

УДК 622.235.8

**Коновал С.В.**, аспирант  
(Государственный ВУЗ «ЧГТУ»)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ СРЕД ЗАРЯДАМИ ВВ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ**

**Коновал С.В.**, аспірант  
(Державний ВНЗ «ЧДТУ»)

## **МОДЕЛЮВАННЯ ВИБУХОВОГО РУЙНУВАННЯ ТВЕРДИХ СЕРЕДОВИЩ ЗАРЯДАМИ ВВ РІЗНОЇ ФОРМИ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕТИНУ**

**Konoval S.V.**, Doctoral Student  
(State H E I «CSTU»)

## **SIMULATION OF EXPLOSIVE BREAKING OF SOLID MEDIA BY EXPLOSIVE CHARGES WITH DIFFERENT CROSS-SECTION SHAPES**

**Аннотация.** Проведено исследование механизма хрупкого разрушения твердых сред и параметров волн напряжений от взрыва зарядов ВВ различной формы поперечного сечения. В лабораторных условиях для проведения экспериментальных исследований изготавливались песчано-цементные модели кубической формы при соотношении компонентов 1:1. В процессе изготовления моделей для оценки результатов дробления и параметров волн напряжений от взрыва заряда ВВ различной формы поперечного сечения в песчано-цементное тесто размещали вставки для формирования зарядной полости и датчики из ЦТС-19. Для разрушения моделей использовали ВВ типа Комполайт. Инициирование зарядов осуществляли нелинейной системой инициирования типа «Импульс», «Искра», NONEL. Результаты дробления оценивали методом ситового анализа. По полученным результатам построены зависимости распределения гранулометрического состава разрушенных моделей зарядами различной формы. Рассчитаны амплитудные значения максимальных волн напряжений в волне сжатия. Сформулированы выводы по результатам экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** твердая среда, взрывчатое вещество, скважинные заряды, взрыв, волны напряжений, разрушение.

**Введение.** Взрывные работы на горных предприятиях в значительной мере определяют эффективность последующих технологических процессов. Одним из методов управления действием взрыва, а, следовательно, и дроблением горных пород, является правильный выбор конструкции заряда ВВ. При этом важно, чтобы по высоте колонки удлиненного заряда ВВ осуществлялось неоднородное нагружение окружающей заряд среды, поскольку возрастает роль растягивающих и сдвигающих напряжений в процессе ее разрушения.

**Актуальность работы.** Полезное действие взрывных нагрузок в значительной степени зависит от условий передачи энергии разрушаемому средам.

Уменьшить потери энергии в ближней зоне на переизмельчение до пылевидных фракций и перераспределить ее на общий объем разрушения

можно путем изменения условий передачи энергии взрыва.

Это позволит повысить коэффициент полезного действия взрыва. Поэтому управление процессами передачи энергии взрыва горной породе и, как следствие, качество дробления, а также экологической безопасности является актуальной проблемой.

При взрыве условия передачи запасенной во взрывчатом веществе энергии определяются особенностями конструкций зарядов, что позволит создать разноградиентное и разнонаправленное поле напряжений и увеличить время действия взрывной разрушающей нагрузки взрыва на среду [1-6].

**Цель работы.** Цель экспериментальных исследований – обоснование новых конструкций зарядов путем сравнения разрушающего действия и величины амплитуды напряжений в волне сжатия от взрыва одинаковых по массе зарядов ВВ различной формы поперечного сечения.

**Методика исследований.** Для проведения экспериментальных исследований по изучению волнового и разрушающего действия взрыва зарядов ВВ различной формы поперечного сечения в однородных твердых средах нами разработан новый способ моделирования их разрушения. Суть его заключается в том, что вначале при формировании модели кубической формы с ребром 150 мм, замешивают структурно однородную песчано-цементную смесь, которую затем заливают в металлическую форму. После этого в центре модели размещают вставки различной формы сечения – цилиндрическую, квадратную и треугольную на глубину  $(0,5-0,6)h_{\text{мод}}$ , а на расстоянии  $(8-10)r_0$ , от оси заряда на глубину  $0,5h_{\text{мод}}$  устанавливают пьезоэлектрические датчики. После 30 % набора прочности модели из нее вынимают вставки, а саму модель извлекают из формы и выдерживают до максимальной прочности в соответствии с действующими ГОСТами. Далее в подготовленных взрывных полостях формируют заряд ВВ, устанавливают инициатор, герметизируют забойкой и подрывают. По полученным значениям амплитуды максимальных механических напряжений в волне сжатия, зафиксированных датчиками, электрические сигналы кодируются и передаются на цифровой осциллограф. По осциллограммам вычисляют максимальные механические напряжения. Схема модели с размещенным в ней пьезоэлектрическим датчиком приведена на рис. 1.

