

УДК 622.233/.235

А.В. Кузина

**ОСОБЕННОСТИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ
ПРИ ПРОХОДКЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ СПОСОБА ИСКУССТВЕННОГО
ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВ**

Круглый стол

Буровзрывные работы в стволе должны обеспечить точно соответствующую проекту форму и размеры поперечного сечения ствола, равномерное дробление породы для обеспечения максимальной производительности погрузочной машины и высокого коэффициента использования шпуров.

При строительстве стволов обычно принимают колонную конструкцию зарядов, при которой патроны ВВ в шпуре непосредственно примыкают один к другому и образуют колонну (рис. 1). При прямом инициировании патрон боевик располагается в заряде первым от устья. В глубоких шпурах при обратном инициировании патрон-боевик помещается первым от дна шпура, а вдоль заряда прокладывается детонирующий шнур для обеспечения надежности детонации.

В общем случае в стволах с круглым поперечным сечением при горизонтальном или пологом залегании пород шпуры располагают по четырем-пяти концентрическим окружностям, описанным из центра ствола.

Каких либо ограничений при взрывных работах в стволах, проходимых обычным способом или способом замораживания нет. По современным представлениям, при выполнении буровзрывных работ в зоне замороженных пород должно быть обеспечено максимальное снижение воздействия взрыва на окружающие породы и сохранены от

повреждений ледопородное ограждение вокруг ствола и замораживающие колонки. Для этого ограничивают глубину шпуров, число и величину одновременно взрываемых зарядов, кроме того, иногда рекомендуют применять заряды специальной конструкции.

Нормы расхода взрывчатых веществ, например аммонита №6ЖВ на 100 м^3 взрываемой массы в этих условиях надлежит принимать 40 кг при крепости замороженных пород $f = 1,5$; 60 кг при $f = 2 - 3$; 75 кг при $f = 4 - 6$; и 90 кг при $f = 7 - 9$.

Буровзрывные работы рекомендуется проводить со следующими мерами пре-

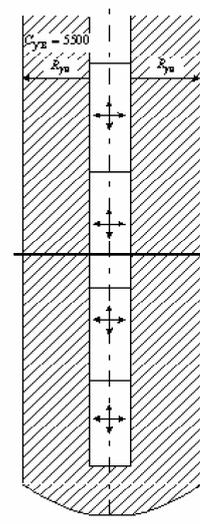


Рис. 1. Конструкция заряда в шпуре

достоверности:

1- длина шпуров при бурении в искусственно замороженных породах принимается не более 1,5 м;

2- расстояние от оконтуривающих шпуров до стенки ствола должна быть не менее 300 мм в крепких породах и 400 мм в породах средней крепости и некрепких. Периферийную часть ствола надлежит дорабатывать отбойными молотками;

3- направление оконтуривающих шпуров принимают вертикальное;

4- для взрывания используют только аммиачно-селитровые ВВ в патронах диаметром не более 36 мм;

5- в качестве средств взрывания применяют электродетонаторы мгновенного действия в сочетании с электродетонаторами замедленного действия;

6- безопасное расстояние от заряда до замораживающих колонок составляет: 1-1,1 м или 60 радиусов заряда в нескольких (глинах, суглинках, слабых аргиллитах, алевролитах) и 1.4-1.5 м или 80 радиусов заряда в скальных породах (песчанистых, песчано-глинистых сланцах, известняках, доломитах и т.д.).

Известно, что взрывчатые вещества представляют собой химические соединения или механические смеси, которые под воздействием внешнего импульса (нагревания, трения, удара и т.п.) детонируют. При взрыве патрона аммонита 6ЖВ массой 200г при энергии взрыва 4190 кДж/кг выделяется 838 кДж энергии. При скорости детонации 3,5 км/с, время взрыва составляет $0,2:3500 = 5,7 \cdot 10^{-5}$ с, а выделяемая в момент взрыва мощность равна

$$N = 838 \cdot 10^3 : 5,7 \cdot 10^{-5} = \\ = 15 \cdot 10^8 \text{ Дж} / \text{с} \text{ } 14,6 \text{ млн.квт}$$

