

УДК 622.831

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ
С ВОЗДУШНЫМ ПРОМЕЖУТКОМ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ**

М. Б. Хаят^{1,2}, Л. Алагха¹, Д. Али¹

¹Миссурийский университет науки и технологий,

E-mail: alaghal@mst.edu, 65401, г. Ролла, Миссури, США

²Инженерно-технологический университет, 54890, г. Лахор, Пакистан

Выявлено рациональное расположение воздушного промежутка в скважинном заряде в процессе проведения взрывных работ с целью обеспечения наиболее эффективного дробления породы. Рекомендованы объемы воздушного промежутка для оптимизации заряда. Исследование направлено на проектирование процесса ведения взрывных работ при открытой разработке путем использования новой конструкции забойки и воздушного промежутка.

Воздушный промежуток, взрывные работы при открытом методе разработки месторождения, удельный расход взрывчатого вещества, затраты на проведение горных работ, геология месторождения

DOI: 10.15372/FTPRPI20190607

При проведении горнодобывающих работ необходимо стремиться к уменьшению издержек производства. Стоимость взрывчатых веществ — одна из основных составляющих в общей сумме затрат на добычу. Целесообразно сокращать использование взрывчатых веществ не в ущерб производительности или качеству выполнения взрывных работ.

Взрывчатые вещества применяются при подземной и открытой разработке месторождения для получения кусков горных пород заданного размера. Доля энергии при взрыве, расходуемая на дробление породы до необходимого размера кусков, нуждается в оптимизации [1]. Во время взрывных работ с использованием сосредоточенного заряда, когда скважина полностью заполняется взрывчатым веществом, начальное давление, возникающее при образовании газов, превышает прочность породы вокруг заряда [2]. Это приводит к переизмельчению породы, на что тратится большое количество энергии, и только 20–30 % энергии идет на дробление породы [3].

Метод взрывания с использованием воздушного промежутка в скважинном заряде позволяет эффективно расходовать энергию взрыва. Воздушный промежуток представляет собой пространство, заполненное воздухом, которое распределяет энергию взрыва внутри породного массива. Это обеспечивает более однородное дробление, предотвращая чрезмерное измельчение и нежелательные потери энергии [4].

Конструкция заряда с воздушным промежутком известна с 1893 г. [5, 6]. В [7, 8] предложена концепция скважинного заряда, где повторяющиеся колебания ударных волн достигаются с помощью заряда с воздушным промежутком. Повторяющиеся колебания позволяют ударной волне воздействовать на породный массив в течение более продолжительного времени, что обеспечивает лучшее дробление. Данный способ применяется для ослабления сейсмических колебаний, вызванных взрывом, уменьшения разлета кусков породы и количества выделяемых газов после взрыва, снижает объем перебура скважин, обеспечивает лучшее дробление и расход взрывчатых веществ, повышает выход и производительность при подземной разработке с формированием предварительного контура [4, 9–13].

Цель настоящей работы — обзор существующего опыта по использованию зарядов с воздушным промежутком при проведении открытых горных работ для улучшения дробления и сокращения расхода взрывчатых веществ. Описано влияние расположения и длины воздушного промежутка в скважинном заряде на основе практического анализа конкретных ситуаций при взрывании.

МЕХАНИЗМ ВЗРЫВАНИЯ ЗАРЯДОВ С ВОЗДУШНЫМ ПРОМЕЖУТКОМ

При детонации сплошного цилиндрического заряда происходит быстрое увеличение давления в скважине, сопровождающееся возникновением взрывной волны. Она распространяется, образуя трещины и инициируя движение среды. Расширение газов приводит к увеличению трещин и дроблению пород вокруг скважины. После прохождения волны сжатия среда достигает статического равновесия и дальнейшего воздействия энергии на среду не происходит. На рис. 1 показана скорость смещения среды при традиционном взрыве с использованием сплошного заряда, которая остается неизменной даже после взрыва (рис. 1а) [7, 8]. В случае заряда, содержащего воздушные промежутки, после прохождения волны сжатия на среду воздействуют дополнительные импульсы из-за столкновения двух газовых потоков в центре воздушного промежутка, а при достижении значительного давления в точке столкновения возникает обратное отражение данных газовых потоков (рис. 1б).

