

надежность срабатывания зарядов в системе. В то же время сочетание применяемых способов инициирования с системами зарядов различной конструкции не всегда дает положительные результаты. Это связано с тем, что в процессе формирования зарядов при соответствующих средствах их инициирования не учитывается характер развития процесса детонации в зависимости от конструктивных элементов заряда и инициатора. Поэтому обоснование механизма развития процесса детонации при взрыве зарядов различной конструкции (сплошных, рассредоточенных, с осевыми зазорами и др.) в сочетании с элементами принятой системы инициирования является важной научно-прикладной задачей.

Масштабно применяемый в отечественной практике способ инициирования с помощью детонирующего шнура (ДШ) достаточно полно продемонстрировал не только его преимущества, но и недостатки. К последним следует отнести необходимость разработки и применения на одном массовом взрыве определенного ассортимента ДШ, позволяющего одновременно обеспечить надежную передачу инициирующего импульса от детонатора боевику, минимальную интенсивность воздушной УВ при взрыве наземной магистральной и участковой сети ДШ, защиту скважинного заряда смесового ВВ от переплотнения при взрыве внутрискважинных отрезков ДШ, ведущих к нижнему (донному) боевику, а также исключение вероятности образования каналов в материале забойки. Потребность в достаточно широком ассортименте ДШ не столько усложняет процесс его производства, сколько создает сложности на стадии ведения зарядных работ с применением различных типов ДШ.

Вместе с тем применение ДШ как высокоскоростного средства передачи инициирующего импульса между частями рассредоточенного заряда позволяет реально использовать во взрывной технике фактор взаимодействия УВ в режиме микросекундных замедлений, что недоступно при других, менее скоростных способах передачи инициирующего импульса.

Учитывая, что способы и средства инициирования являются определяющими при обеспечении технологической эффективности и безопасности взрывания, их совершенствованию и разработке уделяется значительное внимание. Опыт индустриально развитых стран – основных потребителей промышленных ВВ и средств их возбуждения свидетельствует о преимущественном развитии неэлектрических систем инициирования промышленных зарядов, основанных на перемещении канальных УВ. Наиболее известной из них является система “Нонель”, отличающаяся повышенной безопасностью, простотой в использовании, обеспечивающая безотказное взрывание в весьма сложных горно-геологических условиях и позволяющая составлять схемы короткозамедленного взрывания (КЗВ) с широким диапазоном интервалов замедлений. Известные преимущества зарубежных систем типа “Нонель” характерны для российского аналога “Эдилин” и для отечественной системы “Импульс”. Практическому применению последней предшествовали тщательная проработка технологии изготовления элементов системы [3, 4], а также лабораторные и полигонные исследования ее надежности и эффективности [5].

Существенные преимущества детонирующих волноводов состоят в универсальности системы неэлектрического инициирования, позволяющей впервые использовать давно доказанные преимущества каскадного инициирования рассредоточенных зарядов, а также технологии встречного инициирования в контурном взрывании и отделении монолитов при добыче блочного камня. Отсутствие боковых повреждений волновода обеспечивает сохранение заданных физических характеристик забойки и заряда, а достаточно мощный скачок давления на выходе из трубки волновода (порядка 2,5...3,0 МПа) гарантирует надежное срабатывание капсуля или передачу импульса присоединенному соосно отрезку волновода.

Рассмотрим преимущества и недостатки систем инициирования на основе ДШ и волновода, исходя из детонационных характеристик детонирующих элементов этих систем в свете задач КЗВ, например, при каскадном инициировании скважинных зарядов. До появления детонирующих волноводов массовая реализация метода внутрискважинных замедлений была практически неосуществимой, поскольку требовала донного инициирования частей рассредоточенного скважинного заряда. При этом в случае использования технологии электрического инициирования замедляющий элемент (капсюль-электродетонатор) требовалось размещать в нижней части заряда, что не допускается действующими правилами, а при взрывании с использованием ДШ требуется применение маломощных их разновидностей с усилением в области боевика для гарантированного его инициирования. Применение трубчатых детонирующих волноводов взамен ДШ облегчает задачу донного инициирования заряда. Однако следует сравнить возможности методов с точки зрения согласованности детонационных процессов в отдельных частях рассредоточенного заряда или в участках сплошного скважинного заряда с учетом разницы во времени приложения отдельных инициирующих сигналов и соответственно скорости их передачи, присущей различным методам.

