

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.В. СОБОЛЕВ

Технология и безопасность выполнения взрывных работ

(краткий курс лекций)

ДНЕПРОПЕТРОВСК 2008

УДК 622.233.622.235:622.271 (075.3)

ББК 33.133

С 54

- С 54 **Соболев В.В.** Технология и безопасность выполнения взрывных работ (краткий курс лекций): Учебник. – Д.: Национальный горный университет, 2008. – 164 с.

ISBN

Рассмотрены общие вопросы взрывчатых превращений, причины и характеристики условий возникновения детонации, закономерности ее развития во взрывчатом веществе, особенности детонации промышленных взрывчатых веществ, способы исследования и измерения скорости детонации на практике, элементы термохимии процессов горения и взрыва, способы испытания предохранительных взрывчатых веществ и относительной оценки работы взрыва. Изложены основы теории действия взрыва в грунтах и скальных массивах. Рассмотрены основные взрывчатые вещества, способы взрывания зарядов взрывчатых веществ, элементы теории предохранительных взрывчатых веществ и области их применения в соответствии с «Едиными правилами безопасности при взрывных работах». Изложены основы технологии проведения подземных выработок, уделяется внимание вопросам сотрясательного взрывания.

Книга предназначена для студентов горных вузов по направлению подготовки “Горное дело” образовательно-квалификационного уровня 6.090300 и 7.090301.

- С 54 **Соболев В.В.** Технологія та безпека виконання вибухових робіт (корткий курс лекцій): Підручник. – Д.: Національний гірничий університет, 2008. – 164 с. (рос.)

ISBN

Розглянуті загальні питання вибухових перетворень, причини й характеристики умов виникнення детонації, закономірності її розвитку у вибуховій речовині, особливості детонації промислових вибухових речовин, способи дослідження та вимірювання швидкості детонації на практиці, елементи термохімії процесів горіння й вибуху, способи випробування запобіжних вибухових речовин. Розглянуто способи відносної оцінки роботи вибуху. Викладені основи теорії дії вибуху в грунтах і скельних масивах. Розглянуті основні вибухові речовини, способи підривання зарядів вибухових речовин, елементи теорії запобіжних вибухових речовин, області їх застосування відповідно “Єдиним правилам безпеки при підричних роботах”. Викладені основи технології проведення підземних виробок. Приділяється увага питанням струсового підривання.

Книга призначена для студентів гірничих вузів за напрямком підготовки "Гірництво" освітньо-кваліфікаційного рівня 6.090300 та 7.090301.

ISBN

ББК 33.133

©Соболев В.В., 2008

©Национальный горный университет, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ	7
1.1 Ударные волны.....	7
1.2 Формы химического превращения взрывчатых веществ.....	12
1.2.1 Детонация взрывчатых веществ.....	16
1.2.2 Принцип Ю.Б. Харитона.....	21
1.3 Экспериментальные методы определения детонации.....	24
1.3.1 Оптические методы определения скорости детонации....	24
1.3.2 Метод ионизационных датчиков.....	25
1.3.3 Метод Дотриша.....	27
1.3.4 Передача детонации на расстояние.....	29
1.4 Элементы термохимии процессов горения и взрыва.....	30
1.4.1 Теплота взрыва. Закон Гесса.....	31
1.4.2 Кислородный баланс.....	32
1.5 Чувствительность ВВ к внешним воздействиям.....	36
1.6 Некоторые способы относительной оценки полезной работы взрыва.....	39
1.6.1 Работоспособность ВВ.....	39
1.6.2 Бризантность ВВ.....	40
2 ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ	43
2.1 Иницирующие ВВ.....	45
2.2 Бризантные ВВ.....	46
2.3 Метательные ВВ.....	48
2.4 Промышленные взрывчатые вещества.....	50
2.4.1 Основные компоненты промышленных ВВ.....	55
2.4.2 Горючие и другие добавки аммиачно-селитренных ВВ...	60
2.4.3 Нитроглицериновые ВВ.....	62
2.4.4 Особенности детонации промышленных ВВ.....	69
2.5 Способы и средства беспламенного взрывания.....	72
3 СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ВЗРЫВАНИЯ ЗАРЯДОВ ВВ	75
3.1 Взрывание с помощью электродетонаторов.....	75
3.2 Неэлектрические способы взрывания.....	82
3.2.1 Огневое инициирование зарядов.....	83
3.2.2 Система "НОНЕЛЬ".....	85
3.2.3 Система "ОПСИН".....	87
3.2.4 Система «Прима-ЭРА».....	88
3.3 Комбинированные способы взрывания.....	91
3.3.1 Электроогневое взрывание.....	91
3.3.2 Взрывание с помощью детонирующего шнура.....	92

4	ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ВВ.....	97
4.1	Особенности взаимодействия солей-ингибиторов с продуктами детонации предохранительных ВВ.....	102
4.2	Перспективы развития предохранительных ВВ.....	104
4.3	Методы испытания предохранительных ВВ.....	107
4.3.1	Испытание на безопасность действия взрыва заряда ВВ в метано-воздушной среде.....	107
4.3.2	Испытание на безопасность действия взрыва заряда ВВ в пыле-воздушной среде.....	109
5	ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА НА СРЕДУ.....	111
5.1	Классификация зарядов ВВ.....	111
5.1.1	Кумулятивный заряд.....	112
5.1.2	Элементы воронки выброса.....	114
5.2	Взрыв одиночного заряда в грунтах.....	116
5.3	Взрыв заряда в скальном монолитном массиве.....	119
5.4	Взрыв заряда в трещиноватом скальном массиве.....	121
5.5	Некоторые закономерности взаимодействия группы зарядов...	122
5.6	Разрушение пород короткозамедленным взрыванием.....	124
6	ВЗРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК.....	129
6.1	Взрывание шпуровыми зарядами ВВ.....	129
6.1.1	Основные взрывные врубы.....	131
6.2	Забойка шпуров при взрывании в угольных шахтах.....	137
6.2.1	Ингибиторная забойка.....	138
6.2.2	Применяемые в настоящее время забоечные материалы..	138
6.3	Причины отказов и выгорания зарядов ВВ.....	141
6.3.1	Некоторые способы инертизации взрывоопасной атмосферы.....	144
6.4	Особенности взрывных работ при проведении выработок по выбросоопасным пластам.....	146
6.5	Взрывные технологии подземной отбойки угля.....	151
6.6	Ответственность персонала за нарушение порядка хранения, учета и использования взрывчатых материалов.....	155

ВВЕДЕНИЕ

Взрывные работы как способ разрушения горных пород являются одним из основных технологических процессов при строительстве шахт, добыче полезных ископаемых и проведении подземных горных выработок. При этом объем взрывных работ в технологическом цикле горного производства может достигать 90%.

Целью преподавания дисциплины "Технология и безопасность ведения взрывных работ" является инженерная подготовка на право руководства взрывными работами. Таким образом, в направлении подготовки "*Горное дело*" изучаемая дисциплина является одной из ведущих дисциплин, требующая фундаментальной подготовки в области физики, химии и математики, глубоких знаний физики горных пород, механики горных пород, геологических дисциплин и др.

Будущие производственные функции бакалавра включают умение организовывать проведение взрывных работ в соответствии с "Едиными правилами безопасности при взрывных работах"; руководить взрывными работами и контролировать качество их выполнения; выбирать рациональные способы бурения шпуров и скважин, типы ВВ и СИ; руководить техникой и технологией заряжания; контролировать монтаж взрывной сети, ее исправность и производство взрывов; разрабатывать и осуществлять мероприятия по предотвращению травматизма; разрабатывать и вести техническую документацию.

Будущий бакалавр должен знать основы теории детонации ВВ и ударных волн в различных средах; теории взрыва и создания промышленных ВВ; типы и свойства ВВ, область их рационального применения; способы и средства взрывания зарядов ВВ; методы оценки эффективности и качества промышленных ВВ; методы расчета параметров БВР при ведении взрывных работ в подземных условиях; методы расчета кислородного баланса, температуры, работы и теплоты взрыва, воздушных ударных волн, сейсмически безопасных расстояний; современный уровень взрывных работ в шахтах; особенности ведения взрывных работ при проведении выработок в опасных условиях угольных шахт.

Для глубокого изучения и усвоения материала, активизации занятий используются элементы методов проблемного изложения материала на лекциях, технические средства обучения, результаты научных исследований при выполнении НИР.

Книга написана по материалам лекций, которые автор читал в течение последних лет студентам третьего курса горного факультета специальности "Разработка месторождений полезных ископаемых". Ранее изданные учебные пособия ("*Ударные волны в твердых средах*", "*Українсько-російсько-англійський термінологічний словник з гірничовибухової справи*", "*Технологія та безпека виконання вибухових робіт. Практикум*" та "*Способи підривання зарядів вибухових речовин*") вместе с предлагаемым кратким курсом лекций предназначены для повышения теоретического уровня и глубокого усвоения основных разделов учебной программы дисциплины "Технология и безопасность проведения взрывных работ".

Теоретический курс состоит из шести разделов, в которых изложены основы теории взрывчатых веществ, основные сведения о взрывчатых веществах, их свойствах и классификации, способах взрывания зарядов ВВ, элементы теории предохранительных ВВ, основы теории действия взрыва на среду и взрывные технологии проведения подземных выработок. В каждом из перечисленных разделов уделяется внимание вопросам охраны труда, приводятся основные требования Единых правил безопасности при взрывных работах.

В конце каждого раздела приведен список рекомендованной литературы как дополнительных источников, используемых студентами при самостоятельной работе. Перечень контрольных вопросов охватывает все ключевые положения теоретического курса.

Примеры решения задач, выполнения паспорта буровзрывных работ и задания для самостоятельной работы в курсе лекций не приведены, поскольку эти материалы изложены в практикуме по данной дисциплине. Основные термины, которые наиболее широко используются в практике взрывного дела, приведены в терминологическом словаре и должны быть усвоены студентами самостоятельно.

Замечания, предложения и рекомендации относительно объема и содержания материала, стиля изложения просьба направлять на кафедру строительства и геомеханики проф. Соболеву В.В., либо сообщить по тел.: 8 0562 458-504 или E-mail: sobolevv@nmu.org.ua

1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Взрывом называют чрезвычайно быстрое химическое или физическое превращение вещества (или системы), сопровождающееся таким же быстрым переходом потенциальной энергии в механическую работу. Характерным признаком взрыва является образование ударной волны (УВ) в среде, примыкающей к месту взрыва. Причиной возникновения УВ является быстрое расширение (со сверхзвуковой скоростью в данной среде) газов или паров, содержащихся до взрыва или возникших в системе в момент взрыва.

Взрывы делят на физические и химические.

При физических взрывах, вызванных, например, взрывом парового котла, баллонов с газом и т.п., изменяется только физическое состояние вещества с сохранением постоянства его химического состава. В горном деле примерами таких взрывов являются отбойка угля при помощи металлических патронов "кардокс", содержащих жидкую уголекислоту, или металлических патронов "эрдокс", содержащих сжатый воздух.

Химическое превращение вещества является обязательным условием химического взрыва. Взрывчатое химическое превращение вещества обуславливается наличием трех факторов: высокой скоростью, образованием газов или паров, выделением теплоты.

Общими чертами физических и химических взрывов является то, что выделяющаяся энергия при взрыве переходит в механическую работу, которую совершают сжатые газы, имевшиеся до взрыва (физический взрыв) или образовавшиеся в момент взрыва (химический взрыв).

Высокая скорость выделения энергии как следствие высоких скоростей изменения состояния вещества и весьма высокое давление (от десятков до сотен тысяч атмосфер) сжатых газов предопределяет особый быстропротекающий разрушительный характер механического действия взрыва.

1.1. Ударные волны

Быстро расширяющиеся сжатые газы вызывают в окружающей среде (газовой, жидкой, твердой) скачок давления или волну возмущений, которую называют *ударной волной*.

Скорость распространения ударной волны в среде всегда превышает скорость звука этой среды. Линейная зависимость скорости ударной волны от параметров среды записывается следующим образом:

$$D = C + \lambda U, \quad (1.1)$$

где D – скорость ударной волны; C – скорость звука в среде; λ – коэффициент (находят в таблицах или определяют экспериментально); U – массовая скорость частицу за фронтом ударной волны.

При взрыве одного и того же взрывчатого вещества (ВВ) одинаковой массы в воздухе, воде и в горной породе скорости соответствующих ударных волн и давления будут подчиняться неравенствам:

$$D_{\text{горн.п.}} > D_{\text{вод.}} > D_{\text{воздух}}; \quad P_{\text{горн.п.}} > P_{\text{вод.}} > P_{\text{воздух}}. \quad (1.2)$$

Фронт ударной волны можно представить как линию, разделяющую два принципиально различных физических состояния в одной среде. Состояния, возникшего в результате прохождения ударной волны, и невозмущенной среды, по которой УВ еще не прошла. Таким образом, фронт УВ, распространяющийся со сверхзвуковой скоростью в среде, представляет скачкообразное изменение давления, температуры и плотности.

На некотором расстоянии от заряда ВВ по среде распространяется ударная волна, которая с расстоянием постепенно вырождается в звуковую, т.е. D стремится к C при $U \rightarrow 0$.

Ударная волна отличается от упругой тем, что создает поток вещества, следующий за ее фронтом. Расстояние, на котором ударная волна ослабляется до звуковой, в газе намного больше, чем в твердом веществе. При заданном диаметре заряда это расстояние в воздухе составляет несколько десятков и даже сотен диаметров заряда, в воде – около 2–3 диаметров, в твердом теле – меньше одного диаметра.

Условия на фронте ударной волны (часто говорят "на ударном скачке") особенно удобно записывать в следующем виде:

закон сохранения массы:

$$\frac{\rho_0}{\rho_1} = 1 - \frac{U_1 - U_0}{D - U_0}, \quad (1.3)$$

закон сохранения количества движения:

$$(D - U_0)^2 = \left(\frac{1}{\rho_0} \right)^2 \frac{P_1 - P_0}{\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_1}}, \quad (1.4)$$

закон сохранения энергии:

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2} (P_1 + P_0) (V_0 - V_1). \quad (1.5)$$

Здесь индексом "0" и "1" обозначены соответственно параметры невозмущенной среды и величины, характеризующие состояние вещества, сжатого ударной волной.

Обычно считается, что невозмущенная среда находится в состоянии покоя. Но при выводе уравнений сохранения массы (1.3), импульса (1.4) и энергии (1.5) предполагалось, что имеется начальная скорость U_0 . Этот более общий характер решения в некоторых случаях оказывается полезным.

Если считать, что невозмущенная среда покоится и $U_0 = 0$, пренебрегая начальным давлением P_0 , уравнения (1.3) – (1.5) можно переписать в более удобном для расчетов виде

$$\rho_0 D = \rho_1 (D - U_1); \quad (1.6)$$

$$P_1 = \rho_1 D U_1; \quad (1.7)$$

$$E_1 = \frac{1}{2} P_1 (V_0 - V_1), \quad (1.8)$$

где V_0 и V_1 соответственно начальный и конечный объем; E_1 – внутренняя энергия; P_1 – давление в среде; $V_0 = 1/\rho_0$; $V_1 = 1/\rho_1$.

Ширина фронта ударной волны в воздухе на уровне моря составляет 0,025 мкм (для сравнения: длина волны в инфракрасной области примерно рав-

на 1 мкм). При распространении ударной волны в любой среде давление, плотность и температура в возмущенной области увеличиваются во много раз. Поэтому люди и животные, попавшие в зону действия ударной волны, гибнут, а сооружения разрушаются. Кроме этого, поток воздуха, возникающий за фронтом ударной волны, также наносит большой ущерб живым организмам и сооружениям. На рис. 1.1. показан профиль ударной волны в координатах давление – расстояние.

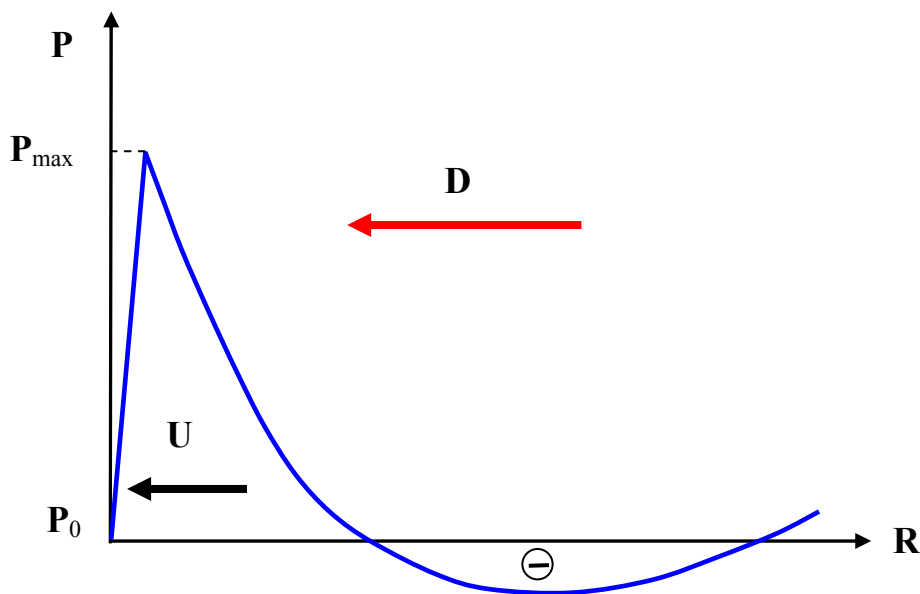


Рис. 1.1. Профиль давления при взрыве:

⊖ – зона разрежения ($P < P_0$); в этой зоне поток вещества будет направлен в сторону противоположную движению фронта ударной волны, т.е. к источнику взрыва;
 R – расстояние. Стрелками показано направление движения фронта ударной волны и частиц окружающей среды

Если профиль давления ударной волны в среде рассмотреть во времени, то окажется, что $P_{\max}$ (максимальное давление) падает быстро – обратно пропорционально расстоянию ($1/R$). На рис. 1.2 представлена схема, изображающая взрыв заряда ВВ в моменты времени t_1 , t_2 и t_3 .

Образовавшийся при взрыве газ "толкает" взрывную волну с крутым фронтом, давление в которой падает с увеличением расстояния. Газ, образовавшийся при взрыве, расширяется до конечного колеблющегося объема, в то время как объем воздуха, охватываемый и нагреваемый ударной волной, растет с увеличением расстояния – ударная волна расходует свою энергию и затухает.

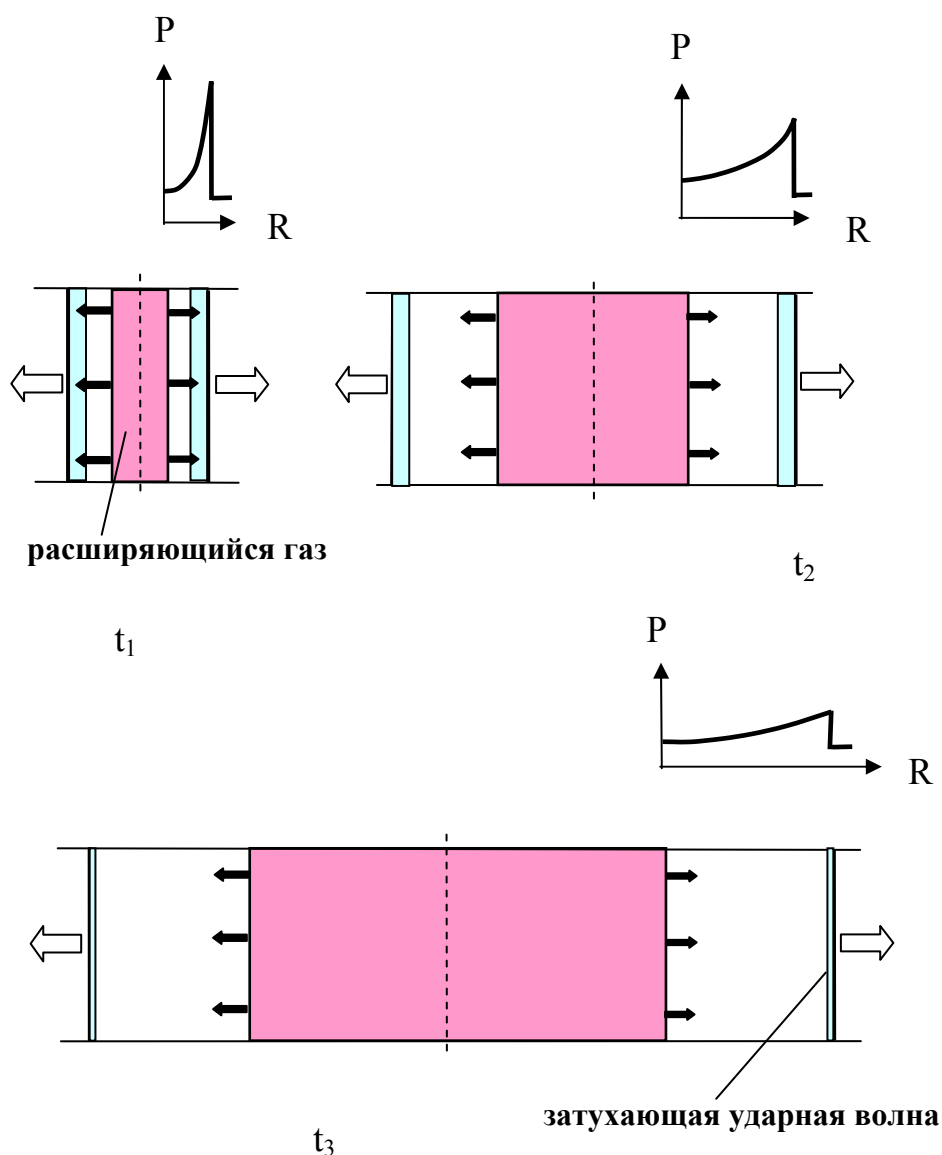


Рис.1.2. Схематическое изображение взрывов цилиндрического или сферического заряда ВВ

Избыточное давление (в Па) на фронте ударной волны в воздухе при взрыве наземного заряда ВВ массой q рассчитывают по формуле Г.И. Покровского

$$P_{\text{наз}} = 10^5 \left(\frac{1,06 \cdot q^{1/3}}{R} + \frac{4,3 \cdot q^{2/3}}{R^2} + \frac{14q}{R^3} \right), \quad (1.9)$$

где R – расстояние от заряда до измеряемой точки.

Если заряд ВВ взрывается над поверхностью земли, то давление можно найти из следующего выражения

$$P_v = 10^5 \left(\frac{0,84q^{1/3}}{R} + \frac{2,7q^{2/3}}{R^2} + \frac{7q}{R^3} \right). \quad (1.10)$$

Избыточное давление на преграде при отражении ударной волны $P_{отр}$ легко рассчитать, используя известную формулу

$$P_{отр} = 2 \cdot P_v + \frac{6P_v}{P_v + 7P_0}. \quad (1.11)$$

где P_v – давление ударной волны в воздухе; P_0 – атмосферное давление или начальное давление в среде.

Важным параметром воздушных ударных волн является время действия фазы сжатия (с) $t_{ф.сж.}$:

$$t_{ф.сж.} = 1,7 \cdot 10^{-3} \sqrt{R \cdot \sqrt{q}} \quad (1.12)$$

1.2. Формы химического превращения взрывчатых веществ

В зависимости от типа взрывчатого вещества (ВВ), условий возбуждения (инициирования) процессы химического превращения могут протекать в различных формах с различными скоростями, отличающимися на порядок и более. К основным формам химического превращения относятся термическое разложение и горение (дозвуковые процессы), детонация (сверхзвуковой процесс).

Термическое разложение ВВ является гомогенным процессом, протекающем во всем объеме заряда при данной температуре. Скорость термического распада ВВ измеряется числом молей, реагирующих в единицу времени в единице объема – моль/(с·см³). Таким образом, скорость термораспада соответствует данной температуре и одинакова во всех точках объема ВВ. Основные продукты разложения – оксиды горючих элементов (СО, СО₂, Н₂О др.), азот, альдегиды, кислоты и т.п. Термическое разложение может завершиться при определенных условиях *тепловым взрывом*.

Горение ВВ является самораспространяющимся гетерогенным направленным процессом с выраженной зоной химической реакции, разделяющей исход-

ное вещество и продукты горения. Как и в случае термического разложения, продуктами горения являются CO , CO_2 , H_2O , N_2 . Горение протекает за счет химических реакций между окислителем и горючими компонентами, содержащимися в составе ВВ, и определяется механизмом передачи энергии из зоны химической реакции в примыкающий к ней слой исходного вещества.

Так как основные составляющие процесса тепло- и массопереноса при горении (конвекция, диффузия, теплопроводность) медленные, то и процесс горения протекает медленно – с дозвуковой скоростью. Обычно линейная скорость горения составляет несколько миллиметров в секунду (редко десятки и сотни миллиметров в секунду). Скорость горения существенно зависит от массы ВВ и внешних факторов – давления и температуры. В весьма ограниченном пространстве давление повышается быстро и горение может перейти в детонацию. В связи с этим уничтожение ВВ сжиганием проводят на открытых площадках.

Известна эмпирическая зависимость линейной скорости горения (V) от давления

$$V = a + bP^v, \quad (1.13)$$

где P – давление; a и b – постоянные; v – показатель степени, колеблющийся от 0 до 1. При значениях v больше единицы возможен переход горения в детонацию.

Основным видом реакции медленного термического распада ВВ является мономолекулярный распад, на который накладываются вторичные реакции с участием продуктов первичного распада. Ускорение реакции распада особенно активно происходит при повышении температуры ВВ. Если приход тепла при реакции преобладает над процессом его отвода в окружающую среду, то возможно прогрессивное нагревание ВВ и в дальнейшем значительный рост реакции, а в итоге – *тепловой взрыв*. Такая критическая точка называется *температурой вспышки ВВ*. Или другими словами, та минимальная температура, при которой в течение условно заданного отрезка времени подвод тепла становится больше теплоотвода и химическая реакция вследствие самоускорения принимает характер взрывчатого превращения, называется температурой вспышки.

Стационарное горение – представляет собой процесс химического превращения, распространяющийся с малыми скоростями (миллиметры в секунду)

и охватывающий последовательно слои вещества. Распространение горения происходит путем теплопередачи. В случае если отвод продуктов горения затруднен, увеличивается поверхность горения или была начальная скорость горения высокой, то медленное горение может перейти в детонацию, либо во взрывное горение. При известных условиях детонация или взрывное горение могут перейти в медленное (стационарное). Например, при переуплотнении ВВ в результате повышенного давления. Такие процессы в шахтах называют *выгоранием зарядов в шпурах*.

Детонация – процесс химического превращения ВВ, сопровождающийся выделением теплоты и распространяющийся с постоянной скоростью, превышающей скорость звука в данном веществе. В отличие от горения детонация представляет собой комплекс мощной ударной волны и следующей за ее фронтом зоны химического превращения вещества.

Исходная структура взрывчатых веществ является термодинамически метастабильной. Перед достижением более стабильного состояния с меньшей энергией система должна пройти через промежуточное менее стабильное состояние с повышенной энергией, это означает как бы наличие барьера, препятствующего непрерывному превращению, если при этом не обеспечена необходимая активация процесса. Химические превращения ВВ в конечные продукты взрыва могут быть инициированы путем подвода тепла, механической энергии (удар, трение), либо другими видами воздействий.

На рис. 1.3 в качестве иллюстрации процесса графически представлено изменение свободной энергии ВВ в процессе химического превращения.

В исходном состоянии ВВ обладает некоторым избытком внутренней энергии, который и определяет его термодинамическую метастабильность. Переход из исходного состояния, которое отвечает превращению в более стабильное, сдерживается энергетическим барьером – ΔF_A . Для системы (ВВ) наименьший прирост энергии ΔF_A , позволяющий перейти через барьер, представляет собой свободную энергию активации реакции, и система (ВВ) с максимальной свободной энергией F_A является нестабильной, находясь в "переходном" или "активированном" состоянии.

Минимальный внешний импульс, способный, например, инициировать переходы "ВВ → продукты взрыва", для различных взрывчатых веществ будет различным и соответствовать величине ΔF для каждого ВВ. Так, для первичных

инициирующих ВВ эта величина будет намного больше, чем для обычных бризантных ВВ. Поэтому для возбуждения реакции взрывчатого превращения в первичных инициирующих ВВ требуется меньшая энергия активации ΔF_A , чем для бризантных ВВ.

При взрыве взрывчатые вещества превращаются в химически устойчивые системы и это превращение может протекать с разной скоростью. Под *скоростью взрывчатого превращения* понимают быстроту распространения этой реакции по взрывчатому веществу. Скорость взрывчатого превращения для данного ВВ является постоянной величиной. В зависимости от химической природы ВВ, его физических характеристик, геометрических параметров (для промышленных ВВ – величины размеров частиц, содержания влаги и других характеристик) скорость взрывчатого превращения колеблется в больших пределах (1,0–10,2 км/с).

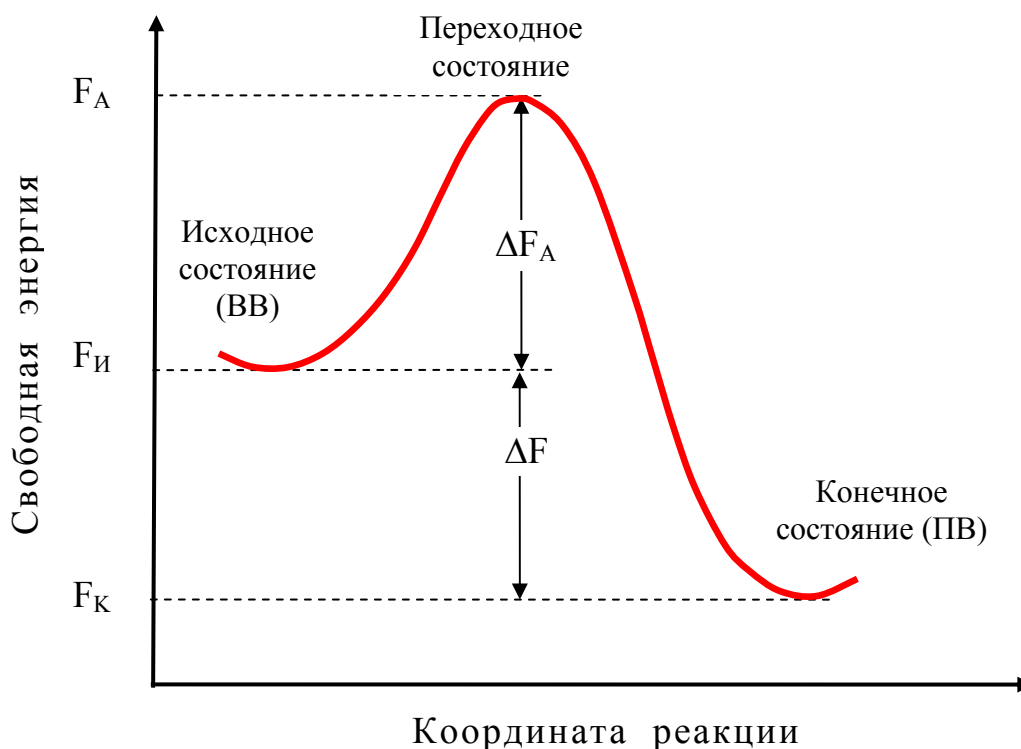


Рис. 1.3. Изменение свободной энергии системы (ВВ) при переходе ее в стабильное состояние:

ΔF_A – свободная энергия активации; ΔF – движущая сила процесса перехода. Координатой реакции является любая переменная величина, служащая мерой развития реакции

1.2.1. Детонация взрывчатых веществ

Служебной формой взрывчатых превращений промышленных ВВ является детонация, представляющая собой самоподдерживающийся процесс перемещения по ВВ со сверхзвуковой скоростью ударного фронта (скачка давления), сопровождающийся химическим превращением вещества. Импульсом для начала развития химической реакции является, как правило, ударная волна, возбуждаемая взрывом капсюль-детонатора или электродетонатора, т.е. промежуточных детонаторов. Таким образом, химическая реакция возникает в результате адиабатического сжатия и разогрева вещества в ударном фронте. Комплекс из ударного фронта и зоны химической реакции называется *детонационной волной*.

В зависимость от типа ВВ, давление на ударном фронте может быть от десятков атмосфер (газовые взрывные смеси) до сотен тысяч (бризантные ВВ). В режиме стационарного распространения скорость фронта детонации может для разных ВВ составлять от 1 до 10 км/с. Тепло, выделяющееся при детонационной форме химического превращения, компенсирует потери энергии, идущие на сжатие и движение вещества, обеспечивая постоянство параметров детонационной волны. Следует подчеркнуть, что скорость детонации не зависит от начального импульса; она является характеристикой и постоянной величиной данного ВВ. Участок заряда от точки инициирования до начала распространения детонации со стационарной скоростью называют *участком нестационарной детонации*.

Теоретические основы детонации были заложены в конце XIX столетия В.А. Михельсоном (Россия), Д.Л. Чепменом (Англия) и Е. Жуге (Франция). Математическая модель, созданная ими не учитывала кинетики химической реакции в детонационной волне, а представляла ударный фронт формально в виде поверхности разрыва, отделяющей исходное ВВ от продуктов взрыва.

Экзотермическая реакция, возбуждаемая механическим ударом, который передается от реагирующего слоя к соседнему слою, распространяется в виде волны давления. Такой процесс возможен лишь при том условии, что химическая реакция заканчивается прежде, чем спадет давление за счет волны разгрузки, идущей от свободной поверхности со скоростью звука. Такой сценарий возможен только при очень высоких давлениях, когда волны давления переходят в

ударную волну. Таким образом, детонацию можно представить как сочетание ударной волны с зоной химической реакции.