При размещении воздушного промежутка в скважинном заряде снижается пиковое давление в скважине. Благодаря столкновению волн в зоне воздушного промежутка и их отражению, обеспечивается многократное воздействие ударных волн на среду, приводящее к повышению распространения энергии в породной среде в 1.5–1.7 раза, по сравнению с применением сплошного заряда, что обуславливает лучшее дробление [7].

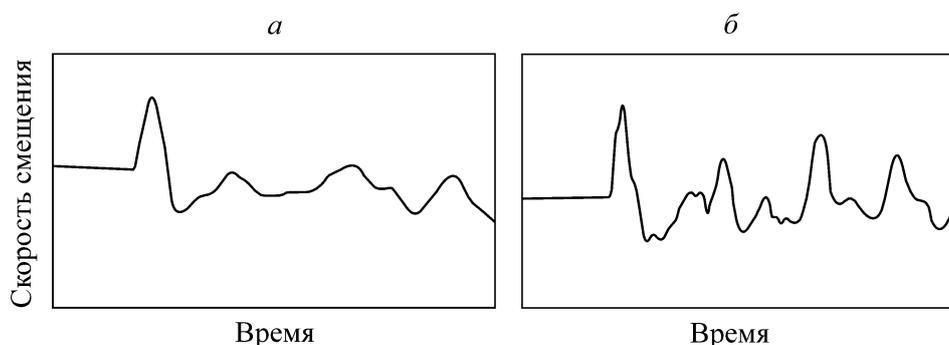


Рис. 1. Скорость смещения среды для традиционного сосредоточенного заряда (а) и заряда с воздушным промежутком (б)

Улучшение дробления при использовании воздушного промежутка в заряде. Лучшая степень дробления отмечена у зарядов с воздушным промежутком, по сравнению с традиционным методом сплошного заряда [2, 5, 6, 12, 14–16]. Средний размер кусков породы при взрывании традиционным методом составил 0.36–1.00 м, при рассредоточенном заряде с воздушным промежутком — 0.27–0.51 м. Дробление породы улучшилось для слабых и трещиноватых пород, что связано с более рациональным использованием энергии взрыва рассредоточенных зарядов [2, 4, 17].

Согласно проведенным испытаниям в одиночной скважине в условиях открытой разработки, эффективность дробления оказалась идентичной использованию зарядов с воздушным промежутком и без него. При этом для рассредоточенного заряда потребовалось на 17 % меньше взрывчатых веществ [12]. В [16] удалось уменьшить размер куска породы с 4.9 до 3.0 при замене традиционного сплошного заряда на заряд с воздушным промежутком. Однако при этом повышался удельный расход взрывчатого вещества, но улучшилась степень дробления. Степень дробления не всегда может улучшаться в случае применения заряда с воздушным промежутком, на нее негативно воздействует неправильно выбранный размер воздушного промежутка в скважинном заряде [18]. Кроме того, место расположения воздушного промежутка устанавливается в зависимости от типа породы.

Влияние места расположения воздушного промежутка на эффективность дробления. Расположение воздушного промежутка в скважинном заряде играет значимую роль и является предметом споров среди ученых. Обычно выделяют три типа локализации воздушных полостей в заряде: в середине, на дне и в верхней части скважины, где над воздушным промежутком размещают материал забойки (рис. 2).