В момент взрыва образуется значительное количество газов (700-1000 л), которые выделяемым теплом нагреваются до температуры 1900-4500 °С. Такие высокие температуры газов взрыва имеют место, благодаря высокой скорости детонации, малому времени выделению энергии и весьма малому теплообмену продуктов взрыва с окружающей средой. В связи с чрезвычайно большими скоростями детонации, в зоне заряда развиваются в начальный момент весьма высокие давления (10^6 - 10^{10} МПа и более), которые обеспечивает более разрушительное (бризантное) действие взрыва вблизи заряда. Взрывная реакция (детонация) распространяется с постоянной, характерной для данного ВВ и диаметра заряда, скоростью, т.е. имеют место само распространяющийся процесс, не требующий дополнительного подвода энергии. При детонации энергия выделяется за счет химической реакции окисления водорода и углерода в оксид (СО) и диоксид (СО₂) углерода кислородом, входящим в состав молекул компонентов твердого ВВ.

В настоящее время для порошкообразных ВВ до сих пор пользуются твердой детонацией, разработанной в 1887 г выдающимся ученым П. Гюголио, который вывел фундаментальное уравнение, описывающее развитие ударного фронта на основе законов сохранения массы, импульса и энергии при переходе через разрыв.

Согласно этой теории распространение взрыва по ВВ обусловлено распространением по нему ударной волны с постоянной скоростью, то есть имеет место само распространяющийся процесс, не требующий дополнительного подвода энергии, то есть адиабатический процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.

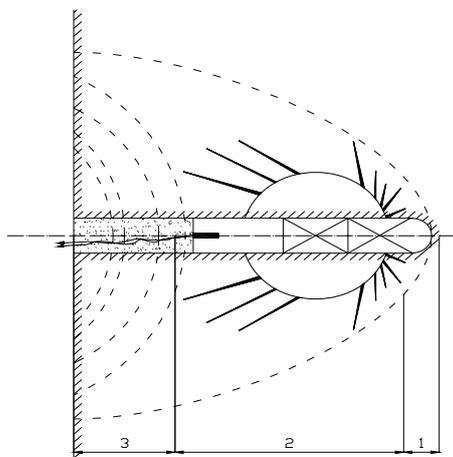


Рис. 2. Схема взрывного разрушения шпура: 1 - донная часть, 2 - колонковая часть, 3 - устьевая часть

Выделяются три области разрушения горного массива при взрывании удлиненного заряда (рис. 2): донную, колонковую и устьевую. Процесс образования «стакана» авторы объясняют концевым эффектом, зависящим от особенностей взрыва в направлении свободной поверхности.

Распространяющаяся ударная волна создает в очень узком слое скачкообразное изменение всех термодинамических параметров ВВ: давления, плотности, температуры. При этом за фронтом волны происходит мгновенное изменение физического состояния частиц ВВ с переходом из твердого в газообразное состояние с ударным изменением давления, плотности, температуры и скорости за счет чего возникает интенсивная экзотермическая химическая реакция, энергия которой поддерживает распространение ударной волны по ВВ и его детонацию

Процессы формирования и распространения ударных волн по ВВ по этой теории описывается законами распространения волн в газах – распространение плоской ударной волны в трубе, заполненной газом.

Такая предпосылка обуславливается тем, что на фронте ударной волны твер-

дые ВВ испаряются и поэтому состояние вещества лучше описывается уравнениями газодинамики, то есть с современной точки зрения, это низкоскоростной процесс. Ученые, поддерживающие эту теорию [8, 11], тем не менее, отмечают существенные несовпадения позиций этой теории с результатами практики, по этому отмечается: «Детонация – это сложное газодинамическое явление, детали которого в настоящее время недостаточно хорошо изучены, но в целом оно объясняется распространением ударных волн по массе ВВ. Ударная волна в массе ВВ возбуждается однократным начальным импульсом от внешнего источника».

С позиций газодинамических явлений можно объяснить явления, возникающие в порохообразных ВВ и динамитов на основе тринитроглицеринов. Но с разработкой высокобризантиных и инициирующих ВВ, новых средств взрывания и совершенствования технологии взрывного дела, произошел переход в пробойно-струйный механизм детонации, с позиций которых будет рассмотрен далее процесс взрывных работ в стволах.