Ударная волна возбуждает реакцию в веществе, а реакция усиливает ударную волну, пока не установится равновесие между передаваемой и рассеиваемой энергией не установится стационарный режим распространения волны детонации. Исследование процессов в такой установившейся волне в одномерном случае является задачей *гидродинамической теории детонации*. С учетом энергосвободы при детонации, основные соотношения между начальными и конечными параметрами состояния вещества, а также скоростью детонации и массовой скоростью движения продуктов химического превращения за фронтом находятся из законов сохранения массы, импульса и энергии в волне.

Независимо друг от друга Я.Б. Зельдович, Д. Нейман, В. Дёринг предложили модель детонационной волны, которая учитывает химическую зону превращения (зону "химтика") ВВ в конечные продукты. В соответствии с такой моделью, исходное ВВ с начальными параметрами p_0 , v_0 (рис. 1.4) сжимается в ударном фронте (точка В), разлагается и выходит из зоны реакции (точка С) со скоростью, уменьшенной на величину u , равную скорости газообразных продуктов взрыва.

В случае одномерного потока законы сохранения массы и импульса записывают следующим образом:

$$\rho_0 = \rho_1 (D-u) \quad (1.14)$$

$$\rho_0 D^2 + P_0 = \rho(D-u)^2 + P, \quad (1.15)$$

где P_0 и P – начальное давление и давление ПВ соответственно; $\rho_0 = 1/v_0$, $\rho = 1/v$ – соответственно начальная плотность ВВ и плотность ПВ.

Закон сохранения энергии записывается в форме

$$E - E_0 - Q_{\text{взр}} = 1/2(P-P_0)(v_0-v), \quad (1.16)$$

где E , E_0 – соответственно удельная внутренняя энергия в конечном и начальном состояниях. Выражение (1.16) является одной из форм записи уравнения ударной адиабаты Гюгонио для ПВ.

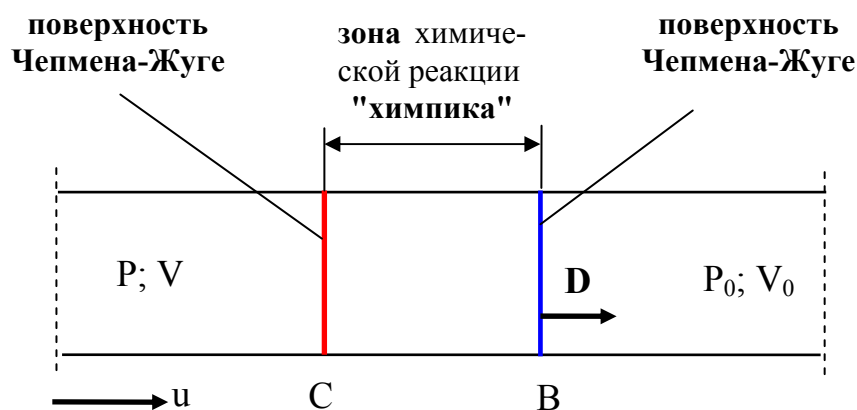


Рис. 1.4. Схема фронта детонации

D – скорость распространения детонационной волны; **u** – скорость ПВ.

На P – v -диаграмме детонационной волны, рис. 1.5, начальному состоянию соответствуют точка А, сжатию ВВ ударным фронтом – точка В. Экзотермическая реакция в ВВ, начавшаяся на ударном фронте (точка В), заканчивается на поверхности Чепмена–Жуге, рис. 1.4, или в точке С, рис. 1.5. Точка С называется точкой Жуге или Чепмена–Жуге; она лежит на адиабате продуктов взрыва (адиабате Гюгонио). Процесс превращения сопровождается расширением ПВ, поэтому давление ПВ падает: в точке Жуге давление $P_{\text{Ж}}$ почти вдвое ниже давления P (в точке В).

Адиабатическому сжатию вещества отвечает прямая АВ, рис. 1.6 с очень малым наклоном относительно оси абсцисс, что свидетельствует о крайне малом времени сжатия и малой толщине сжатого слоя. Зоне химика отвечает участок ВС на кривой спада давления. Точка С отвечает точке Жуге, участок за этой точкой характеризует спад давления в расширяющихся ПД.

Таким образом, вещество в детонационной волне последовательно проходит все состояния по пути АВС

Зона сжатия в ударной волне очень мала (порядка 0,1 мкм), зона химической реакции зависит от химических и физических свойств ВВ и имеет ширину 0,5 мкм (для азидов свинца) до 10 мм (для тротила и тетрила). Продолжительность времени химпика в высокоплотном флегматизированном гексогене составляет $\sim (2,5 \pm 5) \cdot 10^{-9}$ с при максимальном давлении в волне – 40 ГПа.

Несмотря на то, что описанная модель не во всех случаях соответствует

наблюдаемым явлениям в структуре детонационных волн, общие зависимости вписываются в гидродинамическую теорию путем пространственно-временного усреднения параметров детонационной волны с неоднородным фронтом.

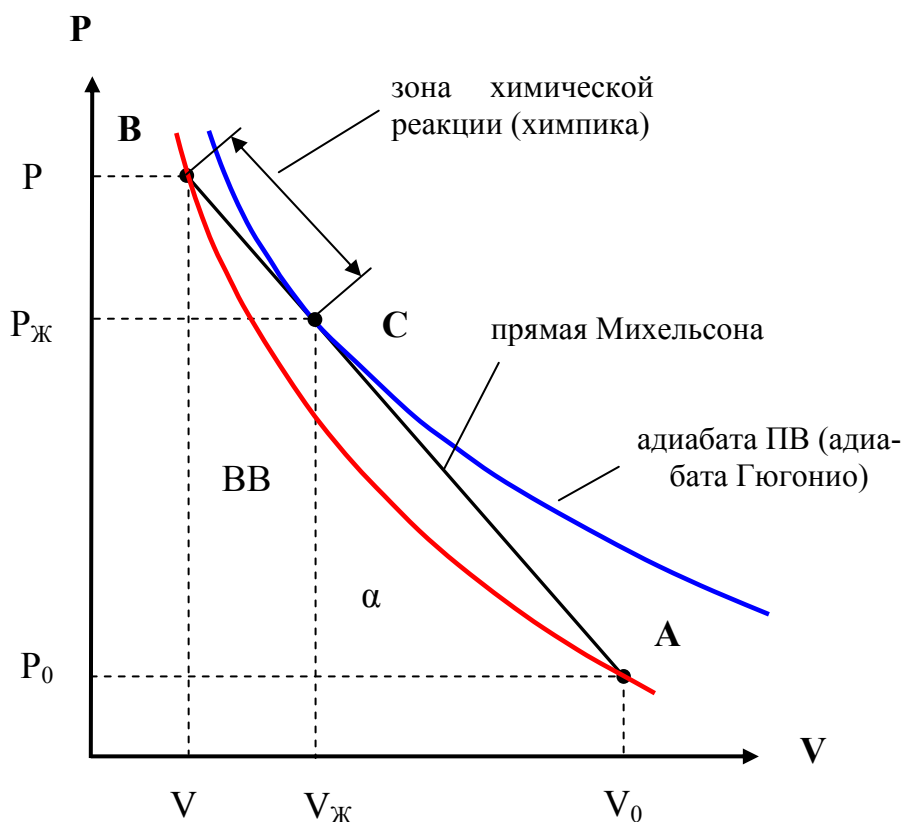


Рис.1.5. P-v-диаграмма детонационной волны

Детонация по Чепмену–Жуге удовлетворяет условию (точка C)

$$D = U + C, \quad (1.17)$$

где U – массовая скорость частиц ПД; C – скорость звука в ПД; D – скорость детонации, равная скорости перемещения зоны химической реакции. Другими словами, химическая реакция во взрывчатом веществе в форме детонации отвечает условию (1.17).

Если $D > D_{ч.ж.}$ давление может превысить $P_{ж}$ и тогда говорят о "*пересжатой*" детонации. При $D < D_{ч.ж.}$ волна называется "*недосжатой*". Невозможность существования самоподдерживающейся "*пересжатой*" детонационной волны следует из того, что в ней $D - U < C$, вследствие чего волна разре-

жения, следующая при детонации за скачком уплотнения, догонит фронт детонационной волны. Давление в нем будет уменьшаться и достигнет величины, соответствующей условиям Чепмена–Жуге.

На графике зависимости P от v (рис. 1.5) величина D определяется как наклон прямой Михельсона, связывающей начальное состояние и состояние, соответствующее окончанию реакции. Таким образом, предполагается, что в условиях устойчивой детонации прямая Михельсона совпадает с касательной к кривой Гюгонио для продуктов взрыва.

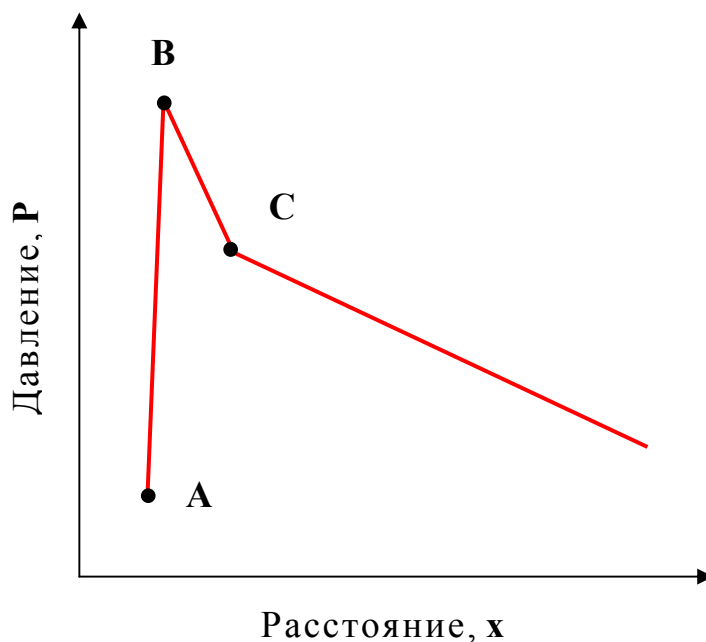


Рис.1.6. Профиль детонационной волны в координатах давление–расстояние

Совместное решение уравнений (1.14) и (1.15) дает формулы для расчета кинематических параметров детонации

$$D = v_0 \sqrt{\frac{P - P_0}{v_0 - v}} = v_0 \operatorname{tg} \alpha,$$

$$U = \sqrt{(P - P_0)(v_0 - v)}.$$

Среди приближенных методов расчета параметров детонации мощных ВВ часто используется соотношение

$$P = \frac{\rho_0 D^2}{k + 1} \quad (1.18)$$

где P – давление; k – показатель политропы – входит в уравнение состояния ПВ в виде политропы $Pv^k = \text{const}$ [Л. Ландау, К. Станюкович]. Величина k может быть различной (1,5÷4). Часто в расчетах принимается $k = 3$.

Шведов К.К. рекомендует при расчетах давления детонации пользоваться следующими значениями k :

$k = 3,25-3,3$ – для тротила при $\rho_0 = 1,59-1,63$ г/см³;

$k = 2,7-3,0$ – для гексогена и октогена.

Если в состав ВВ входят инертные добавки (например, NaCl или алюминий), то давление можно рассчитать по формуле:

$$P = \frac{\rho_0 D^2}{k + 1} \left(1 - \alpha \frac{\rho_0}{\rho_{0\text{доб}}} \right) \quad (1.19)$$

где α – весовая доля добавки в составе ВВ; $\rho_{0\text{доб}}$ – начальная плотность добавки, г/см³.

1.2.2. Принцип Ю.Б. Харитона

При выводе основных соотношений в детонационной волне рассматривалась одномерная задача для плоской волны. В этом случае вся потенциальная химическая энергия реализуется в детонационной волне и определяет параметры детонации – ее скорость, давление и т.д.

В случае неоднородного течения за ударным фронтом *параметры детонации в определенных границах становятся зависимыми от поперечных размеров заряда*. Это впервые показал Ю.Б. Харитон.

Поскольку зона химического превращения в детонационной волне имеет конечные размеры, то за время химической реакции, протекающей на участке ВС, рис. 1.5, образующиеся сжатые газообразные продукты стремятся к расширению в радиальном направлении. В результате этого в зону реакции с боковой поверхности заряда ВВ входит волна разрежения, рис. 1.7, а охваченная ею масса вещества теряется как поставщик энергии относительно ударного фронта. Поскольку глубина проникновения волны разрежения обратно пропорциональ-

на радиусу заряда, то относительные потери энергии в детонационной волне должны уменьшаться с увеличением радиуса заряда.

Принцип Харитона: детонация может устойчиво распространяться по заряду, если продолжительность реакции в волне (τ) меньше времени разброса вещества в радиальном направлении (Θ).

Исходя из этого, можно найти такой минимальный диаметр заряда, при котором еще возможно устойчивое распространение детонации, т.е. найти критический диаметр заряда ВВ.

Условия устойчивости определяют следующим образом. Продолжительность химической реакции в детонационной волне τ будет равна

$$\tau = \frac{\delta}{D - U}$$

или, учитывая, что $U = D/4$

$$\tau = \frac{D}{k + 1} \approx \frac{1}{4} D,$$

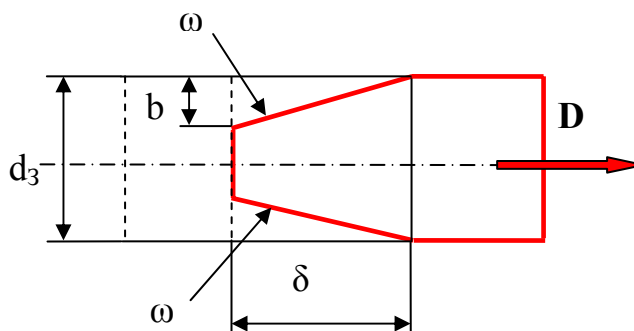


Рис. 1.7. Зона химической реакции в детонационной волне:

d_3 – диаметр заряда ВВ; ω – волна разрежения; $\omega = 0,5 \cdot D_{ВВ}$; b – глубина проникания волны разрежения; δ – ширина зоны реакции; D – скорость детонации ВВ

будем иметь

$$\tau = \frac{4}{3} \cdot \frac{\delta}{D}. \quad (1.20)$$

Время разброса вещества в радиальном направлении составит

$$\Theta = \frac{d_3}{2\omega},$$

следовательно,

$$d_{кр} = 2\omega \cdot \tau \quad (1.21)$$

С учетом выражения (1.20) и того, что $\omega = D/2$, формулу (1.21) можно переписать следующим образом

$$d_{кр} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot D \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{\delta}{D} = \frac{4}{3} \delta, \quad (1.22)$$

т.е. критический диаметр близок по величине к ширине зоны химической реакции. При $d_3 > d_{кр}$ потери энергии в детонационной волне должны уменьшаться, а параметры волны соответственно возрастать, асимптотически приближаясь к максимуму.

Детонацию с максимальными параметрами для данного ВВ и данной плотности называют *идеальной детонацией* или *детонацией в идеальном режиме*. Диаметр заряда, при котором параметры детонации близки к максимальным (рис. 1.8), т.е. к $D_{и}$, называют *предельным диаметром* ($d_{пр}$).

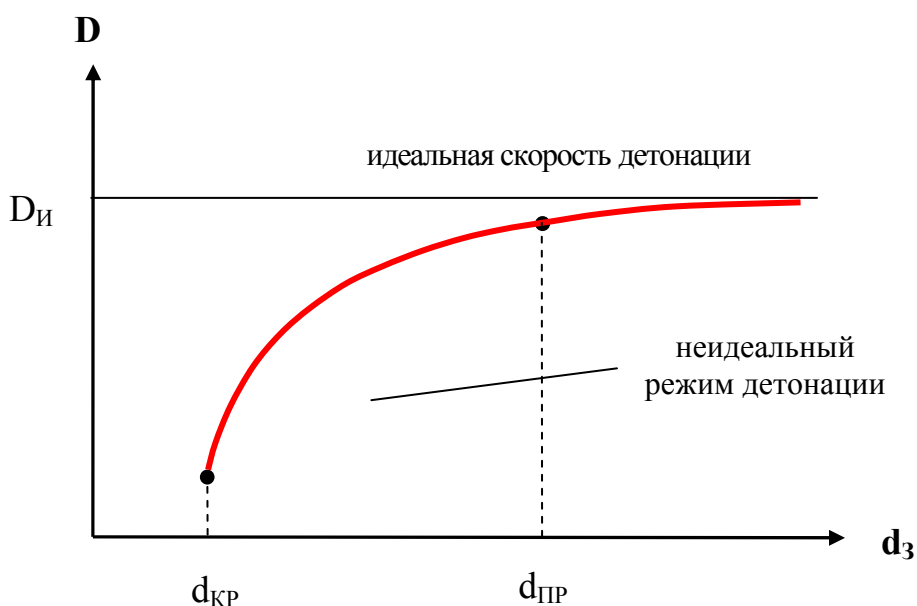


Рис. 1.8. Зависимость скорости детонации ВВ от диаметра заряда

Детонацию, протекающую в зарядах с $d_{кр} < d_3 < d_{пр}$, называют *неидеальной*, или *детонацией в неидеальном режиме*. Связь между скоростью идеальной детонации, шириной зоны реакции и диаметром заряда выражается формулой, предложенной А. Дубновым:

$$D = D_{\text{и}} \left(1 - \frac{\delta}{d_3} \right).$$

Величина критического диаметра зависит от плотности ВВ, наличия оболочки и ее материала, внешнего давления, температуры и других параметров.

1.3. Экспериментальные исследования детонации ВВ

1.3.1. Оптический метод определения скорости детонации

Основными приборами, используемыми для оптических исследований, являются фоторегистраторы с зеркальной разверткой – СФР; оптическая принципиальная схема приведена на рис. 1.9.

С помощью СФР свечение, сопровождающее детонацию заряда ВВ, записывают на неподвижную фотопленку, на которую оно отбрасывается плоским вращающимся зеркалом. Количество фиксируемых на пленке кадров достигает 2-х млн. в секунду. Обычно заряд ВВ взрывают в бронекамере, имеющей щель, через которую и проникает свечение. Изображение на пленке получается уменьшенным по отношению к действительным размерам заряда.

Практическое использование СФР возможно в нескольких режимах:

- *съемка с боковой поверхности заряда ВВ* (в этом случае на фотопленке фиксируется временная развертка распространения зоны свечения – фронта ударной волны, детонационной волны или пламени при горении ВВ – по длине заряда. Данная постановка эксперимента позволяет регистрировать и переходные процессы, т.к. изображение на пленке является аналогом t,x-диаграммы);
- *съемка с торцевой поверхности заряда* (данная постановка применима для регистрации скорости детонационной волны);
- *покадровая съемка* (в этом случае перед фотопленкой устанавливается линзовая вставка, позволяющая получать покадровое изображение процесса со скоростью до 2-х миллионов кадров в секунду; щелевая диафрагма при данной съемке отсутствует).

Типичная картина покадрового изображения развития высокоскоростного процесса показана на рис. 1.10.

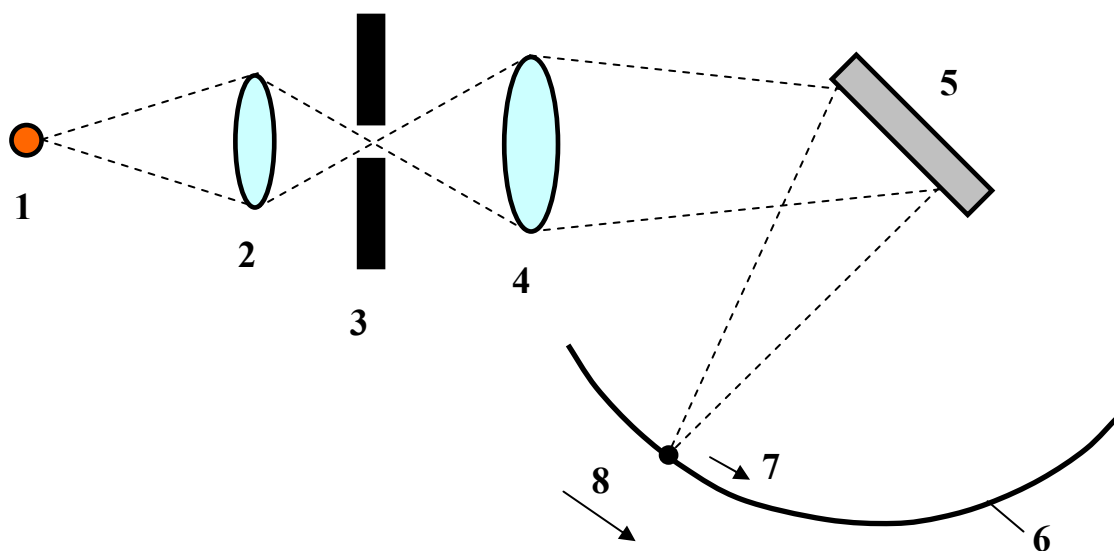


Рис. 1.9. Принципиальная оптическая схема зеркальной развертки:
 1 – заряд ВВ, расположенный перпендикулярно к плоскости чертежа; 2 – объектив;
 3 – щелевая диафрагма; 4 – объектив; 5 – вращающееся зеркало; 6 – фотопленка;
 7 – направление вращения зеркала; 8 – направление перемещения изображения

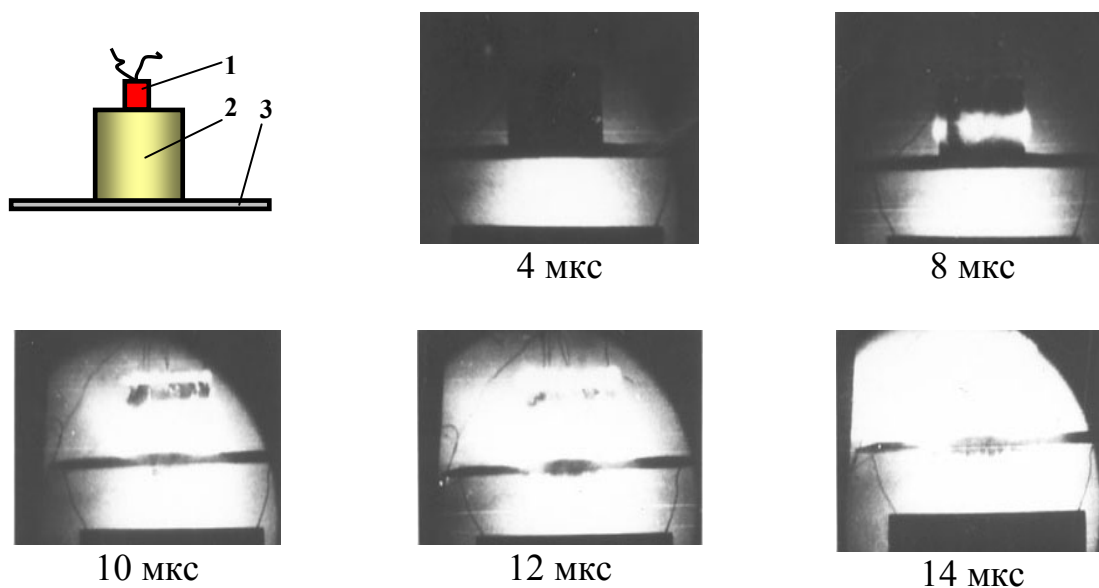


Рис. 1.10. Серия последовательных кадров светящихся продуктов взрыва заряда аммонита 6ЖВ:
 1 – электродетонатор; 2 – заряд ВВ; 3 – картонное основание

1.3.2. Метод ионизационных датчиков

Данный метод измерения скорости детонации основан на ионизации продуктов взрыва за фронтом детонационной волны. Как было установлено при детонации зарядов ВВ могут возникать высокие напряжения. Например, между двумя проводниками, идущими от электродетонатора №8, получены сигналы

величиной 2 кВ. Более высокие значения (20 кВ) зафиксированы в зарядах, покрытых оболочкой из поваренной соли. Эти наблюдения послужили причиной исследований как ионизированного состояния в бризантных ВВ во время детонации, так и связи детонации с ионизацией. На основании многочисленных экспериментов было установлено, что высокая степень ионизации в зоне реакции детонационной волны является уникальной особенностью детонации конденсированных ВВ.

Электрическое сопротивление продуктов взрыва составляет от нескольких единиц до нескольких десятков Ом на миллиметр. Помещая в заряд ВВ на некотором расстоянии друг от друга искровые промежутки (ионизационные датчики), к которым приложено некоторое напряжение, можно во время детонации фиксировать возникающий в цепи электрический импульс. На рис. 1.11 показана схема измерения скорости детонации с помощью ионизационных датчиков.

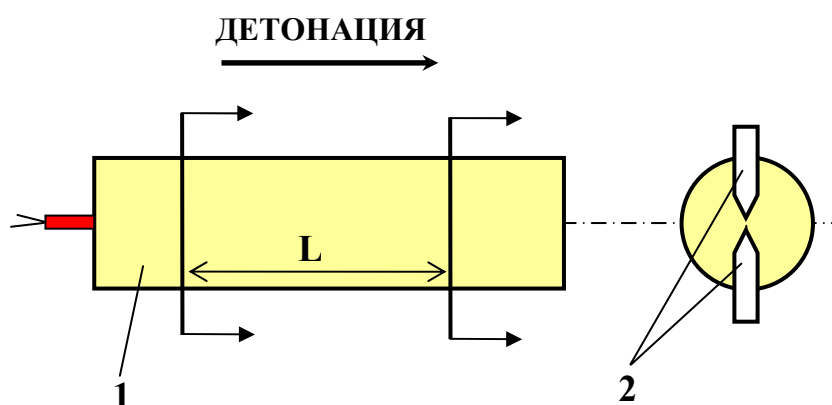


Рис. 1.11. Постановка метода ионизационных датчиков:
1 – заряд ВВ; 2 – лепестки датчиков

Ионизационные датчики помещаются в заряд ВВ, лепестки которых включаются в цепь осциллографического измерителя времени. Таким образом с помощью осциллографа измеряется временной промежуток (t) прохождения детонационной волны участка L

$$D_{\text{ВВ}} = L / t.$$

Для данного метода $\Delta D_{\text{ВВ}} / D_{\text{ВВ}} \approx \pm 0,5\%$.

Кроме метода ионизационных датчиков в экспериментальных исследованиях широко используются электромагнитный метод регистрации массовой скорости за фронтом ударных и детонационных волн, метод измерения скорости детонации с помощью реостатного датчика.

В последние годы разработаны способы измерения скорости детонации с помощью световодов, основанные на передаче свечения детонационной волны к фотоприемникам. Методика измерения по своей сути близка к методу измерения электроконтактными датчиками. Отличается тем, что к регистрирующим приборам по световодам передается свечение детонационной волны.

1.3.3. Метод Дотриша

Для контроля качества ВВ на полигонах наиболее простым и доступным способом определения скорости детонации является хорошо испытанный метод Дотриша, рис. 1.12. С боковой стороны заряда испытываемого ВВ длиной 300 мм (или другой длины) вводят отрезки детонирующего шнура (ДШ) длиной от 1,5 до 3-х метров. Расстояние между точками А и Б в зависимости от длины патрона должно быть 200 – 300 мм. Расстояние между точками и длину детонирующего шнура тщательно измеряют, при этом скорость детонации ДШ должна быть известна до проведения опыта. Свободный отрезок ДШ укладывают на металлическую пластину толщиной не менее 2–4 мм и длиной 300–400 мм. На середине пластины отмечают участок (точка О) между равными отрезками: $АО = АВ + БО$.

Электродетонатор устанавливают как показано на схеме рис. 1.12. Во время взрыва заряда ВВ детонационная волна, дойдя до точки А, возбуждает детонационную волну в отрезке АО детонирующего шнура, которая пойдет по ДШ в сторону точки О. Продолжая движение по заряду ВВ, детонационная волна дойдет до точки Б и возбудит детонацию в отрезке БО детонирующего шнура. Таким образом, детонационные волны в отрезках АО и БО будут двигаться навстречу друг другу и в какой-то момент встретятся, например, в точке В. Если скорость детонации заряда ВВ будет меньше скорости детонации ДШ, то столкновение двух волн произойдет справа от точки О. Если же скорость детонации заряда ВВ окажется больше, чем детонирующего шнура, то

столкновение двух волн произойдет слева от точки **О**. Результатом "лобового" столкновения детонационных волн, идущих по отрезкам ДШ, будет скачкообразное повышение давления и образование двух симметричных газовых струй, направленных перпендикулярно к оси ДШ. Высокое давление газов создаст характерное углубление на поверхности металлической пластины.

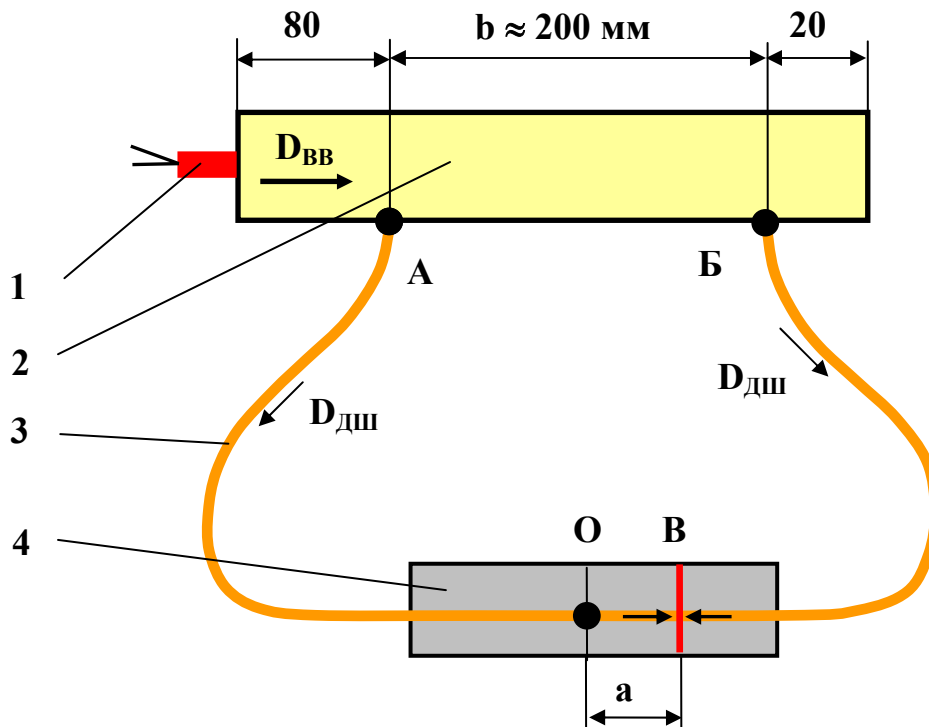


Рис. 1.12. Схема определения скорости детонации по Дотришу:

1 – электродетонатор (или капсюль-детонатор); 2 – заряд ВВ; 3 – ДШ; 4 – металлическая пластина; $D_{ДШ}$ – скорость детонации ДШ; $D_{ВВ}$ – скорость фронта детонационной волны в заряде ВВ. Стрелками указано направление движения фронта детонационной волны в заряде ВВ и в детонирующем шнуре

Время, в течение которого фронт детонации пройдет от точки **А** к точке **В**, будет равно

$$t_1 = (AO + a) / D_{ДШ}.$$

Время, затраченное фронтом детонации в заряде ВВ на прохождение участка от точки **А** к точке **Б** (расстояние b), определяем из выражения

$$t_2 = b / D_{ВВ},$$

а время прохождения ДВ по шнуру от точки Б к точке В легко находят из выражения

$$t_3 = (BO - a) / D_{\text{дш}}.$$

Поскольку детонационные волны, распространяющиеся в отрезках $(AO + a)$ и $(BV - a)$ детонирующего шнура, встречаются в точке В, то очевидно, что $t_1 = t_2 + t_3$:

$$(AO + a) / D_{\text{дш}} = b / D_{\text{ВВ}} + (BO - a) / D_{\text{дш}}$$

или

$$D_{\text{ВВ}} = D_{\text{дш}} \cdot b / (AO + a - BO + a).$$

Используя начальное условие, при котором $AO = b + BO$, произведем замену в последнем уравнении и получим:

$$D_{\text{ВВ}} = D_{\text{дш}} \cdot b / (b + BO + a - BO + a).$$

Окончательно будем иметь

$$D_{\text{ВВ}} = D_{\text{дш}} \cdot b / (b + 2a) \quad (1.23)$$

Ошибка в измерениях, как показала многолетняя практика, не превышает 3-5%.

1.3.4. Передача детонации на расстояние

Передача детонации на расстояние характеризует способность взрыва заряда ВВ (*активного заряда*) вызывать детонацию другого заряда (*пассивного заряда*), установленного на некотором расстоянии от первого.

Реакция взрывчатого превращения пассивного заряда ВВ объясняется резким сжатием первого его слоя и сильным разогревом ударной волной, возникшей при взрыве активного заряда.

Дальность передачи возрастает с увеличением диаметра, плотности, массы и мощности активного заряда. Факторами, от которых зависит дальность передачи, являются свойства пассивного заряда, наличие оболочки, свойства материала оболочки, среды, разделяющей заряды, и др. Установлено, что из

свойств активного заряда определяющими являются скорость детонации и плотность ВВ. На основе принципа передачи детонации на расстояние введено испытание чувствительности ВВ к восприятию детонации, рис. 1.13. Это испытание заключается в определении максимального расстояния между двумя патронами диаметром 31–32 мм, при котором взрыв активного заряда вызывает безотказную детонацию пассивного заряда ВВ. Для каждого промышленного ВВ установлены минимумы таких расстояний (x).

