

Предлагаемое изобретение относится к области взрывного дела и может быть использовано при добыче полезных ископаемых и в строительстве.

Наиболее близким к предлагаемому техническому решению является способ подготовки и взрывания скважинных зарядов, включающий формирование в скважине заряда ВВ с размещением боевика в приустьевой части заряда и созданием в донной части скважины воздушной подушки, забойку скважин, монтаж взрывной сети и взрывание зарядов [1].

Применение известного способа приводит к повышению к.п.д. взрыва, улучшению качества дробления горной массы, снижению сейсмического и ударно-воздушного эффектов взрыва.

Недостатками известного способа являются: при его применении не обеспечивается формирование на уровне подошвы уступа максимального импульса взрыва, что не позволяет существенно расширить сетку расположения скважин, уменьшить величину перебура; высокие затраты на производство буровзрывных работ.

Целью предлагаемого технического решения является снижение удельных затрат на производство буровзрывных работ за счет формирования на уровне подошвы уступа максимального импульса взрыва, расширения сетки расположения скважин, уменьшения величины перебура.

Указанная цель достигается тем, что при формировании заряда ВВ на расстоянии от 7 до 12 диаметров заряда (d_0) от нижнего торца колонки ВВ и $(1...4) d_0$ выше уровня подошвы уступа в нем устанавливают дополнительный боевик с детонирующим шнуром (ДШ), прокладываемым по оси скважины в сторону ее устья на длину, определяемую по формуле

$$l = \frac{\frac{c}{D_1} h_1 + W_0 - \sqrt{h_1^2 + W_0^2}}{\frac{c}{D_1} - \frac{c}{D_2}}, \text{ м,}$$

где c - скорость распространения продольной волны напряжений в массиве, м/с; D_1, D_2 - соответственно скорость детонации ВВ, из которого формируется заряд, и ДШ дополнительного боевика м/с; h_1 - высота установки основного боевика в скважине относительно уровня подошвы уступа, м; W_0 - величина линии сопротивления по подошве уступа в направлении отбойки, м. При этом для инициирования дополнительного боевика применяют ДШ с пониженной инициирующей способностью и скоростью детонации, выше скорости детонации ВВ и скорости распространения продольной волны напряжений в массиве. Причем скорость детонации применяемых ВВ и ДШ, а также параметры заряда должны обеспечивать выполнение следующих условий:

$$\frac{h^2}{D_1} + \frac{h_1 - h_2}{D_2} \leq \frac{\sqrt{h_1^2 + W_0^2} - W_0}{c};$$

$$\frac{h_1 - l_0}{D_1} + \frac{l_0}{D_2} \geq \frac{\sqrt{h_1^2 + W_0^2} - W_0}{c};$$

$$\frac{m}{l} \geq (0,4 \dots 0,45) \left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right);$$

где h_2 - высота установки в скважине дополнительного боевика относительно уровня подошвы, м; l_0 - минимальная длина прокладки по заряду ДШ дополнительного боевика, принимаемую в пределах от 6 до 12 диаметров заряда; m - расстояние от дополнительного боевика до нижнего торца колонки ВВ, м.

В предлагаемом способе за счет использования в заряде дополнительного боевика и строго согласованного его инициирования с основным боевиком в массиве происходит эффективное взаимодействие волн напряжений, распространяющихся от различных элементарных участков заряда ВВ на уровне подошвы уступа. Это обеспечивает увеличение амплитуд падающей и отраженных волн напряжений, формирование максимального импульса в нижней части уступа. Большую роль в формировании максимального импульса взрыва в указанном участке массива играет место расположения дополнительного боевика - на расстоянии 1-4 диаметров заряда выше подошвы уступа.

В месте расположения дополнительного боевика детонационная волна падает на стенки скважины под прямым углом. В результате этого в прилегающем участке массива генерируется элементарная волна с повышенными параметрами. Это приводит к более интенсивному зарождению и развитию зон разрушений вокруг скважины в нижнем участке уступа, а также способствует увеличению амплитуды суммарной волны напряжений.

На уровне подошвы уступа происходит также интенсивное взаимодействие волн напряжений, генерируемых при детонации элементарных участков колонки ВВ, находящихся по обе стороны от дополнительного боевика, в непосредственной близости от него, что обеспечивает увеличение амплитуды волны напряжений в нижней части уступа как в средней, так и в дальней от скважины зонах.

Импульсы взрыва и радиус зон разрушения вокруг скважины в нижней части уступа, образующихся при детонации заряда ВВ, значительно возрастают при использовании дополнительных боевиков, изготавливаемых из мощных ВВ с высокой скоростью детонации. При взрыве такого боевика во взрывчатом веществе возбуждается высокоскоростной режим детонации, который распространяется по колонке ВВ на 2-5 диаметров заряда за пределы места установки боевика. При этом в окружающем массиве генерируется волна напряжений с повышенными начальными параметрами.

Формирование максимального импульса взрыва на уровне подошвы уступа, где имеет место наиболее тяжелые условия отбойки горной породы уступа, позволяет значительно расширить сетку скважин и

уменьшить величину перебура.