Многие взрывные вещества взрываются только при определенных и достаточно сильных воздействиях.

Если такого воздействия нет, то самопроизвольное взрывание произойти не может. При строительстве стволов чаще всего применяется ВВ в виде механических смесей. Достоинством таких ВВ является то, что путем подбора компонентов можно получить желательное для данных условий свойства (безопасность в обращении, чувствительность к

детонации, достаточная мощность, нулевой кислородный баланс и др.)

Для того чтобы инициировать взрыв заряда, необходимо придать начальный импульс, который вызовет в небольшой части заряда разложение химического вещества, сближение и соударение молекул, и инициирование бурной химической реакции с образованием газообразных веществ в определенном объеме, развивающих определенное давление. Для этого используются капсуль-детонаторы, которые представляют собой кумулятивный комбинированный заряд первичного и вторичного инициаторов, массой 1,3-1,5 г, помещенный в бумажную или металлическую гильзу. По составу ВВ промышленные капсуль-детонаторы делятся на гремучертуго-тетрагидрофурановые и азидотетрагидрофурановые.

Электродетонаторы отличаются от капсулей-детонаторов способом воспламенения первичного инициатора, осуществляемого с помощью специального приспособления, называемого электровоспламенителем.

Электродетонаторы мгновенного действия представляет собой капсуль-детонатор, в дульце которого вставлен электровоспламенитель. Электродетонаторы мгновенного действия при пропускании электрического тока взрываются практически мгновенно. Задержка в передаче импульса от воспламенительной части к первичному инициатору составляет 8-15 мсек. Электродетонатор замедленного действия отличается от электродетонатора мгновенного действия тем, что между воспламенительным составом и чашечкой, прикрывающей первичный инициатор, помещается замедляющий состав, который состоит из смеси перекиси бария, калиевой селитры и идитола. Электродетонаторы короткозамедленного действия состоит из замедлитель-капсуль-детонатора, за-

прессованного в медную гильзу с зарядом высоко бризантного ВВ. Замедлитель-капсуль детонатор состоит из медного колпачка с характерной кумулятивной выемкой на конце, шелковой сетки, замедляющего состава, декстринового азид свинца, тэна и чашечки.

При взрыве заряда электродетонатора со сферической выемкой в противоположной от детонатора части заряда продукты химической реакции образуют сходящийся к оси выемки поток и формируется высокоскоростная кумулятивная струя, скорость которой достигает 10-15 км/с, что обеспечивает ей большую пробойную силу.

Скорость кумулятивной струи всегда больше скорости детонационной волны и поэтому происходит явление отрыва кумулятивной струи.

Оторвавшаяся кумулятивная струя приобретает скорость, по значению большую второй космической, и, в свою очередь, образует свою кумулятивную гиперкосмическую ударную волну. Именно поэтому струя (ударная волна, возникающая перед струей) в преграде пробивает отверстие, диаметр которого в 10 раз больше диаметра кумулятивной струи.

Электродетонаторы в металлических оболочках с углублением в торцевой части при взрыве образуют кумулятивные струи, имеющие форму кусочков металла размером 1-2 мм. Кумулятивная струя медного электродетонатора сохраняет сильное пробивное действие на расстоянии до 5 м. Учитывая, что пробивное действие производит не сама струя, а фронт, образующийся вокруг струи и имеющий диаметр 10-15 мм, можно предположить, что именно фронт кумулятивной струи, двигаясь с гиперкосмической скоростью инициирует взрыв заряда ВВ, а не детонационный фронт электродетонатора, как считают