Техника многоточечного или каскадного инициирования удлиненных зарядов предусматривает оптимизацию количества пунктов инициирования в сплошном заряде или степени рассредоточения заряда с применением инертных промежутков. Результатом применения метода является многократное нагружение неоднородного породного массива в различных точках горизонтальной и вертикальной плоскостей разрушаемого объема. Заряды каскадного инициирования представляют собой сплошную или рассредоточенную инертными промежутками колонку. Последовательность и направление их детонации, следовательно, и механический эффект взрыва связаны с соотношением скоростей детонации инициатора и заряда, а также моментом приложения инициирующего импульса.

Количественную оценку импульса взрыва зарядов различных ВВ в каскаде выполняем с использованием зависимости [6]

$$I_{\max} = \sum 0,087 \rho_{\text{ВВ}i} D^2 t ,$$

где $n_{\text{ч}}$ – количество частей ВВ по длине заряда; $\rho_{\text{ВВ}}$ – плотность ВВ; D – скорость детонации, t – продолжительность импульса.

Рассчитана величина импульса и его продолжительность для сплошных удлиненных зарядов гранулолола, граммонита, аммонита № 6ЖВ и игданита, а также для комбинированных зарядов ВВ. Конструктивно заряды представляли собой колонку длиной 8 м, состоящую либо из однородного ВВ, либо из комбинации пар двух ВВ, последовательно размещенных по колонке. Длина отдельного участка заряда составляла 1,3 м.

Расчеты и экспериментальные исследования с определением радиуса воронки взрыва при каскадном инициировании позволили установить, что оптимальные сочетания ВВ по силовым и временным параметрам импульса представлены парами аммонит 6ЖВ + игданит, граммонит + игданит и аммонит 6ЖВ + граммонит. Максимальный радиус воронки взрыва достигается при количестве пар $n = 3$.

Исключая из рассмотрения небезопасный электрический метод инициирования отдельных частей колонки заряда, проанализируем возможность и целесообразность использования ДШ и детонирующего волновода. Сущность каскадного инициирования состоит в достижении определенной последовательности столкновения детонационных волн в заряде и УВ в горной породе. Если применяется заряд, сложенный поочередно участками детонационно мощных и слабочувствительных ВВ, применение для их инициирования стандартного ДШ приводит к первоначальной детонации в парах мощных ВВ от ДШ, а затем от них – низкочувствительных ВВ, не детонирующих от ДШ. В целом заряд взрывается “каскадом”, обеспечивая столкновения УВ в породе, усиление примерно в 1,6 раза максимальных сжимающих напряжений [7] и возникновение интенсивных сдвиговых напряжений. Если исходить из направления и соотношения скоростей детонации ДШ и различных частей заряда ВВ, место встречи фронтов детонационных волн должно находиться ниже уровня середины промежутка из слабого ВВ (рис. 1). Здесь не принимается во внимание наличие вдоль всего заряда более слабого сигнала, генерируемого самим ДШ.

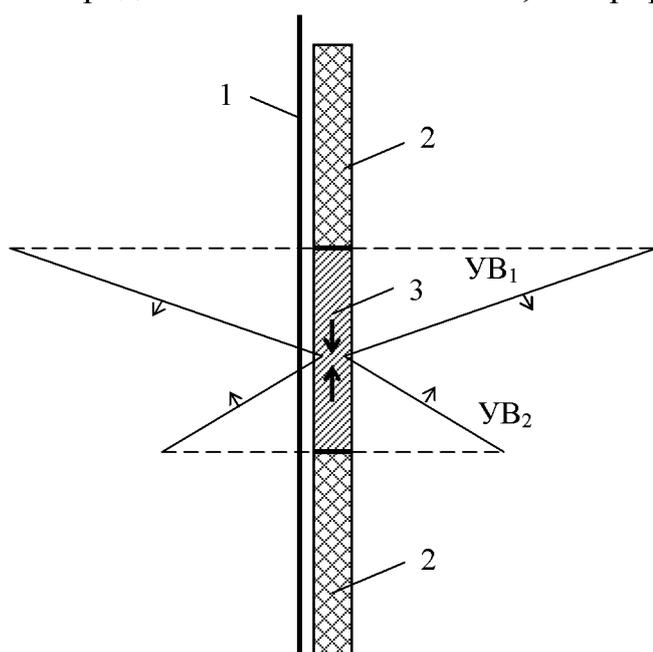


Рис. 1. Последовательность развития детонационного процесса при каскадном инициировании с помощью ДШ: 1 – ДШ; 2 – заряд мощного ВВ; 3 – заряд малочувствительного ВВ; УВ₁, УВ₂ – встречные фронты ударных волн