В предлагаемом способе, как и в известном способе, предусматривается использование воздушной подушки, которая обеспечивает после завершения детонационного процесса в заряде ВВ образование мощного потока продуктов взрыва в направлении дна скважины и отраженной ударной волны сжатия, образующейся при их торможении уменьшения бризантного и увеличения фугасного действия взрыва, улучшение качества дробления горной массы, снижение ударно-воздушного и сейсмического эффектов взрыва. Вместе с тем, в предлагаемом способе при распространении отраженной ударной волны сжатия по зарядной полости обеспечивается более интенсивное нагружение массива в нижней части уступа, что обусловлено наличием в этой части уступа вокруг скважины более развитой зоны первичных разрушений. Это способствует дальнейшему расширению сетки расположения скважин и уменьшению величины перебура.

Предлагаемый способ предусматривается применять при уступной отбойке горных пород и проходке траншей с использованием нисходящих вертикальных скважин. Заряд ВВ, применяемый в предлагаемом способе, представлен на фиг.

Предлагаемый способ реализуется следующим образом: 1) в донную часть скважины 1 для создания воздушной подушки 2 помещают соответствующее количество гранулированного пенополистирола либо полые цилиндры из пластмассы или плотной бумаги; 2) в скважине 1 формируют нижний участок колонки ВВ 3; 3) в скважине 1 устанавливают дополнительный боевик 4 с ДШ 5, подвешивают их с помощью шпагата 6; 4) в скважине 1 формируют основной участок колонки ВВ 7 и устанавливают основной боевик 8; 5) в устьевой части скважины 1 формируют забойку 9 из инертного материала; 6) монтируют наружную взрывную сеть и производят взрывание зарядов ВВ.

Основными новыми конструктивными элементами заряда, применяемыми при предлагаемом способе, являются дополнительный боевик и ДШ дополнительного боевика. Они обеспечивают формирование максимального импульса взрыва, а также интенсивное образование зоны разрушения вокруг скважины на уровне подошвы уступа, где имеют место наиболее трудные условия работы заряда по отбойке - максимальная величина ЛНС, дополнительные затраты энергии взрыва для отрыва по плоскости подошвы уступа, увеличенное геометрическое расхождение волн напряжений, обусловленное близостью к торцу заряда.

Дополнительный боевик расположен между основными и нижними участками колонки ВВ и инициирует в них детонационные волны, которые в нижнем участке колонки ВВ распространяются сверху вниз, в сторону воздушной подушки, а в основном участке колонки ВВ - снизу в верх, навстречу детонационной волне, инициируемой основным боевиком.

Для изготовления дополнительного боевика могут быть использованы штатные шашки-детонаторы или патроны ВВ. При отбойке крепких слаботрещиноватых горных пород целесообразно применять дополнительные боевики, изготовленные из мощных ВВ, обладающие повышенной инициирующей способностью и возбуждающие в колонке ВВ сверхскоростной режим детонации. Это позволяет на расстоянии нескольких диаметров заряда по длине скважины интенсифицировать процесс зарождения и развития первичных зон разрушений, а также увеличить общий импульс взрыва на уровне подошвы уступа.

Основное назначение ДШ дополнительного боевика - это возбудить детонацию в дополнительном боевике. Причем его длину принимают из расчета одновременного прихода фронтов волн напряжений к участку массива, расположенному на свободной поверхности по линии сопротивления по подошве уступа как от основного боевика, так и от элементарного участка заряда, расположенного на уровне подошвы уступа. При этих условиях на уровне подошвы уступа формируется максимальный импульс волны напряжений.

Другим назначением ДШ дополнительного боевика является создание в основном участке колонки ВВ осевого канала, который обеспечивает усиление движения продуктов детонации в сторону воздушной подушки, а также исключает при достаточных больших величинах лобовое столкновение фронтов двух детонационных волн, распространяющихся по основному участку колонки ВВ навстречу друг другу.

Если бы происходило лобовое столкновение двух детонационных волн, то в результате многократного увеличения давления в продуктах детонации в месте столкновения значительно увеличился бы радиус зоны разрушения. В дальнейшем в квазистатической фазе действия взрыва это привело бы к более интенсивному разрушению массива в указанном участке, притоку энергии взрыва к этому месту из других участков зарядной полости. При этом при больших величинах место столкновения детонационных волн находилось бы на значительном удалении от подошвы уступа. Это привело бы к ослаблению действия взрыва в нижней части скважины, привело бы к увеличению затрат на буровзрывные работы.

В качестве ДШ дополнительного боевика может быть использован маломощный детонирующий шнур. При отсутствии последнего могут быть использованы для этой цели детонирующие шнуры средней мощности, например ДША, ДШЭ-12, помещаемые в демфирующую оболочку.

При детонации ДШ дополнительного боевика в окружающих ДШ слоях промышленного ВВ детонационный процесс не возбуждается, а происходит только уплотнение ВВ с образованием осевого канала в колонке ВВ. Затем при распространении детонационной волны по участку колонки ВВ с осевым каналом в последнем возникает и распространяется так называемая канальная волна, представляющая собой ударную воздушную волну, распространяющуюся со скоростью более высокой, чем скорость детонации ВВ, за фронтом которой происходит движение потока воздуха и продуктов детонации (см. Скважинные заряды взрывчатых веществ с осевой воздушной полостью [2]).

При встрече фронта канальной волны, который может значительно опережать фронт детонационной волны, с препятствием происходит резкое повышение давления и температуры среды в осевом канале. В результате этого возбуждается детонация в участке колонки ВВ, расположенном перед основным фронтом детонации.