Керамические пьезодатчики ЦТС-19, установленные в моделях, представляют собой квадранты круглых дисков диаметром  $d = 14,8$  мм и толщиной  $h = 0,65$  мм. Перед установкой в модели были измерены электрические емкости круглых дисков, а затем, с учетом того, что электрическая емкость пропорциональна площади плоского конденсатора, рассчитывались электрические емкости установленных в моделях пьезодатчиков.

Площадь каждого датчика ( $S_d$ ) была равна  $1/2-1/4$  площади круглого диска диаметром 14,8 мм, поэтому  $S_d = 8,6-4,3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>. Тарировка пьезоэлектрических преобразователей осуществлялась методом резонанса - антирезонанса, а затем расчетным путем определялся пьезомодуль  $d_{33}$  каждого датчика [7]. Параметры применяемых пьезоэлектрических датчиков и электрические амплитуды регистрируемых ими сигналов приведены в табл. 1.

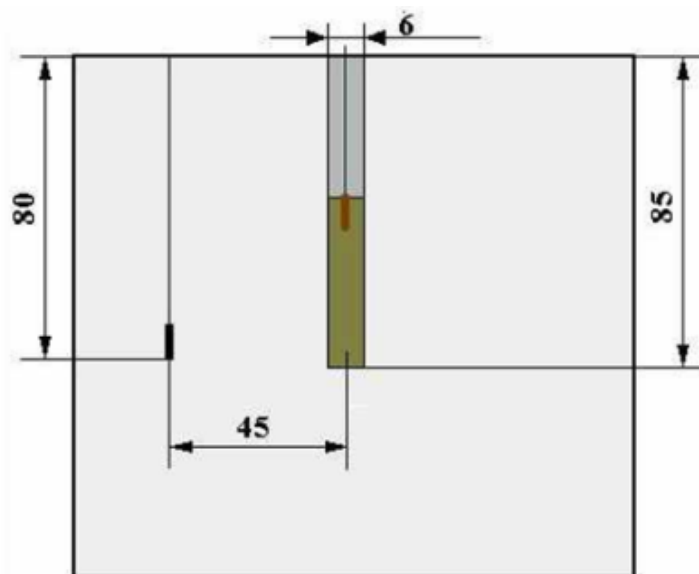


Рисунок 1 – Схема расположения в модели пьезодатчика относительно заряда ВВ

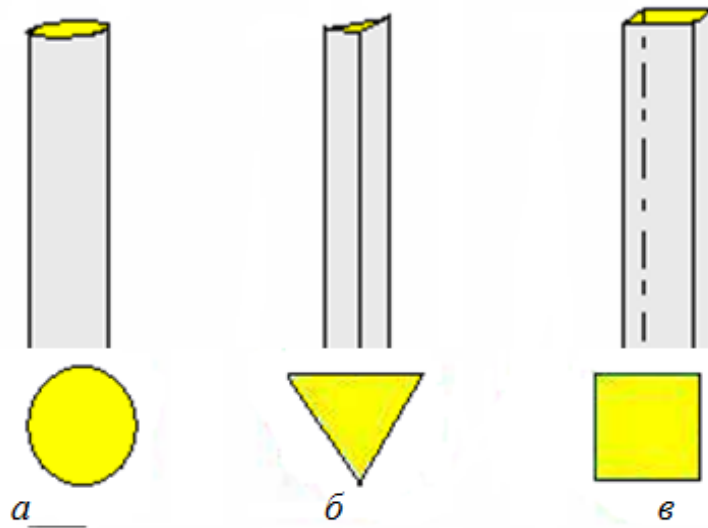
Таблица 1 – Параметры пьезоэлектрических преобразователей

№№ Датчика (табл.)	Электрическая емкость, пФ, $C \cdot 10^{-10}$	Площадь датчика, $S_d \cdot 10^{-5}$ , м <sup>2</sup>	Пьезомодуль $d_{33} \cdot 10^{-10}$ , К/Н	U, В	Чувствительность осциллографа	
					по амплитуде, В/дел	по длительности мкс/дел
1 (41)	0,164	8,6	3,13	220	20	50
2 (43)	0,152	8,6	2,93	280		
3 (28)	7,85	4,3	2,86	160		
4 (48)	0,148	8,6	2,50	220		
5 (25)	7,65	4,3	2,77	220		
6 (48)	0,148	8,6	2,50	300		
7 (25)	7,65	4,3	2,77	260		

В подготовленных зарядных полостях были сформированы заряды с различным поперечным сечением ВВ типа Комполайт – цилиндрической, квадратной и треугольной формы. Взрывчатая смесь помещалась в подготовленные бумажные патроны различной формы сечения. Масса ВВ в заряде составляла 2,0 г для всех серий экспериментов, а в качестве забойки использовался кварцевый песок фракции 0,25 мм. Удельный расход ВВ составлял – 0,3 кг/м<sup>3</sup>. Высота колонки заряда в зависимости от сечения колебалась в пределах 25-35 мм. Для инициирования зарядов применяли отрезки волновода длиной 0,8 м НЭСИ «Импульс» соединенный с капсулом-детонатором. Конструкции зарядов приведены на рис. 2.

