от исходного состояния до любого текущего момента времени.

В результате расчетов получим распределение геомеханических параметров в различные моменты времени (рис. 4).

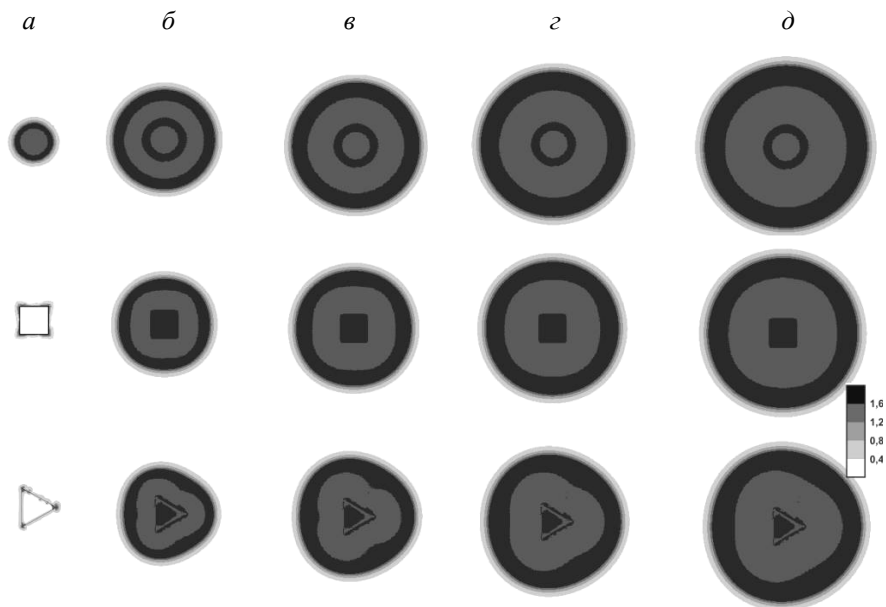


Рис. 4. Распределение значений параметра  $Q$  для зарядов различной формы поперечного сечения и зоны неупругих деформаций на различных временных итерациях – а, б, в, г, д

Из представленных рисунков видно, что зоны неупругих деформаций вокруг зарядов практически повторяют контур заряда со сглаженными углами, со временем приобретая форму круга.

## ВЫВОДЫ

На моделях из оптически активного материала изучен характер разрушения твердой среды зарядами различной формы поперечного сечения.

Установлено, что заряды квадратной и

треугольной формы позволяют формировать разноградиентное поле напряжений, что увеличивает эффективность разрушения твердых сред за счет преобладания роли сдвиговых и растягивающих напряжений.

Компьютерным моделированием с помощью метода конечных элементов рассчитаны зоны неупругих деформаций вокруг зарядов, которые на контакте «ВВ-среда» практически повторяют форму заряда со сглаженными углами, трансформируясь по мере удаления от центра заряда в окружность.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круковская В.В. Математическое моделирование геомеханических и фильтрационных процессов при проходке выработки буровзрывным способом в режиме сотрясательного взрывания / В.В. Круковская, А.П. Кру-

ковский // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Д., 2009. – № 81.

2. Пат. 86212 Україна МПК 7 E21C 39/00. Спосіб імітаційного моделювання напружено-деформованого стану гірського масиву при вибуху / В.В. Круковська, К.С. Іщенко, О.П. Круковський, О.К. Іщенко.– замовл. 08.04.13;

№ и 2013 04403. – *замовник і власник патенту ІГТМ НАН України; опубл. 25.12.13, Бюл. № 24.*

3. Боровиков В.А. *Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород / В.А. Боровиков, И.Ф. Ваягин. – М.: Недра, 1990. – 234 с.*

4. Белопухов Л. *Ударные волны и детонация / Л. Белопухов // Квант. – 2008. – № 1. – С. 4 – 8.*

## ОБ АВТОРАХ

*Ищенко Константин Степанович – к.т.н., с.н.с. отдела механики взрыва горных пород Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.*

*Коновал Сергей Владимирович – аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства Черкасского государственного технологического университета.*

*Кратковский Игорь Леонидович – к.т.н., с.н.с. отдела механики взрыва горных пород Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.*

*Круковская Виктория Викторовна – д.т.н., с.н.с. отдела управления динамическими проявлениями горного давления Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.*

*Круковский Александр Петрович – д.т.н., заместитель директора отдела горной термоаэродинамики и автоматизированных систем Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.*