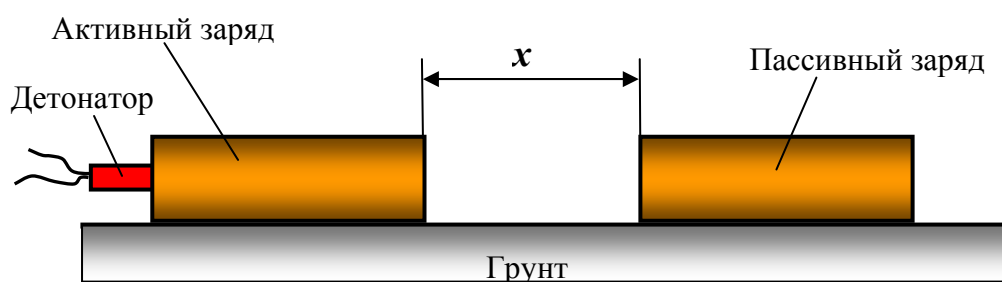


Рис. 1.13. Схема испытания ВВ на передачу детонации

На грунте укладывают два патрона на расстоянии, указанном в ТУ. Если при двух взрывах отказов не произошло, то ВВ считают выдержавшим испытания. Если произошел отказ, то количество испытаний увеличивают вдвое. При повторном отказе бракуется вся партия ВВ

При испытаниях ВВ, поступивших в мешках, изготавливают патроны диаметром 31 ± 1 мм, длиной 200 ± 10 мм при плотности заряда ВВ 0,95-1,05 г/см³. Водостойчивые ВВ испытывают после их выдержки в воде в течение 1 часа на глубине 1 м.

1.4. Элементы термохимии процессов горения и взрыва

Работоспособность взрывчатого вещества как источника энергии определяется теплотой взрыва (теплотой взрывчатого превращения). Часто в связи с этим о ВВ говорят как о своеобразной тепловой машине, которая, в конечном счете, превращает потенциальную энергию в механическую работу. В результате взрыва ВВ работу в окружающей среде совершают в процессе расширения нагретые и сжатые продукты взрыва (ПВ). Таким образом, одним из условий

взрывчатого превращения является экзотермичность процесса. Тепло, выделяемое при взрыве, сильно влияет на сам характер взрыва, на температуру и давление ПВ, брызгантность и работоспособность ВВ.

1.4.1. Теплота взрыва. Закон Гесса

На практике расчет теплового эффекта взрыва производят в соответствии с известным законом Гесса, из которого следует, что *суммарный тепловой эффект некоторой последовательности химических реакций не зависит от пути превращения исходных веществ в конечные продукты, а определяется только начальным и конечным состоянием системы*:

$$Q_{\text{взр.}} = \Sigma Q_{\text{ПВ}} - Q_{\text{ВВ}}, \quad (1.24)$$

где $Q_{\text{взр.}}$ – теплота взрывчатого превращения; $Q_{\text{ВВ}}$, $\Sigma Q_{\text{ПВ}}$ – теплота образования ВВ, сумма теплот образования продуктов взрыва соответственно.

Закон Гесса в общем виде может быть сформулирован следующим образом: *тепловой эффект кругового процесса равен нулю*.

При вычислении теплоты образования ВВ обычно рассматривают такие три составляющие системы, рис. 1.14, как взрывчатое вещество (1), продукты взрыва (2) и свободные молекулы химических элементов (3).

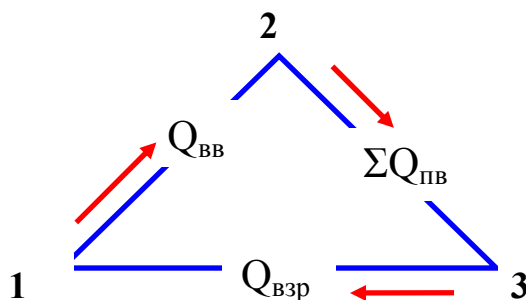


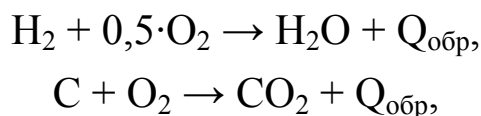
Рис.1.14. Схематическое изображение закона Гесса

При переходе (1)→(2) выделится тепло, равное теплоте полного сгорания – $Q_{\text{ВВ}}$. В случае перехода (2)→(3) произойдет поглощение тепла, равное сумме теплот образования ПВ – $\Sigma Q_{\text{ПВ}}$. Так как переход (3)→(1) соответствует процес-

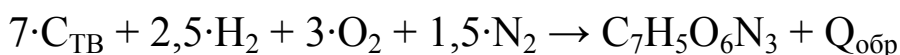
су образования молекул ВВ, то теплота этого процесса равна теплоте взрывчатого превращения – $Q_{\text{взр}}$.

Теплотой взрывчатого превращения ($Q_{\text{взр}}$) называется количество тепла, выделяемое при взрывчатом превращении одного моля вещества.

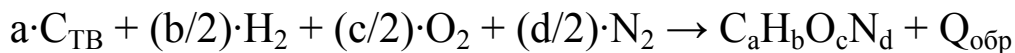
Теплотой образования вещества ($Q_{\text{обр}}$) называется количество тепла, которое выделяется или поглощается при образовании одного моля вещества из молекул газов соответствующих элементов (H_2 , O_2 , N_2 и т.д.) и простых веществ (C , металл и т.п.). Реакции образования могут быть как реальными



так и гипотетическими, например, реакция образования тротила:



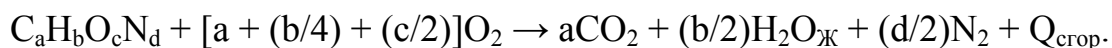
В общем виде гипотетическая реакция образования ВВ общей формулы $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$ записывается



Теплоту образования ВВ $Q_{\text{ВВ}}$ в прямом эксперименте определить невозможно. $Q_{\text{ВВ}}$, рассчитывают с учетом экспериментально найденной стандартной теплоты сгорания данного вещества.

Стандартной теплотой сгорания вещества называется количество тепла, которое выделяется при сгорании одного моля вещества в атмосфере избытка кислорода при условии, что углерод и водород образуют при этом высшие окислы (CO_2 , H_2O).

Для ВВ формулы $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$ реакция сгорания в избытке кислорода записывается следующим образом



Для бризантных ВВ небольшие ошибки при оценке $Q_{\text{обр}}$ допустимы, так как окончательная приемка ВВ производится по натурным испытаниям зарядов: бризантность, разрушение преград, метательные действия, работоспособность и т.д.

1.4.2. Кислородный баланс ВВ

Взрыв представляет собой необратимую химическую реакцию превращения исходного ВВ в газообразные продукты. Направление реакции и состав конечных продуктов определяют основные параметры взрыва: теплоту, температуру, давление и др. Входящие в состав продуктов взрыва (ПВ) окислы азота и окись углерода, как известно, обладают высокой токсичностью. Они становятся особенно опасными в подземных выработках, когда их количество превышает допустимые пределы. Борьба с ядовитыми газами в горных выработках ведется в течение многих десятков лет, а в настоящее время в связи с расширением ассортимента применяемых ВВ и развитием горных работ становится весьма важной и актуальной. Неизбежные ограничения, например, по условиям вентиляции в подземных выработках обязывают вводить определенные нормы для ВВ в отношении количества образуемых при взрыве ядовитых газов.

Идеальными компонентами взрывчатого превращения являются наиболее термодинамически устойчивые соединения. Однако в случаях промышленного использования ВВ наблюдаются отклонения от идеального состава ПВ по нескольким причинам. Например, на состав ПВ с отрицательным кислородным балансом сильное влияние оказывает плотность заряда ВВ, скорость закалки ПВ (скорость теплообмена с окружающей средой), условия разлета ПВ, т.е. время протекания реакции в зоне химического пика и особенности характера взаимодействия между компонентами ПВ, а также химический состав и концентрация добавок. Кроме этого, свойства горных пород при ведении взрывных работ оказывают весьма заметное влияние на образование, состав и концентрацию ядовитых газов. Причиной отклонения от идеального состава ПВ является каталитическое действие горных пород – при взрыве одного ВВ в различных горных породах, были обнаружены значительные отклонения количественного состава ядовитых газов. Другими словами, горные породы вступают в химическое взаимодействие с ПВ, оказывая каталитическое действие на сценарии вторичных реакций в самих ПВ.

Эксперименты, проводившиеся в ГосМакНИИ и в Институте горного дела (ИГД) им. А.А. Скочинского, свидетельствуют о том, что влияние породы, окружающей заряд ВВ, значительно сильнее, чем влияние состава ВВ на количество ядовитых газов в ПВ. Колебания суммарного количества ядовитых газов

при взрыве различных ВВ в одной горной породе достигали 200%, а при взрыве одного ВВ в различных породах – до 1000%.

При взрывании зарядов ВВ в горном массиве возникают радиальные и тангенциальные трещины, механизм образования которых подробно описан в литературе. ПВ под действием высокого давления проникают не только в свежееобразованные трещины, но и в трещины естественного происхождения, вызывая их развитие. Процесс разрушения, при котором происходит образование трещин, сопровождается разделением разноименных электрических зарядов на свежееобразованных поверхностях, при этом, в области разрыва возникают электрические поля высокой напряженности, что приводит к резко неравновесному состоянию поверхности, высокой поверхностной проводимости и химической активности. На стойкость молекул и ход химических реакций в целом оказывает решающее влияние плотность поверхностных зарядов.

Под действием давления газов вероятность соударения молекул ПВ с поверхностными зарядами трещины резко возрастает, т. е. существует большая вероятность их сближения на расстояния, сравнимые с межъядерными расстояниями в молекуле. В результате этого возможна диссоциация исходных молекул и образование новых, в том числе и таких токсичных, как окислы азота, углерода и др.

Для оценки энергетических параметров ВВ необходимо находить соотношение между горючими компонентами и окислителем в молекуле. Это соотношение характеризуется величиной кислородного баланса – КБ, выраженного в процентах.

Кислородным балансом называют достаточное, избыточное или недостаточное количество кислорода в составе ВВ по сравнению с количеством, необходимым для полного окисления содержащихся в нем углерода, водорода и других элементов, способных окисляться при взрыве.

Таким образом, из определения следует, что КБ может быть положительным, отрицательным и нулевым.

Положительный КБ – наличие кислорода в составе ВВ превышает количество, необходимое для окисления горючих элементов (при взрывчатом превращении ВВ образуются ядовитые окислы азота, вследствие чего такие ВВ не допускаются для взрывных работ над землей).

Нулевой КБ – в составе ВВ кислород содержится в количестве, необходи-

мом для полного окисления всех горючих элементов.

Отрицательный КБ – наличие кислорода недостаточно для окисления всех горючих элементов и в продуктах взрывчатого превращения.

По составу ВВ делятся на индивидуальные химические вещества и механические смеси компонентов, которые вступают между собой в реакцию. Расчетная формула при определении КБ для индивидуальных ВВ будет следующая:

$$KB = \frac{A_{\Gamma} \cdot 100}{M}, \% \quad (1.25)$$

где A_{Γ} – грамм-атомный вес излишка или недостатка кислорода в составе ВВ; M – грамм-молекулярный вес данного ВВ; 16 – грамм-атомный вес кислорода; K_{Γ} – необходимое число атомов кислорода для полного окисления атомов углерода в CO_2 и атомов водорода в воду; K_B – число атомов кислорода в составе взрывчатого вещества; $A_{\Gamma} = (K_B - K_{\Gamma}) \cdot 16$.

$$K_{\Gamma} = 2 \cdot C_n + 0,5 \cdot H_m.$$

Для ВВ формулы $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$:

$$KB = \frac{[d - (2a + 0,5b)] \cdot 16}{12a + b + 14c + 16d} \cdot 100\%, \quad (1.26)$$

где a , b , c , d – числа атомов углерода, водорода, азота и кислорода соответственно.

Знаменатель дроби в правой части формулы обозначает молекулярную массу ВВ:

$$M_{\text{ВВ}} = 12a + b + 14c + 16d.$$

Нулевому КБ соответствует кислородный коэффициент α_K , равный 1

$$\alpha_K = d / (2a + 0,5b) = 1.$$

Относительно 1 кг смеси ВВ расчет КБ удобно производить по формуле:

$$KB = 1,6 [d - (2a + 0,5b)], \% \quad (1.27)$$

Если в смеси ВВ содержится алюминий, то уравнения для КБ и α_K будут иметь следующий вид:

$$KB = 1,6 \left[d - (2a + 0,5b + 1,5e) \right], \% \quad (1.28)$$

$$\alpha_K = d / (2a + 0,5b + 1,5e),$$

где e – количество грамм-атомов алюминия.

1.5. Чувствительность ВВ к внешним воздействиям

Взрывчатые свойства ВВ определяют лишь потенциальную возможность их взрывчатого превращения. Для реализации этой возможности необходимо произвести на ВВ такое воздействие, которое было бы способно вызвать в нем взрывчатое превращение, т.е. воздействие, которое называют иницирующим импульсом. *Способность ВВ реагировать на внешние воздействия путем химического превращения в форме детонации (взрыва) называют чувствительностью ВВ к внешним воздействиям.* Чувствительность ВВ является важнейшим параметром, определяющим не только принципиальную возможность практического применения ВВ, но и области применения.

Начальными импульсами могут быть различные виды воздействий. Любое внешнее воздействие по физической сути является энергетическим. ВВ обладает избирательной чувствительностью к различным видам начальных импульсов. Так, одни ВВ более чувствительны к механическим воздействиям (трение, накол и т.п.), другие – к тепловым (открытый огонь, контактный нагрев), третьи – к энергии лазерного излучения, рентгеновского или инфракрасного. Чувствительность к внешним воздействиям классифицируют по видам начального импульса, рассматривая отдельно чувствительность к удару, лучу огня, ударной волне и др.

Основными видами начальных импульсов являются следующие формы энергии: тепловая, механическая, электрическая, энергия электромагнитного излучения, ударно-волновое воздействие, детонационный импульс, ультразвуковые волны и т.д.

Поскольку наиболее распространенным видом случайного воздействия

является механическое (удар, трение, накол), то чувствительность ВВ к этому виду воздействия исследуется в первую очередь для оценки уровня их опасности, а также для оценки безотказности срабатывания ВВ.

Основными экспериментальными методами оценки чувствительности ВВ к механическим воздействиям являются: определение чувствительности к трению ударного характера (метод Боудена–Козлова), к трению при истирании, к удару (копер Велера, копер К-44-1, копер К-44-П, роликовые приборы №1 и №2), метод критических напряжений (измеряются напряжения, развивающиеся в ВВ при ударе в момент возбуждения взрывного процесса).

В процессе производства, переработки, снаряжения и применения ВВ распространенным видом внешнего воздействия является тепловое – контактный нагрев, действие открытого огня. Взрывчатое вещество при нагревании термически разлагается с выделением тепла. Если скорость отвода тепла в системе будет меньше скорости поступления в нее тепла, то реакция может сопровождаться возникновением вспышки. *Температура, при которой химическая реакция принимает характер взрывчатого превращения, называется температурой вспышки.*

Одним из вариантов испытания ВВ на чувствительность к тепловому воздействию является метод ЛТИ, разработанный в Санкт-Петербургском технологическом университете. По этому методу температуру вспышки определяют при 5-ти секундной задержке воспламенения ВВ. Используются следующие навески ВВ: для ИВВ – 0,02 г, для БВВ – от 0,05 до 0,1 г.

Чувствительность ВВ к электрическому импульсу является важнейшей характеристикой, поскольку большинство взрывчатых веществ диэлектрики и обладают способностью к электризации. Главная опасность состоит в том, что накопленный статический заряд на стенках оборудования или ВВ может превысить электрическую прочность окружающей среды, а электрический разряд при этом может вызвать воспламенение или детонацию ВВ.

Искровой разряд может возникнуть от блуждающих токов, статической электризации и других причин. В момент пробоя в разрядном промежутке образуется тонкий токопроводящий канал холодной плазмы с плотностью тока $10^4 - 10^5$ А/см². За времена 0,1 – 1,0 мкс воздух нагревается до температуры 10000 К, что является причиной образования ударной волны. Если ВВ (в виде пыли или порошка) оказывается по каким-либо причинам в разрядном проме-

жутке, то оно может воспламениться или детонировать.

В соответствие с правилами безопасности и охраны труда предусмотрены следующие основные меры защиты от электризации:

- непрерывный отвод образующихся зарядов путем заземления оборудования;
- принятие мер для повышения объемной и поверхностной проводимости (увлажнение поверхности частиц, поддержание в помещении относительной влажности свыше 65%, введение антистатических добавок, электропроводящих добавок (металлов, графита и т.п.);
- обслуживающий персонал должен быть в электропроводной одежде и обуви (человек, изолированный от земли, может накопить на себе заряд до 15000 В);
- в наиболее опасных с точки зрения электризации узлах устанавливаются приборы, непрерывно фиксирующие фактический уровень электризации.

С целью создания надежных, безотказно действующих средств инициирования (капсюлей детонаторов – КД, электродетонаторов – ЭД) проводятся исследования чувствительности бризантных ВВ к детонационному импульсу. Чувствительность БВВ к взрывному импульсу инициирующих ВВ определяется для обеспечения безотказного действия КД и ЭД и характеризуется величиной минимального инициирующего заряда ИВВ. В табл. 1.1 приведены значения МИЗ штатных ИВВ.

Таблица 1.1

*Минимальный инициирующий заряд штатных ИВВ
для некоторых БВВ (вторичных инициирующих ВВ)*

Бризантное взрывчатое вещество	МИЗ инициирующих ВВ, г	
	азид свинца	гремучая ртуть
Тротил	0,1	0,36
Тетрил	0,023	0,3
Гексоген	0,02	0,19
ТЭН	0,01	0,17

1.6. Некоторые способы относительной оценки полезной работы взрыва

1.6.1. Работоспособность ВВ

Для определения относительной работоспособности ВВ наиболее широко применяется *метод свинцовой бомбы* или *проба Трауцля*, принятый на Втором Международном конгрессе прикладной химии.

Бомба Трауцля представляет собой свинцовый цилиндр диаметром и высотой 200 мм, в которой имеется цилиндрическое несквозное отверстие диаметром 25 мм и глубиной 125 мм, рис. 1.15. Бомбу отливают из рафинированного свинца при температуре 390 – 400 °С. На дно отверстия помещают заряд ВВ весом 10 г в бумажной гильзе. На заряд ВВ устанавливают электродетонатор ЭД-8-Э, а свободную часть канала бомбы засыпают сухим кварцевым песком. Испытания проводят при температуре +10 °С. При изменении температуры производят соответствующие поправки: при 0 °С полученную величину расширения увеличивают на 5%, при +30 °С – уменьшают на 6%.

В бомбе в районе размещения заряда при взрыве образуется полость, рис. 1.15,в. Расширение канала бомбы происходит за счет действия давления продуктов взрыва электродетонатора и испытуемого ВВ. Мерой относительной работоспособности ВВ (в см³) является величина расширившегося объема канала свинцовой бомбы за вычетом начального объема (61 см³) и расширения (30 см³) за счет взрыва электродетонатора.

Принципиальные недостатки этого способа состоят в следующем. По величине расширения канала нельзя количественно сравнивать ВВ, а можно лишь расположить их в некоторой последовательности, т.е. в некоторый относительный ряд, поскольку величина расширения объема связана с истинной работоспособностью ВВ нелинейной зависимостью.

А.Ф. Беляев предложил метод эквивалентных зарядов, заключающийся в определении эквивалентной массы аммонита 6ЖВ, производящей такое же действие, как исследуемый заряд ВВ. Обязательным условием метода является использование зарядов равного объема. При соблюдении данного условия одинаковым расширениям должна соответствовать одинаковая работа.

Кроме *метода свинцовой бомбы* на практике широко применяются:

- *метод баллистического маятника;*
- *метод баллистической мортиры;*

- оценка работоспособности по воронке выброса.

С методикой проведения исследований и оценки работоспособности перечисленных способов можно познакомиться в специальной литературе, приведенной в конце раздела.

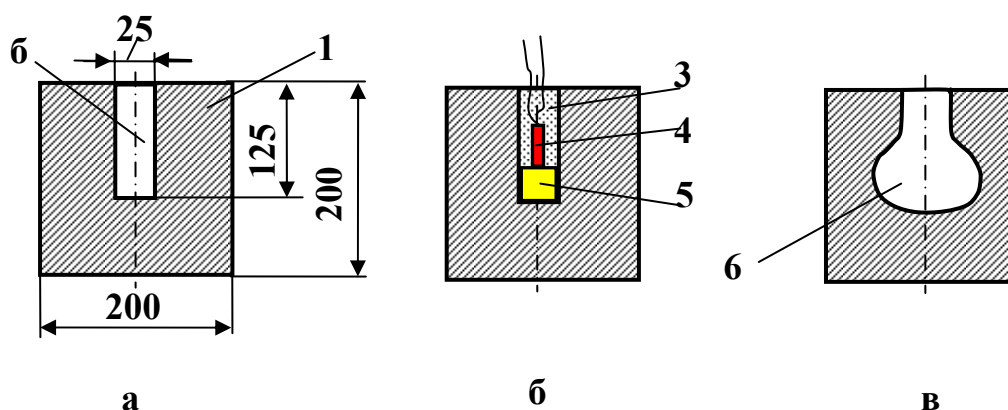


Рис. 1.15. Определение работоспособности в свинцовой бомбе:

1 – свинцовая бомба; 2 – канал; 3 – сухой кварцевый песок; 4 – электродетонатор;
5 – испытуемое ВВ; 6 – полость, образовавшаяся в бомбе при взрыве ВВ и ЭД

1.6.2. Бризантность ВВ

Бризантность или дробящее действие взрыва определяют простым и широко распространенным методом, используя стандартную пробу на обжатие свинцовых столбиков или *пробу Гесса*, рис. 1.16, которая используется в качестве контрольной приемочной пробы.

Мерой бризантности ВВ (**Б**) является величина обжатия или, другими словами, разность высот столбика до обжатия (60 мм) и после обжатия (H_B , мм):

$$Б = 60 - H_B, \text{ мм.}$$

Для промышленных ВВ величина обжатия столбика зависит от скорости детонации ВВ, которая возрастает с измельчением компонентов, увеличением гомогенности их смешивания.

Кроме пробы Гесса на практике используют методы испытаний бризантности ВВ с использованием баллистического маятника (экспериментальное значение импульса рассчитывается по измеренному отклонению маятника). Бризантность промышленных ВВ исследуют путем дробления кубиков горной

породы (после взрыва разрушенная горная порода подвергается ситовому анализу – определяют выход зерен размером 5– 7 мм).

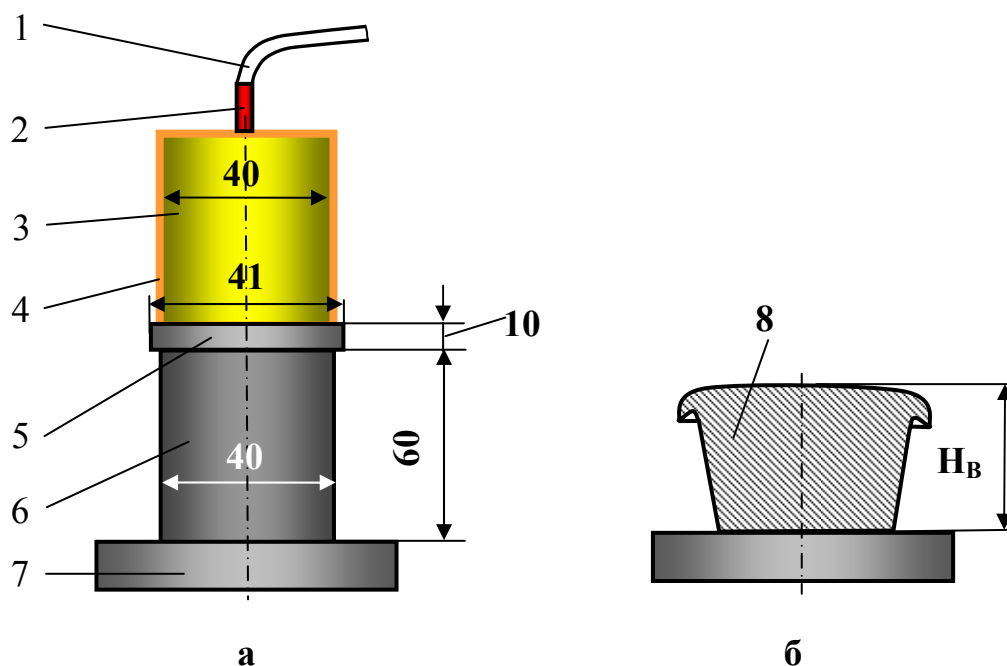


Рис. 1.16. Схема к определению бризантности по пробе Гесса (а):
 1 – огнепроводный шнур; 2 – капсюль детонатор; 3 – заряд испытуемого ВВ (50 г);
 4 – бумажная оболочка; 5 – стальная пластина; 6 – свинцовый столбик;
 7 – металлическая плита; (б) – свинцовый столбик после обжатия

Вопросы для самоконтроля знаний

1. Какой процесс называют взрывом? Назовите его характерные признаки.
2. Какие бывают взрывы? Что является причиной разрушительного характера взрыва?
3. Что представляет собой фронт ударной волны?
4. Какое принципиальное отличие ударной волны от звуковой?
5. Какие основные формы химического превращения ВВ известны?
6. Что такое "термическое разложение" и "термический взрыв"?
7. Что представляет собой стационарное горение ВВ? Назовите основные признаки.
8. Какой процесс называют детонацией? С какой скоростью распространяется детонация в твердых ВВ, жидких и газообразных?
9. Что представляет собой структура фронта детонационной волны?
10. Какому условию удовлетворяет детонация по Чепмену-Жуге?
11. Сформулируйте принцип Ю.Харитона.

12. Что понимают под терминами "идеальная детонация" и "детонация в неидеальном режиме"?
13. Какие существуют экспериментальные методы исследования детонации? Кратко охарактеризуйте каждый из названных Вами методов.
14. В чем состоит суть метода Дотриша?
15. Сформулируйте закон Гесса.
16. Что называется кислородным балансом? Для чего необходимо знать величину кислородного баланса и как он рассчитывается?
17. Какими способами возбуждают детонацию в ВВ?
18. Что такое температура вспышки?
19. Перечислите меры защиты ВВ от электризации.
20. В чем заключается метод определения работоспособности ВВ?
21. Каким способом определяют бризантность ВВ на практике?

Список рекомендованной литературы

1. Зельдович Я.Б., Компанеец А.С. Теория детонации. – М.: Гос. из-во техн.-теоретич. л-ры, 1955. – 268 с.
2. Гласс И.И. Ударные волны и человек. – М.: Мир, 1977. – 191 с.
3. Физика взрыва /Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович и др. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
4. Покровский Г.И. Взрыв. – М.: Недра, 1980. – 190 с.
5. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. – М.: МГУ, 1992. – 516 с.
6. Единые правила безопасности при взрывных работах. – К.: Норматив, 1992. – 171 с.
7. Соболев В.В., Усик І.І., Терещук Р.М. Технологія та безпека виконання вибухових робіт. Практикум: Навч. посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 114 с.
8. Соболев В.В., Мандрікевич В.М., Орел М.В., Шломіна Л.С. Українсько-російсько-англійський термінологічний словник з гірничовибухової справи. – Д.: Національний гірничий університет, 2004. – 245 с.

2. ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

В течение XIX–XX веков, т.е. начиная с того периода, когда появились первые бризантные ВВ, химикам удалось разработать и получить несколько тысяч различных веществ, способных взрываться. По разным причинам многие из них не нашли практического применения, некоторые представляют только теоретический интерес, а некоторые из-за высокой токсичности и других недостатков уже не используются. Существует целый ряд ВВ, которые применяются исключительно в военном деле. Многие ВВ широко используются в горном деле, в строительстве, машиностроении и других отраслях промышленности. Наибольшее количество промышленных ВВ (около 90%) используется в горном деле при добыче полезных ископаемых. Поэтому, не смотря на то, что взрыв освоил десятки профессий, прежде всего, он является "горняком".

Все промышленные ВВ можно разделить на два основных класса:

- 1 – взрывчатые химические соединения;
- 2 – взрывчатые смеси.

Взрывчатые химические соединения представляют собой относительно неустойчивые химические системы, способные под влиянием внешних воздействий к быстрым экзотермическим превращениям (с выделением тепла), в результате которых происходит разрыв химических связей как между молекулами, так и между атомами в молекулах и последующая рекомбинация свободных (атомов или ионов) в термодинамически устойчивые новые соединения (молекулы газа, твердые ультрадисперсные углеродсодержащие частицы – алмаз, графит и др.). В этой группе большинство ВВ представляют собой кислородсодержащие органические соединения, способные к частичному или полному внутримолекулярному горению.

Неустойчивость взрывчатых химических соединений, согласно Вант-Гоффу, обуславливается присутствием в их молекулах метастабильных атомных комплексов, например, групп $C\equiv C$ в производных ацетилена, $N=N$ в азидах, $N=C$ в солях гремучей кислоты, $N=O$ в нитросоединениях, $C-O$ в перекисях и озонидах, $O-Cl$ в хлоратах и перхлоратах и др.

Перечисленные группы придают соответствующим ВВ и соединениям взрывчатые свойства за счет того, что некоторые из них ($N=O$, $C-O$ и $O-Cl$) содержат несвязанный с горючим свободный кислород, который вступает в хими-

ческую реакцию с горючими компонентами со значительным выделением тепла. Другие группы с неустойчивыми химическими связями ($C\equiv C$, $N=N$, $N=C$) относительно легко распадаются.

Взрывчатые вещества этой группы называют еще индивидуальными. К ним относятся *азид серебра, азид свинца, гексоген, гремучая ртуть, дина, нитроглицерин, нитроксилин, нитроглицоль, октоген, тротил, тенерес, тетрил, тэн* и др.

Взрывчатые смеси представляют собой такие системы, которые состоят, по крайней мере, из двух компонентов, не связанных химически между собой. Один из компонентов, как правило, является веществом, богатым кислородом, а второй – состоит преимущественно из горючих элементов, при этом не содержит кислород, либо содержит, но в количестве недостаточном для полного внутримолекулярного окисления. Такие смеси представляют собой газообразные, жидкие, твердые или гетерогенные системы.

Примеры таких систем:

- *газообразная* – смесь метана с воздухом (рудничный газ);
- *жидкая* – смесь горючих компонентов (бензол, толуол) с окислителями (азотная кислота, тетранитрометан);
- *твердая* – смесь основного компонента (например, аммиачной селитры) с горючими (тротил, динитробензол и др.) К этим системам относятся пороха;
- *гетерогенная* – смесь аммиачной селитры с нефтяным маслом, дизельным топливом, аэрозоли, пылегазовая смесь и т.п.

К современным промышленным ВВ предъявляется ряд требований, главные из которых:

- достаточная мощность, которая обеспечивает необходимую механическую работу;
- простота и безопасность при изготовлении;
- удобство и безопасность в обращении;
- постоянство свойств при длительном хранении и применении;
- безотказность действия при достаточном инициирующем импульсе;
- технически и экономически доступные в изготовлении.

Для применения в условиях подземной добычи полезных ископаемых к отдельным группам ВВ предъявляются следующие дополнительные требования:

- образование минимального количества ядовитых газов;
- безопасность применения в шахтах, опасных по взрыву газа или пыли.

По способу возбуждения взрывчатого превращения взрывчатые вещества и взрывчатые системы условно разделяют на:

- первичные инициирующие;
- вторичные инициирующие.

В соответствии с областями применения ВВ делят на:

- инициирующие (ИВВ);
- бризантные или дробящие (БВВ);
- метательные (пороха и ракетные топлива);
- пиротехнические составы.

2.1. Иницирующие взрывчатые вещества

Иницирующие ВВ применяются в качестве возбуждения детонации в зарядах БВВ. Отличительные свойства ИВВ от других бризантных ВВ состоят в их способности детонировать под влиянием незначительных тепловых (луч огня) или механических (удар, трение, накол) внешних воздействий, т.е. обладают чрезвычайно высокой чувствительностью к механическим воздействиям. Вещества этой группы характеризуются весьма малым временем роста скорости взрывчатого превращения от начала возбуждения до стационарной детонации. У азидов свинца, например, период ускорения процесса практически отсутствует, т.е. процесс независимо от размеров заряда сразу же протекает в форме детонации.

Иницирующие взрывчатые вещества преимущественно используют в средствах инициирования – капсюлях-детонаторах (КД), электродетонаторах (ЭД). К этой группе относятся:

1. Соли тяжелых металлов гремучей кислоты (фульминаты):

- гремучая ртуть – $\text{Hg}(\text{ONC})_2$,
- гремучее серебро – AgONC .

2. Соли азотистоводородной кислоты (азиды):

- азид свинца – $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$,
- азид серебра – AgN_3 .

2а. Некоторые органические азиды:

- циануртриазид – $\text{C}_3\text{N}_3(\text{N}_3)_3$.

3. Соли тяжелых металлов стифниновой кислоты:

- тринитрезорцинат свинца (ТНРС).

4. Карбиды тяжелых металлов (ацетилениды):

- ацетиленид серебра.

5. Галоидные соединения азота.

6. Некоторые нитроароматические диазосоединения.

Эти вещества называют *первичными инициирующими* или *первичными ВВ*.

В течение последних лет Национальным горным университетом совместно со специалистами Санкт-Петербургского технологического университета разработаны и получены инициирующие ВВ нового класса, основным свойством которых является очень высокая чувствительность к химическому превращению в детонационной форме при воздействии лазерного излучения определенной длины волны. По сравнению с азидом свинца чувствительность некоторых новых ИВВ выше почти в 100 раз. Однако чувствительность к тепловым и механическим воздействиям практически соответствует аналогичным характеристикам тэна. Некоторые из них взрываются только при действии лазерного луча. Такие взрывчатые вещества могут быть использованы как первичные в оптических детонаторах (ОД), либо как обычные бризантные ВВ при проведении специальных взрывных работ; в табл. 2.1 представлены некоторые ВВ этого класса.