Так как разрушающее действие взрыва сильно зависит от физико-механических и прочностных свойств разрушаемой среды, одновременно с изготовлением основных моделей изготавливались образцы для определения

плотности  $\rho$ , скорости продольных волн  $C_p$  и прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$  материала моделей.



*a* – заряд постоянного сечения; *б* – заряд в сечении в форме треугольника;  
*в* – заряд в сечении в форме квадрата;

Рисунок 2 – Конструкции зарядов

Образцы для определения физико-механических свойств имели форму кубиков с ребром  $40 \pm 2$  мм. Скорость продольных волн определялась с помощью разработанного в ИГТМ НАН Украины стенда, а определение плотности образцов и испытание их на прочность при одноосном сжатии проводились на стандартном оборудовании и в соответствии с действующими ГОСТами.

Результаты определения физико-механических свойств материала моделей приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Физико-механические свойства материала моделей

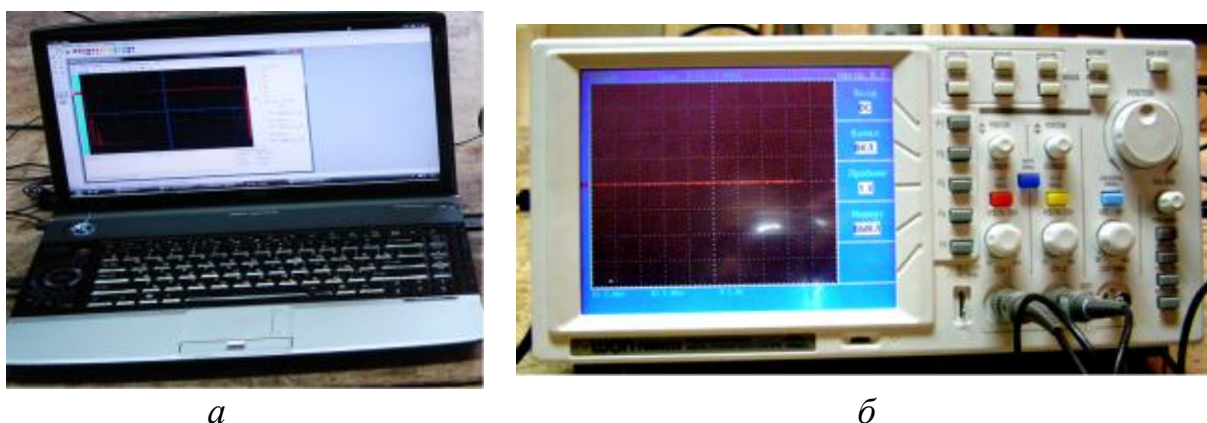
Масса образцов, $m, \cdot 10^{-3}$ , кг	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость продольных волн, $C_p$ , м/с	Прочность на сжатие, $\sigma_{сж}$ , МПа
Среднее значение, 131,2	Среднее значение 1910	Среднее значение 3080	Среднее значение 13,0
Средние квадратичные отклонения, $\Delta$ , кг/м <sup>3</sup>	30	40	1,7
Коэффициенты вариации, $v_{вар}$ , %	1,6	1,6	6,9

Взрывы производились в толстостенной металлической обрезиненной взрывной камере. Общий вид модели, установленной во взрывной камере, до и после взрыва представлен на рис. 3.



Рисунок 3 – Общий вид модели, расположенной во взрывной камере (а), и характер ее разрушения (б)

При взрыве зарядов ВВ в моделях максимальные механические напряжения в волне сжатия, преобразованные пьезоэлектрическими датчиками в электрические сигналы, поступали на цифровой запоминающий осциллограф типа OWON серии POS 58225. Перед измерениями проводится калибровка осциллографа и устанавливалась необходимая для данного эксперимента чувствительность его по амплитуде и длительности импульса величин напряжений, полученных при пробных взрывах. Считываемая информация кодировалась и передавалась на вычислительный комплекс – NOUTBOOK (рис. 4), где с использованием программного обеспечения обрабатывалась и отображалась на мониторе в диалоговом окне в виде осциллограммы с числовыми данными по всему диапазону измерений (рис.5). По осциллограммам определяли максимальные величины напряжений и длительность импульса.