Важнейшими особенностями зарядов ВВ с осевой полостью являются значительно более интенсивное, чем у обычных колонковых зарядов, движение продуктов взрыва в направлении распространения

детонационной волны, уменьшенное бризантное и увеличенное фугасное действие взрыва на массив, расположенный вокруг скважины,

Заряд, применяемый в предлагаемом способе подготовки и взрыва работает следующим образом.

Под действием взрыва боевика 8 возбуждается детонация основного участка колонки ВВ 7. Детонационная волна, распространяясь по основному участку колонки ВВ 7 сверху вниз, через некоторый промежуток времени достигает ДШ 5 и возбуждает в нем детонацию. Некоторый промежуток времени одновременно детонирует ДШ 5 и основной участок колонки ВВ 7. Фронт детонационной волны в ДШ 5 с течением времени все более опережает фронт детонационной волны, распространяющийся в участке колонки ВВ 7. При этом в результате детонации ДШ 5 в колонке промышленного ВВ сформируется осевой канал.

Детонационная волна, распространяющаяся по ДШ 5, достигает дополнительный боевик 4 и инициирует его. В свою очередь последний возбуждает детонацию в верхнем торце нижнего участка 3 и нижнем торце основного участка 7 колонки ВВ. С момента взрыва дополнительного боевика 4 по основному участку колонки ВВ 7 навстречу друг другу движутся две детонационные волны, а по осевому каналу - каналные волны. При этом фронты каналных волн опережают соответствующие фронты детонационных волн. Причем у возникшей раньше каналной волны, распространяющейся сверху вниз, это опережение значительно больше, чем во встречной каналной волне.

Через некоторый промежуток времени после взрыва дополнительного боевика 4 происходит столкновение двух каналных волн, и в месте их столкновения возбуждается детонационная волна, распространяющаяся от поверхности осевого канала к наружной боковой поверхности колонки ВВ.

К моменту подхода основных фронтов детонационных волн к указанному участку заряда в нем завершается детонационный процесс, и в месте столкновения каналных волн происходит столкновение двух потоков продуктов детонации. В результате в продуктах детонации образуется скачок давления, и в скважине распространяются два фронта ударных волн сжатия, один из которых направлен в сторону воздушной подушки, другой - в сторону устья скважины. После столкновения указанных потоков продуктов детонации в результате их взаимодействия образуется суммарный поток, движение которого направлено в сторону воздушной подушки.

Фронт детонационной волны, распространяющийся в нижнем участке колонки ВВ, с течением времени достигает нижнего торца колонки В. В результате этого начинается истечение продуктов детонации в воздушную подушку, образование и распространение в сторону дна скважины ударной воздушной волны сжатия. А по продуктам детонации в сторону устья скважины распространяется волна разрежения, приводящая всю массу продуктов детонации в мощное движение в направлении дна скважины.

При отражении ударной воздушной волны от дна скважины и торможении движения потока продуктов детонации формируется отраженная ударная волна сжатия, распространяющаяся от дна к устью скважины и обладающая большим запасом энергии. Распространение по продуктам детонации, заполняющих скважину, указанных волны разрежения и ударной волны сжатия уменьшают длительность действия пикового давления и удлиняет время действия среднего давления продуктов взрыва.

Таким образом, при взрыве скважинного заряда ВВ, применяемого при предлагаемом способе, отбиваемый массив подвергается трехкратному динамическому нагружению: при распространении по заряду детонационной волны; при распространении по продуктам детонации ударной волны сжатия, образовавшейся при столкновении двух потоков продуктов детонации на основном участке колонки ВВ; при распространении по продуктам детонации ударной волны сжатия, образовавшейся в результате торможения продуктов детонации при столкновении их с дном скважины.

При детонации заряда ВВ под действием продуктов детонации в окружающем скважину массиве образуется и распространяется волна напряжений осевой симметрии. В начальный период после инициирования заряда ВВ в массиве возникает и распространяется волна напряжений, возбуждаемая под действием взрыва верхней части основного участка колонки ВВ. С момента взрыва дополнительного боевика в массиве возникает и распространяется волна напряжений, возбуждаемая детонацией нижнего участка и нижней части основного участка колонки ВВ. Через некоторый промежуток времени фронты волн напряжений смыкаются, образуя общий фронт. Вблизи зарядной полости на фронте волны и непосредственно за ним происходят интенсивные пластические деформации и измельчение горной породы, формируется зона смятия. На больших удаленных от заряда со значительным отставанием от фронта волны напряжений зарождаются трещины, которые затем в течение определенного времени раскрываются и распространяются в массиве. Под воздействием продуктов детонации происходит постепенное расширение зарядной полости, в результате чего снижается давление в продуктах взрыва, а энергия последних переходит в энергию волны напряжений.

Наиболее благоприятные условия для образования зоны смятия и зарождения радиальных трещин вокруг скважины возникают в местах установки дополнительного и основного боевиков. Это в первую очередь обусловлено тем, что в указанных местах скважины детонационная волна падает на стенки скважины под прямым углом, что приводит к более интенсивному увеличению давления как в продуктах детонации, так и в волне напряжений.