Таблица 2.1

Светочувствительные взрывчатые вещества

ВВ	Плотность, г/см ³	Скорость детонации, км/с	Чувствительность к удару (нижний порог), мм	Температура вспышки, С	Энергия зажигания лазерным моноимпульсом, Дж/см ²
ВС-2	3,0	6,5	50	185	$2,3 \cdot 10^{-3}$
ВС-7	4,6	6,2	60/100	350	$5 \cdot 10^{-3}$
ВС-16	1,1	5,1	–	139	$12 \cdot 10^{-3}$

2.2. Бризантные взрывчатые вещества

В бризантных ВВ детонация может быть вызвана влиянием относительно больших внешних воздействий, обычно при помощи ИВВ. Основным видом их взрывчатого превращения также является детонация. У бризантных ВВ взрывчатые характеристики значительно выше чем у инициирующих ВВ.

Эту группу представляют следующие ВВ:

1. О-нитросоединения:

- нитроглицерин – тринитрат глицерина,

- ТЭН – Тетранитрат пентаэритрита,
- нитрат целлюлозы.

2. С-нитросоединения:

- тетрил (тринитротолуол),
- пикриновая кислота (тринитрофенол)
- тетранитрометан – $C-(NO_2)_4$.

3. N-нитросоединения:

- тетрил (тринитрофенилметилнитрамин),
- гексоген (циклотриметилентринитрамин),
- октоген (циклотетраметилентетранитрамин).

4. БВВ – механические смеси

- аммониты (смеси на основе аммиачной селитры),
- динамиты (смеси на основе нитроглицерина),
- сплавы тротил-гексоген (ТГ) и др.,
- пластичные и эластичные ВВ на основе мощных БВВ; в табл. 2.2 представлены некоторые свойства БВВ.

Тэн, гексоген, тетрил используют как вторичные инициирующие ВВ в средствах инициирования основных зарядов ВВ – в детонирующих шнурах (ДШ), в капсулах-детонаторах (КД) или электродетонаторах (ЭД).

Таблица 2.2.

Свойства штатных бризантных взрывчатых веществ

Показатели	Тротил	Тетрил	Гексоген	Октоген	ТЭН
Температура плавления, °С	80,6-80,9	129,45	204-205	281-284	139-141,3
Плотность монокристаллов, г/см ³	1,663	1,730	1,806	1,904	1,770
Удельная теплота взрыва, ккал/кг (кДж/кг)	1010 (4228)	1150 (4815)	1290 (5392)	1354 (5668)	1400 (5866)
Скорость детонации, км/с	7	7,6	8,85	9,25	8,35
Чувствительность к удару по ГОСТ 4545-88, %	4-8	48-60	80	84-96	100

Во второй половине XX века был синтезирован и изучен ряд мощных бризантных ВВ, имеющих рекордные значения скорости детонации (9,1 –

10,2 км/с), табл. 2.3. В настоящее время наиболее перспективными среди мощных ВВ представляются такие продукты как **CL-20** и отчасти **TNAZ**.

Таблица 2.3.

Свойства мощных бризантных ВВ

Взрывчатые вещества	Плотность монокристаллов, г/см ³	Температура плавления °С	Энтальпия образования ккал/кг (кДж/кг)	Удельная теплота взрыва, ккал/кг (кДж/кг)	Скорость детонации, км/с (при плотности заряда ВВ, г/см ³)
Гексанитробензол	2,0	249	135,02 (565,2)	1670 (6992)	9,5 (1,90)
4,4'-динитроазофуроксан	2,0	128	470 (1967,4)	1788 (7484,6)	10,2 (2,0)
Бис-нирофуразаниловый эфир	1,907	62	331,8 (1389)	1610 (6738)	9,2 (1,9)
3,4-бис(4-нитрофуразан-3-ил)фуроксан	1,93	109-110	496 (2075)	1457 (6097)	9,25 (1,93)
Азокси-бис(нитрофураза-нил-О,N,N-азокси)фуразан	1,88	148	715,7 (2995)	1446 (6052)	9,5 (108)
Гексанитрогексаазаизовюртцитан (CL-20)	2,04	240	230,5 (964,9)	439 (6023,6)	9,49 (2,0)
1,3,3-тринитроазетидин (TNAZ)	1,84	101	45,3 (189,6)	1460 (6111,6)	9,10 (1,84)
4,4'-динитроазоксифура-зан (ТАТИН)	1,82	110-112	565,0 (2365)	1395 (6781,3)	9,13 (1,8)
1,3,4,6-тетранитротетра-гидроимид-азо[4,5-d] имидазол-2,5(1H,3H)-дион (ТНГУ, Соржил)	2,03	249	11,8 (49,4)	1395 (5839,5)	9,15 (2,0)

2.3. Метательные взрывчатые вещества

К метательным ВВ относятся пороха и ракетные топлива. Служебным видом превращения ракетных топлив и порохов является горение, протекающее за счет содержащихся в них горючего и окислителя. В случае использования мощного инициирующего импульса могут детонировать. При утилизации ракет твердое топливо используют в виде добавок в промышленные ВВ; разработана технология синтеза ультрадисперсных алмазов при взрывании твердого ракетного топлива. Оптимальным для ракетного пороха и смесового ракетного твердого топлива является кислородный коэффициент порядка 0,65–0,70 (кислородный ко-

эффицент характеризует содержание в топливе окислительных элементов по отношению к необходимому для полного сгорания горючих компонентов).

Взрывчатое превращение дымного пороха при возбуждении искрой или пламенем происходит в форме взрывного горения, скорость которого всегда меньше скорости детонации и измеряется сотнями метров в секунду. При возбуждении взрыва капсюлем-детонатором или детонирующим шнуром дымный порох способен детонировать. Используют порох в огнепроводных шнурах (ОШ), в качестве зарядов при отбойке некоторых видов поделочного камня и в других операциях, требующих совершения механической работы.

Пороха являются многокомпонентными механическими системами и делятся на дымный (черный) порох и бездымный. Дымный порох известен с XI столетия. В его состав входят KNO_3 (75%), древесный уголь (15%) и сера (10%). Используют дымный порох в огнепроводных шнурах (Бикфордовых шнурах), в качестве охотничьего пороха.

Бездымные пороха или пороха коллоидного типа используются в стрелковом оружии, артиллерийских снарядах и в качестве ракетных топлив. Основным компонентом является нитроцеллюлоза различной степени нитрации (так, динитрат целлюлозы содержит 11,11% азота, тринитрат – 14,14% и т.д.). Целлюлоза представляет собой гидроксилсодержащий природный полимер класса полисахаридов. Нитраты целлюлозы обычно содержат 12,5–13,5% азота (их называют пироксилинами) или 11,5–12% (коллоксилины). При желатинизации нитроцеллюлозы используют пластификаторы различной природы, что обуславливает деление этих порохов на ряд групп.

Лазерные пороха, разработанные сравнительно недавно, являются специальным топливом, обеспечивающим при сгорании высокотемпературную смесь продуктов строго определенного состава, способных в определенных условиях генерировать когерентное электромагнитное излучение с требуемой длиной волны. В состав лазерно-активной среды входят как минимум 2-3 газовые компоненты (оксиды углерода, молекулы воды, азота и др.).

Ракетные топлива являются смесевыми системами и могут быть жидкими, твердыми и комбинированными. Основными компонентами жидкого топлива являются жидкое горючее и жидкий окислитель. В качестве жидкого горючего используют водород, керосин, гидриды металлов, несимметричный ди-

метилгидразин. Основой жидкого окислителя являются фтор, окись фтора, кислород, смесь фтора с кислородом, азотная кислота, тетранитрометан и др.

Основными компонентами твердого ракетного топлива (смесового твердого ракетного топлива – СТРТ) являются кристаллический окислитель: аммониевая соль динитразовой кислоты, перхлорат аммония и др. В качестве горючего используют каучук, который является одновременно и связующим компонентом. Кроме этого в СТРТ добавляют различные пластификаторы, отвердители, горючие добавки – мощные БВВ (например, октоген), порошкообразные металлы и гидриды металлов, стабилизаторы.

При утилизации СТРТ и выполнении других работ следует учитывать высокую потенциальную опасность, связанную с изменениями физико-химических характеристик, произошедшими за время длительного хранения: изменение взрывчатых характеристик, ухудшение эластичности и прочности, нарушение сплошности зарядов, появление дефектов (Трещины, отслоения и др.), снижение чувствительности к удару и трению.

Пиротехнические составы – механические смеси неорганических окислителей с органическими или металлическими горючими веществами и технологическими добавками. Горение является служебной формой химического превращения. Пиротехнические составы используют в различных отраслях народного хозяйства и оборонной технике. При определенных условиях могут детонировать (взрывы на заводах пиротехнических средств в Нидерландах, Италии, Испании, Китае и др. стран).

2.4. Промышленные взрывчатые вещества

Большинство промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) представляют собой смесь химически разнородных материалов; как правило, они выпускаются в виде порошков, гранул или суспензий, состоящих из компонентов с частицами различных размеров и формы, различных по физическим свойствам, по агрегатному состоянию. Такие неоднородности являются причиной физико-химических особенностей возбуждения и развития детонации, процесса взрыва, по многим параметрам отличающихся от закономерностей взрыва индивидуальных ВВ. Особые свойства ПВВ придают такие компоненты как окислители,

флегматизаторы, сенсibilизаторы, структурообразующие, горючие и гидрофобные добавки и др.

Окислители – вещества, содержащие избыточный кислород, расходуемый при взрыве на окисление горючих элементов. (аммиачная селитра – АС , калиевая селитра – КаС , натриевая селитра – НаС и т.д).

Горючие добавки – твердые или жидкие вещества, как правило, невзрывчатые – тонкоизмельченный уголь, древесная мука, соляровое масло. Горючие добавки вводят в состав ВВ для увеличения количества энергии, выделяемой при взрыве. Роль горючих добавок выполняют также ВВ (тротил, гексоген и другие), имеющие в своем составе недостаточное количество кислорода для полного окисления содержащихся в них горючих элементов.

Пламегасители вводят в состав только предохранительных ВВ для снижения температуры взрыва и уменьшения вероятности воспламенения метановоздушных и пылевоздушных смесей в шахтах. В качестве пламегасителей чаще всего вводят NaCl и KCl . Пламегасители не участвуют в реакции при взрыве, только нагреваются и испаряются, снижая тем самым температуру газов взрыва.

Сенсibilизаторы – вещества, вводимые в состав ВВ для повышения его чувствительности к восприятию и передаче детонации. Это, как правило, мощные ВВ (тротил, гексоген, нитроэфиры), чувствительные к инициирующему импульсу, которые в смеси малочувствительных взрывчатых веществ (АС и т.п.) с невзрывчатыми (древесная или хлопковая мука) обеспечивают нормальную чувствительность такого смесового ВВ к инициированию.

Роль сенсibilизатора могут выполнять и невзрывчатые вещества (горючие добавки): соляровое масло, древесная мука или уголь. При этом образуются простейшие смесевые ВВ: динамоны, игданиты, гранулиты.

Стабилизаторы (древесная, торфяная мука и др.) вводят для повышения химической и физической стойкости ВВ.

Флегматизаторы – легкоплавкие вещества, масла, имеющие высокую теплотемкость и высокую температуру вспышки, обволакивающие частицы ВВ и не вступающие с ним в реакцию. Введение флегматизаторов снижает чувствительность ВВ к механическим воздействиям и обеспечивает более безопасные условия его применения. Часто используют вазелин, парафин и различные масла.

Смесевые ВВ для шахт и карьеров – порошкообразные ВВ на основе сухих порошкообразных компонентов, а также с добавками жидких веществ.

Из многокомпонентных смесей наибольшее применение имеют следующие основные группы ВВ.

Аммониты – смесь "аммиачная селитра+тротил+невзрывчатые горючие добавки". В состав скального аммонита входит добавка гексогена; аммониты предохранительные для шахт и рудников выпускают с добавкой пламегасителей – аммонит №6ЖВ (ожелезненная селитра марки ЖВ), аммонит АП–5ЖВ, аммонит ПЖВ–20, аммонит Т–19 и др.

Аммоналы – аммониты с добавкой алюминиевой пудры.

Детониты – смесь "аммиачная селитра+нитроэфиры и пудра алюминия".

Динамоны – смесь "аммиачная селитра+невзрывчатые горючие добавки".

Гранулированные ВВ – смеси на основе сухих гранулированных, чешуйчатых компонентов или гранулированных сплавов компонентов.

Граммониты – смесь гранулированной аммиачной селитры с гранулированным тротилом или с чешуйчатым тротилом.

Гранулиты – смеси гранулированной аммиачной селитры с жидкими и порошкообразными невзрывчатыми горючими добавками.

Игданиты – смесь гранулированной аммиачной селитры с жидкой горючей добавкой.

Гранулотол – гранулированный тротил.

Алюмотол – гранулированный сплав тротила с алюминиевой пудрой.

Водосодержащие ВВ – на основе сухих гранулированных или чешуйчатых компонентов или гранулированных сплавов компонентов с добавками холодного или горячего раствора аммиачной селитры, NaCl или KCl, загущающих раствор и стабилизирующих заряд добавок.

Акватолы – смесь гранулированной аммиачной селитры и гранулированного тротила с раствором селитр, загущающих и стабилизирующих добавок.

Эмульсионные ВВ – смеси холодного или горячего насыщенного раствора селитр с жидкой невзрывчатой горючей добавкой и эмульгатором, которая при обработке ее в диспергаторе превращается в водоустойчивое подвижное ВВ. При остывании горячее эмульсионное ВВ твердеет.

К наиболее важным свойствам промышленных ВВ (кроме взрывчатых характеристик, эксплуатационных качеств ВВ, их стабильности) относятся гигроскопичность, слеживаемость, химическая стойкость, водоустойчивость, пластичность, текучесть, уплотняемость, сыпучесть, старение, летучесть, эксудация и др.

Гигроскопичность – способность промышленных ВВ поглощать влагу из окружающей атмосферы. Способность к увлажнению аммиачно–селитренных ВВ обусловлена высокой гигроскопичностью основного компонента – аммиачной селитры, – что приводит к ослаблению и полной потере взрывчатых составов. Накопившаяся влага флегматизирует ВВ.

Слеживаемость – способность некоторых порошкообразных веществ терять при хранении сыпучесть и превращаться в прочную сплошную массу. Слежавшиеся патроны ВВ имеют повышенную опасность. В такие патроны затруднено введение детонатора. Слежавшиеся аммониты (особенно в патронах малого диаметра) мало восприимчивы к первичным средствам инициирования, отличаются пониженной детонационной способностью.

Химическая стойкость (стабильность) характеризует скорость разложения ВВ при хранении. Если ВВ обладает низкой стабильностью, то в результате хранения больших его количеств может произойти самоускоряющееся разложение и взрыв. В этом случае продукты первичного распада катализируют дальнейшую реакцию, ускоряет, таким образом процесс разложения.

Водоустойчивость – способность ВВ сохранять взрывчатые свойства при погружении в воду. Для повышения водоустойчивости ВВ разработано много способов, один из которых характеризуется введением стеарата кальция или цинка в порошкообразные нитроглицериновые ВВ – детониты, углениты и др. Для снижения смачивающей способности жидких нитроэфиров в этих ВВ их слабо желатинируют коллоидным хлопком.

Пластичные ВВ – ВВ высоковязкой структуры, способное легко деформироваться при незначительных нагрузках и полностью заполнять зарядные полости. К таким ВВ относятся динамиты и акваниты.

Текущие (льющиеся) ВВ – низковязкие акватолы, ифзаниты и некоторые акваниты, содержащие до 30% водной желатины. Такие ВВ можно транспортировать по шлангам.

Уплотняемость – качество ВВ, определяющее плотность заряжения зарядной емкости. Уплотняемость возрастает при наличии жидкой фазы в ВВ.

Сыпучесть – способность ВВ легко транспортироваться по трубам и шлангам к месту заряжения, свободно высыпаться, хорошо заполнять пространство скважин. Сыпучесть иногда характеризуют углом естественного от-

коса. Гранулиты, зерногранулиты, гранулотол – промышленные ВВ, характеризующиеся хорошей сыпучестью.

Старение – необратимое ухудшение взрывчатых свойств ВВ при хранении, вызванные физико-химическими изменениями в веществе в результате внутренних процессов или взаимодействия с внешней средой. В связи с процессами старения для всех ПВВ устанавливается гарантийный срок хранения, в течение которого гарантировано сохранение основных показателей технических условий не ниже регламентированных норм.

Летучесть – способность некоторых жидких компонентов ПВВ испаряться. К таким компонентам относятся нитроглицерин, динитроэтиленгликоль, нитрогликоль. Потеря веса таких ВВ приводит к весьма заметному изменению их взрывчатых свойств.

Эксудация – процесс выделения жидкой фазы из твердой многокомпонентной системы. Это явление наблюдается при старении динамитов, в результате которого на поверхности зарядов появляются капельки чистого нитроглицерина, при этом изменяются взрывчатые характеристики, возрастает опасность в обращении с такими ВВ.

К нарушению физической стойкости ВВ могут приводить расслаиваемость компонентов систем, рекристаллизация компонентов и др.

Для открытых работ допускаются ВВ, у которых не регламентируется состав продуктов взрыва. К ним не предъявляют строгих требований по детонационной способности.

К ВВ, предназначенным для ведения взрывных работ при подземной добыче полезных ископаемых, кроме шахт, опасных по пыли и газу, предъявляются требования по минимальному образованию ядовитых газов (CO , CO_2 , NO , NO_2 , сернистый газ) при взрыве.

Слежавшиеся и не поддающиеся размятию руками порошкообразные ВВ, не содержащие гексогена или жидких нитроэфиров, должны измельчаться в соответствие с требованиями "Единых правил безопасности при взрывных работах", после чего могут использоваться только в шахтах (рудниках), не опасных по газу или разрабатывающих пласты (рудные тела), не опасные по взрывам пыли, а также при работах на земной поверхности.

Слежавшиеся порошкообразные ВВ, содержащие гексоген или жидкие нитроэфиры, должны использоваться без разминания или измельчения только при взрывных работах на земной поверхности.

В угольных и сланцевых шахтах, опасных по газу или пыли, при заряджании запрещается разрезать оболочку патронов.

2.4.1. Основные компоненты промышленных ВВ

В 1867 году в Швеции И. Олсон и И. Норбин получили патент на использование аммиачной селитры в составах ВВ.

Аммиачная селитра (азотнокислый аммоний или нитрат аммония), NH_4NO_3 представляет собой бесцветное кристаллическое вещество. Выпускается в виде чешуек, гранул, кристаллов. Легко растворяется в воде, Плотность 1,56–1,74 г/см³; при температуре от –18° до +32°С плотность составляет 1,725 г/см².

В зависимости от температуры аммиачная селитра (АС) может существовать в различных модификациях. Фазовые переходы в АС осуществляются при температурах: –16°С; +32°С; +85°С; +125°С. При температуре 169,1°С АС плавится. При разложении один грамм селитры выделяет 0,2 г кислорода, окисляющего водород, углерод, алюминий. Из-за этого свойства АС используют в качестве компонента взрывчатых смесей.

Насыпная плотность АС 0,8–0,9 г/см³. Толщина слоя, по которому устойчиво может распространяться детонация, равна 30–50 мм, а слоя из пыли АС – 15÷20 мм. Критический диаметр открытого заряда АС при плотности 0,8 г/см³ – 100 мм, а сухая и тонкоизмельченная АС имеет критический диаметр 10 мм, товарная (обычная селитра) имеет критический диаметр 200÷250 мм.

Растворение АС в воде происходит со значительным поглощением тепла и понижением температуры замерзания раствора. При растворении 6 частей в 10 частях воды температура снижается на 17°, а раствор, содержащий 50 г АС на 100 г воды, замерзает при –18°С. В связи с этим в местах хранения АС и аммиачно-селитренных ВВ следует систематически вести наблюдения за температурой и влажностью воздуха.

Известные трудности возникают при работе со слежавшейся АС. Для уменьшения слеживаемости АС выпускают в виде гранул или крупных чешуек. Водостойчивая аммиачная селитра ЖВ, содержащая гидрофобную смесь па-

рафина и железных солей жирных кислот, обладает заметно меньшей слеживаемостью.

Скорость детонации АС в зависимости от условий 1,5–3,4 км/с. Иницирование зарядов АС осуществляют промежуточным детонатором (например, зарядом аммонита, массой $5 \div 20$ % массы заряда АС). Теплота взрыва $335 \div 375$ ккал/кг. В зависимости от материала оболочки существенно изменяется критический диаметр АС: в бумажной оболочке – $10 \div 12$ см, а в стальной – 5 см.

Гранулированная или чешуйчатая АС в мешке не детонирует от взрыва 500 г тротиловой шашки.

По условиям хранения и транспортирования аммиачная селитра не относится к ВВ.

Натриевая, калиевая и кальциевая селитры имеют высокую плотность (более 2 г/см^3) и в два раза больше содержат кислорода, чем АС. Но эти селитры имеют ограниченное применение, их добавки повышают плотность ВВ, снижают температуру его замерзания, хорошо удерживают воду в составе ВВ. Смеси перечисленных селитр с горючими добавками более чувствительны к механическим воздействиям и воспламенению.

Динамоны – смеси АС с горючими невзрывчатыми веществами: тонкодисперсной смеси АС с горючими веществами типа древесной муки, измельченного торфа и других целлюлозных материалов, а также алюминиевой пудры и горючих жидкостей. К этой группе относятся *игданит* и гранулит. Первый получают путем смешивания гранулированной АС с дизельным топливом (ДТ). Названо это ВВ было авторами (1958 г.) в честь института горного дела им. А.А. Скочинского – ИГД. Второе ВВ – гранулит – представляет собой смесь гранулированной АС с минеральными маслами, иногда содержащие добавку алюминиевой пудры. Известны гранулиты АС–4, АС–8, гранулит–М и др.

Тротил (тринитротолуол, тол) $\text{C}_7 \text{H}_5 (\text{NO}_2)_3$ – ВВ класса химических соединений (однокомпонентное ВВ). Впервые получен в 1863 г., а в 1891 г. его стали выпускать как промышленный продукт во многие страны мира. Кристаллы чистого тротила имеют цвет от светло- до темно-желтого.

Насыпная плотность тротила $0,9 \text{ г/см}^3$. Плотность литого тротила $1,54\text{--}1,59 \text{ г/см}^3$; в расплавленном состоянии – $1,467 \text{ г/см}^3$. При прессовании под давлением $4 \cdot 10^8 \text{ Па}$ плотность тротила достигает $1,6 \text{ г/см}^3$. Плотность монокристаллов – $1,663 \text{ г/см}^3$. Тротил практически нерастворим в воде; в толуоле и аце-

тоне растворяется легко. К самовозгоранию и саморазложению не способен. Температура вспышки тротила около 310°C. Вспышка взрывом не сопровождается. Горение тротила в замкнутом пространстве или больших масс может привести к взрыву.

Восприимчивость тротила к инициированию можно по мере ее уменьшения представить таким рядом: порошкообразный, прессованный, чешуйчатый, гранулированный, литой. Прессованный тротил инициируют капсюлем-детонатором (КД) или несколькими витками детонирующего шнура (ДШ). Для взрыва литого тротила требуется промежуточный мощный детонатор из прессованных шашек тротила или патронов аммонита.

Теплота взрыва тротила при плотностях 0,85 г/см³ и 1,5 г/см³ составляет соответственно 810 ккал/кг и 1010 ккал/кг. Скорость детонации сухого гранулированного тротила в открытых зарядах диаметром 60 мм составляет 2,7÷3,3 км/с, в водонаполненном состоянии – 6 км/с.

Критический диаметр детонации сухого гранулированного тротила в открытых зарядах около 60 мм, водонаполненного 25÷30 мм кислородный баланс (–74%). Работоспособность водонаполненного гранулированного тротила по пробе Трауця дает 310–315 см³, сухого порошкообразного – 285 см³.

Бризантность водонаполненного гранулированного тротила составляет 23 мм, сухого гранулированного – 9 мм, а тонкоизмельченного – 16 мм.

В настоящее время из-за токсичности практически все страны мира не производят тротил и не используют его в промышленности.

Алюмотол – смесь тротила с алюминиевым порошком (№15). Гранулированный алюмотол готовят путем смешивания расплавленного тротила с алюминиевым порошком и последующей грануляции полученной смеси в воде. Продукт представляет собой серебристого цвета гранулы диаметром 3–5 мм.

Теплота взрыва водонаполненного алюмотола составляет 1240 ккал/кг; работоспособность 420–430 см³; бризантность – 24,5 мм. Скорость детонации в открытых зарядах диаметром 60 мм 5,5÷6,0 км/с.

Тетрил (тринитрофенилметилнитрамин) C₆H₂(NO₂)₃N(NO₂)CH₃ – белый кристаллический порошок, технический перекристаллизованный представлен кристаллами светло-желтого или желтого цвета. Впервые получен в 1877 году.

Плотность монокристалла тетрила – 1,725 г/см³; насыпная ~1 г/см³, а прессованного – 1,68 г/см³. В литом виде не применяется.

Чувствителен к механическим и тепловым воздействиям. Горение обычно заканчивается взрывом. Теплота взрыва 1080 ккал/кг.

Используют в детонаторах (ЭД, КД) как вторичное инициирующее ВВ, для изготовления шашек – промежуточных детонаторов.

Гексоген (циклотриметилентринитрамин, циклонит, RDX) – формула $C_3H_6N_6O_6$ – кристаллический белый порошок с насыпной плотностью 1,1 г/см³. Монокристалл имеет плотность 1,8 г/см³. Температура плавления 203,5°С. Чрезвычайно токсичен, химически стоек, в воде нерастворим. Прессуется плохо. Впервые получен в 1837 году.

Скорость детонации при плотности 1,7 г/см³ – 8,6 км/с. Температура вспышки – 290°С. Чувствительность к удару – 30 см. Теплота взрыва в прессованном виде 1300 ккал/кг; работоспособность по Трауцлю 475 см³. При испытаниях по стандартной пробе Гесса навеска гексогена разрушает свинцовый столбик.

Применяется как вторичное инициирующее ВВ в детонаторах; в смеси с тротилом или в сплаве с тротилом в виде шашек ТГ; в качестве сенсibilизатора в некоторых сортах мощных аммонитов (например, в аммоните скальном №1). Гексоген флегматизируют воскообразными веществами в составах А-IX-I, А-IX-2 или специальным лаком в составе ГФГ-2; с тротилом или алюминием – шашки ТГА; в виде пластичных и эластичных ВВ на основе гексогена. Используют в некоторых типах твердых ракетных топлив в качестве активного горючего.

Октоген (циклотетраметилентетранитрамин, НМХ) $C_4H_8N_8O_8$ – кристаллический белый порошок; плотность монокристаллов 1,9 г/см³; температура плавления с разложением 277°С. Температура вспышки 335°С. Токсичен. Скорость детонации около 9 км/с. Получен в 1941 г.

Обладает относительно высокой термостабильностью. Входит в состав твердых ракетных топлив. Его используют в зарядах для перфорации глубоких нефтяных скважин с температурой выше 180°С. Имеет 4 кристаллических модификации. Одна из них – β-модификация – является стабильной формой, обладает наименьшей чувствительностью к механическим воздействиям.

ТЭН (тетранитропентаэритрит) $C_5H_8(ONO_2)_4$ получен в 1894 году. Кристаллический порошок белого цвета. Плотность монокристаллов 1,728 г/см³. Влаги не боится. Скорость детонации 8,2÷8,7 км/с. Температура вспышки 255°С, температура плавления с разложением – 141°С, работоспособность

500 см³. Чувствительность к удару 30 см. Химически стойкое вещество. Теплота взрыва 1480 ккал/кг. Бризантность высокая: свинцовый столбик разрушается.

Небольшие количества тэна сгорают спокойно, при повышенном давлении горение переходит во взрыв. Обладает высокой чувствительностью к трению и удару, поэтому его выпускают не только в чистом виде, но и флегматизированным парафином и другими подобными веществами.

Критический диаметр детонации тэна при плотности 1 г/см³ равен 3 мм.

Используется в качестве вторичного инициирующего ВВ в некоторых КД. Застывшая суспензия тэна в тротиле (*пентолит*) применяется в шашках в качестве промежуточных детонаторов. Используется для изготовления пластин и эластиков. Применяется в качестве медицинского препарата под названием "ЭРИНИТ", который является аналогом нитроглицерина. Кроме этого, ТЭН нашел широкое применение в детонирующих шнурах, поскольку имеет критический диаметр детонации – 1 мм.

Нитроглицерин (тринитрат глицерина, НГ, НГЦ) $C_3H_5(ONO_2)_3$ – тяжелая маслянистая и бесцветная жидкость плотностью 1,6 г/см³, синтезирован итальянским химиком А. Собrero в 1846 г. Технический глицерин имеет желтовато-коричневый цвет. Затвердевает при +13,2°C. Теплота взрыва 6040 кДж/кг. Скорость детонации 2 и 7,6 км/с. Работоспособность 550 см³. Ядовит, при контакте с кожей человека вызывает головную боль.

Применяется в качестве сенсibilизаторов при изготовлении некоторых предохранительных ВВ: победитов, угленитов, серного и нефтяного аммонитов. Единственное штатное БВВ жидкое и единственное с положительным кислородным балансом.

Нитроглицоль $C_2H_4(ONO_2)_2$ – прозрачная жидкость с удельным весом 1,5 г/см³. Затвердевает при –20°C. В смеси с нитроглицерином образует растворы, имеющие температуру затвердевания от –17°C до –23°C. Химически стоек; теплота взрыва 7120 кДж/кг, скорость детонации 7,4 км/с; работоспособность 600 см³.

При работе с нитроглицолем нужна особая осторожность – недопустим контакт открытых поверхностей тела. Области применения такие же, как и у нитроглицерина.

2.4.2. Горючие и другие добавки аммиачно-селитренных ВВ

В состав аммиачно-селитренных ВВ входят невзрывчатые органические горючие добавки, богатые горючими элементами (H_2 , C), которые окисляются избыточным кислородом АС с выделением тепла (древесная мука, мука хлопкового жмыха).

В качестве добавок используют *карбамид* (мочевину) – $CO(NH_2)_2$. Карбамид с аммиачной селитрой (48/52) образует смесь с $T_{\text{плавл.}} = 48^\circ\text{C}$, а при 15% карбамида смесь плавится при 75°C .

Жидкой горючей добавкой (5%) является соляровое масло всех выпускаемых марок. Используют при изготовлении гранулитов.

Широко применяемой в качестве твердых горючих добавок является алюминиевая пудра или алюминиевый порошок, повышающие чувствительность ВВ, теплоту взрыва и объемную концентрацию энергии ВВ.

Алюминий часто заменяют ферросплавами, содержащими кремний, ферросилиций (содержит 20–80% Si, 1–3% Al, 0,2–0,4% Cr, 0,2–0,6% Mn) и силикокальций (содержит 10–30% Ca, 1–2% Al, 6–25% Fe).

В состав водоустойчивых ВВ входят *гидрофобные добавки* (парафин, стеарат кальция, асфальтит), выполняющие роль горючих компонентов.

При необходимости загущения растворов АС в водосодержащих ВВ применяют полиакриламид, изаргам, гуаргам, который получают размолотом бобов тропической акации.

Структурообразующие добавки применяют для создания поперечной связи макромолекул загущающих полимеров. Для этой цели применяют сульфат хрома, бихромат натрия, серноокислый алюминий, буру, калиевые квасцы хрома и др.

Пороха коллоидного типа (пироксилиновые пороха) для взрывных работ используют сравнительно редко. При зарядании скважин пироксилиновый порошок смешивают с насыщенным раствором АС, что повышает бризантность и энергию взрыва.

Конверсионными взрывчатыми веществами принято называть ВВ и средства инициирования (СИ), которые использовали в военном деле, а затем из-за истечения сроков хранения применяют в горном деле для взрывов дробления или выброса.

Все ВВ (заряды в снарядах, авиабомбах, торпедах, ракетах), а также артиллерийские и ракетные пороха имеют большой отрицательный КБ, повышенную чувствительность (ВВ с добавками гексогена, тэна, сплавов алюминия и магния), сильную электризуемость (пороха), т.е. они гораздо опаснее при их применении в промышленных взрывах.

Пороха и некоторые ВВ выделяют, кроме традиционных газов CO, NO₂ ядовитые хлористые газы. Это позволяет использовать эти ВВ только на земной поверхности, при этом, они экологически будут вреднее промышленных.

Конверсионные ВВ более подходят (по организационным факторам) к использованию на временных объектах – сооружение дорог, каналов, плотин, взрывов на выброс и т.д.

В качестве средств инициирования можно использовать тротиловые и тротил-гексогеновые шашки (ТГ) для промежуточных детонаторов, а также более высококачественные, чем промышленные, боевые ЭД с платиноиридиевыми мостиками накаливания, а также КД и огнепроводные шнуры.

В настоящее время накоплен опыт переработки и использования в качестве водоустойчивых ВВ под названием гранипоров артиллерийских порохов, выплавки из снарядов тротила, последующего его гранулирования и использования взамен гранулолита под названием конвертол.

Успешные результаты получены при использовании баллиститных порохов для изготовления удлиненных кумулятивных зарядов для дробления негабаритов, резки металлоконструкций при утилизации или разрушения объемных бетонных и железобетонных сооружений.

Разработана технология переработки зарядов твердого топлива в гранулы, пригодных для производства синтетических алмазов, пороховых зарядов твердотопливных ракет в гранулы разных размеров, пригодных для заряжания обводненных скважин.