а – ПК NOUTBOOK; б – запоминающий цифровой осциллограф OWON, серия POS 58225

Рисунок 4 – Общий вид измерительно–вычислительного комплекса

После каждого взрыва проводилось исследование гранулометрического состава разрушенных моделей методом ситового анализа с применением набора лабораторных сит по известным методикам [7]. Сита устанавливали сверху вниз от крупных размеров к мелким. Разрушенный материал модели помещали на верхнее сито, и весь набор встряхивали в течение 10 минут. Остаток на каж-

дом сите взвешивали на технических весах с точностью до 0,1 %. Сумма всех полученных классов крупности не должна более чем на 1 % расходиться с массой исходной модели. Сумма всех классов крупности принимается за 100 %. Выход классов получают делением массы каждого класса на исходную массу. Для проведения ситового анализа использован набор сит с отверстиями размером 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 7,0; 10,0; 12,0; 16,0; 20,0; 26,0; 30,0; 40,0; 50,0; 60,0; 70,0; 80,0 мм.

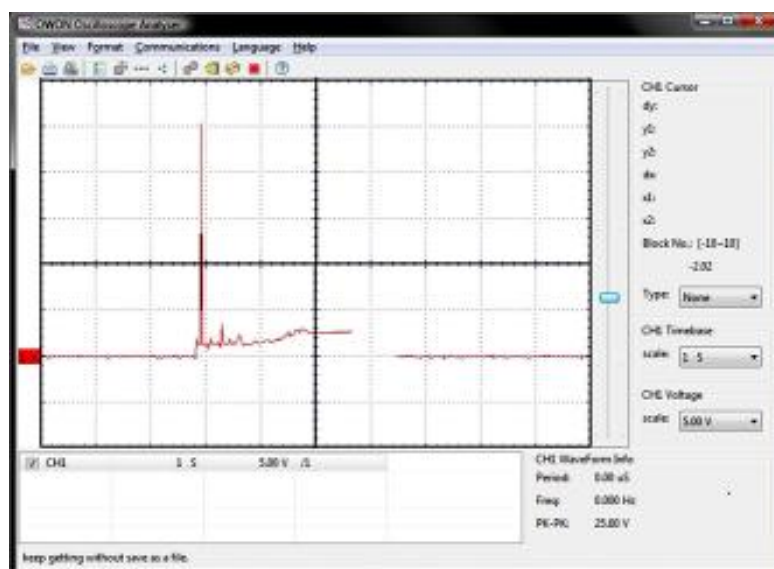


Рисунок 5 – Типичная осциллограмма амплитуды сигналов максимальных напряжений в волне сжатия, записанные с помощью пьезоэлектрических преобразователей

**Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение.** Экспериментальные исследования волнового и разрушающего действия взрыва зарядов различной формы поперечного сечения были проведены в полигонных условиях гранитного карьера «Сивач» ПрАТ "Украгровзрывпром".

На подготовленных песчано-цементных моделях с установленными в них пьезоэлектрическими датчиками запланировано проведение две серии экспериментальных исследований:

- разрушение твердых сред зарядами различной формы поперечного сечения при различных условиях передачи энергии, разрушаемой среде;
- разрушение твердых сред зарядами различной формы поперечного сечения в сформированных в модели взрывных полостей в форме цилиндра, квадратных и треугольных призм.

Датчики в моделях способны преобразовывать механическое волновое воздействие взрыва на них в электрические сигналы, регистрируемые осциллографом.

Механические напряжения  $\sigma$  (ГПа) в материале моделей в местах расположения пьезодатчиков для фиксируемых осциллографом электрических напряжений  $U$  (В) рассчитывались по формуле

$$\sigma = \frac{CU}{d_{33}S_d},$$

где  $C$  – электрическая емкость пьезодатчика (Ф);  $d_{33}$  – его пьезомодуль (К/Н);  $S$  – площадь поверхности датчика, нормальная к направлению волны напряжений от взрыва заряда ВВ ( $\text{м}^2$ ).

В ходе обработки результатов экспериментов рассчитывались напряжения в волне сжатия на одинаковом удалении от оси заряда, равном 9 радиусов зарядной полости (45 мм) для различной формы поперечного сечения зарядов.