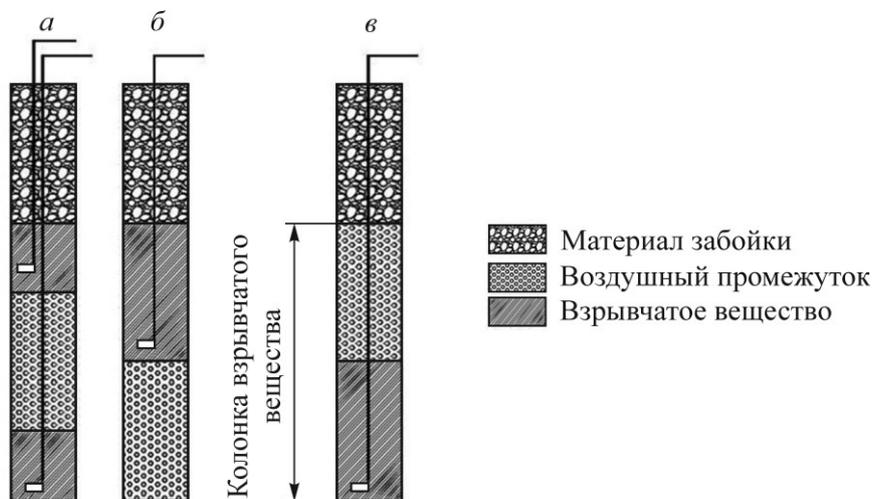


Рис. 2. Конструкция рассредоточенных скважинных зарядов с воздушным промежутком в середине (а), на дне (б) и верхней части скважины (в)

Расположение воздушной полости в середине заряда показало лучшие результаты по сравнению с расположением в верхней части или на дне, благодаря взаимодействию двух фронтов ударной волны в верхней и нижней частях, что привело к лучшей степени дробления [18]. Серией испытательных взрывов бетонных блоков [15] установлено, что заряд, в котором воздушный промежуток располагался в середине колонки, продемонстрировал большую эффективность дробления, нежели при расположении в двух других частях. Использование заряда с воздушным промежутком в середине дает более мелкое дробление, чем традиционный сосредоточенный заряд.

ченный заряд. Однако степень дробления в [15, 18] не согласуется между собой при сравнении зарядов с воздушным промежутком со сплошным зарядом. В [15] испытания осуществлялись с зарядом, в котором объем воздушного промежутка составлял 20 %, в [18] — 30 %.

Полномасштабные взрывные испытания проводились также в условиях открытой разработки, где сплошные заряды заменялись зарядами с воздушным промежутком, расположенным в середине, в результате зафиксирована высокая степень дробления [4, 5]. Отмечено, что расположение воздушного промежутка в средней части заряда является наиболее эффективным среди трех видов конструкций зарядов.

На основе результатов моделирования в [6] установлено, что расположение воздушных промежутков в середине заряда и на дне уступает по эффективности зарядам, в которых воздушный промежуток расположен в верхней части. Выполненные два независимых испытания в лабораторных условиях на бетонных блоках показали лучшие результаты по степени дробления, чем в случае применения зарядов с воздушным промежутком на дне скважины [15, 18]. Степень дробления при использовании сплошных зарядов и зарядов с воздушной полостью в середине скважины оказалась низкой.

В [19] описываются полевые испытания на карьерах по добыче известняка с использованием зарядов с воздушным промежутком в верхней части. Степень дробления оказалась близкой к полученной при применении сосредоточенного заряда. В случае с менее устойчивыми породами (рейтинг массива горных пород $RMR = 57$) заряды с воздушным промежутком показали близкие или лучшие результаты в сравнении со сплошными зарядами [20]. Заряды с воздушным промежутком в верхней части применялись на известняковом карьере в Пакистане. Их эффективность очень близка к той, что показали сплошные заряды [21], однако замечены крупные куски породы, образовавшиеся из-за используемого материала для забойки.

В [5] показано, что заряды с воздушным промежутком на дне скважины могут применяться, если основание скважины сложено более мягкими породами. Установлено, что при расположении заряда с воздушным промежутком в днище скважины появляется способность создавать в 2–7 раз больше давление, чем при применении сплошного цилиндрического заряда [12]. Заряды с воздушным промежутком в основании могут быть эффективны как для мягких, так и для твердых пород. Компания Blast Dynamics Inc. успешно применяет такую конструкцию забойки скважинного заряда на руднике по добыче золота (северная часть штата Невада) без потери эффективности дробления и снижения производительности экскаватора. Кроме того, не возникало проблем с формированием подошвы уступа [22]. Заряды с воздушным промежутком в основании при полномасштабных взрывах показали эффективность во время разработки известнякового карьера в Пакистане, где объем воздушного промежутка составлял всего 10 % [21].