На развитие радиальных трещин вокруг скважины и деформирование горной породы в зоне смятия большое влияние оказывают волновые процессы, протекающие в продуктах детонации на последующих после детонации этапах развития взрыва. Так, на участке расположения дополнительного боевика по мере распространения двух фронтов детонационных волн в противоположные направления в прилегающем к скважине участке массива формируется зона смятия. За фронтом волны напряжений происходит радиальное смещение частиц массива, в результате за пределами зоны смятия с отставанием фронта волны возникают растягивающие тангенциальные напряжения. С полем смещения частиц среды эти направления возрастают по модулю, что обеспечивает зарождение, а в дальнейшем и развитие радиальных трещин.

При приходе к указанному участку скважины ударной волны сжатия, вызванной соударением двух

потоков продуктов взрыва, распространяющимися за фронтами встречных детонационных волн в основном участке колонки ВВ, увеличивается радиальное смещение частиц среды. Последнее приводит затем к увеличению тангенциальных растягивающих напряжений и повышению интенсивности роста радиальных трещин. С прохождением по продуктам детонации волны разряжения, обусловленной истечением продуктов взрыва в воздушную подушку, в зоне смятия по всей длине скважины постепенно прекращаются пластические деформации, а зарождение и развитие радиальных трещин продолжается с прежней интенсивностью. С прохождением по продуктам детонации ударной волны сжатия, вызванной торможением продуктов детонации при их истечении в воздушную подушку, процесс радиального смещения частиц массива усиливается, все больше нарастает величина растягивающих тангенциальных напряжений, интенсифицируется развитие радиальных трещин.

Из литературных источников известно, что с образованием зоны разрушения вокруг зарядной полости источником волны напряжений в дальнейшем являются эта зона разрушения [3]. По мере увеличения радиуса зоны разрушения относительные расстояния для фиксированных точек массива уменьшаются. Это приводит к тому, что в квазистатической фазе развития взрыва в указанных точках массива даже при спаде давления в зарядной полости радиальные и тангенциальные напряжения могут увеличиваться по модулю, что способствует дальнейшему увеличению зоны разрушения. Поэтому образование зоны смятия и зоны зарождения радиальных трещин увеличенных размеров (по радиусу) в массиве в месте установки дополнительного боевика в дальнейшем на последующих этапах развития взрыва обеспечивается более интенсивное разрушение горной породы вблизи подошвы уступа.

Обоснование основных параметров способа.

Одной из главных задач, которая решается в предлагаемом способе, является увеличение амплитуды волны напряжений в наиболее отдаленном от заряда участке массива, расположенного на линии сопротивления по подошве уступа.

Из литературных источников известно, что действие взрыва удлиненного заряда аналогично суммарному действию серии сближенных сосредоточенных элементарных зарядов, расположенных на одной линии. Волны напряжений, распространяющиеся от элементарных сосредоточенных зарядов, взаимодействуют между собой и формируют общий фронт волны напряжений. При этом при наличии возможности инициировать каждый элементарный заряд в строго определенный момент времени максимальная амплитуда волны напряжений в указанном выше участке массива достигалась бы, когда фронты всех элементарных волн приходили к нему одновременно. Однако в полном объеме это не осуществимо.

Увеличение амплитуды волны напряжений в отмечаемом выше участке массива может быть достигнуто при прямом инициировании заряда и применении ВВ, имеющие скорости детонации порядка 6000 м/с и выше, что технически трудно осуществимо, а экономически нецелесообразно. Кроме того, при использовании такого способа не решалась бы другая, не менее важная задача - увеличение амплитуды волны напряжений на уровне подошвы уступа в непосредственной близости от скважины, а также в средней зоне. Оптимальным решением указанных выше задач является использование дополнительного боевика, устанавливаемого несколько выше уровня подошвы уступа и инициируемого строго согласованно со взрывом основного боевика.

Условие прихода волн напряжений в точку А массива, расположенной на свободной поверхности на уровне подошвы уступа от основного боевика и элементарного заряда, находящегося на уровне подошвы уступа, можно записать в следующем виде (см.фиг.):

$$\frac{AB}{c} = \frac{BC - l}{D_1} + \frac{l}{D_2} + \frac{AC}{c} \quad (1)$$

при этом $\overline{BC} = h_1$, $\overline{AC} = W_0$.

Из прямоугольного треугольника ABC имеем

$$\overline{AB} = \sqrt{BC^2 + AC^2} = \sqrt{h_1^2 + W_0^2} \quad (2)$$

С учетом (2) выражение (1) принимает вид

$$\frac{\sqrt{h_1^2 + W_0^2}}{c} = \frac{h_1 - l}{D_1} + \frac{l}{D_2} + \frac{W_0}{c} \quad (3)$$

После ряда преобразования выражения (3) получаем полное квадратное уравнение

$$\left(\frac{c}{D_1} - \frac{c}{D_2}\right) - 2\left(\frac{c}{D_1}h_1 + W_0\right)l + \frac{1}{\frac{c}{D_1} - \frac{c}{D_2}} \left[h_1^2 \left(\frac{c^2}{D_1^2} - 1\right) + 2\frac{c}{D_1}h_1W_0\right] = 0 \quad (4)$$

Один из корней уравнения (4) дает нам искомую длину прокладки ДШ дополнительного боевика по скважине

$$l_{1,2} = \frac{\frac{c}{D_1}h_1 + W_0 - \sqrt{h_1^2 + W_0^2}}{\frac{c}{D_1} - \frac{c}{D_2}}$$

При этом первый корень значительно больше длины заряда, что лишено физического смысла, поэтому

длина прокладки ДШ равна второму корню уравнения (4).

