

УДК 622.235

О ВЛИЯНИИ КОНСТРУКЦИИ ЗАРЯДА НА ХАРАКТЕР РАЗВИТИЯ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ СРЕД

В. В. Воробьев, М. В. Помазан

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: tehm@kdu.edu.ua

Рассмотрены вопросы взрывного разрушения горных пород. Показано, что одним из основных параметров, влияющих на качественное разрушение нижних слоев массива, является конструкция заряда. Экспериментально исследованы особенности трещинообразования среды на начальной стадии взрыва (эксперименты проводились на прозрачных моделях из оргстекла). С помощью скоростной кино съемки установлено, что форма донной части шпура оказывает существенное влияние на пространственное развитие трещин при взрыве. Показано совместное влияние скорости газового потока и концентратора ударных волн на параметры зоны трещинообразования в нижней части заряда. Для усиления динамического нагружения дна шпура предложено формировать в нижней части заряда кумулятивную выемку.

Ключевые слова: конструкция заряда, трещинообразование, перебур, кумулятивный эффект.

ПРО ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЇ ЗАРЯДУ НА ХАРАКТЕР РОЗВИТКУ ПОЧАТКОВІЙ СТАДІЇ РУЙНУВАННЯ ТВЕРДИХ СРЕД

В. В. Воробйов, М. В. Помазан

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: tehm@kdu.edu.ua

Розглянуто питання вибухового руйнування гірських порід. Показано, що одним з основних параметрів, які впливають на якісне руйнування нижніх шарів масиву, є конструкція заряду. Експериментально досліджено особливості тріщиноутворення середовища на початковій стадії вибуху (експерименти проводилися на прозорих моделях з оргстекла). За допомогою швидкісної кінозйомки встановлено, що форма донної частини шпуру робить істотний вплив на просторовий розвиток тріщин при вибуху. Показано спільне вплив швидкості газового потоку і концентратора ударних хвиль на параметри зони тріщиноутворення в нижній частині заряду. Для посилення динамічного навантаження дна шпуру запропоновано формувати в нижній частині заряду кумулятивну виїмку.

Ключові слова: конструкція заряду, тріщиноутворення, перебур, кумулятивний ефект.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Многообразие физико-механических свойств горных пород, различие их трещиноватости и уровня обводненности требует дифференцированного подхода к выбору конструкций скважинных зарядов, обеспечивающих рациональное пространственное распределение энергии взрывчатых веществ (ВВ) в массиве горных пород [1].

Особенностью открытых горных работ является бурение скважин ниже отметки подошвы взрываемого уступа, что вызвано необходимостью усиления действия заряда в нижней части скважины для удовлетворительной проработки подошвы уступа.

В настоящее время на большинстве карьеров это достигается путем использования перебура, величина которого зависит от свойств горной породы и колеблется в пределах 1...4 м. Однако, наряду с положительным эффектом, наличие перебура скважины оказывает отрицательное влияние на результаты отработки нижележащего уступа. Основными среди них можно отметить следующие:

- 1) увеличение времени и стоимости бурения (на 20...30 % увеличивает расходы на бурение и ВВ).
- 2) Значительная часть ВВ располагается в перебуре. Вследствие этого заряд удаляется от массива, подлежащего дроблению, что ухудшает дробление верхней части уступа и увеличивает выход негабарита.
- 3) Увеличение трещинообразования в верхней части нижележащего уступа. Это отрицательно сказывается на забурировании в нем скважин – снижает производительность буровых станков в два раза.

Выполненные в последние годы разработки отечественных ученых позволили существенно уменьшить величину перебура за счет

интенсификации развития поперечных трещин, проходящих на уровне дна скважин, с одновременным снижением интенсивности закалывания вдоль оси заряда [2];

усиления действия заряда ВВ в зоне перебура помещением в этой части скважины более мощного ВВ (применением комбинированного заряда) [3] или расширением нижней части [4];

использования скважинных зарядов ВВ с воздушной подушкой или водным промежутком, расположенными в нижней части заряда [5–7];

применения эффекта встречи детонационных волн для усиления действия взрыва в донной части скважины [8];

изменения направления движения ударной волны и газообразных продуктов детонации (ПД) путем размещения в дне скважины концентратора ударных волн (КУВ) [9, 10].