2.4.3. Нитроглицериновые ВВ

Высокопроцентные нитроглицериновые ВВ имеют весьма небольшое применение по сравнению с аммиачно-селитренными. Основные компоненты: нитроглицерин и нитроглицоль. Очень опасны в обращении.

Из высокопроцентных нитроглицериновых ВВ имеет применение, при-

том весьма незначительное лишь 62% динамит. Он состоит из смеси нитроглицерина – 37% и нитрогликоля – 25%, желатинированных коллоидным хлопком – 3,5%, калийной или натровой селитры – 32%, древесной муки – 2,5%.

Тугая пластичная масса ВВ патронируется в бумажные гильзы, плотность патронов 1,45.

Динамит водостойчив. Бризантность 16 мм. Чувствительность к удару 28 см. $T_{\text{замерз.}} -20^{\circ}\text{C}$ (опасность в обращении увеличивается). Замерзшие динамиты перед употреблением надо отогревать при температуре не выше $+30^{\circ}\text{C}$.

При отогревании, а также при хранении в условиях повышенной температуры может происходить эксудация – выделение из массы патрона жидких нитроэфиров. Эксудирующий динамит столь же опасен в обращении, как и нитроглицерин. Поэтому работа с таким динамитом и его хранение запрещаются. Динамит подлежит немедленному уничтожению.

Низкопроцентные нитроглицериновые ВВ содержат до 15% нитроэфиров. По условиям хранения и транспортировки они приравниваются к аммиачно-селитренным ВВ, но в обращении они опаснее, имеют некоторую токсичность.

Непредохранительные ВВ II класса.

Детонит №10А и детонит М – порошкообразные предохранительные ВВ, содержащие до 10% нитроэфиров и до 10% порошка алюминия, 8÷11% тротила и более 70% – АС. Плотность $1,1\div 1,3 \text{ г/см}^3$. Бризантность 17 – 18 мм. В воде заряды детонита выдерживают несколько часов без снижения качества. Эти ВВ рекомендуются при зарядании обводненных скважин и шпуров в крепких породах.

ВВ этого класса разрешается применять:

- при проведении горизонтальных, наклонных, восстающих и вертикальных выработок, а также углубке шахтных стволов с действующих горизонтов шахт при соблюдении следующих условий:
 - отсутствии в забоях угольных пластов, пропластков, а также выделения метана;
 - подтоплении водой забоя углубляемого ствола перед взрыванием на высоту не менее 20 см, считая по наивысшей точке забоя;
 - отставании от любой точки забоя до угольного пласта (при приближении к нему) не менее 5 м, считая по нормали. После пересечения пласта за-

боем выработки расстояние от любой точки забоя до пласта должно быть более 20 м, считая по протяжению выработки.

Если выработка закреплена монолитной крепью, исключающей поступление в нее метана из пласта, и работы по изоляции пласта ведутся по проекту, согласованному организацией – экспертом по безопасности работ, ВВ II класса могут применяться после пересечения угольных пластов и пропластков;

- в забоях, проводимых с поверхности шурфов или стволов шахт, опасных по газу или пыли, в том числе при пересечении этими забоями пластов, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа;
- при сотрясательном взрывании в выработках, проводимых по выбросоопасным породам при условии применения водораспылительных завес, создаваемых взрывным распылителем воды из полиэтиленовых сосудов в сочетании с туманообразующими завесами.

Предохранительные ВВ III класса.

Победит ВП–4, содержит до 10% нитроэфиров, имеет хорошие детонационные свойства. В обводненных забоях и в крепких породах более эффективен, чем аммонит АП–5ЖВ. Бризантность – 14 мм, плотность $1,1 \div 1,3 \text{ г/см}^3$. Температура взрыва – 2565°C . Применяется в породных забоях, опасных по метану, но не опасных по пыли.

Аммонит серный №1ЖВ, порошок желтого цвета, жирный на ощупь, сенсибилизирован нитроэфирами. Имеет низкую водоустойчивость, малую мощность, хорошую детонационную способность. Токсичен, требует повышенной осторожности в обращении, чувствителен к низким отрицательным температурам. Содержит: 5% нитроэфиров, 11,5% тротила; 52% – АС. Бризантность 11 мм, температура взрыва 1570°C . Плотность ВВ в патронах $0,95 \div 1,05 \text{ г/см}^3$.

Аммонит нефтяной №3ЖВ. По многим свойствам близок к аммониту серному, но отличается от последнего высокой водоустойчивостью. Состоит из: 9% нитроэфиров, 7% тротила, 52% АС. Бризантность 12 мм, плотность $1 \div 1,3 \text{ г/см}^3$. Температура взрыва – 1925°C .

Предохранительные ВВ III класса разрешается применять:

- в забоях выработок, проводимых только по породе, в том числе и по выбросоопасным породам, при выделении метана и отсутствии взрывчатой пы-

ли; в забоях стволов, проводимых только по породе, при их углубке с действующих горизонтов и выделения в них метана;

- при вскрытии пластов, опасных по внезапным выбросам угля и газа, до обнажения пласта при условии применения водораспылительных завес и наличии между пластом и забоем выработки породной пробки по всему сечению выработки. Размер пробки (считая по нормали) должен быть не менее 2 м при вскрытии крутых пластов и не менее 1 м при вскрытии пологих пластов.

Предохранительные ВВ IV класса.

Аммонит ПЖВ–20, Аммонит Т–19. Отличаются увеличенным на 3% содержанием тротила и лучшей технологической обработкой, за счет чего несколько увеличились их взрывчатые характеристики. Выпускаются в патронированном виде; мелкодисперсные порошки светло–желтоватого цвета с видимыми частицами пламегасителей. Способны детонировать при уплотнении до 1,7 г/см³.

Работоспособность аммонита ПЖВ–20 – 265–280 см³; теплота взрыва 3400 кДж/кг. Скорость детонации 3,5÷4,0 км/с. Основные компоненты: 64% – АС; 16% –тротил; 20% –хлористый натрий.

Работоспособность аммонита Т–19 составляет 270–280 см³; теплота взрыва 3380 кДж/кг. Скорость детонации 3,6 –4,3 км/с. Основные компоненты: 61% –АС; 19% –тротил; 20% –хлористый натрий.

Область и условия применения: шпуровые заряды в сухих и мокрых угольных и смешанных забоях, опасных по взрыву метана и пыли (кроме забоев, отнесенных к особо опасным), а также скважинные заряды при вскрытии угольных пластов сотрясательным взрыванием.

Аммониты для подземных работ выпускают в виде порошка или прессованные и только патронированные (ρ патрона 1–1,15 г/см³; Ø патрона 32, 36 и 45 мм). Плотность прессованных аммонитов 1,4–1,58 г/см³. *Патроны прессованные разминать нельзя.*

Гильзы патронов делают из пергаментной бумаги, парафинируют. На гильзы патронов проставляют фабричное клеймо с обозначением наименования завода, типа ВВ и массы патрона. Массы патронов стандартного диаметра 100, 200, 250, и 300 г.

Цвет гильзы (или клейма) соответствует классу ВВ.

Гарантийный срок использования аммонитов предохранительных – 6 мес.
Непредохранительных – 12 мес.

Предохранительные ВВ IV класса разрешается применять:

- в угольных и смешанных забоях выработок, проводимых по угольным пластам, опасным по взрывам пыли, при отсутствии выделения метана в этих выработках;
- в угольных и смешанных забоях горизонтальных, наклонных и восстающих (до 10°) выработок, проводимых по пластам, опасным по газу и пыли, в которых отсутствует повышенное выделение метана при взрывных работах;
- при сотрясательном взрывании, в т.ч. камуфлетном, вскрытии угольных пластов после их обнажения и последующем проведении выработок на протяжении не менее 20 м;
- в бутовых штреках с нижней подрывкой пород; в бутовых штреках с верхней подрывкой пород при относительной метанообильности выемочного участка менее 10 м³/т; при взрывной выемке угля в лавах;
- при взрывании по породе в смешанных забоях выработок, проводимых по пластам, опасным по внезапным выбросам угля и газа, при опережающем породном забое;
- для подрывки боковых пород с $f > 4$ в смешанных забоях выработок, при условии, что предварительная выемка угля будет проводиться без применения взрывных работ

Предохранительные ВВ V класса.

Угленит Э–6. Основные компоненты: нитроэфиры – 14%; натриевая селитра – 46%; хлористый аммоний – 30%; хлористый натрий – 7%; древесная мука – 2,5%. Теплота взрыва 2680 кДж/кг; скорость детонации 2 км/с; работоспособность 130 – 170 см³; мало водостойчив. Свободно подвешенный заряд не вызывает взрыв метано-воздушной смеси.

Ионнообменные соли в зоне повышенных давлений и температур, обеспечиваемых детонацией нитроэфиров, вступают в реакцию обмена, которая сопровождается выделением инертных газов и пылевидной инертной соли:



Избыточный кислород окисляет горючие элементы древесной муки.

Угленит №5. Теплота взрыва 1300 кДж/кг; скорость детонации 1,8 км/с; работоспособность –50 см³. Состав основных компонентов: нитроэфиры –10%, аммиачная селитра –14%, хлористый натрий –75%, древесная мука –1%.

Применяется для перебивания стоек органной крепи в лавах и для рыхления угля, застрявшего в углеспусках.

Угленит №7 отличается от угленита №6 твердой сенсibiliзирующей добавкой – окиси кремния. Предназначен для разбуривания печей в газовых шахтах и перебивания крепежных стоек. Работоспособность 80 – 120 см³.

Предохранительные ВВ V класса разрешается применять:

- в угольных и смешанных забоях горизонтальных, наклонных и восстающих (до 10°) выработок с повышенным выделением метана при взрывных работах. При этом в смешанных забоях по углю и по породе должно применяться одно и то же ВВ. В отдельных случаях по разрешению органа Госнадзорохрантруда, выданному на основании заключения организации-эксперта по безопасности работ, допускается применение по углю ВВ V класса, а по породе – IV класса;

- в угольных и смешанных забоях восстающих (до 10°) выработок, в которых выделяется метан, при проведении их с предварительно пробуренными скважинами, обеспечивающими проветривание выработок за счет общешахтной депрессии; в нишах лав, не отнесенных к забоям с повышенным выделением метана;

- в бутовых штреках, проводимых с верхней подрывкой пород, при относительной метанообильности выемочного участка 10 м³/т и более;

- для верхней и смешанной подрывки боковых пород с $f=4$ и менее в смешанных забоях выработок с повышенным выделением метана при взрывных работах при условии, что предварительная выемка угля будет проводиться без применения взрывных работ.

Предохранительные ВВ VI класса.

Угленит 12ЦБ (кроме патронов СП–12) как и угленит П–12ЦБ относятся к ионнообменным селективно-детонирующим ВВ. В качестве сенсibiliзатора содержит нитроэфиры (нитроглицерин). Теплота взрыва 2300 кДж/кг; скорость детонации около 2 км/с; работоспособность 120 см³.

Предохранительные ВВ VI класса разрешается применять:

- в верхних нишах лав с повышенным выделением метана;
- в угольных забоях восстающих (до 10°) выработок, в которых выделяется метан, при проведении их без предварительно пробуренных скважин;
- в забоях выработок, проводимых по нарушенному массиву (в том числе и в забоях выработок, проводимых в присечку к нарушенному массиву), при выделении в них метана. При этом глубина шпуров должна быть не более 1,5 м, а масса шпурового заряда патронированного ВВ – не более 0,6 кг;
- для верхней и смешанной подрывки пород с $f=4$ и менее в вентиляционных штреках, проводимых вслед за лавой.

Шпуровые заряды в верхних нишах лав и в восстающих выработках, особо опасных по метану, изготавливаются из угленита П–12ЦБ.

Предохранительные ВВ VII класса.

Ионит – безопасное предохранительное ВВ VII класса; скорость детонации 1,8 км/с; теплота взрыва 1900 кДж/кг. В своем составе содержит компоненты такие же, как и углениты.

Предохранительные ВВ VII класса разрешается применять для следующих видов специальных взрывных работ:

- для ликвидации завесаний горной массы в углеспускных выработках и дробления негабаритов накладными зарядами;
- для взрывного перебивания деревянных стоек при посадке кровли

В забоях выработок, где имеется газовыделение или взрывчатая угольная пыль, разрешается применять только предохранительные электродетонаторы мгновенного и короткозамедленного действия

Основные характеристики некоторых промышленных взрывчатых веществ, которые нашли широкое применение в угольных шахтах приведены в табл. 8.6 учебного пособия [6]. Составы и свойства некоторых ионообменных промышленных ВВ для угольных шахт, опасных по газу и пыли, приведены в табл. 2.4 и 2.5.

В США доля потребления предохранительных ВВ составляет 1% от общего выпуска, при этом список допущенных ВВ такого класса к применению в угольной отрасли насчитывает более ста наименований: гранулированных составов – около 50 наименований, водосодержащих и эмульсионных составов – более 25, остальные – нитроэфирсодержащие ВВ. Предохранительные ВВ, в

состав которых входит тротил, не производятся. В целом, ассортимент предохранительных ВВ США не типичен для применения в условиях украинских шахт, опасных по газу и пыли. С учетом принятой методики идентификации предохранительных ВВ в Украине взрывчатые вещества США относятся к III и IV классам.

Таблица 2.4

Состав некоторых ионообменных предохранительных ВВ для угольных шахт, опасных по газу и пыли (по Ю. Михайлову и др.)

ПВВ	Страна	Химический состав в вес. %			
		НЭ	NaNO ₃ (KNO ₃)	NH ₄ C I	Прочие компоненты ПВВ
1	2	3	4	5	6
Угленит 13П	Украина	13,0	36,4	25,0	Карбонат кальция – 5,0; NaКМЦ – 2,0; нитрат аммония (ЖВ) – 15,0; полистирол – 2,5; стеарат кальция – 0,8; коллоидный хлопок – 0,3
Угленит 13П/1	Украина	13,0	47,7	30,0	Карбонат кальция – 5,0; NaКМЦ – 2,0; полистирол – 1,5; стеарат кальция – 0,5; коллоидный хлопок – 0,3
Аммонит П-5	Украина	16-17 тротил	63-64 нитрат аммония	15,0 соль	Полифосфат натрия – 4,5; графит – 0,5; мука – 2,5
Угленит М	Россия	11,0	41,1	13,0	Нитрат аммония (ЖВ) – 18,2; карбамид – 12,04; коллоидный хлопок – 0,2-0,4; NaКМЦ – 2,0; древесная мука – 2,5
Угленит 12ЦБ	СССР	12,0	46,0	–	Карбамид – 23,0; коллоксилин – 0,3; карбонат кальция – 10,0; хлористый натрий – 6,0; NaКМЦ – 3,0
Ионит	СССР	10,0	54,0	33,7	Аэросил – 0,8; NaКМЦ – 1,0; коллоидный хлопок – 0,2–0,3
Специальный метанит VI	Польша	10,0	53,8	34,0	Тальк – 2,2
Минурекс	Франция	20,0	34,0	22,0	Нитрат аммония – 17,0; мочевины – 7,0 (пена)
Дайнаджекс	Англия	16,0	15,1	7,0	Нитрат аммония – 27,0; нитроклетчатка 0,3; NaКМЦ – 1,0; хлористый натрий – 5,6; формиат натрия – 25,0; кизельгур – 3,0
Веттерсекьюрит С	Германия	9,0	15,0 (35,3)	33,9	Стеарат кальция – 0,05; древесная мука – 1,45; карбонат кальция – 5,0; каолин – 0,2
Шарбрит 4/50	Бельгия	9,5	55,25	28,0	Оксалат аммония – 5,0; кремнезем – 0,65; древесная мука – 1,6

Примечание: NaКМЦ – натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы

Таблица 2.5

*Свойства некоторых ионообменных предохранительных ВВ
для угольных шахт, опасных по газу и пыли (по Ю. Михайлову и др.)*

ПВВ	Взрывчатые свойства			Предохранительные свойства		
	Работос- пособность, ΔV , см ³	Скорость детона- ции, D, км/с	Предел детона- ции, L, см*	Каналь- ная морти- ра, m _{кр} , кг	Угло- вая морти- ра, m _{кр} , кг	Устойчивость против выго- рания
Угленит 13П	180	2,3–2,4	10/5	1,0	0,1	Устойчив
Угленит 13П/1	155	2,0–2,1	8/5	1,2	0,25	Устойчив
Аммонит П-5	260	3,9–4,1	7/5	0,3	0,025	Устойчив
Угленит М	200	1,8–1,9	11/9	–	0,3**	Устойчив
Угленит 12ЦБ	120	1,9	8/4	1,0	0,6	Неустойчив
Ионит	110	1,6–1,7	5/1	>1,0	1,0	Неустойчив
Специальный метанит VI	100	1,7–1,8	11/5	>1,0	0,5	Неустойчив
Минурекс	180	–	10/5	1,0	–	Устойчив
Дайнаджекс	140	2,3	25/10	1,0	–	Устойчив
Веттерсекьюрит С	100	1,5	3/–	2,2	2,0	Устойчив
Шарбрит 4/50	95	1,6–1,65	3/–	2,2	2,0	Устойчив

Примечание: * – передача детонации между сухими патронами в числителе, в знаменателе – между мокрыми патронами; ** – свободноповешенный заряд в опытном штреке.

Очевидно несовершенство и ограниченность существующего ассортимента предохранительных промышленных ВВ в Украине, которые более полувека представлены тремя порошкообразными патронированными аммонитами III и IV класса предохранительности, несколькими нитроэфирными ВВ V – VII класса. Однако их уровень предохранительных свойств и устойчивости против выгорания не в полной мере отвечают существующим требованиям сверхкатегорийных шахт.

2.4.4. Особенности детонации промышленных ВВ

Главная особенность промышленных ВВ (ПВВ) состоит в том, что они являются физически и химически неоднородными системами. Этим объясняются особенности их детонации и некоторые аномалии относительно положений классической теории детонации конденсированных ВВ.

Большинство ПВВ представляет собой смеси материалов разнородных по химическим и физическим свойствам. Как известно, в ПВВ могут содержаться

и высокоактивные индивидуальные ВВ, разлагающиеся в детонационной волне с большой скоростью, и менее активные вещества, но с сильно выраженными взрывчатыми свойствами типа тротила; вещества со слабо выраженными взрывчатыми свойствами – аммиачная селитра, динитронафталин и др., разлагающиеся при детонации со скоростью на порядок меньшей, чем мощные БВВ.

В состав ПВВ входят горючие материалы, не обладающие взрывчатыми свойствами (алюминий, древесная мука, парафин и др.), и совершенно инертные, не принимающие участия в химических реакциях при взрыве и способные претерпевать лишь фазовые превращения такие вещества как минеральные соли (пламегасители), вода и др. С точки зрения компонентного состава промышленные ВВ являются также и кинетически неоднородными системами.

Основные особенности детонации промышленных ВВ следующие:

1. Химические реакции при взрыве промышленных смесевых ВВ происходят в несколько стадий. Типичной схемой развития химических реакций является первоначальное разложение или газификация исходных компонентов в детонационной волне и последующее взаимодействие продуктов разложения между собой или с веществами (алюминий, ферросилиций и др.), не претерпевшими на первой стадии химических или фазовых превращений. Критическая плотность, точка максимума на кривой $D=f(\rho_0)$ и другие характеристики, связанные с экстремальным видом зависимости параметров детонации от плотности, не являются константами того или иного ПВВ, определяемыми его химическим составом. Они меняются с изменением физических характеристик ВВ (размер частиц, равномерность распределения компонентов и т.д.), поперечных размеров зарядов, свойств оболочки заряда.

2. На детонационную способность ПВВ может существенно влиять равномерность смешивания компонентов. Чем мельче частицы разнородных компонентов и чем более равномерное их распределение в объеме, тем быстрее завершается их сгорание, смешивание и взаимодействие продуктов сгорания.

3. Для промышленных ВВ характерны такие явления как растянутость зоны химической реакции, большой интервал между $d_{кр}$ и $d_{пр}$ (отношение этих величин может достигать 5 – 10). Например, $d_{кр}$ тонкодисперсных аммонитов в открытых зарядах при рабочей плотности составляет 10 – 15 мм, а максимальная скорость детонации наблюдается при заряде диаметром 80 – 100 мм. Грану-

лированные смеси устойчиво детонируют в открытых зарядах диаметром 40 – 150 мм и достигают максимальной скорости детонации в зарядах диаметром более 200 мм, сильная зависимость этих характеристик от технологии изготовления; экстремальная зависимость скорости детонации и брызгантности от плотности заряда при $d_3 < d_{\text{ПР}}$ (рис. 2.1 и 2.2) и ряд других.

4. Для многих ПВВ спад скорости детонации (рис. 2.1) или брызгантности (рис. 2.2) после максимума может быть достаточно резким, а, начиная с некоторой плотности, детонация в заряде данного диаметра вообще становится неустойчивой. В связи с этим явлением для промышленных ВВ ввели понятие *критической плотности* $\rho_{\text{кр}}$. Нормальный характер зависимости $D=f(\rho_0)$ относится к области идеальной детонации.

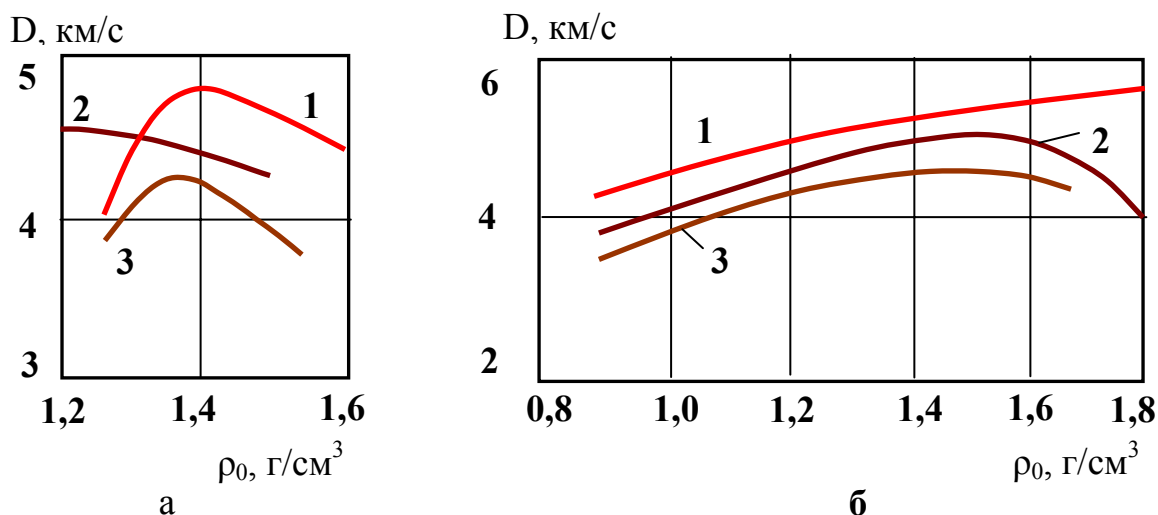


Рис. 2.1. Зависимость скорости детонации от плотности заряда ВВ
а – (1) победит ВП-3, (2) аммонит ПЖВ-20, (3) победит ВП-1; **б** – в зарядах аммонита ПЖВ-20 различного диаметра: (1) 100 мм, (2) 40 мм, (3) 20 мм

5. Многостадийность приводит к усилению (по сравнению с индивидуальными порошковыми ВВ) зависимости критических условий распространения и параметров детонации от размеров частиц компонентов.

6. $d_{\text{кр}}$ и $d_{\text{ПР}}$ зависят не только от химического состава ВВ, но и от плотности заряда. С возрастанием плотности ПВВ значения $d_{\text{кр}}$ и $d_{\text{ПР}}$ увеличиваются.

7. Установлено влияние плотности ВВ на минимальный инициирующий импульс: при увеличении плотности увеличивается минимальный инициирующий импульс (МИИ), рис. 2.3.

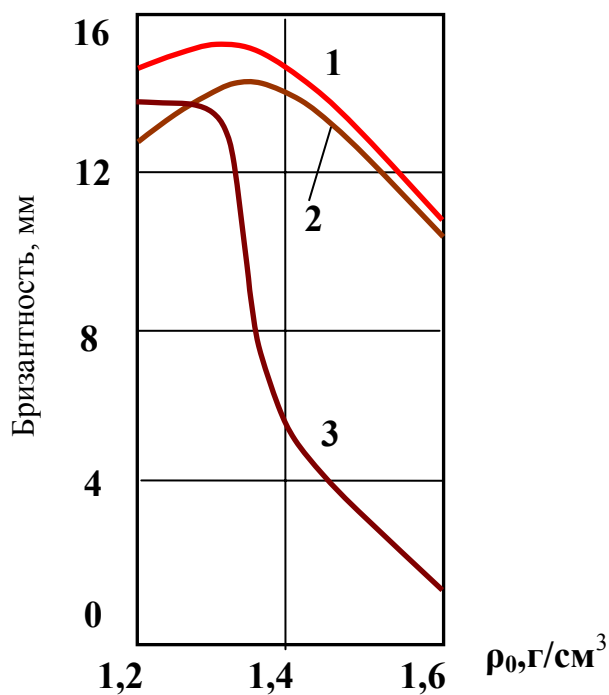


Рис. 2.2. Зависимость бризантности Б от плотности ВВ:
1 – победит №6; 2 – победит ПУ-2; 3 – аммонит №8

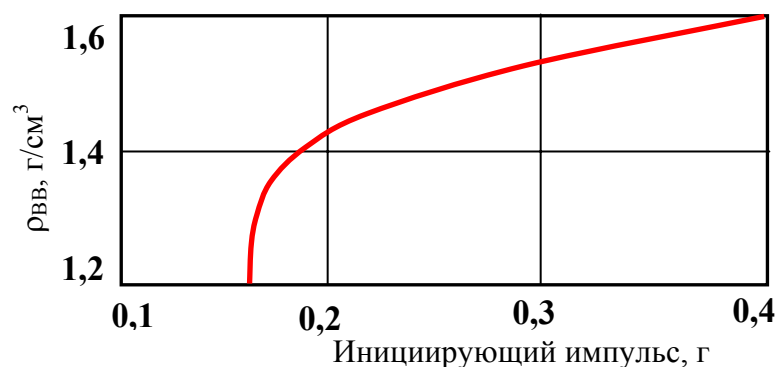


Рис. 2.3. Зависимость минимального инициирующего импульса при взрыве гремучей ртути от плотности заряжения победита ВП-3

2.5. Способы и средства беспламенного взрывания

Все способы беспламенного взрывания основаны на быстром образовании в стальных патронах, размещенных в шпурах, газов под высоким (10^8 Па и более) давлением и мгновенном их выбросе в шпур.

Применяется в наиболее опасных условиях угольных шахт, где не разрешается ведение взрывов даже предохранительными ВВ, для работ по углю, главным образом в лавах с машинной зарубкой, а также для подрывки некреп-

ких боковых пород.

Наиболее эффективными являются следующие способы:

Кардокс, – образование газов происходит в результате быстрого испарения жидкой углекислоты при ее интенсивном нагревании.

Гидрокс, – образование газов происходит в результате химических реакций порошкообразных составов под действием нагревания;

Аэродокс, – при котором в патрон, размещенный в шпуре, подается сжатый воздух под давлением $(3-8) \cdot 10^7$ Па.

Достоинства способа беспламенного взрывания:

- полная безопасность отбойки угля на шахтах, опасных по взрыву газа или пыли;
- отсутствие вредных газов;
- получение крупнокускового угля с уменьшением пылеобразования в 3–4 раза;
- сокращение времени на проветривание забоя при отбойке сжатым воздухом;
- высокая безопасность в обращении с патронами;
- отсутствие возможности преждевременного взрыва;
- меньшая вероятность повреждения призабойной крепи и отсутствие надобности в складах ВМ.
- улучшает гигиенические условия труда;
- обеспечивает добычу угля более высокого качества.

Вопросы для самоконтроля знаний

1. На какие классы делят все промышленные ВВ? В чем состоит принцип такого разделения?
2. Какие ВВ относятся к индивидуальным? Назовите некоторые из них.
3. Какие ВВ относятся к взрывчатым смесям? Назовите некоторые из них.
4. Перечислите основные требования, предъявляемые к промышленным взрывчатым веществам.
5. Перечислите ВВ в соответствии с областями их применения.
6. Какие ВВ называют индивидуальными? Преимущественные области их применения.
7. Какие ВВ называют бризантными? Чем они отличаются от инициирующих? Приведите примеры наименований нескольких бризантных ВВ.
8. Какие ВВ относятся к метательным? Почему?

9. Какие взрывчатые вещества называют промышленными? По какой причине их выделяют в отдельную группу?
10. Перечислите основные компоненты промышленных ВВ.
11. Назовите наиболее важные свойства промышленных взрывчатых веществ.
12. Какие меры предосторожности предусмотрены ЕПБ при обращении с ВВ, имеющих физико-химические нарушения?
13. Назовите основные свойства аммиачно-селитренных ВВ.
14. Назовите основные свойства тротила.
15. Перечислите основные свойства гексогена, октогена, тэна.
16. Назовите основные свойства нитроглицерина и нитроглицоля.
17. Какие основные добавки используют в аммиачно-селитренных взрывчатых веществах?
18. Нитроглицериновые ВВ и их основные характеристики.
19. Непредохранительные ВВ II класса и области их применения в соответствии с "ЕПБ при взрывных работах".
20. Предохранительные ВВ III класса и области их применения в соответствии с "ЕПБ при взрывных работах".
21. Предохранительные ВВ IV класса и области их применения в соответствии с "ЕПБ при взрывных работах".
22. Предохранительные ВВ V класса и области их применения в соответствии с "ЕПБ при взрывных работах".
23. Предохранительные ВВ VI класса и области их применения в соответствии с "ЕПБ при взрывных работах".
24. Предохранительные ВВ VII класса и области их применения в соответствии с "ЕПБ при взрывных работах".
25. Перечислите основные особенности детонации промышленных ВВ.
26. Какие существуют способы беспламенного взрывания? Их достоинства.

Список рекомендованной литературы

1. Взрывное дело /С.А. Ловля, Б.Л. Каплан, В.В.Майоров и др. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
2. Физика взрыва /Ф.А.Баум, Л.П.Орленко, К.П.Станюкович и др. – М.: Наука, 1975.– 704 с.
3. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1988. – 358 с.
4. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. – М.: МГИ, 1992. – 516 с.
5. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. Пер. с англ. под ред. Г.П. Демидюка и Н.С. Бахаревича – М.: Недра, 1980. – 453 с.
6. Единые правила безопасности при взрывных работах. – К.: Норматив, 1992. –171 с.

3. СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ВЗРЫВАНИЯ ЗАРЯДОВ ВВ

Возбуждение детонации в зарядах ВВ, осуществляемое надежным и рациональным способом, является одним из главных условий эффективного развития технологии взрывных работ. В мировой практике используются различные способы взрывания зарядов, которые можно разделить на три группы: электрические, неэлектрические и комбинированные.

3.1. Взрывание с помощью электродетонаторов

В системах *электрического* инициирования энергия от внешнего источника электрического тока передается к электродетонаторам (зарядам ВВ) по электровзрывным сетям. Основными элементами электрического взрывания являются электродетонаторы нормальной чувствительности, рис. 3.1,а.

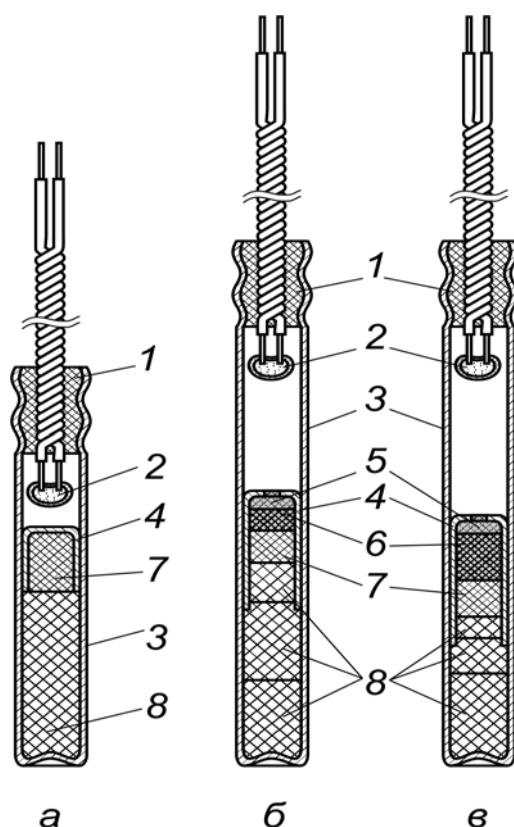


Рис. 3.1. Электродетонаторы мгновенного – ЭД (а), короткозамедленного – ЭДКЗ (б) и замедленного ЭДЗД (в) действия:

- 1 – пробка; 2 – зажигательная головка; 3 – корпус (гильза); 4 – втулка (чашечка);
5 – воспламеняющая смесь; 6 – замедляющий состав; 7 – первичный заряд ВВ;
8 – вторичный заряд ВВ

Электродетонаторы различают:

- по виду заряда инициирующего ВВ, который в нем находится (грему-чертутно-тетриловый и азидо-тетриловый);
- по времени срабатывания (мгновенного, рис. 3.1,а, короткозамедленного, рис. 3.1,б, и замедленного действия, рис. 3.1,в);
- по конструктивному оформлению и по назначению (общего назначения, для сейсморазведки, обработки металлов, для торпедирования нефтяных скважин и др.);
- по условиям применения (непредохранительные и предохранительные – для шахт, опасных по взрыву газа или пыли);
- по чувствительности к блуждающим токам (нормальной, пониженной и очень низкой чувствительности или грозоустойчивые).