Максимальная величина l равна $h_1 - h_2$ и имеет место, когда ДШ дополнительного боевика прокладывают на всем интервале между основным и дополнительным боевиками.

Минимальная длина прокладки ДШ дополнительного боевика (l_0) может быть определена из условий, что до окончания детонации основного участка колонки ВВ (т.е. до начала взаимодействия двух потоков продуктов детонации) в массиве вокруг скважины в месте установки дополнительного боевика должна сформироваться зона смятия (которая в дальнейшем является источником возмущения в массиве).

Радиус зоны смятия зависит прежде всего от физико-механических характеристик горных пород, работоспособности и скорости детонации ВВ, плотности заряжения. В крепких горных породах при применении гранулированных ВВ средней мощности он не превышает 3-4 радиусов заряда (скважины). Соответственно толщина этой зоны составляет 2-3 радиуса заряда. При диаметре заряда 250 мм это составит 0,25-0,32 м. В этой зоне взрывная волна является ударной волной сжатия и распространяется в горной породе со скоростью, превышающей скорость распространения упругой продольной волны. Разрушение горной породы вблизи заряда происходит на фронте ударной волны, т.е. фронт разрушения в зоне смятия распространяется в массиве со скоростью ударной волны. При средней скорости ударной волны 4000 м/с время формирования зоны смятия равно 0,06...0,08 мс.

Это время должно быть меньше времени распространения детонационной волны, возбуждаемой в основном участке заряда дополнительным боевиком до момента столкновения со встречной детонационной волной (взаимодействием канальных волн пренебрегаем, тем более, что при малых значениях их опережение фронтов детонационных волн минимально).

Время распространения детонационной волны, возбуждаемой дополнительным боевиком в основном участке колонки ВВ, равно

$$t_2 = \frac{l_0 - l_1}{2D_1}, \quad (6)$$

где l_1 - длина участка колонки ВВ с проложенным ДШ, который детонирует за фронтом детонационной волны, возбуждаемой основным боевиком, м.

В свою очередь величина l_1 зависит от времени детонации ДШ, проложенного по колонке ВВ,

$$l_1 = D_1 t_1, \quad (7)$$

где t_1 - время детонации отрезка ДШ, с, которое равно

$$t_1 = \frac{l_0}{D_2} \quad (8)$$

С учетом (7) и (8) выражение (6) принимает вид

$$t_2 = \frac{l_0}{2D_1} \left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right), \quad (9)$$

откуда

$$l_0 = \frac{2D_1 t_2}{\left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right)}, \quad (10)$$

При $D_1 = 4000$ м/с, $D_2 = 7000$ м/с и $t_2 = 0,08 \cdot 10^{-3}$ с расчеты по формуле (10) дают $l_0 = 1,5$ м, что при диаметре заряда 250 мм составляет 6 диаметров заряда. С увеличением D_1 до 5000 м/с при неизменных D_2 и t_2 величина l_0 возрастает до 2,7 м, или примерно до 11 d_0 . Поэтому вполне обосновано можно считать, что применительно к железорудным и подобным карьерам, на которых применяют в основном скважины большего диаметра, минимальная длина прокладки ДШ дополнительного боевика должна быть в пределах от 6 до 12 диаметров заряда. Указанная выше величина l_0 вполне приемлема и с точки зрения усиления движения потока продуктов детонации в сторону воздушной подушки, что обеспечивает уменьшение длины последней.

Достижение максимального импульса взрыва на уровне подошвы уступа возможно только в случае, если скорость детонации ДШ дополнительного боевика выше скорости детонации ВВ и скорости распространения волны напряжений в массиве. Дополнительно к этому, для того, чтобы при расчете по формуле (5) величина l была в пределах от l_0 до $h_1 - h_2$, должны выполняться следующие условия (см. фиг. 1): 1) при $l = h_1 - h_2$ время распространения волны напряжений в массиве от основного боевика до точки А (t_{BA}) должно быть больше или равно сумме времени распространения волны напряжений от заряда до точки А по подошве уступа (t_{CA}) и времени от момента взрыва основного боевика до момента детонации элементарного участка заряда, расположенного на уровне подошвы уступа, т.е. времени распространения детонации по колонке ВВ и ДШ от основного боевика до подошвы уступа (t_{BC});

2) при $l = l_0$ время t_{BA} должно быть меньше или равно сумме времени t_{CA} и t_{BC} .

Эти условия можно записать в следующем виде:

$$\frac{h_2}{D_1} + \frac{h_1 - h_2}{D_2} \leq \frac{\sqrt{h_1^2 + W_0^2} - W_0}{c}$$

$$\frac{h_1 - l_0}{D_1} + \frac{l_0}{D_2} \leq \frac{\sqrt{h_1^2 + W_0^2} - W_0}{c}$$

Расположение дополнительного боевика относительно уровня подошвы уступа определено, исходя из следующих соображений. Зона разрушения увеличенного радиуса, образующаяся при детонации заряда ВВ должна быть максимально приближена к подошве уступа и вместе с тем дальнейшее ее развитие в квазистатической фазе действия взрыва должно происходить в условиях влияния свободной поверхности. Поэтому в случае использования дополнительных боевиков средней мощности их следует устанавливать на 1-1,5 диаметра выше подошвы уступа. Если же применяются дополнительные боевики высокой мощности, возбуждающие в колонке ВВ сверхскоростную детонацию, высоту установки их целесообразно увеличить до 3-4 диаметров заряда.