Целью данной работы является исследование особенностей развития зоны трещинообразования на начальной стадии развития взрыва при использовании различных конструкций удлиненных зарядов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Проведенные ранее исследования [11] показали, что применение зарядов с кумулятивной выемкой в совокупности со специальной формой дна скважины усиливает радиальное действие газообразных ПД.

Характер формування розрушеної зони вблизи скважинного заряду во многом определяется начальной стадией развития взрыва. Исходя из этого, анализ процесса трещинообразования в модели с помощью скоростной киносъемки позволит оценить эффективность использования различных конструкций зарядов ВВ. С этой целью на базе лаборатории Донецкого национального технического университета проведены эксперименты с использованием высокоскоростной кинокамеры.

Скоростная фотосъемка фиксировала процесс развития зоны трещинообразования в моделях из оргстекла размером 140x100x70 мм. Диаметр шпура составлял 4 мм, его длина 70 мм. Диаметр заряда – 3 мм, высота заряда 15 мм, его масса – 110 мг. В качестве ВВ применяли тэн, забойка отсутствовала. Заряд инициировали с помощью капельки азида свинца (верхнее инициирование). Специальную форму донной части шпура создавали с помощью конической вставки с углом раствора $2\beta=30^\circ$. При проведении данных экспериментов учитывали результаты ранее выполненных исследований [11] т.е. заряды были подняты на $2d_{ш}$ над дном скважины. Использовали следующие конструкции: сплошной заряд (конструкция № 2), кумулятивный заряд с углом раствора выемки $2\alpha = 30^\circ$ (конструкция № 3) и кумулятивный заряд ($2\alpha = 30^\circ$) со вставкой ($2\beta = 30^\circ$) (конструкция № 4). В качестве контрольного использовали кадры развития взрыва заряда без кумулятивной выемки и вставки в донной части, расположенный на дне (конструкция № 1).

Частота кадров при фотосъемке данной серии экспериментов составляла 32000 кадров/с, харак-

терные кадры развития зоны трещинообразования приведены на рис. 1–3.

По кадрам скоростной фотосъемки была проведена сравнительная оценка изменения во времени следующих параметров: относительного радиуса зоны разрушения на уровне дна шпура, относительного радиуса зоны разрушения на уровне верхнего торца заряда, относительной площади зоны разрушения, а так же распространения относительной зоны разрушения вглубь массива. За единицу были приняты аналогичные показатели при использовании сплошного заряда, расположенного на дне.

Результаты обработки полученных данных приведены в табл. 1–4.

Рассматривая сравнительные результаты влияния конструкции заряда на радиус зоны разрушения на уровне дна шпура (табл. 1), можно сделать следующие выводы. На начальной стадии развития процесса разрушения (до 24 мкс) радиус зоны трещинообразования на уровне дна шпура максимален для случая применения сплошного заряда и почти в два раза превышает аналогичный параметр для остальных конструкций зарядов. Однако уже к 32 мкс величина этого параметра для всех конструкций выравнивается и, в дальнейшем, во всех временных интервалах наблюдается превышение показателей конструкции №1. Так, в конечном итоге, величина данного параметра при использовании зарядов конструкции № 3 и № 4 в 1,3 и более, чем в 1,5 раза, соответственно, больше нежели в контрольном опыте. В то же время разница величины радиуса зоны разрушения на уровне дна шпура в модели конструкции № 4 на 18 % больше, чем при взрывании просто кумулятивного заряда (конструкция № 3).