При обработке гранулометрического состава определялись общая масса разрушенной взрывом модели, содержание мелких фракций, содержание крупных фракций, площадь вновь образованной поверхности и диаметр среднего куска. Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты разрушения песчано-цементных моделей от действия взрыва заряда ВВ различной формы поперечного сечения и условий передачи энергии взрыва разрушаемой среде

Конструкции зарядов	Масса модели, $m$ , кг	Диаметр среднего куска $d_{cp}$	Содержание фракций (в %), разрушенных взрывом модели		Напряжения в волне сжатия, ГПа	Вновь образованная поверхность, $S_n$ , $\text{см}^2$
			$d_i < 20$ мм	$d_i > 50$ мм		
Заряд постоянного сечения	5,735	41,83	27,0	53,0	0,14	83010
Заряд в сечении квадратная призма, размещенная в цилиндрической полости с воздушным зазором	6,476	35,8	31,0	45,0	0,17	171408
Заряд в сечении треугольная призма, размещенный в цилиндрической полости с воздушным зазором	6,319	49,0	20,0	60,0	10,2	98600
Заряд в модели – квадратная призма, размещенный к волне напряжений:	6,596	32,8	32,0	40,0	0,15	225006
					боковой поверхностью	
Заряд в модели – треугольная призма, размещенный к волне напряжений:	6,601	31,2	37,0	32,0	14,2	237828
					боковой поверхностью	

По результатам ситового анализа и обработки полученных данных грансостава построены кумулятивные кривые распределения гранулометрического состава разрушенных моделей зарядами ВВ различных конструкций (рис. 6) и гистограммы распределения фракционного состава продуктов разрушения модели взрывом (рис. 7 и 8).



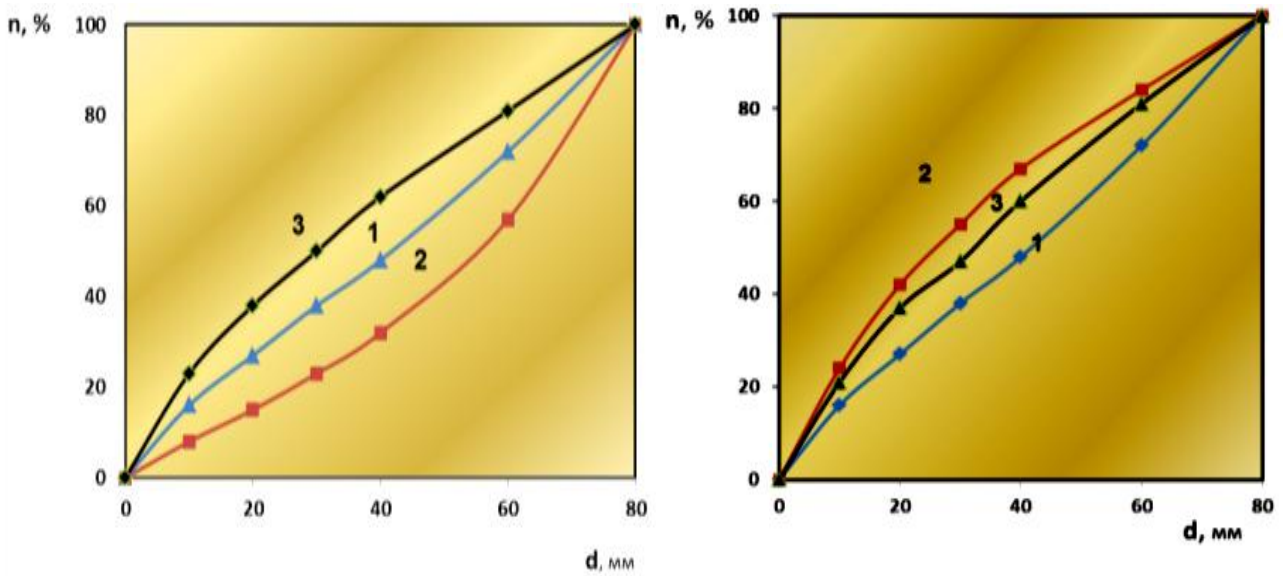


Рисунок 6 – Зависимость содержания фракций дробления  $n$  от их размера  $d$  при распределении granulометрического состава разрушенных взрывом моделей зарядами ВВ различной формы поперечного сечения при передаче энергии ВВ через промежуточную среду - воздух: 1, 2 и 3 – заряды ВВ постоянного сечения; в сечении треугольная призма; в сечении квадратная призма