Расстояние между дополнительными боевиком и нижним торцом колонки ВВ, который граничит с воздушной подушкой, оказывает большое влияние на разрушающее действие взрыва заряда в месте установки дополнительного боевика. С увеличением этого расстояния все позже приходит к месту установки дополнительного боевика волна разрежения, образующаяся в результате истечения продуктов детонации в воздушную полость. Это способствует увеличению времени действия высокого давления продуктов взрыва в месте установки дополнительного боевика и прилегающих к нему участках скважин, увеличивает в этом месте радиус первичной зоны разрушений в массиве вокруг скважины. Однако при большом увеличении расстояния между дополнительным боевиком и нижним торцом колонки ВВ возникает необходимость в увеличении величины перебура, что связано с дополнительными затратами на производство буровзрывных работ. Поэтому величина указанного параметра должна быть, с одной стороны, достаточной для эффективного действия взрыва в месте дополнительного боевика во время детонации заряда, а с другой стороны не приводить к увеличению величины перебура.

При известном способе подготовки и взрывания скважинных зарядов без использования воздушной подушки при отбойке крепких пород и диаметре скважины 250 мм величина перебура обычно составляет порядка 3 м. Такая же величина перебура принимается обычно и при известном способе с использованием воздушной подушки. При этом высоту последней принимают равной порядка 2 м.

При применении предлагаемого способа высоту воздушной подушки представляется возможным существенно уменьшить.

По нашим оценкам, подтвержденным экспериментально, минимальная высота воздушной подушки при применении предлагаемого способа с использованием скважин диаметром 250 мм составляет порядка одного метра, или четыре диаметра заряда. Поэтому при величине перебура, равном 3 м (12 диаметров заряда), максимальное расстояние между дополнительным боевиком и нижним торцом колонки ВВ составило бы порядка девяти диаметров заряда - в случае применения дополнительного боевика средней мощности. А в случае когда применяется дополнительный боевик большой мощности этот параметр достигал бы величины 12 диаметров заряда.

При высоте воздушной подушки, равной восьми диаметрам заряда, длина участка колонки ВВ, расположенного ниже дополнительного боевика, при неизменной величине перебура, составило бы всего пять диаметров заряда - в случае применения боевика средней мощности, а в случае применения мощного боевика - девять диаметров заряда.

Таким образом, из конструктивных соображений в предлагаемом способе величина m могла бы приниматься в пределах от 5 до 12 диаметров заряда. Окончательно величина этого параметра определена из расчета того, что до момента прихода фронта волны разрежения к месту установки дополнительного боевика в ударную волну, распространяющуюся по массиву, успевает перейти не менее 2/3 общей энергии, которая переходит в нее в течении положительной фазы. Это условие может быть записано в следующем виде:

$$E_1^H / E_0^H \geq 2/3 \quad (13)$$

где E_0^H , E_1^H - соответственно общее количество удельной энергии, заключаемой в положительной фазе волны, и количество удельной энергии, которая переходит в ударную волну до прихода волны разрежения.

Из литературных источников известно (см. Ханукаев А.Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. - М., 1974, - с. 62 - 65), что количество удельной энергии, заключенной в положительной фазе ударной волны, распространяющейся в массиве, определяется из выражения

$$E_0 = \rho N_{cp} \int_0^{\tau_0} V^2(\tau) d\tau, \quad (14)$$

где ρ - плотность горной породы, кг/м³; N_{cp} - средняя скорость ударной волны в массиве, м/с; V - массовая скорость частиц массива, м/с; τ_0 - длительность положительной фазы волны, с.

Следует отметить, что E_0 для точек массива, расположенных на стенках зарядной полости, является E_0^H . Учитывая вышеизложенное, долю энергии, передаваемой зарядом массиву до прихода волны разрежения, можно выразить следующим образом:

$$\frac{E_1^H}{E_0^H} = \frac{\int_0^{\tau_1} V_n^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\tau_0} V_n^2(\tau) d\tau}, \quad (15)$$

где τ_1 - время воздействия продуктом детонации на стенки зарядной полости в месте установки дополнительного боевика до прихода волны разрежения, с; V_n - массовая скорость частиц массива, расположенных на стенках зарядной полости, м/с.

Время действия на стенки скважины продуктов детонации в месте установки дополнительного боевика до прихода фронта волны разрежения определяется из выражения

$$\tau_1 = \frac{m}{N_{cp}} + \frac{m}{c_1} = m \left(\frac{1}{N_{cp}} + \frac{1}{c_1} \right), \text{ с.} \quad (16)$$

где $c_1 = 0,6 D_1$ - скорость распространения волны разрежения в продуктах взрыва, м/с. Длительность положительной фазы взрывной волны, возникающей при взрыве удлинённых зарядов промышленных ВВ средней мощности в крепких горных породах, можно определить по формуле

$$\tau_0 = \left[50 + 0,21 \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right) \right] R_0 \cdot 10^{-3}, \text{ с} \quad (17)$$

где R - расстояние от оси заряда, м; R_0 - радиус заряда, м, (Ханукаев А.Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. - М.: 1974, с. 85).