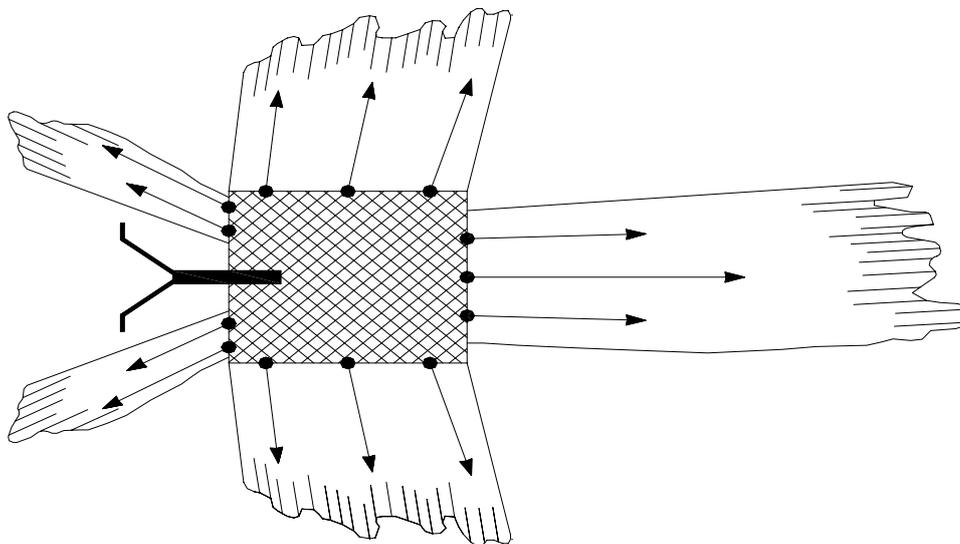


Рис. 3. Схема разлета взрывных газов кубического заряда с детонатором, расположенным в центре одной из его граней

авторы [4]. Заряд ВВ инициируется изнутри ударным фронтом кумулятивной струи, который, с некоторым отрывом во времени, инициирует ударный фронт основного заряда ВВ. Кумулятивная струя, ударяясь о преграду (заряд ВВ) передает ей давление, составляющее величину

$$P_K = \frac{1}{4} V_K^2 \rho_0$$

Принимая за преграду ВВ аммонит №6ЖВ (прессованный) с плотностью $\rho = 1,30 \text{ г/см}^3$ при $V_K = 10000 \text{ м/сек}$ получим $P_K = 32500 \text{ кг/см}^2$. При таком давлении взрывчатое вещество мгновенно испаряется и взрывается. Скорость детонации аммонита 3600-700 м/с, что составляет общую скорость детонации всего заряда в зоне вторичного детонирования, но скорость инициирующей кумулятивной струи, пронизывающей взрывчатку в зоне первичного детонирования – 10000 м/с, и она имеет сверхударный характер. Физическая

сущность данного явления показана на схеме разлета взрывных газов (рис. 3), полученной при фотографировании в темноте взрыва прямоугольной шашки взрывчатого вещества.

Характерной особенностью такого разлета продуктов взрыва является то, что прослеживается направление действия двух фронтов детонации. Четко видно, что в противоположной от детонации части заряда продукты взрыва разлетаются более интенсивно, чем по торцевым (боковым) граням. В пространстве, примыкающем к исходящим углам и ребрам заряда, где находится детонатор, взрывные газы не распространяются. В этих местах действие взрыва практически отсутствует. Здесь наблюдаются своеобразные «защитные зоны». Это явление имеет большое теоретическое и практическое значение, которое позволяет управлять действием взрыва путем выбора формы и места его инициирования. Далее рассмотрим взрыв удлиненного шпурового заряда в