Мировые фирмы производят электродетонаторы высокоточные с жестко фиксированными интервалами времени замедления, новые системы ЭД, защищенные от действия статического электричества, блуждающих и других посторонних токов, прецизионного действия, применение электронных устройств для программированного последовательного инициирования зарядов и т.д. Разработаны различные приборы для их взрывания и контрольно-измерительная аппаратура.

Преимущества электрического способа взрывания перед другими заключается в возможности проверки каждого ЭД и всей взрывной сети перед взрывом. Ведущими мировыми производителями электрических средств взрывания являются компании "Нитро Нобель" (Швеция), "Дюпон", "Атлас Паудер", "Остин Паудер", "Геркюлес Инк", "Енсайн-Бикфорд" и др. (США), "Ай-Си-Ай Нобель Иксплозивс" (Великобритания) и др.

Наиболее распространенными типами ЭД и соответствующими способами взрывания в угольных шахтах являются: "Акудет Марк V", "Тренчдет", "Геркюлес Инк", "Мастердет", "Магнадет", "Магна" и др.

Основные параметры электродетонаторов:

- *сопротивление ЭД* – сумма электрического сопротивления мостика накаливания и выводных проводов в холодном состоянии;
- *безопасный ток* – максимальное значение (верхняя граница) постоянного тока, который не вызывает взрыв при неограниченном времени его про-

хождения через ЭД;

- *длительный воспламеняющий ток* – минимальное значение (нижняя граница) постоянного тока, который, протекая через ЭД за время более 1 мин., вызывает взрыв;

- *стотиллисекундный воспламеняющий ток* – значение постоянного тока, который, протекая через ЭД в течение 10 мс, вызывает его взрыв;

- *импульс воспламенения* – наименьшее значение импульса тока (постоянного), при котором происходит зажигание электровоспламенителя;

- *время передачи* – время от момента воспламенения электровоспламенителя ВВ до момента выхода луча огня из его головки, а для ЭД мгновенного действия – до его взрыва;

- *время срабатывания* – время от момента включения тока до момента взрыва ЭД;

Гарантийный ток – минимальный ток, который, проходя через последовательно включенные ЭД, вызывает в них воспламенение всех электровоспламенителей. Гарантийная величина переменного тока принимается равной 2,5 А. В случае использования постоянного тока его гарантийная величина должна быть не меньшей чем удвоенное значение стотиллисекундного тока и обычно принимается равной 1 А, однако при одновременном взрыве 200 ЭД это значение увеличивается до 1,3 А.

Для производства взрывных работ в угольных и сланцевых шахтах, опасных по взрыву газа или пыли, с 1990 г. выпускаются предохранительные мощные ЭД короткозамедленного действия пониженной чувствительности к действию зарядов статического электричества и блуждающих токов типа ЭД-КЗ-ПК и нормальной чувствительности к действию зарядов статического электричества и блуждающих токов типа ЭД-КЗ-ПКМ. Для шахт, опасных по взрыву газа или пыли, выпускаются непереходные ЭД с замедлением типа ЭД-З-Н, которые имеют 23 серии замедления.

"Едиными правилами безопасности при взрывных работах" предусмотрены следующие основные требования при взрывании с применением электродетонаторов:

- провода ЭД после проверки их сопротивления должны быть замкнуты накоротко и в таком положении находиться все время до момента присоединения к взрывной сети. При выполнении этой операции на рабочем месте прове-

ряющего допускается иметь не более 100 ЭД;

- в шахтах (рудниках), опасных по газу или пыли, провода электродетонаторов и электровзрывной сети должны соединяться только с применением контактных зажимов;

- электровзрывная сеть должна быть двухпроводной. Использование воды, земли, труб, рельсов, канатов и т.п. в качестве одного из проводников запрещается. До начала заряжания взрывник обязан осмотреть взрывную магистраль, убедиться в ее исправности;

- в шахтах (рудниках), опасных по газу или пыли, должны применяться электродетонаторы только с медными проводами. Это требование распространяется также на соединительные и магистральные провода (кабели) взрывной сети;

- запрещается монтировать электровзрывную сеть в направлении от источника тока или включающего ток устройства к заряду;

- после монтажа электровзрывной сети необходимо проверить ее проводимость;

- постоянная взрывная магистраль должна отставать от места взрыва не менее чем на 100 м;

- включение тока для взрывания должно проводиться из безопасного места. Взрывной прибор должен иметь специальные клеммы для подсоединения магистральных проводов электровзрывной сети. Подсоединение магистральных проводов к взрывному прибору (машинке) следует проводить в месте укрытия взрывника;

- концы проводов смонтированной части электровзрывной сети должны быть замкнуты накоротко на все время, предшествующее подсоединению их к проводам следующей части электровзрывной сети. Запрещается присоединение проводов уже смонтированной части электровзрывной сети к следующим проводам, пока противоположные концы последних не замкнуты накоротко;

- концы магистральных проводов электровзрывной сети также должны быть замкнуты в течение всего времени до присоединения их к клеммам прибора или устройства, включающего ток для взрывания;

- со всех электроустановок, кабелей, контактных и воздушных проводов и других источников электроэнергии (в т.ч. источников опасных электромагнитных излучений), действующих в зоне монтажа электровзрывной сети, напряжение должно быть снято с момента монтажа сети;

- в подземных условиях в зону монтажа электровзрывной сети необходимо включать выработки, в которых монтируется такая сеть;
- при монтаже электровзрывной сети в подземных выработках допускается не отключать находящиеся в пределах зоны монтажа осветительные электрические сети не более 42 В, вентиляторы местного проветривания и аппаратуру в исполнении РО;
- при взрывании с применением электродетонаторов выход взрывника из укрытия после взрыва разрешается не ранее, чем через 5 мин. и только после отсоединения электровзрывной сети от источника тока и замыкания ее накоротко;
- если при включении тока взрыва не произошло, взрывник обязан отсоединить от прибора (источника тока) электровзрывную сеть, концы ее замкнуть накоротко, взять с собой ключ от прибора (ящика, в котором находится взрывное устройство) и только после этого выяснить причину отказа. Выходить из укрытия в таком случае можно не ранее, чем через 10 мин., независимо от типа применяемых электродетонаторов;
- взрывные приборы (машинки) перед выдачей взрывникам должны проверяться согласно инструкциям по эксплуатации на соответствие установленным техническим характеристикам, в т.ч. на развиваемый ток, импульс тока и, на шахтах (рудниках), опасных по газу или пыли, на длительность импульса напряжения.

В табл. 3.1 приведены характеристики трех типов электродетонаторов (рис. 3.1), применяемых при взрывных работах в угольных шахтах.

Технология электрического взрывания включает следующую последовательность выполняемых работ:

- проверить и подобрать электродетонаторы по сопротивлению;
- изготовить патроны-боевики (рис. 3.2);
- подать предупредительный сигнал (*один длинный*), ввести заряды ВВ в шпуры, скважины или камеры и произвести их забойку;
- выполнить монтаж электровзрывной сети;
- проверить исправность электровзрывной сети и определить ее сопротивление;
- подать боевой сигнал (*два длинных*), подсоединить магистральные провода к источнику тока и произвести взрыв;

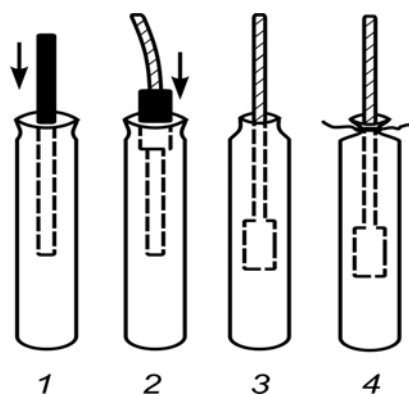


Рис. 3.2. Последовательность изготовления патрона-боевика:

1 – создание углубления под детонатор в торце патрона ВВ; 2 - установка детонатора контрольной трубки в патрон; 3 - закрытие торца патрона; 4 - завязывание торца патрона

Таблица 3.1

Типы электродетонаторов и интервалы замедлений

Электродетонаторы	Интервал замедления между сериями, мс	Замедление с максимальными отклонениями (время срабатывания), мс	Цвет окраски придонной части гильзы
ЭД-8е	-	мгновенное	не окрашивается
ЭД-8ж	-	магновенное	– // –
ЭДКЗ - ОЗ	-	4 ± 2	– // –
ЭДКЗ – 13М	15	15 ± 7	черный
ЭДКЗ - 23М	15	30 ± 7	красный
ЭДКЗ - 33М	15	45 ± 7	не окрашивается
ЭДКЗ - 43М	15	60 ± 7	зеленый
ЭДКЗ - 53М	20	80 ± 10	желтый
ЭДКЗ - 63М	20	100 ± 10	белый
ЭДКЗ - 73М	20	120 ± 10	синий
ЭДКЗ - 13	25	25 ± 7	черный
ЭДКЗ - 23	25	50 ± 7	красный
ЭДКЗ - 33	25	75 ± 110	не окрашивается
ЭДКЗ - 43	25	100 ± 10	зеленый
ЭДКЗ - 53	25	125 ± 10	желтый
ЭДЗД - 7	500	$500 \pm 50 (- 150)$	– // –
ЭДЗД - 8	250	$750 \pm 125 (- 150)$	розовый
ЭДЗД - 9	250	$1000 \pm 300 (- 75)$	оранжевый
ЭДЗД - 10	500	$1500 \pm 350 (- 150)$	голубой
ЭДЗД - 11	500	$2000 \pm 600 (- 100)$	светло-сиреневый
ЭДЗД - 12	2000	4000 ± 500	белый
ЭДЗД - 13	2000	6000 ± 600	черный
ЭДЗД - 14	2000	8000 ± 900	зеленый
ЭДЗД - 15	2000	$10000 \pm 1600 (- 800)$	фиолетовый

- после проветривания осмотреть взорванный забой; при наличии отказов ликвидировать их;
- подать сигнал отбоя (*три коротких*).

При взрывании ЭД в угольных и сланцевых шахтах принята единая схема – последовательное соединение электродетонаторов.

Достоинства схемы последовательного соединения:

- через все ЭД проходит электрический ток одинаковой величины;
- для взрыва необходим источник тока минимальной мощности;
- меньшая длина проводов, простота монтажа, легкий контроль за исправностью электровзрывной сети;
- простота расчетов электровзрывной сети.

Недостатки схемы последовательного соединения:

- опасность массового отказа в случае попадания в электровзрывную сеть дефектного ЭД;
- невозможность одновременного взрывания большого количества электродетонаторов.

Совершенствование технологии и методов контроля за безопасностью электровзрывания открыли новые возможности для развития электрического способа взрывания на открытых и подземных горных работах.

Однако развитие любой технической системы, как и электрического способа взрывания зарядов ВВ, в конце концов, приводит к необходимости создания принципиально новых элементов (как, например, система "Магнадет"), либо принципиально новой системы, физико-технические параметры которой исключили бы недостатки существующей.

Так, анализируя электрическую систему взрывания зарядов ВВ, можно выделить недостатки, характерные для разных этапов ее развития.

1. Недостатки, определяемые физико-техническими характеристиками элементов (недостатки очевидные). Этот тип недостатков лежит в основе, т.е. в способе технической реализации используемого физического эффекта. К этому типу относятся недостатки, связанные с опасностью преждевременного взрыва в результате появления в сети посторонних токов, сложностью монтажа сети, особенно при большом количестве ЭД, токсичностью продуктов взрыва ЭД.

2. Недостатки, проявляющиеся в процессе эксплуатации системы и ее элементов (недостатки скрытые). К этому типу можно отнести, например, снижение уровня безотказности действия ЭД в течение гарантийного срока хранения.

3. Недостатки потенциальные, т.е. связанные с изменением эксплуатационных требований при усовершенствовании технологического процесса в целом. От того, насколько высок физический потенциал системы, ее неэксплуатированные скрытые возможности, зависит будущее системы, связанное с эффективной ее эксплуатацией. К таким недостаткам относятся неудовлетворительные параметры, характеризующие точность интервала замедления ЭД.

4. Технологические недостатки, связанные с несоблюдением технических условий изготовления элементов системы. Установлены как скрытые дефекты ЭД (некачественный контакт мостика накаливания с вилочкой и т.д.).

Перечисленные недостатки резко снижают уровень безопасности и эффективности электрического способа взрыва.

ГосМахНИИ установлено, что отказы шпуровых зарядов ВВ в угольных и сланцевых шахтах происходят, в основном, по техническим причинам и зависят от качества изготовления основных элементов системы.

Кроме этого, уровень качества элементов определен нормативно-технической документацией, которая устанавливает допустимую вероятность появления отказа в течение года, равную 10^{-6} . А уровень эксплуатационного качества промышленных ЭД составляет $3 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, в электрической системе основным элементом, приводящим к снижению безопасности действия системы, является ЭД.

3.2. Неэлектрические способы взрыва

К *неэлектрическим способам инициирования* зарядов ВВ относится огневое взрывание, которое осуществляется с помощью огнепроводного шнура, капсюля-детонатора и зажигательного патрона. В современных неэлектрических способах взрыва передачу энергии от внешнего источника к детонаторам осуществляют с помощью световодов, а также полого пластикового шнура различных конструкций, у которых:

- внутренняя поверхность шнура покрывается тонким слоем ВВ (система

"НОНЕЛЬ" – Швеция, "Эдилин", "УНСИ", "Снежинка" – Россия, "Деталайн" – США и др.);

- внутренний объем шнура заполняется взрывчатой газовой смесью (система "Херкудет" – США); внутренние стенки покрываются горючей смесью, горящей со скоростью до 1000 м/с (система LVST – США).

3.2.1. Огневое инициирование зарядов

Огнепроводный шнур (ОШ), рис. 3.3, представляет собой спрессованную из дымного пороха и добавок пластификатора сердцевину с центральной направляющей нитью, закрытую нитяной оплеткой с гидроизоляционным слоем. Внешний диаметр шнура 5,5 мм. В соответствии с требованиями "Единых правил безопасности при взрывных работах" отрезок ОШ длиной 60 см должен сгорать за 60 – 68 с.

Основные виды ОШ: экструзионный ОШЭ в полиэтиленовой оболочке, асфальтированный ОША предназначены для сухих и влажных забоев, пластиковый ОШП – для обводненных забоев, двойной асфальтированный ОШПА предназначен для мокрых забоев.

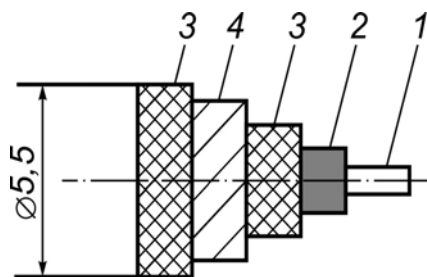


Рис. 3.3. Огнепроводный шнур:

1 – направляющая нитка; 2 – пороховой сердечник; 3 – оплетка; 4 – гидроизоляция

Капсюль-детонатор, рис. 3.4, представляет собой цилиндрическую гильзу (медную, алюминиевую или биметаллическую) диаметром 6 – 7 мм и длиной 48–51 мм, снаряженную зарядами первичного инициирующего ВВ: гремучая ртуть (0,5 г), ТНРС (0,1 г), азид свинца (0,2 г) и вторичного инициирующего ВВ – тетрила (или гексогена) массой 1 г.

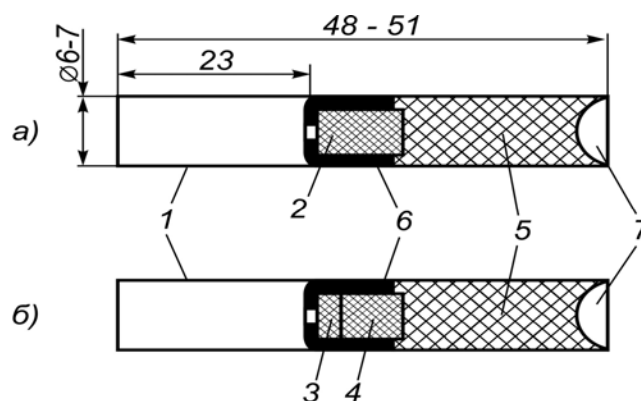


Рис. 3.4. Капсюль-детонатор гремучертутнотетриловый № 8С (а) и азидотетриловый № 8А (б): 1 – гильза; 2 – гремучая ртуть; 3 – ТНРС; 4 – азид свинца; 5 – тетрил; 6 – чашечка; 7 – кумулятивная выемка

В капсюлях-детонаторах заряд первичного инициирующего ВВ выбирается таким, чтобы вызвать детонацию во вторичном инициирующем ВВ. Заряд вторичного ВВ подбирается из условий безотказного инициирования зарядов порошкообразных промышленных ВВ. Для усиления инициирующей способности дно КД имеет кумулятивную выемку.

В настоящее время используют следующие КД: №8М в медной гильзе, №8Б в бумажной гильзе, №8С в биметаллической гильзе. Капсюли-детонаторы, снаряженные азидом свинца, немного мощнее гремучертутных, имеют высокую чувствительность к трению, удару, сжатию и огню.

Зажигательные патроны, рис. 3.5, применяют для группового взрывания зарядов ВВ путем зажигания 10–38 зажигательных трубок или отрезков ОШ. Зажигательная смесь состоит из 85% мелкозернистого пороха, 5% канифоли и 10% парафина. Длина зажигательного ОШ составляет 15–25 см.

Едиными правилами безопасности при ведении взрывных работ огневой способ взрывания в угольных и сланцевых шахтах запрещен к применению.

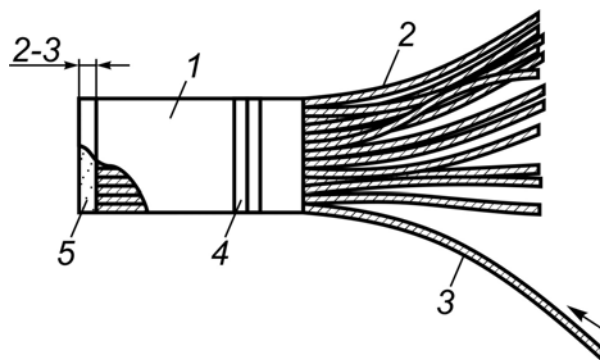


Рис. 3.5. Зажигательный патрон:

1 – гильза; 2 – зажигаемые отрезки ОШ, идущие к зарядам ВВ; 3 – поджигающий ОШ; 4 – фиксирующий шпагат; 5 – зажигательный состав (толщина слоя 2÷3 мм)

3.2.2. Система "НОНЕЛЬ"

Все современные неэлектрические системы инициирования полностью безопасны к различного рода электромагнитным наводкам и, при этом, позволяют создавать схемы взрывания зарядов с практически неограниченными возможностями управления процессами разрушения массивов горных пород.

Основным элементом системы "НОНЕЛЬ" является полый пластиковый шнур-волновод, внутренняя поверхность которого покрыта тонким слоем взрывчатой смеси. При инициировании воздушная ударная волна распространяется по каналу шнура со скоростью 2 км/с. Ударная волна передает энергию, которой достаточно для инициирования КД, закрепленного на одно из концов шнура-волновода (рис. 3.6).

Шнур "НОНЕЛЬ", выполненный в виде пластиковой трубки (внешний диаметр 3 мм, внутренний – 1,5 мм), не имеет взрывчатых свойств, он не при каких условиях не возбуждает детонацию ни в одном из ВВ, которые используются на практике. Шнур не взрывается ни от удара, ни от воздействия огня. При передаче ударной волны шнур не разрушается, выполняя роль только лишь проводника сигнала.

Шнуры серии НД имеют повышенную прочность на разрыв, износостойкость и сохраняют свою работоспособность до температур +50°C.

КД "НОНЕЛЬ" представляет собой алюминиевую гильзу, в середине которой находится чувствительное к огню первичное инициирующее ВВ, вызывающее детонацию во вторичном бризантном ВВ.

Достоинства "НОНЕЛЬ"

- безразличие к действию блуждающих токов, электростатических зарядов и электромагнитных полей в диапазоне разных частот;
- повышение продуктивности вследствие ускорения подготовки взрыва;
- снижение стоимости взрывных работ;
- высокая надежность.

Недостатки "НОНЕЛЬ"

- невозможность проверки целостности взрывной сети;
- многоэлементность.

Неэлектрическая система "НОНЕЛЬ" предназначена для открытых и подземных взрывных работ, в том числе и в условиях шахт, опасных по взрыву газа или пыли.

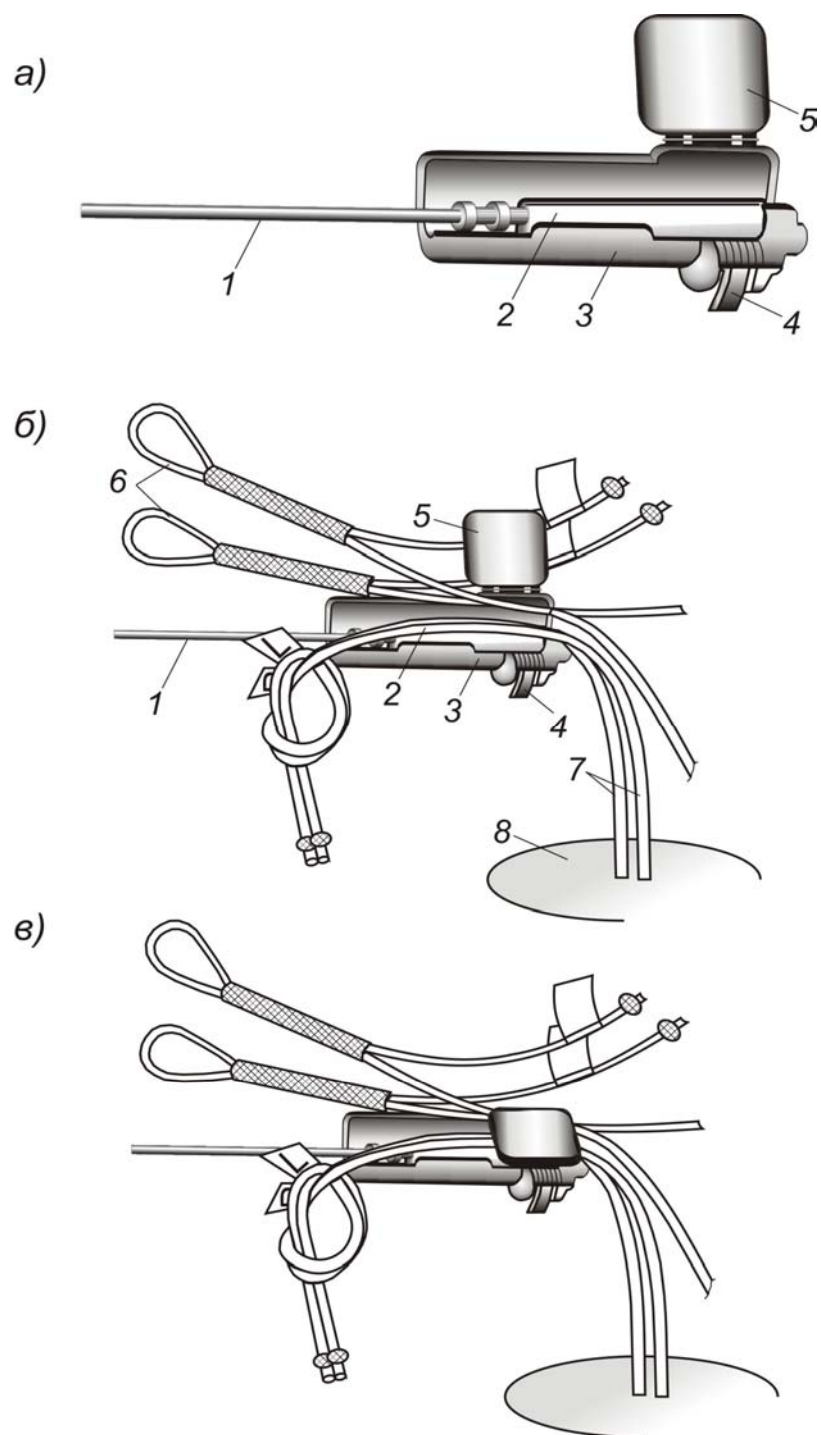


Рис. 3.6. Соединительный блок и последовательность его монтажа в системе НОНЕЛЬ:

а) – общий вид соединительного блока; б) – подключение шнуров-волноводов к соединительному блоку; в) – соединительный блок в сборе с четырьмя шнурами-волноводами; 1 – шнур-волновод; 2 – неэлектрический капсюль-детонатор; 3 – соединительный блок; 4 – заслонка; 5 – крышка; 6 – выводные шнуры для подключения к скважинным зарядам; 7 – внутрискважинный шнур "НОНЕЛЬ" для замедленного взрывания зарядов ВВ; 8 – скважина

3.2.3. Система "ОПСИН"

В системе лазерного инициирования "ОПСИН", рис. 3.7, передача энергии от лазера к оптическим детонаторам осуществляется с помощью световодов (разработка Национального горного университета) либо непосредственно через воздушную атмосферу.

Области применения новой прецизионной системы ОПСИН:

производство массовых взрывов шпуровых и скважинных зарядов, сварка, гравировка, компактирование взрывом; упрочнение изделий со сложным рельефом поверхностей; взрывные работы в стеснённых условиях городов, производственных предприятий и т.п. Получение профилированных детонационных волн (плоских, сферических, цилиндрических и др.), которые невозможно реализовать при использовании традиционных средств инициирования. Испытания конструкций корпусов ракет на предмет устойчивости к импульсному воздействию рентгеновских и ультрафиолетовых излучений боевых лазеров и т.д.

Система обеспечивает особо высокие уровни безопасности и точности управления многозарядного взрывания.

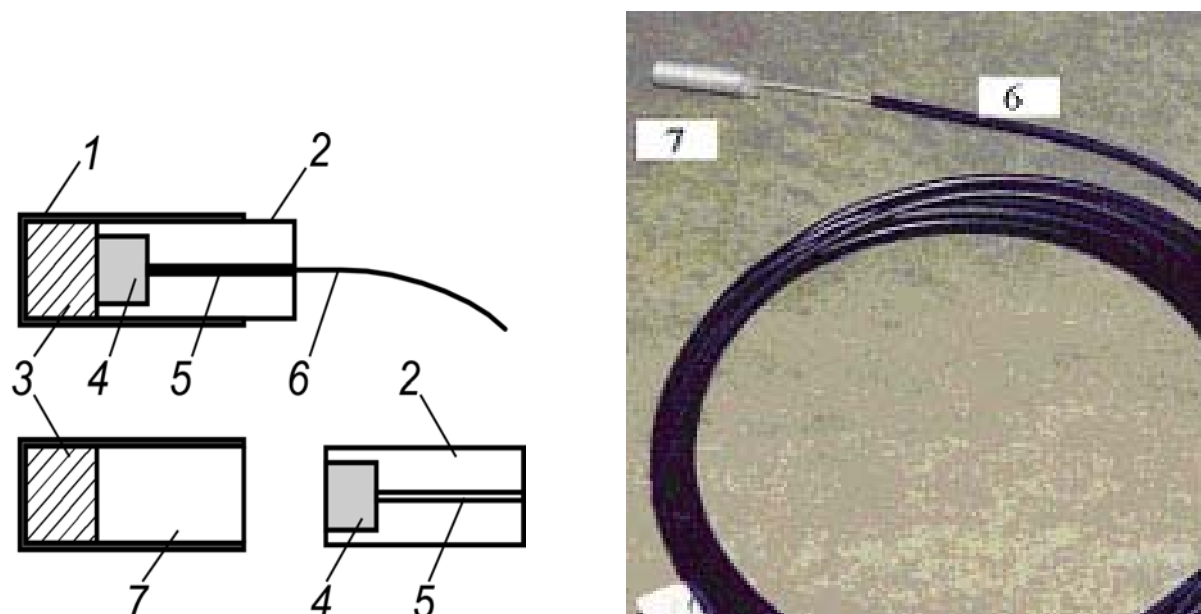


Рис. 3.7. Схема устройства оптического детонатора (ОД):

- 1 – алюминиевая трубка; 2 – втулка; 3 – вторичное инициирующее ВВ;
4 – стакан с первичным инициирующим ВВ (светочувствительное ВВ);
5 – канал для установки световода; 6 – световод; 7 – пиропатрон

Высокая безопасность обусловлена использованием специальных взрывчатых составов (ВС), высокочувствительных к воздействию характерного импульса лазерного излучения и имеющих низкую чувствительность к механическим и тепловым воздействиям.

Высокие точность управления обеспечивается за счёт:

- малого времени задержки срабатывания ВС ($\leq 10^{-6}$ сек);
- программируемого управления работой отдельных каналов лазерного устройства, обеспечивающего подачу лазерной энергии в локальные участки оптоволоконной кабельной сети;
- проверки целостности оптоволоконной сети перед взрыванием за счёт измерения уровня лазерного излучения малой мощности отраженного от поверхности высокочувствительного взрывчатого состава оптических детонаторов.

3.2.4. Система «Прима-ЭРА»

Для исключения недостатков традиционных средств инициирования ВВ Научно-исследовательским институтом высокоэнергетических материалов (НИИ ВЭМ) Государственного предприятия "Научно-производственное объединение "Павлоградский химический завод" (ГП "НПО "ПХЗ") разработана неэлектрическая система инициирования (НСИ) Прима-ЭРА.

Система Прима-ЭРА является водостойкой с повышенной безопасностью по производству и применению, предназначена для инициирования промежуточных детонаторов и патронов боевиков при ведении взрывных работ на дневной поверхности, в забоях подземных выработок (в рудниках и шахтах, не опасных по газу и пыли), при строении тоннелей, а также под водой. Позволяет создавать схемы мгновенного и замедленного взрывания с широким диапазоном интервалов замедления.

По заказу потребителя НСИ Прима-ЭРА может комплектоваться различными типами элементов: Прима-ЭРА-С соединитель (коннектор), Прима-ЭРА-Д детонатор, Прима-ЭРА-СД двойная, Прима-ЭРА-Т (Прима-ЭРА -Тм) тоннельная.

Прима-ЭРА-С соединитель (коннектор) поверхностная, представляет собой комплект, состоящий из капсуля-детонатора (КД) №6 с замедлением 0, 9, 25, 42,

67, 109 и 176 мс со стандартным интервалом замедления и волновода. Система предназначена для передачи и распределения инициирующего импульса при ведении взрывных работ на дневной поверхности, на открытых горных разработках.

Конструкция пластикового коннектора позволяет производить коммутацию до шести волноводов, а также при необходимости проводить перекоммутацию сети, выполнять работы в зимнее время и обеспечивать исключение разрушения поверхностной коммутирующей цепи.

Прима-ЭРА-Д детонатор внутрискважинная, представляет собой комплект, состоящий из КД №8 с замедлением от 0 до 400 мс с интервалом 100 мс, от 400 до 500 мс с интервалом 25 мс и волновода. Предназначена для инициирования промежуточных детонаторов и патронов-боевиков при взрывании скважинных зарядов.

Прима-ЭРА-С и Прима-ЭРА-Д предназначены для совместного использования при коммутации взрывной сети при ведении взрывных работ на дневной поверхности.

Прима-ЭРА-СД двойного действия, представляет собой комплект, состоящий из КД № 6 с замедлением аналогично Прима-ЭРА-С, оснащенного соединителем (коннектором) соответствующего цвета и КД №8 с замедлением аналогично Прима-ЭРА-Д, соединенных между собой волноводом. Конец системы с КД №8 используется внутри скважины, а конец системы с КД №6 с помощью коннектора соединяется со следующим волноводом системы для коммутации взрывной сети.

Прима-ЭРА-Т тоннельная представляет собой комплект, состоящий из КД №8 с замедлением от 100 до 400 мс с интервалом 100 мс, от 400 до 500 мс с интервалом 25 мс, от 500 до 6000 мс с интервалом 500 мс, от 6000 до 9000 мс с интервалом 1000 мс и волноводом. Система предназначена для ведения взрывных работ в подземных горных выработках не опасных по газу и пыли.

Волновод системы Прима-ЭРА предназначен для передачи детонационной волны от инициирующего устройства к капсулю-детонатору и представляет собой полую пластиковую трубку голубого, желтого или оранжевого цвета с наружным диаметром $(3,00 \pm 0,15)$ мм. На внутреннюю поверхность трубки нанесено активное вещество массой 20 мг/п. м длины, обладающее скоростью передачи импульса до 2000 м/с.

Структура волновода обеспечивает ему прочностные качества при линейных нагрузках до 120 кг. При деформации в 200% сохраняется стабильность волновода к передаче инициирующего импульса. Эта способность волновода сохраняется и в случае неоднократного его перегиба и завязывания узлом.

Возбуждение инициирующего импульса в волноводе может осуществляться от стандартных капсюлей-детонаторов типа КД №6, КД №8, электродетонаторов, детонирующих шнуров с навеской не менее 6 г/м, а также от высокоэнергетической искры мощностью не менее 5 Дж.

Для инициирования промышленных взрывчатых веществ в скважинах и шпурах применяются промежуточные детонаторы и патроны боевики, собранные с НСИ В качестве промежуточных детонаторов и патронов боевиков могут использоваться двухканальные шашки-детонаторы типа "Т", "ТГ", а также одноканальные шашки-детонаторы типа Т-400Г, патроны аммонита № 6ЖВ и патронированные эмульсионные ВВ кл.1.1.

НСИ Прима-ЭРА в отличие от применяемых традиционных средств инициирования обеспечивает повышенную безопасность. Благодаря низкой чувствительности к блуждающим токам, она позволяет производить взрывные работы без обесточивания энергетического оборудования. Преимуществами НСИ Прима-ЭРА является низкая чувствительность к механическим воздействиям, простота и надежность монтажа взрывной сети, повышенная безопасность при хранении, транспортировании и использовании.