В непосредственной близости от заряда, т.е. когда $R = R_0$, выражение (17) принимает вид

$$\tau_0 = 50 R_0 \cdot 10^{-3}, \text{ с.} \quad (18)$$

Для оценки доли энергии, передаваемой зарядом массиву при различных величинах m , воспользуемся результатами лабораторных исследований закономерности движения стенок зарядной полости с помощью рентгеновской сверхскоростной установки, приведенных в указанной выше работе А.Н. Ханукаева (см. с. 62 - 65 и рис. 30).

В табл. приведены данные о скорости перемещения стенок зарядной полости в различные моменты времени, взятые из графика "массовая скорость - время" для сланца (плотность - 1340 кг/м³, скорость упругой продольной волны - 1800 м/с). Тип ВВ - ТЭН. В таблице также приведены вычисленные нами для

$$V_n^2, \int_0^{\tau} V_n^2(\tau) d\tau, E/E_0, \tau/\tau_0.$$

соответствующих моментов времени величины

Анализ данных таблицы показывает, что за промежуток времени после взрыва 0,18 длительности положительной фазы волны в массив переходит 2/3 общего количества энергии ударной волны. Учитывая возможность разброса удельных параметров взрыва в различных условиях, можно с достаточным основанием считать, для передачи массиву не менее 2/3 доли общего количества энергии ударной волны время действия взрыва должно быть порядка 0,18-0,20 длительности положительной фазы волны.

При диаметре заряда 250 мм (радиус заряда - 0,125 м) расчеты по формуле (17) дают, что длительность положительной фазы волны составляет $\tau = 6,25 \cdot 10^{-3}$ с, Минимальное необходимое время действия продуктов детонации в месте расположения дополнительного боевика до прихода волны разрежения составит $n = (1,125 \dots 1,250) \cdot 10^{-3}$ с.

Для определения величины m преобразуем выражение (16) к виду

$$m = \tau_1 \frac{c_1 N_{cp}}{c_1 + N_{cp}} \quad (19)$$

Подставляя значения соответствующих параметров в формулу (19), определяет величины параметра m . При $N_{cp} = 4000$ м/с, $c_1 = 2400$ м/с и $\tau_1 = 1,125 \cdot 10^{-3}$ с, величина m равна 1,687 м, или 6,75 диаметра заряда (при $d_0 = 0,25$ м).

При тех же значениях N_{cp} и c_1 в случае, когда $\tau_1 = 1,6 \cdot 10^{-3}$ с, величина m равна 1,875 м, или 7,5 диаметра заряда.

В случае, когда $N_{cp} = 5000$ м/с и $c_1 = 3000$ м/с при величине $\tau_1 = 1,125 \cdot 10^{-3}$ и $1,250 \cdot 10^{-3}$ с, величина составит соответственно 2,11 и 2,34 м, или 8,4 и 9,4 диаметра заряда.

Таким образом, с учетом конструктивных соображений и физики процесса величина m находится в пределах от 7 до 12 диаметров заряда. При этом высоту воздушной подушки следует принимать от 4 до 6 диаметров заряда.

Одним из важных условий эффективной работы заряда, применяемого в предлагаемом способе, является то, что детонация основного участка колонки ВВ должна завершаться не позже, чем в данном участке колонки ВВ. В таких условиях в месте установки дополнительного боевика участок массива подвергается динамическим нагружением, обусловленным прохождением по продуктам детонации ударной волны сжатия, вызванной взаимодействием двух потоков продуктов детонации на участке колонки ВВ, где расположен ДШ дополнительного боевика. Это обеспечивает усиление процесса зарождения и развития радиальных трещин вокруг скважины в нижней части уступа.

Указанное выше реализуется в том случае, если время распространения детонационной волны, возбуждаемой дополнительным боевиком в нижней части основного участка колонки ВВ, до завершения детонационного процесса в основном участке колонки ВВ t_2' будет меньше или равно времени детонации

нижнего участка колонки ВВ t_2'' .

Для определения величины t_2' может быть использована формула, аналогичная выражению (9), где вместо l_0 фигурирует параметр l и вносится поправка, учитывающая сокращение времени детонации основного участка колонки ВВ за счет очага детонации в месте соударения двух встречных канальных волн.

$$t_2' = \frac{Kl}{2D_1} \left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right), \quad (20)$$

где K - коэффициент, учитывающий уменьшение времени детонации основного участка колонки ВВ в месте прокладки ДШ дополнительного боевика за счет инициирования канальными волнами нового очага детонации. В расчетах величина K может быть взята равной 0,8 - 0,9,

Время t_2'' определяется из выражения

$$t_2'' = \frac{m}{D_1} \quad (21)$$

С учетом (20) и (21) неравенство $t_2' \geq t_2''$ запишется в следующем виде

$$\frac{m}{D_1} \geq \frac{Kl}{2D_1} \left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right) \quad (22)$$

После преобразований выражение (22) с учетом значений K принимает вид

$$\frac{m}{l} \geq (0,4 \dots 0,45) \left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right) \quad (23)$$

Проверка эффективности предложенного способа в промышленных условиях

Промышленные эксперименты проводили на карьере СевГОКа в Кривбассе.