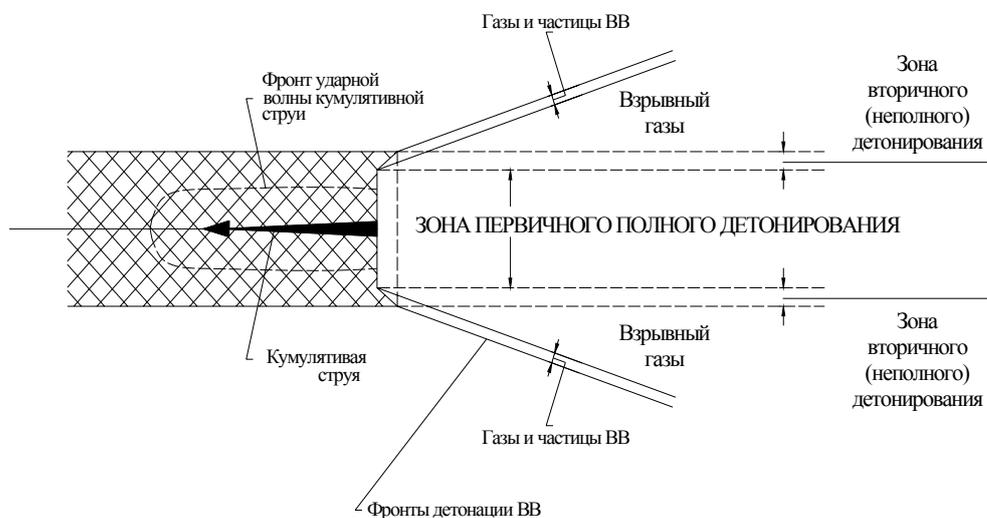


Рис. 4. Схема взрыва удлиненного заряда

свете высказанных представлений о физической сущности детонирования ВВ.

После прохождения фронта ударной волны от кумулятивной струи, который в 10 раз больше диаметра непосредственно кумулятивной струи, взрывчатое вещество в пределах зоны первичного детонирования сжимается, нагревается и начинает испаряться, разлагаясь на составляющие молекулы, которые, сталкиваясь друг с другом, начинают изменять свое первоначальное состояние в связи с начинающейся химической реакцией взрыва. Вне зоны прохождения фронта ударной волны от кумулятивной струи, ближе к наружной поверхности заряда, взрывчатое вещество находится в прежнем твердом состоянии, и, следовательно, не готово к взрыванию. Это зона вторичного детонирования, которое произойдет под действием взрыва ВВ зоны первичного детонирования. Различие указанных зон детонирования существенное. В зоне первичного детонирования ВВ происходит полное и эффективное детонирование под действием

проходящего фронта ударной волны от кумулятивной струи при длине заряда 1-2 м. Необходимо отметить, что фронт ударной волны кумулятивной струи всегда отрывается от фронта детонационной волны, так как скорости детонационного фронта и ударного фронта в 1,5-2 раза отличаются друг от друга. Поэтому эффективность детонации вторичного фронта зависит от возможности передачи энергии взрыва от первичной зоны во вторичную зону и окружающим породам.

С этой точки зрения мало эффективными являются удлиненные заряды большого диаметра, взрываемые в воздухе. Более эффективна детонация вторичной зоны удлиненного заряда, заключенного в прочную оболочку из достаточно плотного материала или находящегося внутри скважины в прочной породе. Существует мнение [7], что в пластичных не замороженных породах, талых и сильно замороженных пластичных породах, вследствие больших скоростей нагружения ударной волной

взрыва стенок скважины, в породе не успевает произойти перекристаллизация льда и переориентировка кристаллов с образованием плоскостей ослабления, что может привести к повышению сопротивляемости его детонированию. Поэтому рекомендуется увеличивать массу заряда на 10-20 % и более. В этих исследованиях рассматривались скважинные сосредоточенные заряды диаметром 130 мм и более, взрываемые при помощи детонирующего шнура. Электродетонатор на поверхности инициировал детонацию шнура. Основным видом деформации пластичных пород при взрыве является их уплотнение. В прочных скальных породах и замороженных песках радиус сферы сжатия скважины изменяется в пределах $(1-2)r_3$, в суглинках – в пределах $(2-3)r_3$, в пластично мерзлых суглинках и глинах $(6-8)r_3$, в пластичных глинах $(7-9)r_3$.

Существуют значительные различия в рылении сезонно мерзлых грунтов скважинными зарядами большого диаметра (более 130 мм), взрываемых при помощи детонирующего шнура и взрывании мелко шпурового удлиненного заряда в стволе с применением электродетонатора.

В шпуровом удлиненном заряде под действием газов зоны первичного детонирования развивается полость, где давление газов резко падает. Вследствие пластичного течения стенок скважины, давление на фронте взрывной волны зоны первичного детонирования резко падает, и на расстоянии $R = (0,6 - 0,8)$ м ударная волна переходит в волну сжатия, а затем в упругую. При этом детонация вторичной зоны происходит либо в ближней зоне, либо затухает совсем, и взрыв заряда вторичной зоны становится невозможным.