ДЛИНА ВОЗДУШНОГО ПРОМЕЖУТКА

При использовании зарядов с воздушным промежутком важно установить его рациональную длину. С увеличением длины воздушного промежутка степень дробления уменьшается по сравнению со сплошным скважинным зарядом [18]. Согласно [2, 5, 8, 12, 14, 15, 18–20, 22, 23], доля воздушного промежутка по всей длине скважины может быть выражена как

$$L = \frac{l_{\text{п}}}{l_3 + l_{\text{п}}},$$

где $l_{\text{п}}$, l_3 — длина воздушного промежутка и колонки заряда.

В [15] проводились испытательные взрывы в бетонных блоках с использованием зарядов с воздушным промежутком (рис. 3). Наиболее эффективное дробление достигнуто при доле воздушного промежутка 20 %, что превосходит результат, полученный при взрывании сплошного заряда. В результате испытания зарядов с более высоким объемным содержанием воздуха (до 40 %) получено более крупное дробление породы, сравнимое с использованием сплошного заряда. В [18] для взрыва бетонных блоков испытывались заряды с объемом воздушного промежутка 30 %, получено дробление, сравнимое с использованием сосредоточенных скважинных зарядов.

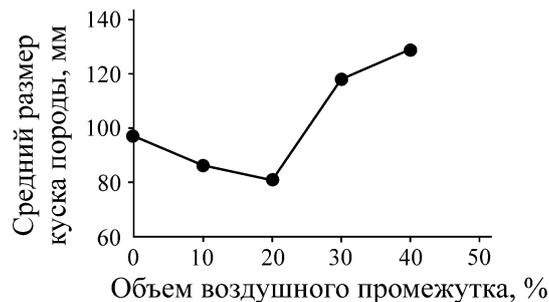


Рис. 3. Средние размеры полученных кусков породы в зависимости от объема воздушного промежутка в заряде

Полномасштабные взрывные работы с применением зарядов с воздушным промежутком осуществлялись на руднике по добыче марганца в Индии [2]. Эффективность дробления улучшилась при замене сплошных зарядов зарядами с воздушной полостью в середине колонки взрывчатого вещества (рис. 4). Объем воздушного промежутка в зарядах 20–40 %. Это лучшие результаты, чем при взрывных работах с использованием традиционных сосредоточенных зарядов. Максимальный средний размер куска породы составил 0.51 м при взрывании всех зарядов, что перспективно для проведения взрывных работ на открытых месторождениях.

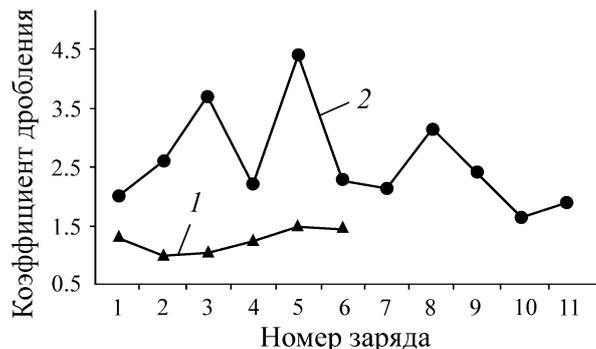


Рис. 4. Сравнение коэффициента дробления при использовании традиционных сплошных зарядов (1) и зарядов с воздушным промежутком (2)

Критический объем воздушного промежутка в зарядах, используемых для выполнения взрывных работ на открытых месторождениях, составил 15–25 % [14]. В исследовании, проводившемся на открытом месторождении, применялись заряды, в которых объем воздушного промежутка варьировал от 17 до 47 % [4]. Объем воздушной полости, превышающий 35 %, негативно сказался на дроблении и сбросе породы. Хорошие результаты по дроблению получены при использовании зарядов с воздушным промежутком объемом 42 % в мягких породах и выветрелом песчанике. Для воздушного промежутка предложен объем 15–35 %.