Таблица 1 – Влияние конструкции заряда на изменение относительного радиуса зоны разрушения на уровне дна шпура

| Конструкция заряда, № | Относительный радиус зоны разрушения в момент времени (мкс) | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 24 | 32 | 40 | 48 | 56 | 64 | 72 | 80 | 88 | 96 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0,57 | 1,5 | 1,13 | 1,16 | 1,07 | – | – | – | – | – |
| 3 | 0,57 | 1 | 0,94 | 1,17 | 1,07 | 1,18 | 1,18 | 1,28 | 1,34 | 1,31 |
| 4 | 0,57 | 1,33 | 1,13 | 1,25 | 1,28 | 1,39 | 1,42 | 1,55 | 1,59 | 1,55 |

Анализируя показатели изменения радиуса зоны разрушения на уровне верхнего торца заряда (табл. 2) можно отметить следующие особенности. При применении сплошного заряда (контрольный опыт), начиная с 72 мкс величина данного параметра не изменяется, в то время как для моделей № 3 и № 4 эти показатели продолжают увеличиваться. По сравнению с контрольным опытом величина радиуса зоны разрушения на уровне верхнего торца заряда в моделях № 3 и № 4 больше в 1,16 и 1,3 раза со-

ответственно. В то же время, в модели № 4 этот показатель больше, чем в модели № 3 на 16 %. Это свидетельствует о том, что использование кумулятивного эффекта одновременно со специально измененной формой дна шпура (расположения конической вставки) приводит не только к усилению радиального воздействия на нижние слои модели, но и способствует увеличению динамического нагружения стенок скважины по всей длине заряда.

Таблица 2 – Влияние конструкции заряда на изменение относительного радиуса зоны разрушения на уровне верхнего торца заряда

| Конструкция заряда, № | Относительный радиус зоны разрушения в момент времени (мкс) | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 24 | 32 | 40 | 48 | 56 | 64 | 72 | 80 | 88 | 96 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1,11 | 1,3 | 1 | 1,07 | 1,06 | – | – | – | – | – |
| 3 | 1,2 | 1,17 | 1 | 1,14 | 1,12 | 1,19 | 0,97 | 1,05 | 1,15 | 1,16 |
| 4 | 1,2 | 1,5 | 1,17 | 1,28 | 1,25 | 1,38 | 1,17 | 1,25 | 1,31 | 1,32 |