НСИ Прима-ЭРА позволяет создавать схемы короткозамедленного взрыва зарядов с практически неограниченными возможностями управления процессами разрушения массивов горных пород, эффективно снижать сейсмическое и воздушно-ударное действие взрыва и одновременно улучшает результаты взрывных работ.

При инициировании относительно нечувствительных взрывчатых веществ, таких как эмульсионные ВВ, детонирующий шнур может способствовать нежелательному уплотнению и выжиганию взрывчатых веществ, что снижает эффективность их применения. В отличие от детонирующего шнура НСИ не разрушает и не уплотняет ЭВВ, соответственно, использование НСИ позволяет повысить эффективность их применения при ведении горных работ.

3.3. Комбинированные способы взрывания

Из известных комбинированных способов инициирования наибольшее распространение получили электроогневой и способ взрывания с помощью детонирующих шнуров (ДШ).

3.3.1. Электроогневое взрывание

Электроогневое инициирование применяют вместо огневого способа в том случае, когда своевременный отход взрывников в укрытие затруднен по каким-либо причинам.

Поджигание отрезков ОШ осуществляется взрывником из безопасного места подачи электрического тока в электрозажигательное устройство, закрепленное на конце ОШ.

Электрозажигательный патрон ЭЗ-ОШ-Б (рис. 3.8,а) состоит из бумажной гильзы с воспламенительной смесью и электрозажигателя.

Электрозажигательный патрон ЭЗП-Б (рис. 3.8,б) предназначен для зажигания нескольких отрезков ОШ в сухих и увлажненных условиях. Отрезки ОШ вводят в патрон и закрепляют путем обжима резиновым кольцом на гильзе патрона.

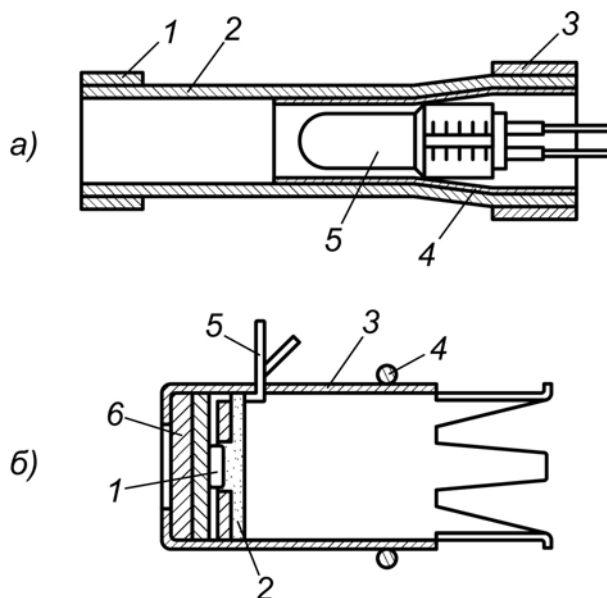


Рис. 3.8. Конструкции электрозажигательных патронов:

- а – патрон ЭЗ-ОШ-Б:** 1, 3 – обжимные металлические втулки;
2 – бумажная (металлическая) гильза; 4 – бумажная втулка; 5 – электровоспламенитель;
б – патрон ЭЗП-Б: 1 – электровоспламенитель; 2 – зажигательный состав;
3 – бумажная гильза с вырезами; 4 – резиновое кольцо; 5 – выводные провода;
6 – вставное дно гильзы

Во время использования электрозажигательных патронов концы огнепроводных шнуров следует подрезать для создания необходимых интервалов между взрывающимися зарядами. Минимальная длина ОШ должна быть не менее 25 см.

Электроогневое взрывание должно проводиться с учетом соответствующих требований Единых правил безопасности при взрывных работах (п. 9.1).

Электроогневому взрыванию шпуровых зарядов присущи те же недостатки, что и огневому взрыванию.

3.3.2. Взрывание с помощью детонирующего шнура (ДШ)

ДШ предназначен для передачи детонации от КД или ЭД к заряду ВВ и от заряда к заряду на требуемые расстояния.

На рис. 3.9 показаны элементы ДШ. Сердцевину ДШ изготавливают из ТЭНа с направляющими нитками или без них и покрывают оплетками из льняных и хлопковых ниток. Для повышения водостойкости внешние оплетки шнура покрывают воском или озокеритом. Шнур для подводного взрывания дополнительно покрывают полихлорвиниловой оболочкой.

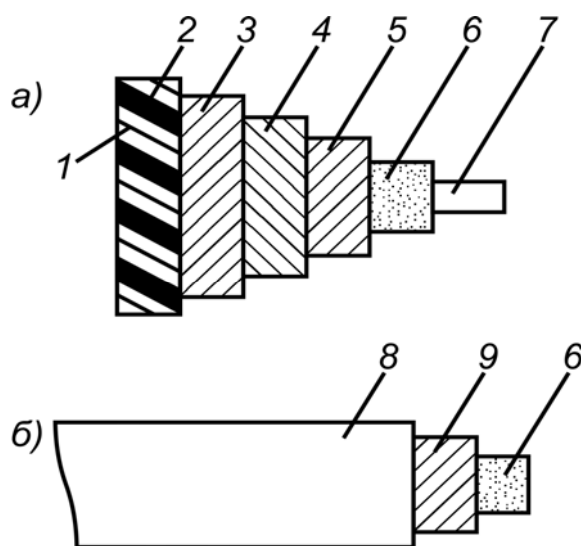


Рис. 3.9. Детонирующие шнуры ДША (а) и ДШВ (б):

1 – внешняя оплетка с двумя красными нитями; 2, 3, 4 – льняные оплетки;
5 – хлопковая оплетка; 6 – ТЭН; 7 – направляющая нить; 8 – полиэтиленовая оболочка;
9 – армирующие капроновые нити

Все шнуры устойчиво детонируют от КД или ЭД до температуры +55°С, а при охлаждении в течение 2 часов – до температуры –35°С.

Для создания необходимых замедлений между взрываемыми зарядами используют пиротехнические замедлители детонирующего шнура – КЗДШ-69, предусматривающие замедления в 10, 20, 35, 50, 75 та 100 мс.

Замедлитель КЗДШ-69 для создания необходимых замедлений включают в разрыв нитки ДШ. *Следует помнить, что детонацию замедлитель передает только в одном направлении, которое стрелкой показано на его корпусе.*

В России начат выпуск замедлителей РП-8 двухстороннего типа с двумя детонаторами и замедлителями, развернутыми на 180°. Замедлитель удобно монтировать в разрыв сети ДШ с помощью полиэтиленовых зажимов, предусмотренных в конструкции РП-8.

Из опыта взрывных работ, которые проводились в России, США, Швеции, Испании и других стран, детонирующие шнуры успешно применяются в условиях:

- потенциальной опасности возникновения блуждающих токов;
- одновременного инициирования групп зарядов ВВ без существенных замедлений в срабатывании отдельных зарядов;
- многорядного или многоярусного инициирования зарядов ВВ в глубоких скважинах большого диаметра;
- дублирования электрической системы инициирования в тяжелых условиях – в глубоких дорогих скважинах, пробуренных по трещиноватым породам;
- инициирования зарядов ВВ во время вторичного взрывания негабаритных кусков в рудоспусках и т.д.

Технология взрывания с помощью ДШ

Для взрывания с помощью ДШ необходимо:

- разрезать шнур на отрезки для изготовления патронов-боевиков;
- изготовить патроны-боевики;
- подать предупредительный сигнал, выполнить зарядание и забойку зарядов;
- выполнить монтаж сети ДШ;

- подать боевой сигнал, присоединить ко магистрали КЗДШ (РП-8), КД или ЕД и произвести взрыв;
- после взрыва осмотреть забой;
- при наличии отказов ликвидировать их и подать сигнал отбоя.

Отрезки ДШ между собой соединяют внакладку или внакрутку на длине не менее 100 мм, рис. 3.10. Шнуры закрепляют изоляционной лентой, шпагатом или скотчем. Наиболее надежным способом наращивания ДШ является их связывание морским узлом или петлей.

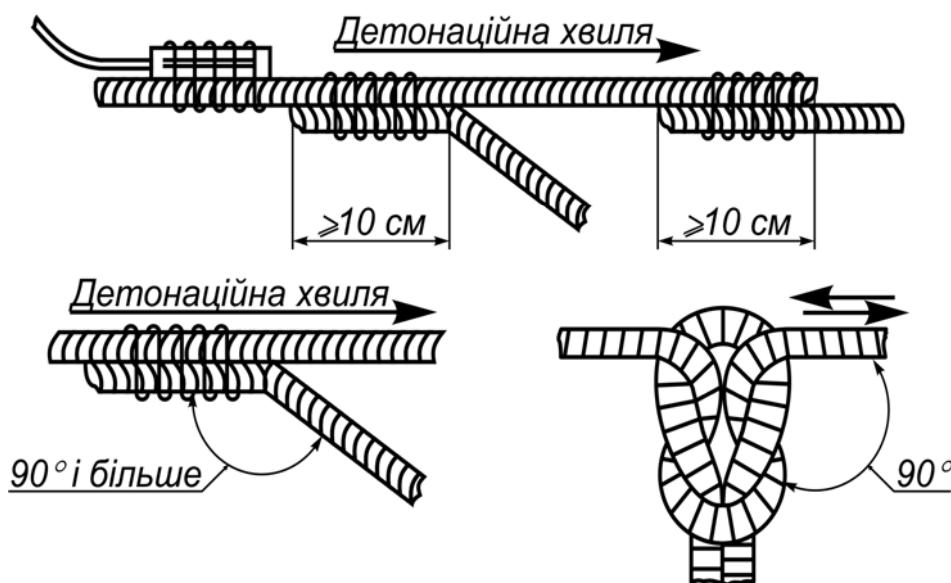


Рис. 3.10. Основные способы соединения ДШ при монтаже взрывной сети

Для более высокой надежности применяют дублирование ниток ДШ. При этом дублирующие и основные сети инициируют одним детонатором.

Достоинства взрывания с помощью ДШ:

- минимальная опасность выполнения заряжания и особенно ликвидации отказов и простота их выполнения.

Недостатки взрывания с помощью ДШ:

- отсутствие приборного контроля исправности сети перед взрывом и высокая стоимость ДШ.

В табл. 3.2 представлены неэлектрические средства инициирования зарядов ВВ и электрозажигательные устройства, применяемые на открытых и подземных горных работах в шахтах и рудниках не опасных по взрыву газа и пыли.

Неэлектрические средства инициирования зарядов ВВ

№ п.п.	Наименование средства инициирования	Тип	Примечания
1	Детонирующий шнур	ДШ-А	В нитяной оболочке, асфальтированный
2	Детонирующий шнур	ДШЭ-12	Оболочка из композиции полиэтилена
3	Реле пиротехническое	РП-92-0	
4	Капсюль-детонатор	КД-8С	
5	Детонатор электро-огневой	ДЭО	Интервал замедления 5...60 с
6	Детонатор огневого действия	ДОД	Интервал замедления 100...300 с
7	Электрозажигатель огнепроводного шнура	ЭЗ-ОШ-М	
8	Зажигательный патрон огнепроводного шнура	ЭП-Б	
9	Огнепроводный шнур	ОША	Асфальтированный (с 1996 г. заменяет ОШП) в пластмассовой оболочке

Вопросы для самоконтроля знаний

1. В чем состоит принцип работы способа взрывания зарядов ВВ с помощью электродетонаторов?
2. По каким параметрам различают электродетонаторы?
3. Что такое гарантийный ток?
4. Основные требования, предъявляемые ЕПБ при взрывании с применением электродетонаторов.
5. Устройство электродетонатора мгновенного действия.
6. Устройство электродетонатора короткозамедленного действия.
7. Устройство электродетонатора замедленного действия.
8. Технология электрического способа взрывания.
9. Последовательность операций при изготовлении патрона-боевика.
10. Перечислите достоинства электрического способа взрывания.
11. Перечислите недостатки электрического способа взрывания.
12. Способ огневого инициирования зарядов ВВ. Приведите характеристику основных элементов этого способа.
13. Устройство капсюля-детонатора.
14. Устройство огнепроводного шнура.
15. Устройство зажигательного патрона.
16. Основные параметры системы "НОНЕЛЬ".
17. Достоинства и недостатки системы "НОНЕЛЬ".
18. В чем суть электроогневого взрывания зарядов ВВ?
19. Устройство электрозажигательного патрона.
20. Строение детонирующего шнура.
21. Основные схемы соединения ДШ.
22. Достоинства и недостатки взрывания с помощью ДШ.

Список рекомендуемой литературы

1. Лурье А.И. Электрическое взрывание зарядов. – М.: Недра, 1973. – 267 с.
2. Барон В.Л., Кантор В.Х. Техника и технология взрывных работ в США. – М.: Недра, 1989. – 376 с.
3. Хайт А. Взрывные работы на шахтах Англии. – М.: Углетехиздат, 1956. – 232 с.
4. Густафссон Р. Шведская техника взрывных работ. – М.: Недра, 1977. – 264 с.
5. Штетбахер А. Порох и взрывчатые вещества. – М.: Оборонгиз, 1957. – 214 с.
6. Граевский М.М. Справочник по электрическому взрыванию зарядов. – М.: Недра, 1983. – 254 с.
7. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1988. – 358 с.
8. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. – М.: МГИ, 1992. – 516 с.
6. Единые правила безопасности при взрывных работах. – К.: Норматив, 1992. – 171 с.
7. Соболев В.В., Усик І.І., Терещук Р.М. Технологія та безпека виконання вибухових робіт. Практикум: Навч. посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 114 с.
8. Соболев В.В., Мандрікевич В.М., Орел М.В., Шломіна Л.С. Українсько-російсько-англійський термінологічний словник з гірничовибухової справи. – Д.: Національний гірничий університет, 2004. – 245 с.

4. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ВВ

До середины XIX века в шахтах и рудниках черный порох использовался до тех пор, пока не появились основные компоненты современных промышленных ВВ. Когда в угольных шахтах стали применять динамиты (динамит изобретен А. Нобелем в 1867 г.), то с самого начала стало ясно, что динамиты по сравнению с черным порохом являются более безопасными ВВ. Однако последующий опыт использования динамита показывал, что и это ВВ может воспламенять пыле- и метано-воздушные смеси. Было установлено, что для воспламенения метано-воздушной смеси (МВС) в ней достаточно взорвать 1 г. черного пороха или несколько грамм динамита.

В связи с ростом аварий в угольных шахтах, вызванных воспламенением и взрывом МВС и пылевоздушных смесей (ПВС) при использовании ВВ, в некоторых странах были созданы специальные комиссии, с целью изучения причин воспламенения шахтного воздуха и разработки мер и способов борьбы с этим явлением.

Качественные представления о механизме теплового ускорения химических реакций в условиях возникновения взрыва были созданы Вант-Гоффом в 1884 г. Примерно в эти же годы Малляр и Ле-Шателье изучали процесс воспламенения смесей некоторых горючих газов с воздухом. При проведении исследований ими было открыто явление задержки воспламенения, наиболее характерное для МВС. Благодаря этому открытию удалось научно обосновать возможность применения ВВ в шахтах, опасных по взрыву газа или пыли.

Малляр и Ле-Шателье предположили, что действие взрыва заряда ВВ на МВС прежде всего зависит от температуры продуктов взрыва. Они утверждали: МВС будет воспламеняться всегда, если температура продуктов взрыва (ПВ) превысит 2200°C , и не будет воспламеняться, если температура ПВ будет меньше *температуры вспышки* – 650°C . При температурах ПВ, соответствующих значениям величин, лежащих в диапазоне от 2200 до 650°C , воспламенение может произойти или не произойти в зависимости от того, успеют ли ПВ охладиться ниже температуры вспышки за время, меньшее, чем время задержки вспышки, соответствующее данной температуре. Изложенные соображения явились основой первой антигризутной (термической) гипотезы.

Французская антигризутная комиссия на основании результатов работ Малляра и Ле-Шателье приняла решение, что ВВ, используемые при взрывных работах по породе, должны иметь температуру взрыва не более 1900°C , а при взрывных работах в угольных забоях – не более 1500°C .

На практике, однако, взрывы МВС происходили, если температура ПВ превышала минимальную температуру воспламенения МВС – 650°C . Оказалось, что взрывы МВС могут быть вызваны в случае увеличения массы ВВ (с увеличением массы заряда медленнее охлаждаются ПВ, увеличивается время воздействия высокой температуры на газовую смесь). Появилось понятие *предельного заряда*, превышение массы которого вызывает воспламенение газовой смеси. Поскольку расчетные методы предельной массы заряда ВВ не существовали, во многих странах было решено проводить оценки в опытных штреках, воспроизводя наиболее опасные условия, которые могут иметь место при взрывных работах в угольных шахтах.

Накопленный экспериментальный материал, разработанная академиком Н.Н. Семеновым теория теплового самовоспламенения, представления о цепных реакциях и опыт ведения взрывных работ в целом, стали основанием для разработки нового механизма воспламенения МВС. В частности, предполагалось, что основными источниками воспламенения МВС могут быть ударная волна, горящие или нагретые до высокой температуры частицы, высокотемпературные газообразные продукты взрыва.

Французский исследователь Е. Одибер, проводя эксперименты по воспламенению МВС, установил, что при свободном падении частиц песка, нагретых до $900\text{--}1100^{\circ}\text{C}$, в МВС наблюдалось воспламенение. В связи с полученными результатами, Е. Одибер предположил, что воспламенение вызывается твердыми нагретыми частицами. Эта гипотеза была развита К. Бейлингом, который проводил исследования и в опытной шахте. Он предложил рассматривать четыре фактора: ударную волну, волну сжатия, газообразные продукты взрыва и твердые частицы. Неубедительность приведенных им доказательств в пользу механизма воспламенения горящими частицами, вероятно, явилась причиной, из-за которой представления Бейлинга не только не получили широкой поддержки, но и вызывают до сих пор ряд серьезных сомнений.

Вклад в развитие представлений о механизме воспламенения МВС сделал Е. Одибер, предположив, что воспламенение зависит от общей энергии ПВ, ли-

бо от удельной энергии, приходящейся на один моль газообразных продуктов взрыва. Механизм процесса воспламенения МВС следующий. При взрыве заряда ВВ продукты взрыва, имеющие высокую температуру, смешиваются с МВС (поэтому механизм иногда называют "механизмом воспламенения путем смешения"). Если в процессе разбавления ПВ метано-воздушной смесью будет достигнута температура вспышки, то произойдет воспламенение МВС. Одибер показал также, что ВВ с положительным или отрицательным кислородным балансом являются опасными в отношении воспламенения метана. Наименьшую опасность представляют ВВ с нулевым кислородным балансом. По мере накопления опыта все больше возникало оснований для возражения против "механизма смешения".

Ф.М. Галаджий и Б.И. Вайнштейн (ГосМакНИИ) утверждали, что воспламенение взрывчатой газовой смеси при сжатии ее в ударной волне более вероятно, чем смешение МВС с быстро остывающими ПВ. Это утверждение основано на экспериментальных результатах.

Известно, что смесь CH_4 с воздухом дает наиболее сильный взрыв при содержании в ней метана 9,46% и воздуха 90,54% по объему. Взрывная реакция идет без изменения объема газов. Теплота взрыва ($Q_{\text{взр}}$), приходящаяся на 1 кмоль МВС составляет 18090 ккал, а на 1 м^3 – 806 ккал (как и при взрыве 1 кг аммонита ПЖВ-20). При большем содержании метана или кислорода взрыв будет слабее, поскольку избыточный компонент, не участвуя в химической реакции взрыва, поглощает часть теплоты взрыва на собственное нагревание. Пределы содержания метана, за которыми смесь его с воздухом перестает гореть и взрываться, зависят от давления – чем оно больше, тем шире эти пределы, табл. 4.1.

Таблица 4.1

Взрывоопасные пределы содержания метана в МВС

Давление, атм	Пределы содержания метана, %
1	4,5 – 14,2
60	4 – 52,9
более 100	2 – 75

Взрывоопасность характеризуется температурой вспышки ($T_{\text{всп}}$) и задержкой вспышки ($\tau_{\text{всп}}$).

На чувствительность МВС к нагреванию влияют примеси некоторых газов и распыленных твердых веществ. Известно, например, что повышают чувствительность к нагреванию CO, NO₂, O₂, а уменьшают – CO₂, N₂, NaCl, KCl.

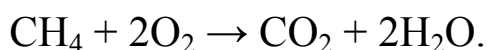
Вспышка МВС происходит с некоторым замедлением, зависящем от температуры нагревания. Величина замедления (*период индукции*) с повышением температуры уменьшается, табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Задержка вспышки в зависимости от температуры

Температура нагревания МВС, °С	Задержка вспышки
650 (минимальная температура воспламенения метано-воздушной смеси)	через 10 секунд происходит взрыв
750	через 1,8 секунды происходит взрыв
800	через 0,5 секунды происходит взрыв
2000	взрыв происходит практически мгновенно

Действие солей (NaCl, KCl) как отрицательных катализаторов объясняется тем, что реакции окисления CH₄ до CO₂ и H₂O являются цепными и цепи обрываются на поверхности частиц указанных солей.



Цепная реакция – химическая реакция, в каждом элементарном акте которой появляется по крайней мере одна активная частица, что вызывает цепи превращений.

Цепи превращений – последовательность химических реакций, в которых продукты предыдущих стадий являются реагентами для последующих.

Для понижения Q_{ВЗР} и T_{ВЗР} взрывчатых веществ, содержащих большое количество аммиачной селитры, используют добавки инертных солей NaCl и KCl. Например, добавки 20% NaCl снижают Q_{ВЗР} и T_{ВЗР} на 25–30%.

NaCl и KCl являются не только отрицательными катализаторами (см. табл. 4.3), но и пламегасителями.

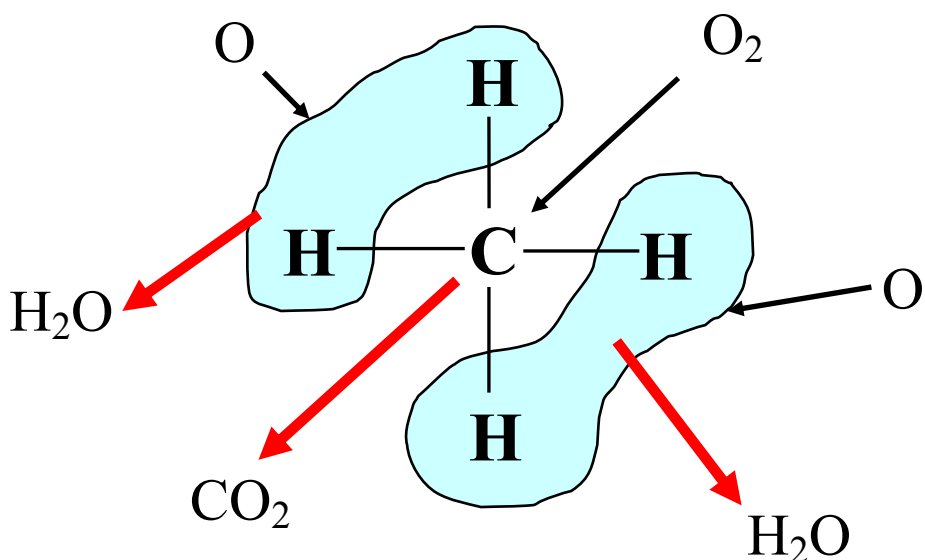


Рис. 4.1. Схема взаимодействия кислорода воздуха с молекулой метана

Таблица 4.3

*Период индукции
в зависимости от типа отрицательного катализатора*

Отрицательный катализатор	Период индукции, с	
	750°C	800°C
NaCl	3,2	0,6
KF	7,1	0,92
KCl	—	5,6

Некоторые главные факторы, влияние которых на зажигание МВС наиболее заметно:

- воздушная ударная волна;
- раскаленные или горящие твердые частицы;
- горячие газообразные ПВ.

Существующие гипотезы учитывают именно эти факторы, но даже и в этом случае они позволяют делать меньше ошибок при подборе предохранительных ВВ и условий взрыва.

Основные требования, предъявляемые ко всем предохранительным ВВ, являются обязательными и для высокопредохранительных составов. Эти требования сводятся к следующему:

- иметь небольшую теплоту и температуру взрыва;

- иметь небольшую работоспособность – порядка 200–240 см³ при взрывании по углю, а в особо опасных забоях – 170 см³; 240–300 см³ – при взрывании по породе;
- энергия взрыва должны быть ограничена;
- ВВ должны хорошо детонировать;
- иметь кислородный баланс, близкий к нулю;
- в состав ВВ целесообразно вводить инертные вещества, обладающие в то же время отрицательными каталитическими свойствами относительно реакции окисления метана;
- не должны содержать посторонних включений (металлических и др.), способных гореть в воздухе с развитием высокой температуры.

Отвечая этим требованиям, предохранительные ВВ имеют свои, присущие только им особенности, благодаря которым они обеспечивают высокую степень безопасности при взрывных работах. Современные предохранительные ВВ, безопасные с точки зрения воспламенения МВС, можно считать безопасными и в отношении воспламенения пылевоздушной смеси.

4.1. Особенности взаимодействия ингибиторов с продуктами детонации предохранительных ВВ (по данным работ Калякина С.А., Шевцова Н.Р. и др.)

По оценкам специалистов до 25% от количества случаев воспламенения МВС или ПВС в опасных выработках шахт являются взрывные работы. Анализ взрывов в шахтах показывает (опыт Украины и России), что главными причинами являются выгорание зарядов (~25%) и их обнажение (~25%), далее идут трещины в массиве пород (~20%), отсутствие или недостаточность забойки (~12%), низкая водоустойчивость зарядов.

Таким образом, почти 50% аварий связаны с применением ВВ, которые не соответствуют указанному классу предохранительности и воспламеняют газ в результате обнажения заряда, при наличии трещин в массиве пород и отсутствии забойки. Существующий ассортимент предохранительных ВВ имеет ряд недостатков. Например, предохранительные аммониты способны к выгоранию, слеживаемости, они обладают малой водоустойчивостью, высокой чувстви-

тельностью к уплотнению и т.д. ВВ, содержащие нитроэфиры, имеют сложный состав, содержат токсичные соединения, обладают высокой чувствительностью к механическим воздействиям, имеют высокую стоимость.

В настоящее время предохранительные ВВ еще не могут быть признаны абсолютно безопасными для ведения взрывных работ во взрывоопасной атмосфере шахт. Поэтому необходимо их дальнейшее совершенствование в направлении повышения антигризутности, т.е. увеличения массы предельного заряда в МВС. Решение этого вопроса является важной задачей, имеющей большое научное и практическое значение для повышения техники безопасности и охраны труда.

Наиболее перспективным направлением повышения уровня предохранительных свойств ВВ является применение в их составе химически активных солей-ингибиторов реакции окисления метана кислородом воздуха. В результате торможения этой реакции ингибитором, который находится в составе предохранительного ВВ, удастся обеспечить предупреждение взрывов МВС при взрывных работах. Однако было установлено, что соли-ингибиторы, введенные непосредственно в состав предохранительных ВВ, в оболочку заряда или забойку, могут под действием взрыва терять свойства отрицательных катализаторов (ингибиторов), что является аномальным явлением, которое ранее не было известно. Это явление характеризуется тем, что в течение определенного времени под действием продуктов детонации ВВ соли-ингибиторы становятся не способными тормозить реакцию окисления метана, в результате чего происходит воспламенение МВС [9]. Считается, что ответственным за каталитическое ингибирующее действие соли является образующий ее металл. Ионы металла на поверхности кристалла соли сначала захватывают или адсорбируют радикал, а затем происходит его рекомбинация с другими радикалами. В результате рекомбинации на поверхности соли-ингибитора радикалы выводятся из зоны реакции, и скорость реакции окисления метана резко тормозится вплоть до полного прекращения реакции.

Однако, как показали исследования по изучению предохранительных свойств ПВВ в МВС [9], ингибирующая активность соли существенно зависит от времени контакта ингибитора со взрывоопасной МВС. Было установлено, что существует интервал времени, в течение которого ингибитор оказывается не способным затормозить реакцию окисления метана. Этот интервал времени, в течение которого у

ингибитора существует дереккомбинационный эффект, соответствует интервалу времени, когда кристаллы соли-ингибитора находятся непосредственно в зоне действия на них сильной детонационной или ударной волны.

В табл. 4.4 приведены результаты расчетов давления динамического сжатия кристаллов соли-ингибитора во фронте детонационной волны предохранительных ВВ. В табл. 4.5 приведены результаты расчета давления ударного сжатия ингибитора при детонации ВВ и приращения энергии кристаллами соли, равное работе их сжатия. Эти величины были сопоставлены со значениями масс предельных зарядов предохранительных ВВ IV-VII классов, которые характеризуют уровень их предохранительных свойств.

Результаты, приведенные в табл. 4.4 и 4.5 показывают, что сжатие вещества ингибитора при детонации ВВ происходит под действием возникающей в нем ударной волны. Величина давления, возникающая в кристаллах соли, оказывает существенное влияние на уровень предохранительных свойств ВВ, т. к. кристаллы соли-ингибитора под действием высокого давления становятся не способными тормозить цепные реакции окисления метана кислородом воздуха.

Необходимо отметить, что величина затраты энергии детонации ВВ на сжатие кристаллов соли-ингибитора не оказывает существенного влияния на уровень предохранительных свойств ВВ. Для угленита Э-6 и ионита различие в таких затратах энергии не превышает 10%, тогда как уровень их предохранительных свойств отличается существенно – величина предельного заряда ионита в 10 раз больше, чем у угленита.

4.2. Перспективы развития предохранительных ВВ (Ю.М. Михайлов и др.)

Существующий ассортимент предохранительных ВВ имеет ряд недостатков. У предохранительных аммонитов основными из них являются выгорание, слеживаемость, малая водоустойчивость, высокая чувствительность к уплотнению и т.д. Нитроэфирсодержащие ВВ имеют высокую чувствительность к механическим воздействиям, токсичные компоненты, сложный состав и высокую стоимость.

Попытки создания новых предохранительных ВВ устойчивых к выгоранию, с повышенной детонационной способностью при групповом взрывании, с

пониженной чувствительностью к механическим воздействиям, с хорошей водоустойчивостью, меньшей токсичностью компонентов и продуктов взрыва, не привели к положительным результатам.

Таблица 4.4

Давление динамического сжатия кристаллов соли-ингибитора во фронте детонационной волны

ВВ (класс)	Параметры ВВ и детонационного фронта			Параметры ударного сжатия соли-ингибитора	
	плотность ВВ, $\rho_{ВВ}$, кг/м ³	скорость детонации ВВ, D, м/с	давление во фронте детонационной волны, P_m , ГПа	массовая скорость вещества за фронтом ударной волны, u_u , м/с	давление во фронте ударной волны, P_u , ГПа
Аммонит Т-19 (IV)	1050,0	4164,0	5,58	795,67	7,681
Углениты:					
Э-6 (V)	1220	2224	1,98	357,52	2,990
13П (V)	1220	2350	2,1804	385,49	3,256
НИИТ-2 (V)	1200	2080	1,675	312,33	2,5705
12ЦБ (VI)	1350	1927	1,55	288,1	2,350
Н-12 (VI)	1250	1911	1,51	286,46	2,336
12П (VI)	1250	1948,9	1,348	256,71	2,07066
10П (VI)	1250	1985,0	1,589	297,88	2,439
Ионит (VII)	1170	1676,0	1,02	206,5	1,635

Таблица 4.5

Давление ударного сжатия соли-ингибитора во фронте детонации ВВ и приращение энергии ее кристаллов в результате их сжатия

ВВ (класс)	Параметры ударного сжатия соли-ингибитора во фронте детонации ПВВ				Приращение энергии, ΔE , кДж/кг	Масса предельного заряда, кг
	ρ_1/ρ_0	$\Delta\rho$, кг/м ³	P_1 , уравнение (9), ГПа	P_u , уравнение (16), ГПа		
Аммонит Т-19 (IV)	1,21603	464,46	7,713	7,681	8268,7	0,010
Углениты:						
Э-6 (V)	1,10243	220,22	3,03	2,99	6788,7	0,125-0,150
12ЦБ (VI)	1,0833	179,14	2,388	2,35	6559,1	0,60-0,65
ионит (VII)	1,06043	129,92	1,666	1,635	6292,3	1,20-1,40

С появлением в промышленности нового поколения эмульсионных взрывчатых веществ возникла реальная возможность создания на их основе новых предохранительных ВВ, которые сочетают в себе безопасные свойства и требуемые детонационные характеристики. Тонкодисперсная структура этих ВВ при наличии воды, имеющих теплоту взрыва в пределах 700 ккал/кг и высокую детонационную способность без использования индивидуальных взрывчатых веществ, позволили российским ученым создать промышленные ВВ III–V классов, табл. 4.6.

Физико-химические параметры и взрывчатые свойства порэммитов соответствуют не только техническим требованиям горнодобывающей отрасли, но и лучшим мировым образцам, табл. 4.7.

Преимущества предохранительных порэммитов в сравнении с патронированными штатными предохранительными ВВ:

- высокая безопасность по отношению к механическим и тепловым воздействиям (удару, трению, прострелу пуль, огню и т.п.);
- низкая способность к горению или отсутствие к выгоранию;
- высокая чувствительность к инициированию стандартным КД;
- отсутствие пыления, электризации, эксудации и контакта с токсичными продуктами;
- сохранение взрывчатых характеристик в интервале плотностей от 0,5 до 1,5 г/см³;
- высокая водостойчивость, сохраняющаяся в воде на большой глубине и в проточной воде;
- обеспечивают при взрыве выделение газов низкой токсичности;
- дешевые в изготовлении; высокая технико-экономическая эффективность применения.