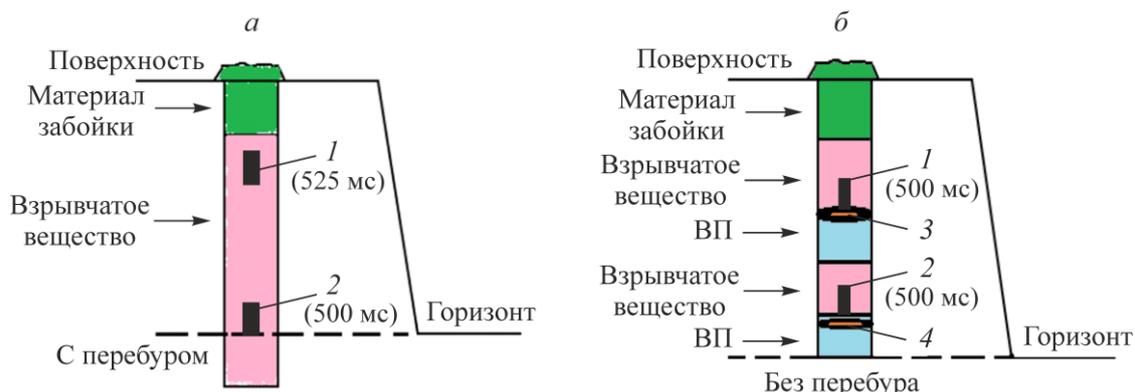


Рис. 5. Традиционная конструкция скважинного заряда с перебуром и без воздушных промежутков (а) и модифицированная конструкция скважинного заряда с несколькими воздушными промежутками (б): 1 — верхний дублирующий детонатор; 2 — нижний детонатор; 3 — заглушка детонатора без буровой мелочи; 4 — детонатор с небольшим количеством буровой мелочи; ВП — воздушный промежуток длиной 0.914 м

Взрывы в отдельных скважинах на известняковом карьере в Калифорнии (США) выполнены с применением как сплошных зарядов, так и рассредоточенных [12]. Конфигурации размещения в скважине традиционного заряда и заряда с воздушным промежутком показаны на рис. 5. Несмотря на уменьшение количества взрывчатых веществ на 25%, заряд с воздушным промежутком при взрывании не показал снижения качества дробления по сравнению со сплошным зарядом. Общий объем воздушного промежутка ~ 18 %.

В [18] представлены испытательные взрывы на бетонных блоках с использованием зарядов с воздушным промежутком, расположенным в верхней части. Применение зарядов с воздушным промежутком объемом > 40 % негативно сказалось на результате. Предложен максимальный объем, равный 35 % (рис. 6). Исследования показали, что хорошие результаты получены у зарядов, верхняя часть которых заполнена воздухом на 20 % [15]. В [8] приведен диапазон значений для объема воздушного промежутка 25–35 %. В [23] проведено имитационное моделирование применения зарядов с воздушным промежутком в верхней части, объем которого должен составлять 13–35 % при использовании в качестве взрывчатого вещества аммиачной селитры с дизельным топливом.

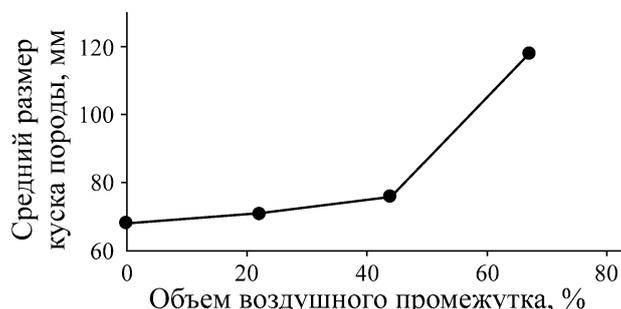


Рис. 6. Средние размеры полученных кусков породы в зависимости от объема воздушного промежутка в заряде

Полевые испытания проводились на карьерах EGAT и INSEE [20]. Для пород на карьере EGAT среднее RMR составило 61, INSEE — 57. Заряды, содержащие воздушный промежуток объемом 13–30%, обеспечивают лучшее дробление, чем сплошные заряды [20]. В [2] исследована эффективность взрывных работ на карьере по добыче известняка для цементной промыш-