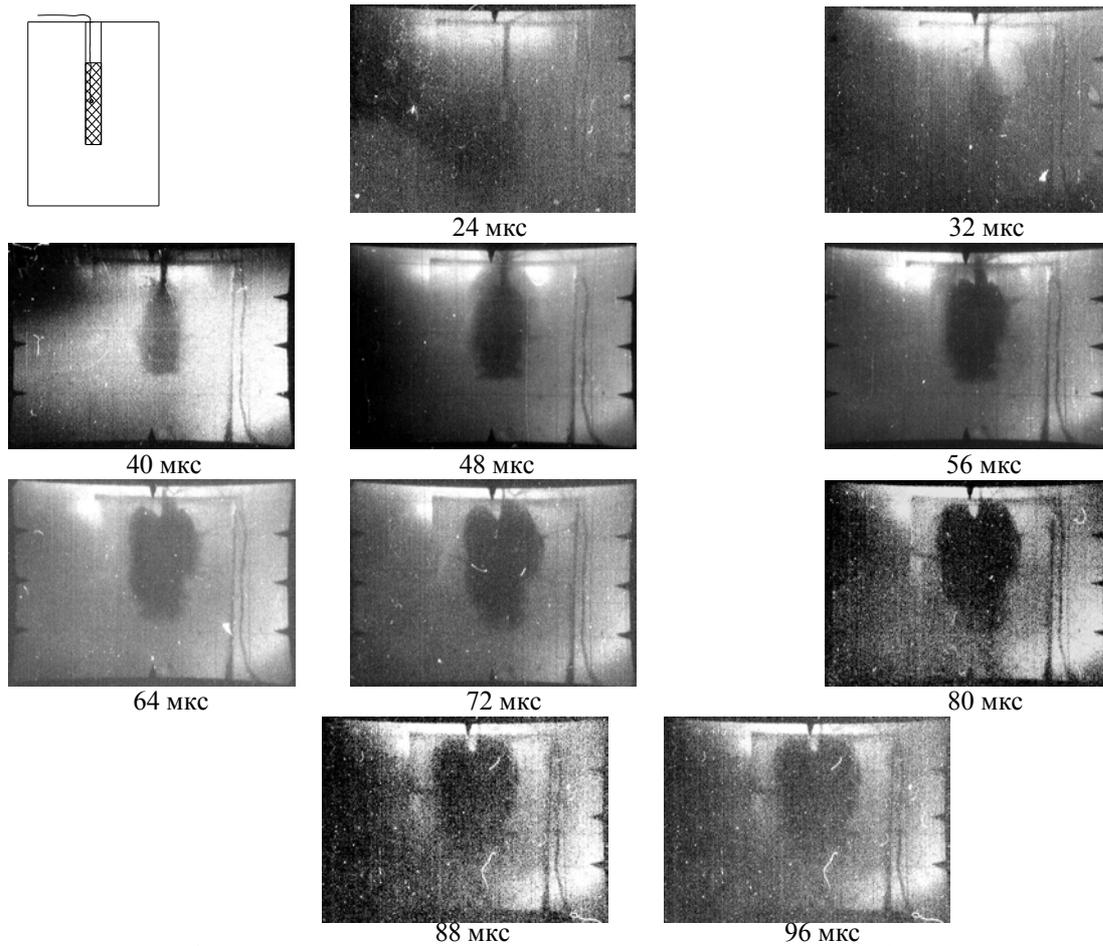


Рисунок 1 – Кадры скоростной киносъемки развития процесса трещинообразования при использовании сплошного заряда, расположенного на дне (конструкция 1)

Применение заряда с кумулятивной выемкой и вставкой на дне шпура позволяет достичь большей площади зоны разрушения по сравнению с остальными конструкциями зарядов (табл. 3). Анализ кадров скоростной киносъемки позволил установить, что к моменту времени 48–56 мкс с начала развития процесса взрывного разрушения наблюдается резкое возрастание площади зоны разрушения при использовании заряда с кумулятивным эффектом и специальной формой дна шпура: более чем в 1,6 раза по сравнению со сплошным зарядом и более чем в 1,2

раза – по сравнению с зарядом с кумулятивной выемкой. Очевидно это связано с тем, что в этом промежутке времени кумулятивная струя достигла дна шпура со вставкой и в дальнейшем начинают проявляться процессы развития трещинообразования, интенсификация которых вызвана усилением радиального действия продуктов детонации в донной части шпура, а также усилением динамического нагружения стенок и дна шпура. В дальнейшем эта разница немного снижается и в конечном итоге составляет 1,24 и 1,1 соответственно.

Таблица 3 – Влияние конструкции заряда на изменение относительной площади зоны разрушения

| Конструкция заряда, № | Относительная площадь разрушения в момент времени (мкс) | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 24 | 32 | 40 | 48 | 56 | 64 | 72 | 80 | 88 | 96 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1,1 | 0,82 | 0,9 | 1,2 | – | – | – | – | – | – |
| 3 | 1,1 | 0,9 | 1,02 | 1,17 | 1,1 | 1,02 | 0,98 | 1,02 | 1,07 | 1,1 |
| 4 | 1,1 | 1,53 | 1,05 | 1,67 | 1,48 | 1,37 | 1,23 | 1,17 | 1,23 | 1,24 |

Данный вывод подтверждается также изменением величины распространения зоны разрушения вглубь массива (табл. 4). Во временном промежутке 48–56 мкс зафиксировано резкое увеличение распространения зоны разрушения в модели, где применялся заряд с кумулятивной выемкой и вставкой (конструкция № 4). В этот временной промежуток, величина данного параметра больше чем при применении сплошного заряда, расположенного на дне

(конструкция № 1) и поднятого на $2d_{ш}$ (конструкция № 2) почти в 1,3 раза. В целом, анализируя изменение данного параметра, можно сделать вывод, что результаты, полученные при применении заряда с кумулятивной выемкой, поднятого на $2d_{ш}$ (конструкция № 3) и такого же, но со вставкой (конструкция № 4) в конечном результате на 6 и 39 % соответственно больше, чем при использовании сплошного заряда.