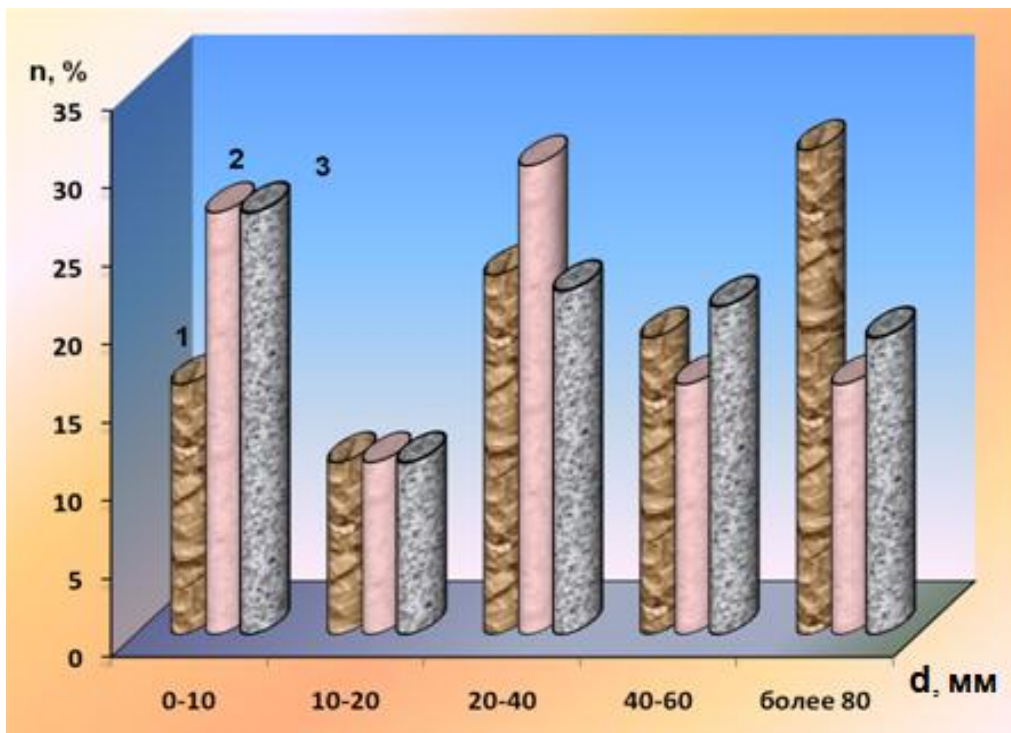


Рисунок 7 – Гистограмма распределения фракционного состава продуктов разрушения  $n$  от их размера  $d$  разрушенной взрывом моделей зарядами ВВ различной формы поперечного сечения при передаче энергии ВВ через промежуточную среду- воздух: 1, 2 и 3 – заряды ВВ постоянного сечения; в сечении треугольная призма; в сечении квадратная призма