ленности, проводимых при помощи зарядов, имеющих воздушный промежуток в верхней части. Ввиду того, что в цементной индустрии при первичном дроблении допустимым является размер кусков породы < 1 м, установлено, что для обоих карьеров с целью достижения желаемой степени дробления рекомендуются заряды с объемом воздушного промежутка 12–23 %; не следует применять заряды с воздушным промежутком объемом 30 % [2]. Заряды с воздушным промежутком в верхней части, объем которого составляет 10 %, дают удовлетворительные результаты по дроблению породы на известняковом карьере, подразумевающую последующую переработку материала [21]. Однако в приведенном исследовании не испытывались заряды, в которых объем воздушной полости превышал 10 %.

В [18] испытывался заряд с воздушным промежутком объемом 30 %, получено более крупное дробление, чем при использовании сосредоточенного заряда. В [15] для лабораторных испытаний брались заряды с воздушным промежутком объемом 20 %, расположенным на дне скважины. При взрывании такого типа зарядов наблюдалось более крупное дробление, чем при использовании сплошных зарядов или зарядов с воздушным промежутком, расположенным в скважине в верхней или средней части. Что касается зарядов с воздушным промежутком в верхней части, то результаты, полученные в [15], соответствуют результатам исследования [18].

Компания Blast Dynamics Inc. проводила полномасштабные взрывные работы на золотом руднике в северной части штата Невада [22]. Объем воздушного промежутка в заряде составлял 18 %. Использование зарядов с воздушным промежутком сократило требуемое количество взрывчатого вещества; получены те же результаты, что и для сосредоточенных зарядов. Для рудника прогнозируемая годовая экономия составила 868 320 долл., при условии использования конструкции забойки скважинного заряда с воздушным промежутком [22].

Для взрывных работ, осуществляемых на известняковом карьере в Пакистане, применялись заряды с объемом воздушного промежутка 10 %. Установлено, что заряды с воздушным промежутком обеспечивают практически идентичную степень дробления, что и при использовании сплошных зарядов, но при этом уменьшаются затраты на взрывчатые вещества [21]. В процессе проведения полномасштабных взрывных работ подготовлено 30 скважин для сплошных и рассредоточенных зарядов. Заряды с воздушным промежутком объемом 8.5 % показали более эффективное дробление, чем традиционные сплошные заряды. Отмечено снижение затрат, связанное с уменьшением перебуривания скважин и сокращением расхода взрывчатых веществ. При использовании рассредоточенных зарядов расход взрывчатых веществ может быть уменьшен до 40 % [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе полученного опыта при проведении взрывных работ рассредоточенные заряды с любым из трех типов расположения воздушного промежутка могут успешно применяться при добыче открытым способом. Однако по данным некоторых литературных источников, использование зарядов с размещением воздушного промежутка в середине скважины позволяет добиться наиболее эффективного дробления породы. Несмотря на то, что такое расположение способно при взрывании обеспечить наилучшие результаты, размещение взрывчатого вещества требует дополнительных затрат в случае использования на месте взрыва неэлектрической системы инициирования заряда типа Nonel. Данная конструкция расположения воздушного промежутка маловероятна на любом участке проведения взрывных работ, трудоемка при использовании аммиачной селитры с дизельным топливом в качестве взрывчатого вещества для скважинного заряда.

Расположение воздушного промежутка в верхней части — наиболее практичный вариант, не требующий никаких изменений в процессе размещения взрывчатого вещества, простой в реализации при взрывании. В крепких породах такое расположение воздушного промежутка может способствовать образованию крупных кусков в зоне образования забойки. Заряды с воздушным промежутком, расположенным в верхней части, показали лучшие результаты по дроблению мягких пород, чем сплошные заряды.

Относительно зарядов с воздушным промежутком на дне скважины, мнения ученых неоднозначны. Эти заряды при взрывании дают наиболее крупное дробление породы по сравнению с двумя другими конструкциями зарядов. Заряды с воздушным промежутком на дне скважины показали большую эффективность, чем заряды с воздушным промежутком в верхней части [21]. Считалось, что данную конструкцию зарядов возможно использовать только в мягких типах пород, но, согласно [12], заряды с воздушным промежутком в основании могут применяться при любой твердости породы. Тем не менее расположение воздушных промежутков на дне скважины рационально в случае, когда они большого диаметра и способны устранить трудности, возникающие при зарядании. Кроме того, воздушный промежуток на дне скважины может защитить взрывчатое вещество от попадания воды, собирающейся в нижней части скважины в период дождей.