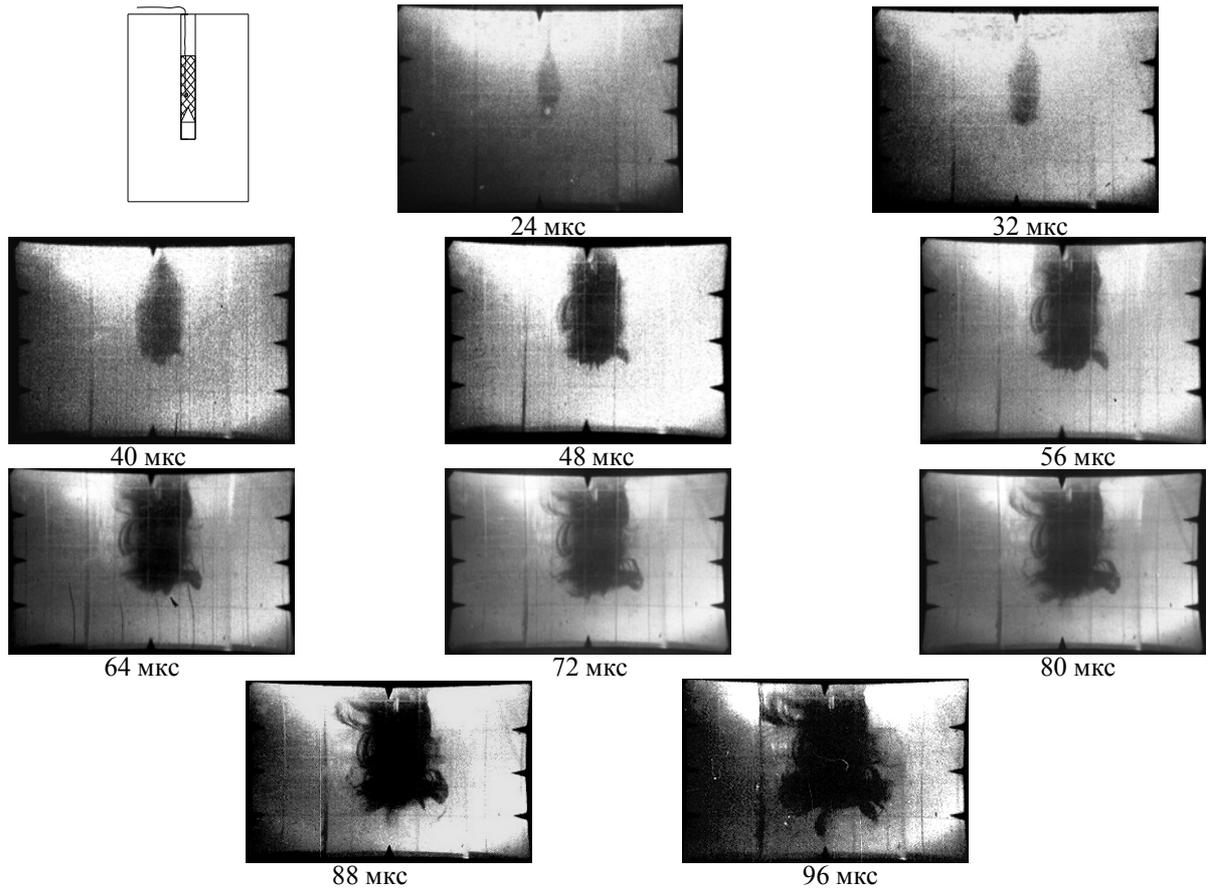


Рисунок 2 – Кадры скоростной киносъемки развития процесса трещинообразования при использовании заряда с кумулятивной выемкой (конструкция 3)