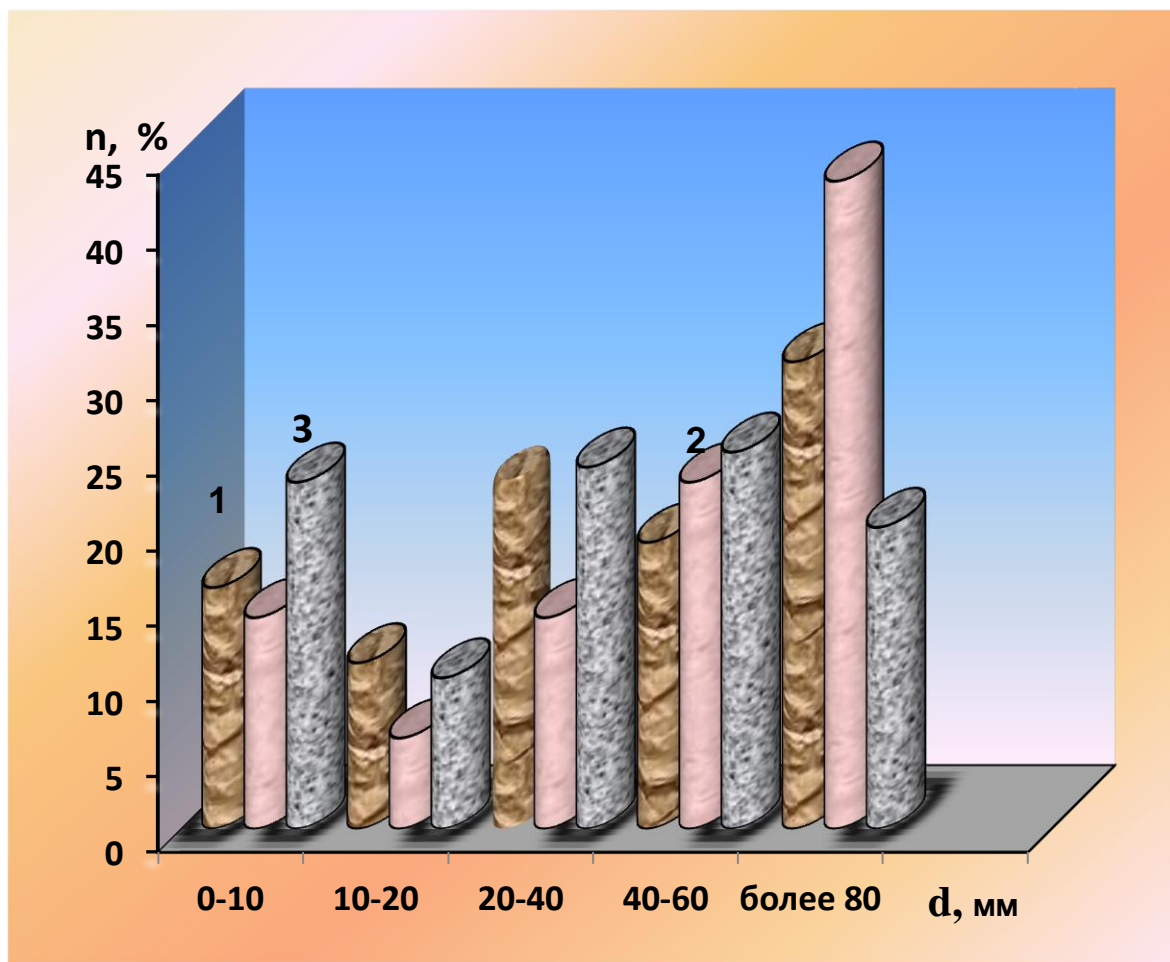


Рисунок 8 – Гистограмма распределения фракционного состава продуктов разрушения  $n$  от их размера  $d$  разрушенной взрывом моделей зарядами ВВ различной формы поперечного сечения: 1, 2 и 3 – заряды ВВ постоянного сечения; в сечении треугольная призма; в сечении квадратная призма

**Выводы.** Анализируя результаты экспериментов можно констатировать следующее:

- установлено, что при взрыве зарядов постоянной формы сечения по высоте колонки напряжения в волне сжатия ниже (0,14 ГПа), чем напряжения от взрыва зарядов в этой полости квадратной и треугольной формы сечения через промежуточную среду – воздух (0,17 ГПа и 10,2 ГПа соответственно). Это, по-видимому, свидетельствует о том, что в момент взрыва зарядов ВВ в углах призм концентрируются максимальные амплитудные значения напряжений в волне сжатия и формировании разноградиентных силовых полей. При этом увеличился выход крупных фракций размером  $d_i > 50$  мм, площадь вновь образованной поверхности и диаметр среднего куска;

- иначе разрушение моделей происходит при формировании зарядов различной формы непосредственно в модели с прямым контактом зарядной полости с разрушаемой средой. Изменился механизм воздействия энергии ВВ на разрушаемую среду, т.е. преобладают сдвиговые усилия над сжимающими. Также, отмечено равномерность дробления модели взрывом заряда ВВ (рис.6 и рис. 8),

снижение диаметра среднего куска на 5-10% и повышение площади вновь образованной поверхности в 1,5-2,0 раза для зарядов в сечении квадратной и треугольных призм.

Таким образом, эффективность разрушения твердых сред (горной породы) может быть существенно повышена за счет создания разноградиентного и разнонаправленного силового поля напряжений, генерируемого взрывом зарядов ВВ в виде удлиненных колонок квадратной и треугольной призм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат, А.Ф. Повышение эффективности буровзрывных работ в крепких рудах / А.Ф. Булат, В.А. Никифорова, В.Я. Осенний // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. –2006. – С.93-94.
2. Опыттно-промышленные испытания технологии заряжания и эффективности взрывания необводненных горных пород зарядами переменного диаметра / Э.И. Ефремов, М.П. Белоконов, Е.В. Николенко [и др.] // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч.тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 58. – С.13-18.
3. Шкуматов, А.Н. Перераспределение импульса взрыва при помощи рефракторов / А.Н. Шкуматов, С.А. Калякин // Взрывное дело № 98/55. – М.: МВК по взрывному делу, 2007. – С. 120-128.
4. Ефремов, Э.И. Способы отбойки горных пород удлиненными зарядами переменного сечения/ Э.И. Ефремов, В.А. Никифорова, К.С. Ищенко// Сучасні ресурсо-енергозберігаючі технології гірничого виробництва. Наук.-виробн. зб.– Кременчук, 2008. – Вип.1. – №1. – С.7-11.
5. Ефремов, Э.И. Управление размерами зоны переизмельчения горных пород при взрывном разрушении /Э.И. Ефремов //Вісник КТУ. – 2007. – Вып.8. – С.36-39.
6. Petrous, K. Perfection of technology of the explosive works on the quantitative exit of the crushed product / Klark Petrous // Mining Engineering .– 2001 – V.53.– №10.– P.55-65
7. Пат. №104707 UA МПК7 F 42D 3/04 Спосіб моделювання вибухового руйнування гірських порід / К.С. Ищенко.– № а 2013 06232; замовл. 20.05.2013,. надр. 25.02.2014. – Бюл. № 4.