При учете всех достоинств и недостатков каждый способ размещения воздушного промежутка в скважинном заряде может применяться в зависимости от условий на месторождении. Выбор объема воздушного промежутка должен осуществляться с учетом типа породы и места расположения воздушного промежутка в скважине.

Другие факторы, требующие глубокого изучения, — длина воздушного промежутка и тип используемых взрывчатых веществ. В ходе проведения взрывных работ используется уравнение, описывающее объем воздушного промежутка $l_{\text{вп}} = (0.15 - 0.35)l_c$, где l_c — длина заряда. Отношение $l_{\text{вп}} / l_c$ уменьшается с увеличением прочности и коэффициента взрываемости породы [8]. При проведении полномасштабных взрывных работ диапазон 0.15–0.35 м нуждается в корректировке в зависимости от расположения воздушного промежутка в скважине. Рекомендованные диапазоны значений для зарядов с различным расположением воздушных промежутков: середина — 0.15–0.45, верх — 0.10–0.30, основание — 0.10–0.25. Низкий диапазон (в нижней части скважины) предназначен для более твердых пород, имеющих неблагоприятные для взрывных работ геологические структуры, в то время как высокий диапазон (в верхней части скважины) — для мягких типов пород, благоприятных для проведения взрывных работ. Для зарядов с воздушным промежутком в середине колонки данный диапазон наиболее высокий, так как заряды такой конструкции показали хорошее дробление породы. Заряды с воздушным промежутком в верхней части при значениях длины в указанных пределах проявили высокую эффективность во время полевых испытаний. Такая конструкция зарядов уступила по степени дробления зарядам с воздушным промежутком в середине, поэтому длина воздушных промежутков в верхней части должна быть меньше, чем у зарядов с воздушной полостью в середине. Увеличение длины воздушного промежутка в верхней части колонки может приводить к образованию больших кусков породы, в данном случае уменьшение максимальной длины является более рациональным.

ВЫВОДЫ

Заряды с воздушным промежутком в середине скважины обеспечивают наиболее эффективное дробление породы, затем следуют заряды с воздушным промежутком в верхней части и менее эффективны заряды с расположением воздушного промежутка на дне скважины. Рекомендуемый объем воздушного промежутка, расположенного в середине заряда, составляет 15–45 %, в верхней части — 10–30, в днище — 10–25 %. При взрывных работах следует применять заряды с воздушным промежутком, начиная с наименьшего рекомендуемого объема, и постепенно увеличивать его. Заряды с воздушным промежутком уменьшают расход взрывчатых веществ на 10–45 % и обеспечивают качественное дробление. Это сокращает затраты на взрывчатые вещества и уменьшает общую себестоимость добычи. Однако для определения эффективности данного метода взрывной отбойки необходимо проведение дополнительных испытаний рассредоточенных зарядов в конкретных условиях добычи на месторождении.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Политехническому институту горного дела Саудовской Аравии, кафедре горного дела и ядерной инженерии Миссурийского университета науки и технологий, а также Инженерно-технологическому университету в Лахоре (Пакистан).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sanchidrian J. A., Segarra P., and López L. M.** Energy components in rock blasting, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2007, Vol. 44, No. 1. — P. 130–147.
2. **Jhanwar J., Jethwa J., and Reddy A.** Influence of air-deck blasting on fragmentation in jointed rocks in an open-pit manganese mine, *J. Eng. Geol.*, 2000, Vol. 57, No. 1. — P. 13–29.
3. **Ozer U.** Environmental impacts of ground vibration induced by blasting at different rock units on the Kadikoy-Kartal metro tunnel, *J. Eng. Geol.*, 2008, Vol. 100, No. 1. — P. 82–90.
4. **Jhanwar J. and Jethwa J.** The use of air decks in production blasting in an open pit coal mine, *J. Geotech. and Geol. Eng.*, 2000, Vol. 18, No. 4. — P. 269–287.
5. **Jhanwar J.** Theory and practice of air-deck blasting in mines and surface excavations: a review, *J. Geotech. and Geol. Eng.*, 2011, Vol. 29, No. 5. — P. 651–663.
6. **Liu L. and Katsabanis P.** Numerical modelling of the effects of air decking/decoupling in production and controlled blasting, *Proc. of 5th Int. Conf. on Rock Fragmentation by Blasting*, AA Balkema, Rotterdam, 1996.
7. **Melnikov N. and Marchenko L.** Effective methods of application of explosion energy in mining and construction, 12th US Symp. on Rock Mech. (USRMS), American Rock Mech. Association, 1970.
8. **Melnikov N. V., Marchenko L. N., Seinov N. P., and Zharikov I. F.** A method of enhanced rock blasting by blasting, *J. Min. Sci.*, 1979, Vol. 6. — P. 32–42.
9. **Park D. and Jeon S.** Reduction of blast-induced vibration in the direction of tunneling using an air-deck at the bottom of a blasthole, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2010, Vol. 47, No. 5. — P. 752–761.
10. **Chi E. A., Liang K. S., and Zhao M. S.** Experimental study on vibration reduction of the hole bottom air space charging, *J. China Coal Soc.*, 2012, Vol. 37, No. 6. — P. 944–950.
11. **Abdalla M.** The environmental impacts of air-deck blasting, University of New South Wales, 2014.
12. **Chiappetta F.** New blasting technique to eliminate subgrade drilling, improve fragmentation, reduce explosive consumption and lower ground vibrations, *J. Explosives Eng.*, 2004, Vol. 21, No. 1. — P. 10–12.