Массив опытного блока представлен среднетрещиноватыми необводненными горными породами с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова $f = 12-14$. Скорость распространения продольной волны напряжений в массиве 3500 м/с. Высота уступа - 15 м.

Опытный блок был разделен на два участка - экспериментальный и контрольный. На последнем применяли обычную для карьеров Кривбасса технологию буровзрывных работ. Использовали вертикальные скважины диаметром 250 мм, располагаемые по прямоугольной сетке с параметрами $a \times b = 6,5 \times 6,5$ м. Величина перебура - 3 м, глубина скважин - 18 м. Тип ВВ - граммонит 79/21; длина и масса заряда соответственно 11 м и 500 кг; длина забойки - 6,6 м.

Конструкция заряда - сплошная колонковая с размещением боевика в скважине на 1 м выше уровня подошвы уступа. Способ инициирования - с помощью ДШ; использовалась диагональная схема многорядного короткозамедленного взрывания (МКЗВ).

На экспериментальном участке применяли предлагаемую технологию буровзрывных работ. При этом диаметр скважин, тип ВВ и способ взрывания зарядов применяли те же, что и на контрольном участке. Сетку расположения скважин увеличили до $7,0 \times 7,0$ м, глубину перебура уменьшили до 2,5 м, длину и массу заряда снизили соответственно до 10 м и 450 кг. На экспериментальном участке применяли, как и на контрольном участке, диагональную схему МКЗВ, причем угол между фронтом блока и диагоналями (линиями, соединяющими скважинные заряды, взрывающиеся с одинаковым замедлением) принимали 45° . Основной боевик устанавливали в скважинах на 8 м, а дополнительный - на 0,3 м выше уровня подошвы уступа. Длину нижнего участка колонки ВВ (расстояние от дополнительного боевика до нижнего торца колонки ВВ) принимали 1,8 м, а высоту воздушной подушки - 1 м.

Для создания воздушной подушки в донную часть скважин помещали полые цилиндры, изготавливаемые из плотной бумаги (в несколько слоев) и пропитанные жидким стеклом. Для этих целей использовали бумагу из-под мешков ВВ.

В качестве основного и дополнительного боевиков использовали по две шашки - детонаторы Т-400 с детонирующими шнурами марки ДШ-А. При этом ДШ дополнительного боевика помещали в резиновый шланг. Длину прокладки по заряду ДШ дополнительного боевика принимали в соответствии с расчетом по формуле (5). В расчетах принимали: $c = 3500$ м/с; $D_1 = 4000$ м/с; $D_2 = 7000$ м/с; $h_1 = 8$ м. Величину линии сопротивления по подошве в направлении отбойки определяли из выражения

$$W_0 = a \sin \alpha, \quad (24)$$

где a - расстояние между скважинами в ряду, м; α - угол наклона диагонали к линии фронта блока,

$$W_0 = 6,5 \sin 45^\circ = 6,5 \cdot 0,707 = 4,95 \text{ м.}$$

При указанных выше параметрах длина прокладки ДШ дополнительного боевика составляла

$$l = \frac{3500}{4000} \cdot 8 + 4,95 - \sqrt{8^2 + 4,95^2} = 7,25 \text{ м.}$$

Как непосредственно после массового взрыва, так и в процессе погрузочных работ велись визуальные наблюдения за качеством дробления горной массы на экспериментальном участке и контрольном участке, а также за качеством проработки подошвы уступа. Эти наблюдения показали, что предлагаемый способ позволяет при существенно меньших удельных затратах на производство буровзрывных работ по сравнению с обычной технологией БВР добиться более качественно и равномерного дробления горной массы, улучшить проработку подошвы уступа.

Следует отметить, что при использовании предлагаемого способа в случае относительно небольшой высоты уступа могут применяться в основном диагональные и клиновые схемы МКЗВ. В случае большой, высоты уступа представляется возможным использовать и другие схемы МКЗВ, в том числе и порядные. При применении диагональной схемы МКЗВ за счет изменения угла между диагональю и фронтом блока представляется возможным в достаточно широких масштабах изменять параметры W для обеспечения условий использования предлагаемого способа.

$\tau \cdot 10^{-6}, \text{с}$	$V, \text{м/с}$	$V^2 \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}^2$	$\Delta S \cdot 10^{-3}, \text{м}^2/\text{с}$	$\tau \cdot 10^{-3} \int_0^\tau V^2(\tau) d\tau, \text{м}^2/\text{с}$	E/E_0	τ/τ_0
1	2	3	4	5	6	7
0	1000	1000	0	0	0	1
1	830	689	844,5	844,4	0,318	0,0667

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7
2	700	490	589,5	1434,0	0,540	0,1333
3	570	325	407,5	1841,5	0,694	0,2
4	460	212	268,5	2110,0	0,795	0,2667
5	380	144	178	2288,0	0,862	0,3333
6	320	102	123	2441,0	0,908	0,4
7	260	68	85	2496,0	0,940	0,4667
8	210	44	56	2552,0	0,961	0,53333
9	180	32	38	2590,0	0,976	0,6
10	150	23	27,5	2617,0	0,986	0,6667
11	120	14	18,5	2636,0	0,993	0,7333
12	80	6	10	2646,0	0,997	0,8
13	60	4	5	2651,0	0,998	0,8667
14	40	2	3	2654,0	0,999	0,8667
15	0	0	1	2655,0	1	0