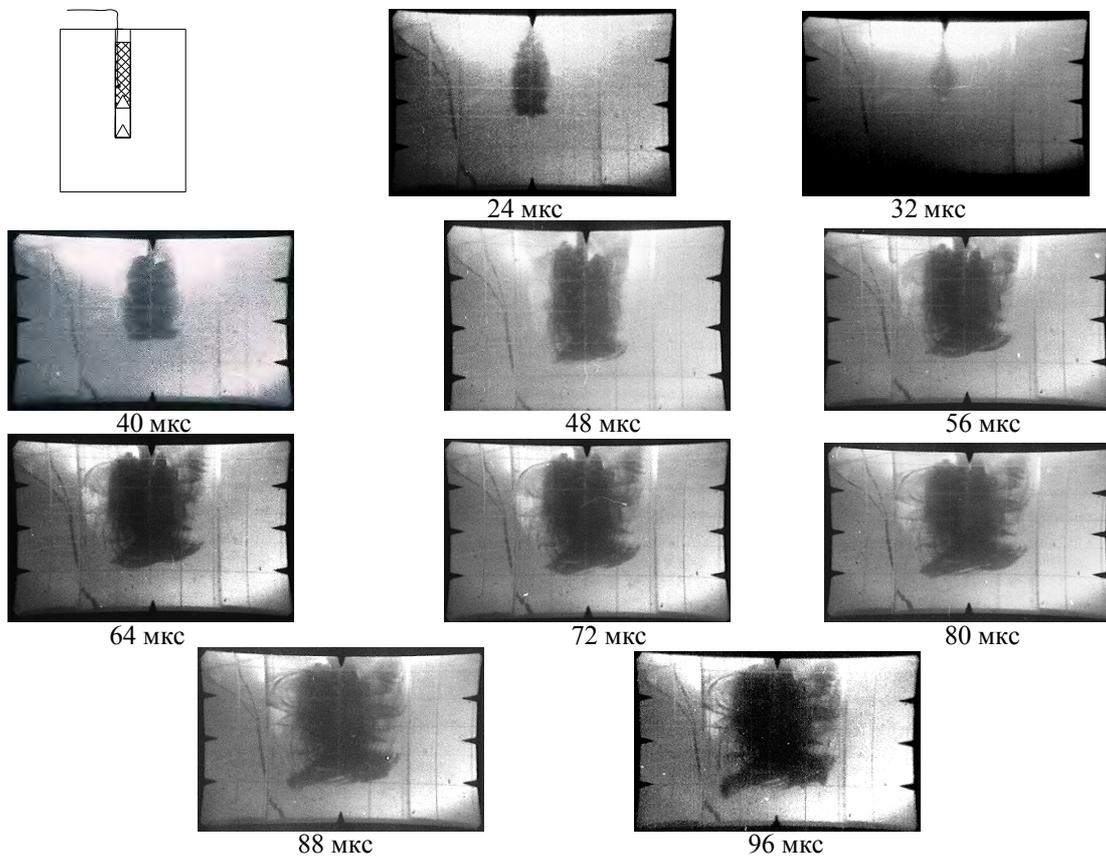


Рисунок 3 – Кадры скоростной киносъемки развития процесса трещинообразования при использовании заряда с кумулятивной выемкой и вставкой (конструкция 4)

Таблиця 4 – Влияние конструкции заряда на изменение относительной длины зоны разрушения вглубь массива

| Конструкция заряда, № | Относительная длина зоны разрушения вглубь массива в моменты времени (мкс) | | | | | | | | | |
|-----------------------|--|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| | 24 | 32 | 40 | 48 | 56 | 64 | 72 | 80 | 88 | 96 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1,06 | 1 | 1,04 | 1 | 1,03 | – | – | – | – | – |
| 3 | 1,08 | 1,11 | 1,21 | 1,11 | 1,1 | 1 | 1 | 1,03 | 1,05 | 1,06 |
| 4 | 1,08 | 1,33 | 1,08 | 1,29 | 1,23 | 1,1 | 1,06 | 1,07 | 1,12 | 1,39 |

Анализ кадров скоростной фотосъемки позволил установить, что использование кумулятивного эффекта в донной части шпура приводит к усилению радиального воздействия на нижние слои модели только при создании специальной формы дна шпура с помощью расположения конической вставки – концентратора ударных волн.

При использовании заряда с кумулятивным эффектом и специальной формой дна шпура, в момент времени 48–56 мкс с начала развития процесса взрывного разрушения, наблюдается резкое возрастание относительной площади зоны разрушения вглубь массива в заряде с применением кумулятивного эффекта и конической вставки (конструкция № 4). Относительная площадь зоны разрушения в этом случае почти в 1,3 раза больше по сравнению со сплошным зарядом, расположенным на дне и поднятым над дном скважины, и в 1,16 раза – по сравнению с зарядом с кумулятивной выемкой. В дальнейшем эта разница немного снижается до 1,06 в случае с зарядом с кумулятивным эффектом по сравнению со сплошным зарядом и увеличивается в заряде с кумулятивной выемкой и вставкой на дне до 1,39 по сравнению со сплошным и 1,3 – с кумулятивным зарядом.