13. **Roy S. and Singh R. S.** Use of spacer aided initiation technique in solid blasting in Indian underground coal mines, *J. Min. Tech.*, 2011, Vol. 120, No. 1. — P. 25–35.
14. **Jhanwar J., Cakraborty A. K., Anireddy H. R., and Jethwa J.** Application of air decks in production blasting to improve fragmentation and economics of an open pit mine, *J. Geotech. and Geol. Eng.*, 1999, Vol. 17, No. 1. — P. 37–57.
15. **Saqib S., Tariq S., and Ali Z.** Improving rock fragmentation using airdeck blasting technique, *Pak. J. Eng. and Appl. Sci.*, 2015, Vol. 17. — P. 46–52.
16. **Thote N. and Singh D.** Effect of air-decking on fragmentation: a few case studies of Indian mining, *J. Explosive and Blasting Technique*, Holmberg (Ed.), Balkema, 2000. — P. 257–265.
17. **Jhanwar J.** Investigation into the influence of air-decking on blast performance in opencast mines in India: a study, *Blasting in Mining-New Trends*, 2012. — P. 105. doi: 10.1201/b13739-14.
18. **Moxon N., Mead D., and Richardson S.** Air-decked blasting techniques: some collaborative experiments, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A, Min. Industry*, 1993, Vol. 102. — P. A25–A30.
19. **Rommayawes S., Leelasukseree C., and Jaroopattanapong P.** Influence of air-deck ength on fragmentation in quarry blasting, *European Scientific J.*, 2014, Vol. 9, No. 10.
20. **Leelasukseree C. and Rommayawes S.** A guideline of empty gap length for air deck blasting in good rockmass, *Rock Mech., Fuenkajorn & Phien-wej (eds.)*, 2011, Vol. 7.
21. **Hayat M. B. and Tariq S. M.** Optimization of bench blasting using air deck blasting technique, *Min. Eng., University of Engineering and Technology Lahore, Pakistan*, 2012.
22. **Floyd J. L.** Power deck optimization, *Blast dynamics Inc.*, 2004.
23. **Lu W. and Hustrulid W.** A further study on the mechanism of airdecking, *Fragblast*, 2003, Vol. 7, No. 4. — P. 231–255.

Поступила в редакцию 09/XI 2018

После доработки 21/XI 2018

Принята к публикации 27/XI 2019