Поскольку процесс инициирования непосредственно связан с воздействием ДШ на более мощное ВВ, при скоростях детонации ДШ 8000 м/с и низкочувствительного ВВ 2500 м/с процесс детонации последнего в нижней части начнется на $(1,3 \text{ м} : 8000 \text{ м/с}) = 163 \text{ мКс}$ позже, чем в верхней его части (см. рис. 1). За это время фронт детонационной волны от верхнего торца малочувствительного ВВ со скоростью 2500 м/с распространится по оси заряда на $(0,000163 \text{ с} \times 2500 \text{ м/с}) = 0,41 \text{ м}$. Встреча конических фронтов УВ I и II произойдет на расстоянии 0,86 м или через 344 мКс после начала детонации. В то же время фронт УВ I в породном массиве на уровне верхнего торца участка малочувствительного ВВ удалится по нормали от оси заряда на 2 м, фронт УВ II – на расстояние 1,05 м.

Эти расчеты дают представление о пространственно-временных параметрах детонационного процесса при каскадном инициировании, а именно: взаимодействие каскада зарядов в каждой паре происходит на волновом уровне в пределах микросекундных временных интервалов на удалении от оси заряда, не превышающем половины расстояния между зарядами. При одновременном взрыве ряда (группы) зарядов их взаимное влияние сводится к минимуму, следовательно, уменьшается вероятность акустического взаимодействия УВ и ДВ, способного негативно влиять на развитие процесса детонации в смежных зарядах.

Вариант схемы с применением инертных промежутков представляет интерес не только в плане простого сокращения расхода ВВ на дробление, но и в связи с изменением пространственно-временного характера распределения волновых фронтов. Если скорость распространения акустического сигнала по инертному материалу промежутка составляет порядка 400 м/с, место встречи конических фронтов УВ I и II в пределах инертного промежутка существенно не перемещается, однако в силу более значительной разницы в скоростях УВ в пределах инертного промежутка и в горной породе угол встречи фронтов приближается к 0° , что сопровождается ростом интенсивности растягивающих напряжений.

Опытные взрывы [6] показали, что оптимальная длина инертных промежутков составляет 1,0...1,2 м при общей высоте колонки заряда 10,0 м, а оптимальное количество инертных промежутков $n_{\text{инт}} = 2$. Промышленные взрывы на карьерах показали, что при наличии в зарядах одного–трех промежутков качество дробления массива заметно улучшается – выход мелких фракций возрастает на 20%, выход негабарита снижается на 41%. Однако сложности с применением обратного инициирования заряда в этом способе сохраняются, особенно в связи с вероятностью отказов отдельных частей заряда вследствие переуплотнения штатным ДШ.

В связи с этим следует рассмотреть возможности современного способа инициирования с применением средств неэлектрической системы типа “Нонель”. Решающим преимуществом трубчатого детонирующего волновода

является отсутствие бокового воздействия на колонковый заряд или его элементы, сложенные из различных ВВ. Однако при этом необходимо решить проблему роста расхода детонирующего волновода, поскольку каждая пара в каскаде или каждая часть рассредоточенного инертными промежутками скважинного заряда потребует подвода отдельного отрезка волновода к боевику для возбуждения инициирующего импульса в заданной последовательности.

Современная взрывная техника решает эту проблему применением скользящих боевиков–детонаторов [8, 9], позволяющих применить схему внутрискважинных замедлений с введением в систему “Нонель” низкоэнергетического ДШ, передающего инициирующий импульс к ответвлению трубчатого волновода с капсуль-детонатором короткозамедленного действия, размещенным в патроне–боевике. Благодаря усложнению схемы с применением высокоскоростного ДШ временные параметры процесса передачи инициирующего импульса сокращаются, вместе с тем применение миллисекундных замедлений внутри скважины исключает возможность взаимодействия зарядов в акустическом режиме, создает предпосылки для их взаимодействия на уровне перемещений, то есть порождает опасность взаимного механического деформирования смежных зарядов с возможностью их частичного переуплотнения и, соответственно, выгорания или отказа. Следовательно, если исходить из принципа взаимодействия частей скважинного заряда на волновом уровне, следует использовать в боевике капсули-детонаторы мгновенного действия.