На начальной стадии развития процесса разрушения (до 24 мкс) относительный радиус зоны трещинообразования на уровне дна шпура максимален для случая применения сплошного заряда и почти в два раза превышает аналогичный параметр для остальных конструкций зарядов. Однако уже к 30 мкс величина этого параметра для всех конструкций выравнивается и, в дальнейшем, во всех временных интервалах наблюдается превышение относительного радиуса для конструкции № 4. В конечном итоге это превышение достигает 55 % относительно сплошного заряда и 18 % относительно кумулятивного заряда.

Относительный радиус зоны трещинообразования на уровне верхнего торца заряда в конструкциях, где применялся кумулятивный эффект и комбинация кумулятивного заряда со вставкой, на протяжении всего процесса разрушения превышает показатели как сплошного заряда, расположенного на дне, так и сплошного заряда, поднятого над дном скважины на $2d_{ш}$. В конечном итоге, данный параметр в зарядах конструкций № 3 и № 4 больше, чем в контрольном заряде (конструкция № 1) соответственно в 1,16 и 1,32 раза. Это свидетельствует о том, что процесс трещинообразования при применении предложенной конструкции заряда улучшается не

только в донной части скважины, но и по всей ее длине.

Относительная площадь зоны разрушения при применении заряда с кумулятивным эффектом и измененным дном скважины (вставкой) на 24 % больше, чем при применении контрольного сплошного заряда, в то время как применение остальных конструкций приводит лишь к незначительному повышению этого параметра.

ВЫВОДЫ. Проведенные экспериментальные исследования показали, что применение заряда с кумулятивной выемкой и КУВ приводит к улучшению результатов взрыва относительно сплошного заряда:

– относительный радиус зоны разрушения на уровне дна шпура возрастает на 55 %;

– превышение относительного радиуса зоны разрушения на уровне верхнего торца заряда составляет 32 %;

– относительная площадь зоны разрушения увеличилась в 1,24 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 473 с.
2. Создание горизонтальных трещин в дне шпура / В.В. Воробьев, С.А. Литовченко // Повышение эффективности разрушения горных пород: сбор. науч. трудов. – К.: Наукова думка, 1991. – С. 64–68.
3. Эффективность отбойки крепких горных пород системой сосредоточенных зарядов на железорудных карьерах Кривбасса / В.П. Белоконь, В.И. Ильин, М.П. Белоконь, А.К. Ольховский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1974. – № 2. – С. 59–60.
4. Формирование комбинированных скважинных зарядов ВВ при взрывных работах на дневной поверхности / Л.Н. Шиман, Е.Б. Устименко, А.Л. Кириченко, Л.И. Подкаменная // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 6/2008 (53), част. 1. – С. 114–117.
5. Chiapetta R., Wyciskalla J. Bottom hole and multiple power decks-independent testing results of the new blasting technique. In R. Holmberg (ed) explosives and Blasting Technique. – Prague, 2003. – PP. 347–355.
6. Thomas R., Levan R. Booster shaped for high-efficiency detonating. US. Patent № 4938143, 1990.
7. Донная гидрозабойка – одно из простых средств повышения эффективности взрывных работ / Н.Р. Шевцов, К.Н. Лабинский, С.А. Калякин // Наукові праці ДонНТУ. Серія „Гірнично-геологічна”.

Вип. 63. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – С. 3–6.

8. Использование многоточечного инициирования скважинного заряда для улучшения проработки подошвы уступа / В.В. Воробьев, В.Т. Щетинин, А.М. Пеев // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Серія “Гірництво”: збір. наук. праць. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2003. – Вип. 9. – С. 63–65.