По нашему мнению, эффективность взрывных работ в стволе будет зависеть не от увеличения расхода ВВ, а в уменьшении зоны вторичного детонирования путем усиления диаметра кумулятивной струи с 1-2 мм до 2-5 за счет применения нестандартных детонаторов с большим кумулятивным эффектом. Возможен также вариант одновременного взрывания двух детонаторов, расположенных симметрично двум половинкам сечения патрона ВВ, так, чтобы два фронта ударной волны кумулятивных струй захватывали максимальный объем взрывчатого вещества. Тем самым эффективность взрыва увеличится при минимальной массе ВВ.

Существующие представления о действии взрывных работ в забое ствола не акцентируют внимание на каком-либо особом воздействии на ледопородное ограждение врубовых, отбойных и оконтурирующих шпуров, различая их только по степени дробления пород. Однако автором установлено, что оконтурирующие шпуры оказывают особое воздействие на ледопородное ограждение как в радиальном, так и особенно в наклонном направлении, образуя разные по скорости и силе воздействия ударных фронтов. Образование при взрыве оконтурирующих шпуров двух ударных фронтов, различных по скорости и силе воздействия, приводит к образованию двух зон в ледопородном ограждении, которые следует учитывать при расчете ледопородного ограждения. На внутреннем контуре ствола в проходке на глубину до 0,5 м будет создаваться зона разрушенных пород, в которой не регистрируется акустический сигнал. На глубине $-,5-0,8$ м в пластичных породах фиксируется зона переуплотненных пород, в которых регистрируется высокоскоростной геоакустический сигнал в отличие от обычных величин скоростей,

соответствующих акустической жесткости породы.

Учитывая наличие при взрыве оконтуривающих шпуров двух ударных фронтов, различных по силе и скорости и направлению действия, но одинаково способных разрушить замораживающую колонку, отклонившуюся внутрь ствола, вопрос обеспечения безопасности рабо-

ты замораживающей колонки остается не решенным. Усиление эффекта действия обоих ударных фронтов на границе двух разнородных пластов пород подтверждает возможность разрушающего действия взрыва оконтуривающих шпуров, которое до наших исследований были теоретически не выяснены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Взрывное* дело. Сборник №63/20. Детонация взрывчатых веществ и безопасность взрывных работ. – М.: Недра. 1967.
2. *Дроговейко И.З. и др.* Буровзрывные работы при проходке шахтных стволов методом замораживания в трещиноватом мелу. Реферативная информация о передовом опыте. (Минмонтажспецстрой СССР) Серия V. Специальные строительные работы. 1976. вып.1 (115), 4-6 с.
3. *Дроговейко И.З., Курманов М.М., Голубятников А.Е.* Особенности буровзрывных работ при проходке шахтных стволов способом замораживания. Шахтное строительство. 1976. № 6 28-29 с.
4. *Карасик И.Б.* «Буровзрывная выемка замороженных пород при проходке стволов». «Проектирование и строительство угольных предприятий» Реферативный сборник № 11-12. – М.: ЦНИЭНуголь 1969, 12-14 с.
5. *Карасик И.Б.* Буровзрывные работы в стволах шахт, проходимых способом замораживанию Труды ВНИИОМШС «Во-
- просы организации и механизации горнопроходческих работ» вып. 19, Харьков 1970, 40-53 с.
6. *Крюков Г.М.* Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. Часть 1. Основы теорий деформирования и разрушения горных пород при бурении и взрывании. Учебное пособие. – М.: Издательство Московского государственного горного университета. 2002.
7. *Крюков Г.М., Глазков Ю.В.* Феноменологическая квазистатическо-волновая теория деформирования и разрушения материалов взрывом зарядов промышленных ВВ. – М.: Издательство Московского горного университета. 2003.
8. *Кутузов Б.Н.* Взрывные работы. – М.: Недра. 1974.
9. *Кутузов Б.Н.* Разрушение горных пород взрывом. – М.: Издательство МГУ. 1992.
10. *Покровский Г.И.* Взрыв. – М.: Недра. 1973.

Коротко об авторах

Кузина А.В. – кафедра «Строительство подземных сооружений и шахт», Московский государственный горный университет.