При обратном инициировании скважинного заряда инициирующий импульс подается в донную часть заряда по детонирующему волноводу и далее вверх по заряду с применением комбинированного инициатора из штатного ДШ и необходимого количества боевиков. Для максимального приближения процесса инициирования к режиму взаимодействия высокоскоростных фронтов следует сокращать длину инертных промежутков до минимума, составляющего согласно экспериментальным данным 0,2 м.

Практика КЗВ систем сплошных скважинных зарядов при массовых взрывах предусматривает преимущественно их заряжание с расположением двух боевиков в верхней и нижней частях заряда. Если применять боевики со стандартной длиной отрезков волновода, то есть исходить из равенства отрезков волновода, подводящих начальный импульс от магистрали к обоим боевикам, расход детонирующего волновода при двухточечном инициировании увеличивается вдвое. Так, при глубине скважины 14 м и длине заряда 10 м длина отрезка детонирующего волновода составит 16 м, а суммарная длина – 32 м.

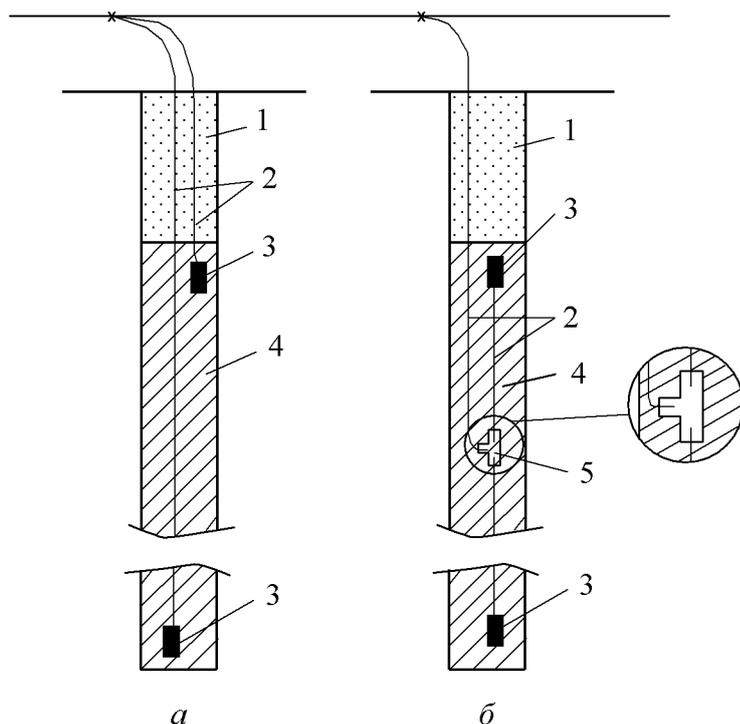


Рис. 2. Схемы инициирования скважинного заряда: *а* – отдельными отрезками ДВ; *б* – через разветвитель; 1 – забойка; 2 – ДВ; 3 – боевик; 4 – заряд ВВ; 5 – разветвитель

Если привести длину верхнего волновода в соответствие с глубиной заложения верхнего боевика, суммарная длина детонирующего волновода уменьшится до 22 м (рис. 2, *а*). Однако вследствие существенной разницы в скоростях детонации волновода и ВВ (2000 и 4000 м/с) детонационный фронт в заряде опередит приход инициирующего импульса по волноводу к нижнему боевику, то есть взаимодействие детонационных фронтов в заряде не происходит. Проблема может быть решена с применением передающего устройства – двойного разветвителя (рис. 2, *б*). Место расположения разветвителя на волноводу диктуется только назначенным местом встречи фронтов ДВ по высоте заряда и техническими приемами его установки в комплексе с волноводом и боевиками. Например, если место встречи УВ, генерируемых отдельными участками скважинного заряда, предусмотреть на его середине, разветвитель устанавливается на этом уровне, при этом общий расход детонирующего волновода составит около 20 м. Значение разветвителя существенно возрастает при каскадном инициировании зарядов или их рассредоточении инертными промежутками. Согласно схеме на рис. 3, *а* при условии донного инициирования последовательно трех частей скважинного заряда без применения разветвителей инициирующий импульс должен подаваться от магистрали по автономным волноводам, причем для обеспечения обратной последовательности инициирования длина отрезков волновода должна расти по мере приближения части заряда к поверхности. Суммарный расход волновода в такой схеме коммутации составит около 50 м на скважину. При переходе на коммутацию “через разветвитель” (рис. 3, *б*) его расход сокращается до 25...30 м.