9. Исследование влияния формы заряда в донной части шпура на изменение прочностных свойств среды при взрыве / В.В. Воробьев, А.М. Пеев // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого

виробництва: науково-виробничий збірник. – Кременчук: КДУ, 2009. – Вип. 2/2009(4). – С. 35–39.

10. Перераспределение импульса взрыва при помощи рефракторов / А.Н. Шкуматов, С.А. Калякин // Взрывное дело. Вып. № 98/55. – М.: ЗАО “МВК по взрывному делу”, 2007. – С. 120–128.

11. Усиление квазистатического действия продуктов детонации в донной части шпура / В.В. Воробьев, М.В. Помазан // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 5/2008 (52), част. 1. – С. 154–157.

ON THE INFLUENCE OF CHARGE CONSTRUCTION ON THE CHARACTER OF THE INITIAL STAGE OF SOLID MEDIUMS DESTRUCTION

V. Vorobyov, M. Pomazan

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: tehm@kdu.edu.ua

The authors have considered the problems of explosive destruction of rocks. It is shown that charge design is one of the main parameters affecting the destruction quality of the lower layers of the rock massif. It is experimentally studied the features of medium cracking at the initial stage of explosion (the experiments were conducted on transparent plexiglas models). With the help of high-speed filming it was found that form of borehole bottom has a significant impact on the spatial development of blast-triggered cracks. It is shown the combined influence of the gas flow rate and the hub of shock waves on the parameters of fracture zones in the lower part of the charge. To enhance the dynamic loading of borehole bottom it is proposed to form the concavity at the bottom of the cumulative charge.

Key words: charge design, fracturing, overgrinding, cumulative effect.

REFERENCES

1. Galperin, A., (2003), *Geomehanika otkrytyh gornyh rabot* [Geomechanics of open mining operations], Moscow State Mining University, Moscow, Russia.

2. Vorobyov, V., Lytovchenko, S., (1991), “Creation of horizontal cracks in the borehole bottom”, *Povyshenie efektyvnosti razrusheniya gornyh porod*, pp. 64–68.

3. Belokon, V., Ilyin, V., Belokon, M., Olhovskiy, A., (1974), “Effectiveness of breaking of hard rocks with system of concentrated charges on Kryvbass iron ore quarries”, *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost*, vol. 2, pp. 59–60.

4. Shyman, L., Ustymenko, E., Kyrychenko, A., Podkamennaja, L., (2008), “Formation of combined downhole explosive charges during blasting operations at the surface”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State Polytechnic University*, vol. 6, no. 53, pp. 114–117.

5. Chiapetta R., Wyciskalla J. (2003), “Bottom hole and multiple power decks-independent testing results of the new blasting technique”, In R. Holmberg (ed.) *Explosives and Blasting Technique*, Prague, Czech Republic, pp. 347–355.

6. Thomas R., Levan R. (1990), “Booster shaped for higt-efficiency detonating”, US patent No 4938143.

7. Shevtsov, N., Labynskiy, K., Kalyakyn, S., (2004), “Bottom hydrotemping is one of the easiest means to improve blasting”, *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya “Girnycho-geologychna”*, vol. 63, pp. 3–6.

8. Vorobyov, V., Schetinin, V., Pejev, A., (2003), “Using multipoint initiation of downhole charge to improve study of ledge soles”, *Visnyk Natsionalnogo tehničnogo universytetu Ukrainy “Kyivskiy polytehnichnij instytut”*. Seriya “Girnystvo”, vol. 9, pp. 63–65.

9. Vorobyov, V., Pejev, A., (2009), “Investigation of the influence of charge form in the bottom portion of borehole to change the strength properties of a medium by the explosion”, *Up-to-date resources and energy-saving technologies in mining industry*, vol. 2, no. 4, pp. 35–39.

10. Shkumatov, A., Kalyakyn, S., (2007), “Redistribution of pulse explosion using refractors”, *Vzryvnoe delo*, vol. 98, no. 55, pp. 120–128.

11. Vorobyov, V., Pomazan, M. (2008), “Strengthening of quasistatic action of detonation products at the bottom of the hole”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State Polytechnic University*, vol. 5, no. 52, part 1, pp. 154–157.

Стаття надійшла 24.02.2014.