#### REFERENCES

1. Bulat, A.F., Nikiforova, V.A. and Ossenyi, V.Ya. (2006), “An increase of efficiency of drillings and blasting is in strong ores”, *Visnyk Kremenchytskogo Derzhavnogo Politekhnichnogo Universitetu*, pp.93-94.
2. Efremov, E.I., Belokon, M. P. and Nikolenko, E.V. (2005), “Industrial tests of technology of loading and efficiency of exploding of without water mining rocks the charges of variable diameter”, *Geotekhnicheskaya mekhanika* [Geo-technical mechanics], no. 58, pp.13-18.
3. Shkymatov, A.N. and Kalyakin, S.A. (2007), “Redistribution of impulse of explosion through refractors”, *Vzryvnoe delo* [Blasting works], no. 98/55, pp.120-128.
4. Efremov, E.I., Nikiforova, V.A. and Ischenko, K.S. (2008), “Methods of crushing of mining rocks the extended charges of variable section”, *Suchasni resursno-energozberigayuxi tekhnologii girnychogo vyrobnystva*, vol. 1, no. 1, pp. 7-11.
5. Efremov, E.I. (2007), “Management by the sizes of zone of shallow factions of the mining rocks destroyed by an explosion”, *Visnyk Kryvorizkogo tekhnichnogo universitetu*, no. 8, pp. 36-39.
6. Petrous, K. (2001), “Perfection of technology of the explosive works on the quantitative exit of the crushed product”, *Mining Engineering*, vol.53, no.10, pp.55-65.
7. Ishchenko, K.S. (2014), *Sposib modelyavannya vybukhovogo ruynuvannya girskykh porid* [Method modeling of explosive rock breaking], State register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 104707.

#### Об авторе

**Коновал Сергей Владимирович**, аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства, Государственное высшее учебное заведение «Черкасский государственный технологический университет» (ГВУЗ «ЧГТУ»), Черкассы, Украина, [seryoga.conoval@yandex.ru](mailto:seryoga.conoval@yandex.ru).

### About the author

**Konoval Sergey Vladimirovich**, Doctoral Student, Department of industrial and civil construction, State Higher Education Institution «Cherkasy state technological university» (SHEI «CSTU»), Cherkassy, Ukraine, [seryoga.konoval@yandex.ru](mailto:seryoga.konoval@yandex.ru).

**Анотація.** Проведено дослідження механізму крихкого руйнування твердих середовищ і параметрів хвиль напружень від вибуху зарядів ВР різної форми поперечного перерізу. У лабораторних умовах для проведення експериментальних досліджень виготовлялися піщано-цементні моделі кубічної форми при співвідношенні компонентів 1:1. В процесі виготовлення моделей для оцінки результатів дроблення і параметрів хвиль напружень від вибуху заряду ВР різного форми поперечного перетину в піщано-цементне тісто розміщали вставки для формування зарядної порожнини і датчики з ЦТС-19. Для руйнування моделей використовували ВР типу Комполайт. Ініціювання зарядів здійснювали нелінійною системою ініціювання типу «Імпульс», «Іскра», NONEL. Результати дроблення оцінювали методом ситового аналізу. За отриманими результатами побудовано залежності розподілу гранулометричного складу зруйнованих моделей зарядами різної форми. Розраховані амплітудні значення максимальних хвиль напружень у хвилі стиснення. Сформульовані висновки за результатами експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** тверде середовище, вибухова суміш, свердловинний заряд, вибух, хвилі напружень, руйнування.

**Abstract.** Mechanism of brittle breaking of solid media and parameters of stress waves caused by explosive charges with different cross-section shapes was studied. For the laboratory experimental studies, sand and cement (ratio of components was 1:1) cubic models were made. In the course of the models manufacture, inserts forming the cavity for the charge and CTS-19 sensors were placed into the sand-cement paste in order to estimate results of crushing and parameters of stress waves caused by explosion of the explosive charges with different cross-section shapes. To break the models, explosive of Compolight type was used. The charges were initiated by the “Impulse”, “Iskra”, NONEL nonlinear initiation systems. Results of crushing were evaluated by method of sieve analysis. Basing on the results, dependences were established for the particle distributions in the models broken by the charges with different cross-section shapes. Values of maximum amplitude of the stress waves in a compression wave were calculated. Conclusions on the results of the experimental study are presented in the article.

**Keywords:** solid medium, explosive, borehole charges, explosion, stress wave, destruction.

*Стаття поступила в редакцію 30.09.2014*

*Рекомендовано к печати д-ром геол. наук В.А. Барановым*