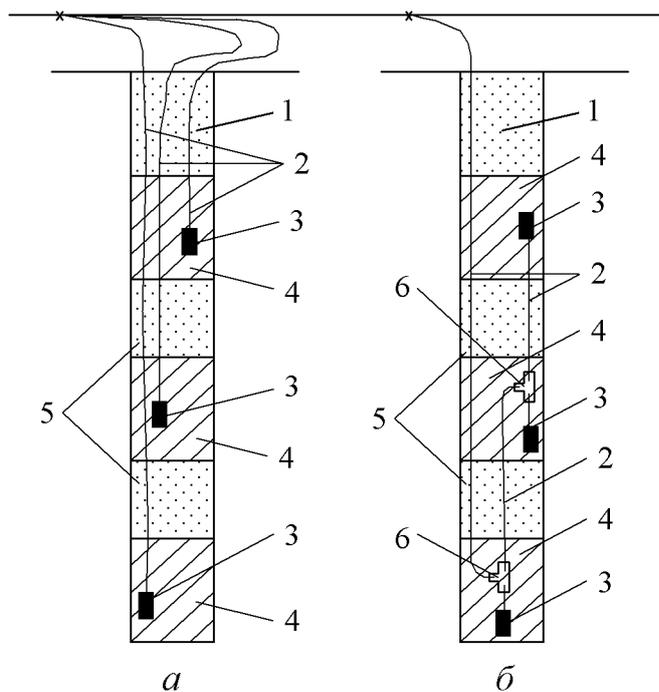


Рис. 3. Схемы “нижнего” инициирования частей рассредоточенного заряда: *а* – отдельными отрезками ДВ; *б* – с применением разветвителей; 1 – забойка; 2 – детонирующий волновод; 3 – боевик; 4 – заряд ВВ; 5 – инертный промежуток; 6 – разветвитель

В связи с изложенным следует обратить внимание на необходимость совершенствования и расширения ассортимента основных и вспомогательных средств неэлектрического инициирования, что послужит дальнейшему развитию безопасных и эффективных приемов и схем КЗВ при массовых взрывах с использованием в качестве базовой инициирующей системы отечественного детонирующего волновода.

1. *Воеводка А., Демещук В. Л.* Забезпечення оптимального режиму детонації свердловинних зарядів шляхом застосування подовжених ініціаторів // Пробл. охорони праці в Україні: Зб. наук. праць. – К.: ННДІОП, 2002. – Вип. 5. – С. 41–48.

2. *Шевцов Н. Р., Левит В. В., Купенко И. В.* Обоснование параметров безотказного взрывания шпуровых зарядов ВВ в вертикальных шахтных стволах // Сб. науч. тр. НГА Украины. – Днепропетровск. – 2002. – № 3. – С. 10–14.

3. *Шаров Б. И., Филимонов В. Н., Баншиевский В. В. и др.* Создание неэлектрической системы инициирования в Украине // Сб. научн. тр. НГА Украины. – Днепропетровск – 2001. – № 11. – С. 108–113.

4. *Закусило Р. В., Желтоножко А. А.* Состояние разработки безопасной неэлектрической системы инициирования. Исследования по разработке рецептуры полимерной трубки волновода // Сб. научн. тр. НГА Украины. Днепропетровск. – 2003. – № 18. – С. 42–50.

5. *Кравець В. Г., Фролов О. О., Маргарян А. З.* Експериментальні дослідження експлуатаційних характеристик хвилеводу системи ініціювання типу „Нонель” // Вісник НТУУ „КПІ”. Сер. „Гірництво”: Зб. наук. пр. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2003. – Вип. 9. – С. 59–66.

6. *Воробьев В. Д., Перегудов В. В.* Взрывные работы в скальных породах. – К.: Наук. думка, 1984. – 240 с.

7. *Беляев А. Ф.* Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. – М.: Наука. – 1968. – 580 с.

8. *Барон В. Л., Кантор В. Х.* Техника и технология взрывных работ в США. – М.: Недра, 1989. – 376 с.

9. *Испытания в производственных условиях* неэлектрической системы инициирования зарядов ЭДИЛИН / В. В. Торопов, Ю. М. Гарин, Е. Л. Цикель, Ю. В. Арзамасцев // *Монтажные и специальные работы в строительстве.* – 1997. – № 2. – С. 13–16.