Таблица 4.6

*Характеристики патронов эмульсионных ВВ
(по Ю. Михайлову и др.)*

ВВ	Марка	Класс	Диаметр патрона, мм	Масса патрона, кг	Водоустойчивость, сутки	Плотность патрона, г/см ³
Порэммит	ПП-IV-I	III и IV	36	0,3	Более 14	1,10–1,20
	ПГ-IV-I	IV	36	0,3	Более 14	1,10–1,20
Монозаряд порэммита	МППИ-IV	IV и V	36	0,4 и 0,7	Более 14	1,10–1,20

Таблица 4.7

Некоторые взрывчатые свойства предохранительных патронированных эмульсионных ВВ (по Ю. Михайлову и др.)

ВВ	Температура взрыва, °С	Теплота взрыва, ккал/кг	Работоспособность относит TNT	Чувствительность к удару, %	Скорость детонации, км/с	Устойчивость против выгорания, г
Порэммит ПП-IV-I	1800	600	0,93–0,97	0	3,2–3,5	Более 2-х
Порэммит ПГ-IV-I	1870	720	0,95–0,98	0	3,6–4,2	Более 2-х
Монозаряд порэмита	1780	590	0,90–0,93	0	3,0–4,0	Более 2-х

4.3. Методы испытания предохранительных ВВ

4.3.1. Испытание на безопасность действия взрыва в метано-воздушной среде

На безопасность по метану предохранительные ВВ испытывают в опытных штреках, рис. 4.2. Опытный штрек представляет собой стальную трубу диаметром 1,5–1,8 м и длиной 15–25 м. С одной стороны труба открыта, а с другой – имеет стальное днище с отверстием диаметром 400 мм для мортиры. Во внутренней полости опытного штрека устанавливается бумажная диафрагма, разделяющая штрек на две камеры. Объем камеры от днища до диафрагмы (10 м^3) называют взрывной камерой, в которой перед испытанием ВВ создается метано-воздушная атмосфера взрывоопасной концентрации ($\sim 10\%$ метана по объему). Равномерное распределение компонентов смеси осуществляют с помощью лопастной мешалки. Концентрацию газа во взрывной камере измеряют электрическим газоанализатором.

Мортира представляет собой стальной цилиндр длиной 1200 мм и диаметром 550 мм с несквозным каналом диаметром 55 мм и глубиной 900 мм. В канал мортиры устанавливается заряд предохранительного ВВ массой 600 г, забойка производится глиной (50 г), толщина слоя забойки 10 мм. Заряд ВВ взрывают электродетонатором.

Взрывчатое вещество считается предохранительным, если при 10-ти кратном исполнении взрыв МВС не произойдет ни разу. Испытывают предохранительные ВВ III и IV классов. ВВ V класса испытывают внутри загазован-

ной камеры, взрывая патрон массой 200 г. ВВ VI класса испытывают внутри за-
газованной камеры, взрывая заряд, уложенный между ребрами уголкового мор-
тиры, рис. 4.3, при этом устанавливают максимальную массу ВВ, не вызываю-
щую взрыва МВС.

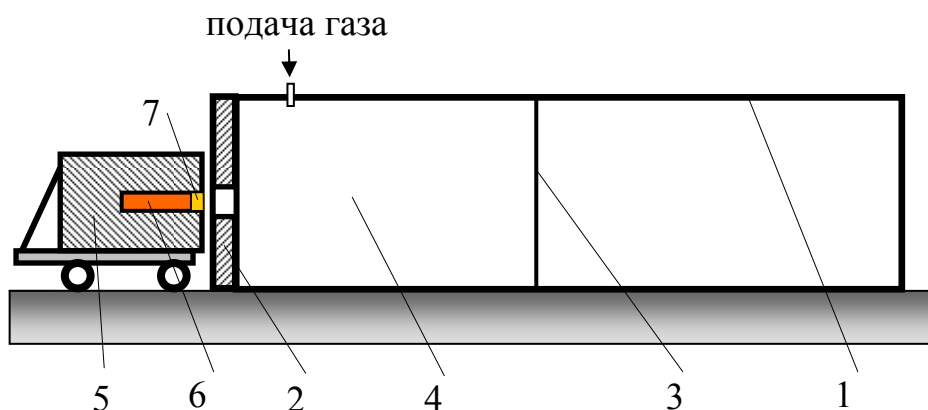
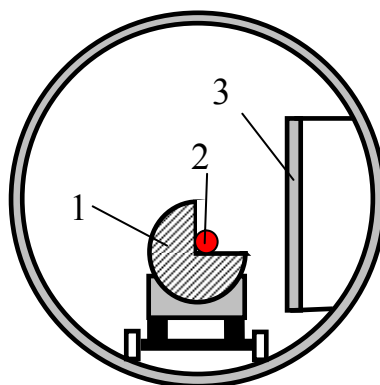


Рис. 4.2. Схема опытного штрека:

1 – стальная труба; 2 – дно штрека с отверстием; 3 – диафрагма;
4 – взрывная камера (10 м^3); 5 – мортيرا; 6 – заряд ВВ; 7 – глиняная забойка



**Рис. 4.3. Схема уголкового мортиры
с отражательной стенкой в опытном штреке:**

1 – уголкового мортиры; 2 – заряд ВВ; 3 – отражательная стенка

Уголкового мортиры представляет собой стальной цилиндр диаметром 230 мм и длиной 2000 мм с продольным пазом глубиной 90–100 мм. Отража-
тельная стенка выполняется из стального листа размером 1х2 м. ВВ VI класса

считаются выдержавшими испытания, если заряд массой 1 кг не воспламеняет метано-воздушную смесь в 10 последовательных опытах на расстоянии уголко-вой мортиры от отражательной стенки 20 см.

4.3.2. *Испытание на безопасность действия взрыва в пылевоздушной среде*

Для создания взрывоопасной взвеси угольной пыли ($400\text{--}600\text{ г/м}^3$) в опытном штреке на расстоянии 8–11 м от днища под углом 20° к горизонтальной оси штрека устанавливается пылераспылительная мортира, рис. 4.4, на дно которой помещают заряд ВВ массой 50 г с электродетонатором мгновенного действия. Сверху заряд ВВ покрывают угольной пылью массой 6 кг. Угольную пыль распыляют за 2–10 с до взрыва основного испытываемого заряда. При проведении испытаний диафрагму в штреке не ставят.

ВВ считается предохранительным, если при 10-ти кратном взрывании заряда массой 700 г не произошло ни одного взрыва пыли.

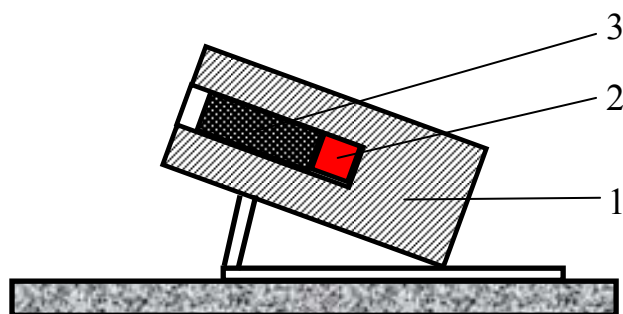


Рис. 4.4. Схема пылераспылительной мортиры:
1 – мортира; 2 – заряд ВВ (50 г); 3 – угольная пыль

Вопросы для самоконтроля знаний

1. Сформулируйте основные положения гипотезы Малляра и Ле-Шателье.
2. Какую массу заряда ВВ называют предельной?
3. Сформулируйте основные положения гипотезы Одибера и ее отличия от гипотезы Малляра и Ле-Шателье.
4. Приведите примеры взрывоопасных пределов содержания метана в метано-воздушной смеси.
5. Какими параметрами характеризуется взрывоопасность МВС?
6. Что понимают под термином "период индукции"?
7. Как влияет температура нагревания МВС на задержку вспышки?
8. Как Вы понимаете механизм действия отрицательных катализаторов?
9. Какие особенности взаимодействия молекул метана с кислородом воздуха?
10. Какие реакции называют цепными и что такое "цепи превращений"?
11. Как изменяется период индукции в зависимости от типа отрицательного катализатора?
12. Перечислите главные факторы, влияющие на зажигание метано-воздушной смеси.
13. Перечислите основные требования к предохранительным ВВ.
14. Какими недостатками характеризуются предохранительные ВВ?
15. Какие главные причины воспламенения МВС, ПВС и взрывов в шахтах?
16. В чем состоит перспектива использования порэммитов в опасных условиях шахт?
17. Как проводят испытания предохранительных ВВ на безопасность действия взрыва в МВС?
18. Как проводят испытания предохранительных ВВ на безопасность действия взрыва в пылевоздушной смеси?
19. В чем состоит особенность испытания предохранительных ВВ V и VI классов на безопасность действия взрыва в МВС?

Список рекомендуемой литературы

1. Дубнов Л.В., Бахареви́ч Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1988. – 358 с.
2. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. – М.: МГИ, 1992. – 516 с.
3. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. Пер. с англ. под ред. Г.П. Демидюка и Н.С. Бахареви́ча – М.: Недра, 1980. – 453 с.
4. Кукиб Б.Н., Росси Б.Д. Высокопредохранительные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1980. – 172 с.
6. Единые правила безопасности при взрывных работах. – К.: Норматив, 1992. – 171 с.
7. Соболев В.В., Усик І.І., Терещук Р.М. Технологія та безпека виконання вибухових робіт. Практикум: Навч. посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 114 с.
8. Соболев В.В., Мандрікевич В.М., Орел М.В., Шломіна Л.С. Українсько-російсько-англійський термінологічний словник з гірничовибухової справи. – Д.: Національний гірничий університет, 2004. – 245 с.
9. Калякин С.А. Взаимодействие кристаллов солей-ингибиторов с продуктами детонации взрывчатого вещества // Физика и техника высокоэнергетической обработки материалов. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2007. – С. 10–19.

5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА НА СРЕДУ

5.1. Классификация зарядов ВВ

Для разрушения массива горных пород применяют взрывы различных зарядов взрывчатых веществ, т.е. определенного количества ВВ, подготовленного к взрыву. Заряды в зависимости от цели, назначения и условий, в которых они работают, классифицируют по нескольким признакам: по форме, конструкции, способу приложения к взрываемому объекту и по характеру действия на массив породы.

По форме различают следующие заряды:

- *сосредоточенные* (заряды, имеющие форму шара, куба, цилиндра и т.п., у которых отношение наибольшей стороны к наименьшей менее 3–5 единиц);
- *удлиненные* (цилиндрические заряды, у которых отношение длины к диаметру превышает 3–5 единиц, такие заряды называют еще колонковыми);
- *фигурные* (условно образующие П-, Г-, Т-форму и другие заряды сложной формы);
- *листовые* (отношение длины или ширины во много раз превышает толщину, обычно это заряды пластического ВВ).

По положению:

- *наружный или накладной* (заряд, помещаемый на взрываемый объект, применяют в основном для дробления негабарита, обрушения козырьков на уступах, в операциях по металлообработке);
- *внутренний* (заряд, помещаемый внутрь взрываемого объекта – шпуры, скважины, камеры; применяют для отбойки минерального сырья, с целью его дробления и последующей переработки; для проведения подземных горных выработок, сооружения каналов, траншей и т.д.).

По конструкции:

- *сплошной* (не разделенный промежутками);
- *рассредоточенный* (отдельные части которого разделены промежутками воздуха, измельченной породы, воды и т.п.)

По характеру действия на среду:

- *заряд камуфлета* (при взрыве разрушение, измельчение и трещинообразование происходят только вокруг места расположения заряда без проявления видимых разрушений на открытой поверхности, рис. 5.1,а);

- *заряд откола* (при взрыве происходит откол породы у открытой поверхности и разрушение вокруг заряда, рис. 5.1,б);
- *заряд рыхления* (дробление породы происходит в объеме, начиная от места расположения заряда до открытой поверхности массива без ее выброса из зоны или воронки разрушения, рис. 5.1,в);
- *заряд выброса* (вызывает дробление и выброс породы за пределы воронки взрыва, рис. 5.1,г).

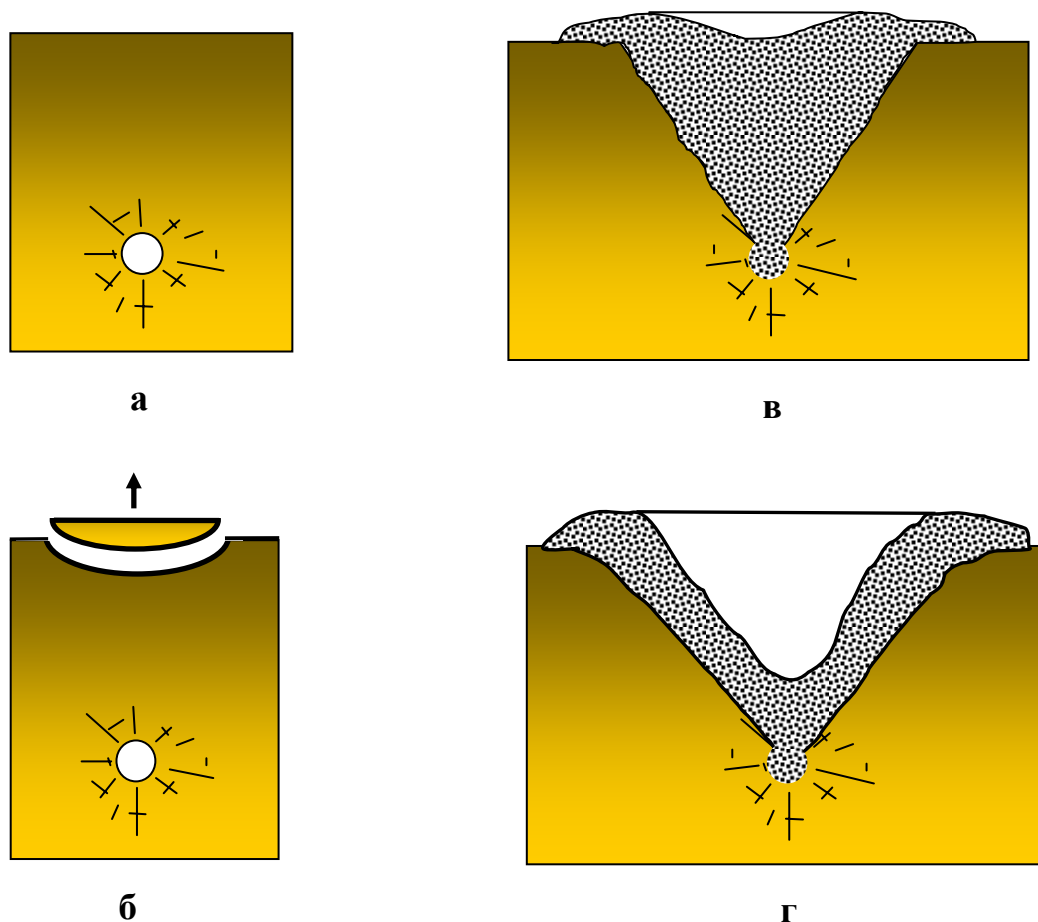


Рис. 5.1. Действие взрыва различных зарядов ВВ:
а – камуфлетного; 2 – откольного; 3 – рыхления; 4 – выброса

5.1.1. Кумулятивный заряд

Кумуляция – существенное увеличение действия взрыва в определенном направлении, достигаемое специфической формой заряда взрывчатого вещества. *Кумулятивный заряд* – заряд ВВ с выемкой (конической, полусферической и др.) в основании, в результате взрыва которого газообразные продукты детона-

ции образуют сходящийся к выемке поток, называемый *кумулятивной струей*. Кумулятивные заряды бывают цилиндрические и удлиненные. Применяются для разрушения металлических преград, горных пород и других материалов. Широко используются при проведении прострелочных работ в скважинах.

Первые публикации о применении кумулятивных зарядов в горном деле появились в Горном журнале в 1947 г. Кумулятивный эффект применялся главным образом для инициирования аммонита, разрушения крепких пород, мерзлых грунтов, в капсюлях-детонаторах и ЭД.

На рис.5.2. показано действие на среду кумулятивных зарядов. Основные соотношения для кумулятивных зарядов следующие (из рис. 5.3).

Скорость кумулятивной струи V_K :

$$V_K = V_O [(1/\sin\alpha) + (1/\operatorname{tg}\alpha)],$$

где V_O – скорость, которую сообщают продукты взрыва металлу облицовки кумулятивной выемки; α – половина угла раствора конической выемки.

Давление, производимое кумулятивной струей на преграду:

$$P = 0,5 \cdot (V_K)^2 \cdot \rho_0,$$

где ρ_0 – плотность материала облицовки.

Суммарная длина канала L , пробиваемого кумулятивной струей, растет с увеличением начальной длины струи, отношения головной и хвостовой скоростей струи, отношения плотностей струи и преграды, рис. 5.2,б,в.

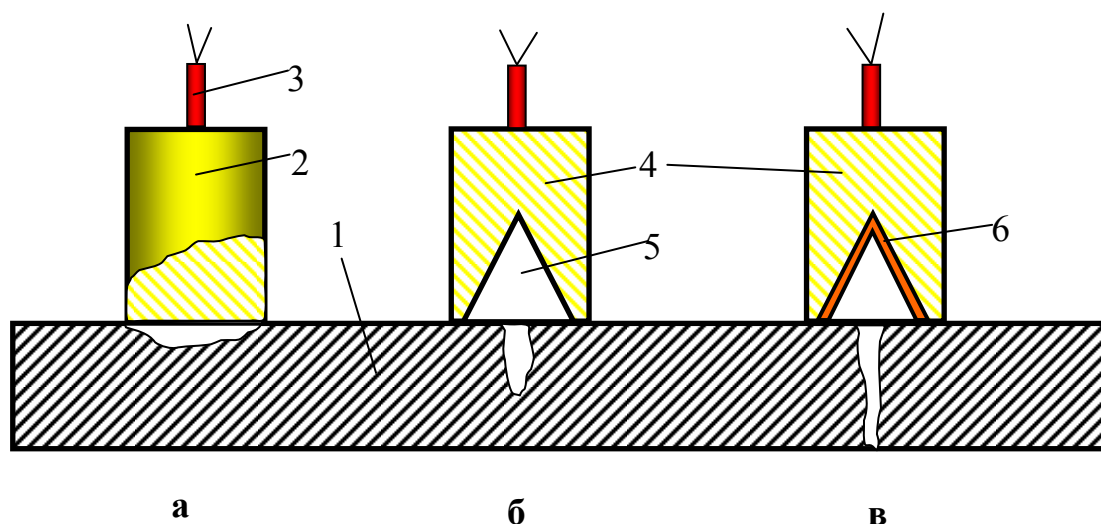


Рис. 5.2. Схематическое изображение действия кумулятивных зарядов на преграду

а – цилиндрический заряд; **б** – заряд ВВ с кумулятивной выемкой;
в – заряд ВВ с кумулятивной выемкой, облицованной медью; 1 – преграда;
 2 – заряд ВВ без кумулятивной выемки; 3 – ЭД; 4 – кумулятивные заряды;
 5 – кумулятивная выемка; 6 – выемка, облицованная медью

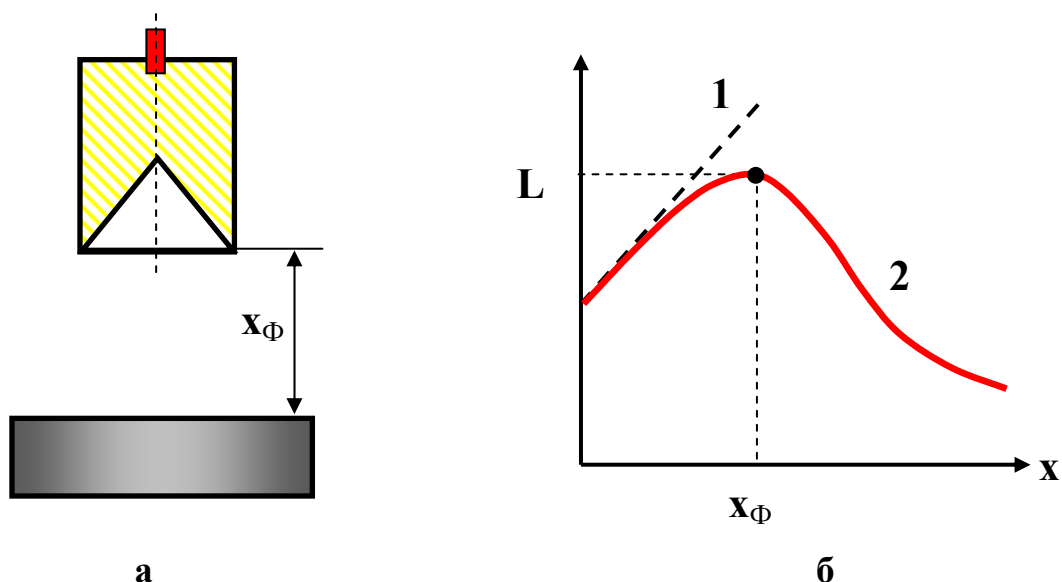


Рис. 5.3. Зависимость глубины пробивания канала кумулятивной струей в преграде от расстояния (б):
а – схема размещения заряда; 1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая

Рост суммарной длины канала L с увеличением расстояния $x_Ф$ (рис. 5.2) до преграды происходит до известного предела (см. точка на кривой 2), соответствующего фокусному расстоянию $x_Ф$, после чего начинается снижение L . Резкое падение пробивного действия при удалении заряда от преграды связано с неустойчивостью струи.

5.1.2. Элементы воронки выброса

Геометрические параметры и форма образуемой воронки при взрыве заряда ВВ зависят от свойств взрывающей породы. Форму воронки взрыва обычно принимают в виде конуса с вершиной в центре заряда ВВ, рис. 5,4.

Из рисунка видно, что основными элементами воронки выброса являются:

- W – глубина заложения заряда или *линия наименьшего сопротивления* (ЛНС);
- r – радиус основания воронки или радиус воронки взрыва;
- 2α – угол раствора воронки.

Показатель действия взрыва определяется из выражения

$$n = r / W.$$

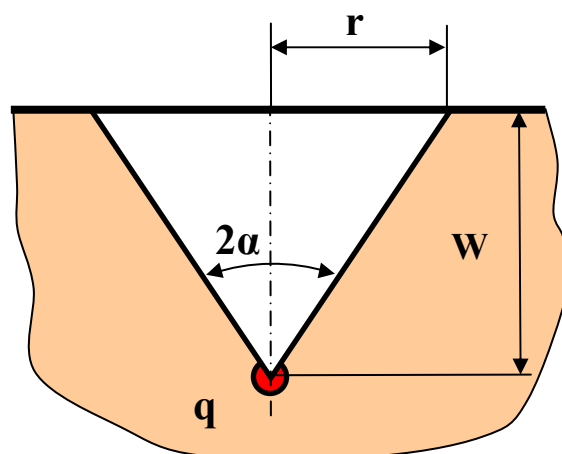


Рис. 5.4. Элементы воронки выброса

В зависимости от величины показателя действия взрыва различают три разновидности зарядов выброса:

- *нормальный выброс*, $n = 1$;;
- *уменьшенный выброс*, $n < 1$;
- *усиленный выброс*, $n > 1$;
- *заряд рыхления*, воронка не образуется, $n \leq 0,7$.

Заряды нормального и уменьшенного выброса применяют на карьерах для дробления скальных пород. При подземной отбойке пород, проходке выработок и строительстве сооружений применяют заряды усиленного выброса с показателем действия взрыва 2 – 3.

При проведении экспериментов по породам с $f \geq 12$ установлено (исследования проведены Н. Налисько), что в качестве характеристики действия взрыва наиболее чувствительным параметром к изменению условий взрывания является глубина воронки выброса h_B , а не параметр n . При максимальном значении соотношения h_B/q_3 зависимость угла раскрытия α от глубины воронки представлена на рис. 5.5.

Рациональная длина зарядов вычисляется по формуле

$$l_3 = 3.5(h_B)^{0,3} \cdot \alpha^{-0,32}, \text{ м.}$$

Глубина воронки может быть рассчитана из выражения

$$h_B = 4,34 f^{1,2} P_3^{1,05} q_3^{0,63} l_{III}^{-0,95}, \text{ м,}$$

где P_3 – показатель эффективности заряда.

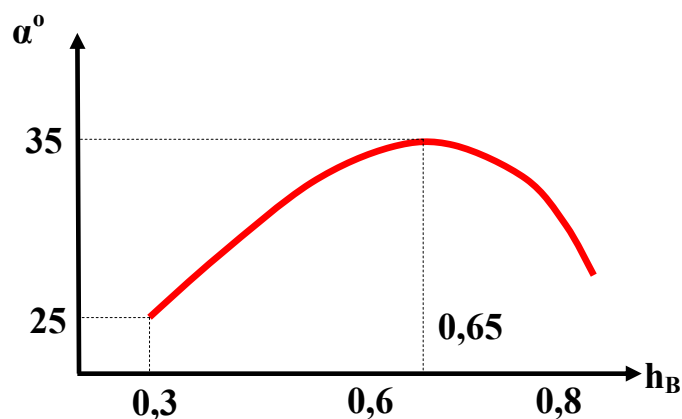


Рис. 5.5. Зависимость угла раскрытия воронки от ее глубины (по Н. Налисько)

Величина разрушения межшпурового целика l_{Π} убывает по степенной зависимости от расстояния между зарядами, а при сближении зарядов на минимально допустимые расстояния глубина полости в крепких породах достигает глубины воронки выброса одиночного заряда

$$l_{\Pi} = 0,2 - 0,7a^4 - 0,25 h_v a + 0,98 h_v^2, \text{ м,}$$

где a – расстояние между шпурами.

Зависимость угла раскрытия воронки выброса α от ее глубины h_v (при максимальном соотношении h_v/q_3) следует находить из следующего выражения:

$$\alpha = (0,31 h_v^3 - 0,36 h_v^2 + 0,086 h_v + 1,04) / l_{\Pi}, \text{ град.}$$

Изменение характера действия взрыва заряда может быть достигнуто как путем уменьшения глубины заложения заряда постоянной величины (рис. 5.6,а), так и путем увеличения массы заряда при постоянной глубине заложения (рис. 5.6,б).

5.2. Взрыв одиночного заряда в грунтах

Грунт является трехкомпонентной средой, состоящей из твердых частиц, жидкой и газовой фаз. Наличие воздуха в порах грунта сильно влияет на условия распространения в них ударных волн. При распространении ударной волны энергия взрыва расходуется на сближение твердых частиц за счет уменьшения

объема пор, при этом разогрев воздуха в ударной волне приводит к повышению температуры твердых частиц (затрачивается $\sim 90\%$ энергии ВВ). Зона уплотнения будет во много раз больше зоны уплотнения в слабо пористых грунтах.

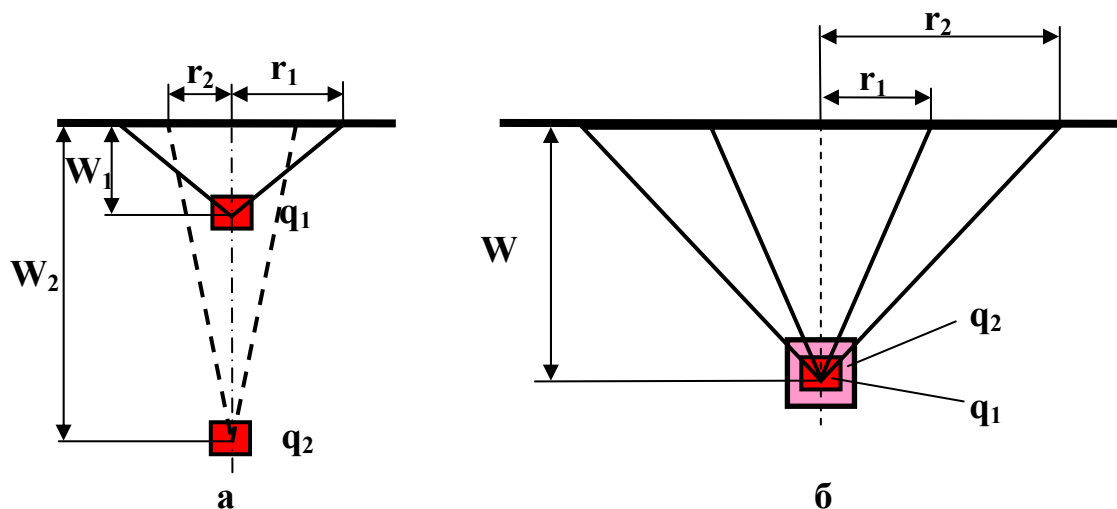


Рис. 5.6. Способы изменения характера действия взрыва на среду:
а – изменением глубины заложения заряда ВВ; **б** – изменением массы заряда ВВ

Разрушение грунта происходит главным образом за счет запаса кинетической энергии, приобретенной средой при расширении продуктов взрыва (*разрушение под действием волн напряжений в грунтах незначительны*). Вокруг заряда при взрыве образуется расширяющаяся сферическая полость, заполненная газами взрыва, которая при приближении к открытой поверхности приобретает грушевидную форму, большая ось которой совпадает с ЛНС заряда, рис. 5.7.

В водонасыщенных грунтах энергия передается преимущественно по воде. Поэтому действие взрыва в таких грунтах по своему характеру, как и при взрывах в воде, близко к гидростатическому давлению, направленному одинаково во все стороны.

В неводонасыщенных (сухих) грунтах, так же как и в твердых телах, напряженное состояние в каждой точке определяется двумя величинами – радиальным (σ_r) и тангенциальным (σ_t) напряжениями. Характер зависимости деформации грунта ε от напряжения σ показан на рис. 5.8.

Изменение формы полости объясняется различной сопротивляемостью перемещению участков массива. В нижней части полости расширения быстро прекращаются, в то время как размеры верхней части полости увеличиваются,

уменьшая толщину слоя грунта, поднимаемого над полостью. В дальнейшем оболочка прорывается в верхней части и движение породы происходит за счет баллистического полета отдельных частиц – в грунте образуется воронка.

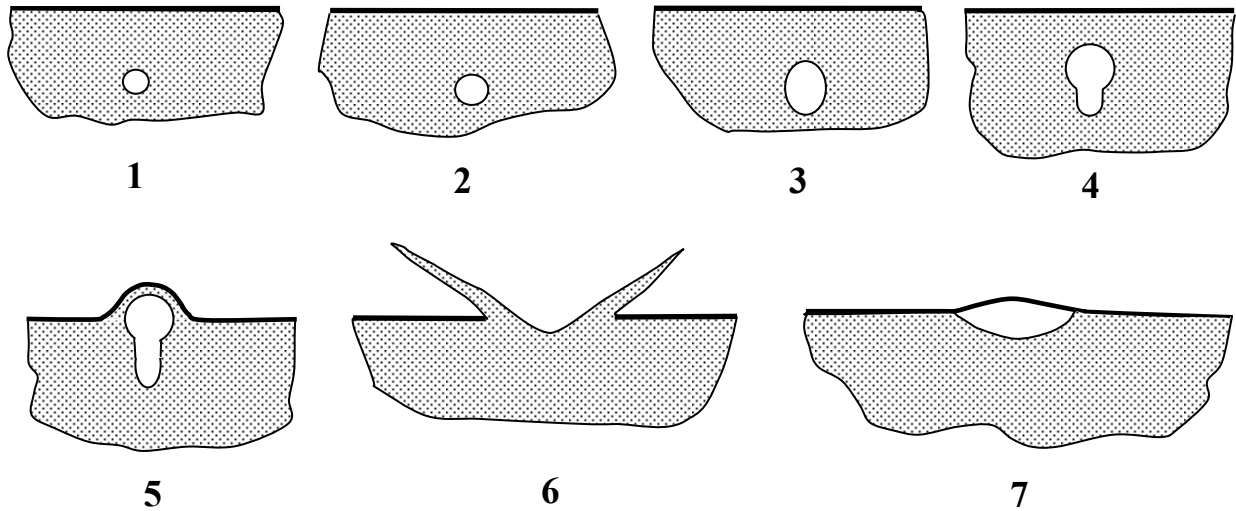


Рис. 5.7. Последовательность фазы движения грунта

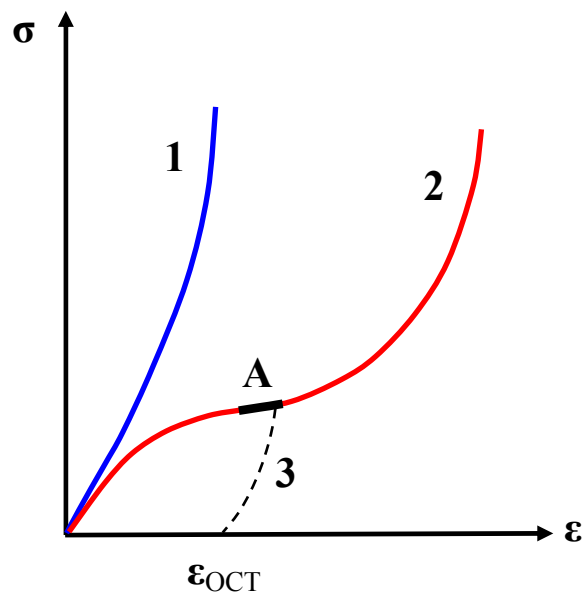


Рис. 5.8. Зависимость деформации грунта от напряжения:

1 – водонасыщенный грунт; 2 – неводонасыщенный грунт; 3 – кривая разгрузки после взрыва (сохраняется остаточная деформация); А – участок смены знака кривизны $\sigma(\epsilon)$

5.3. Взрыв заряда в скальном монолитном массиве

Механизм разрушения скальной монолитной породы взрывом сосредоточенного заряда ВВ принципиально отличается от механизма действия взрыва в грунтах. В скальной породе вблизи заряда под действием ударной волны и высокой температуры продуктов взрыва образуется зона сильно деформированной породы, Эту область называют *зоной сжатия* или *измельчения*, рис. 5.9.

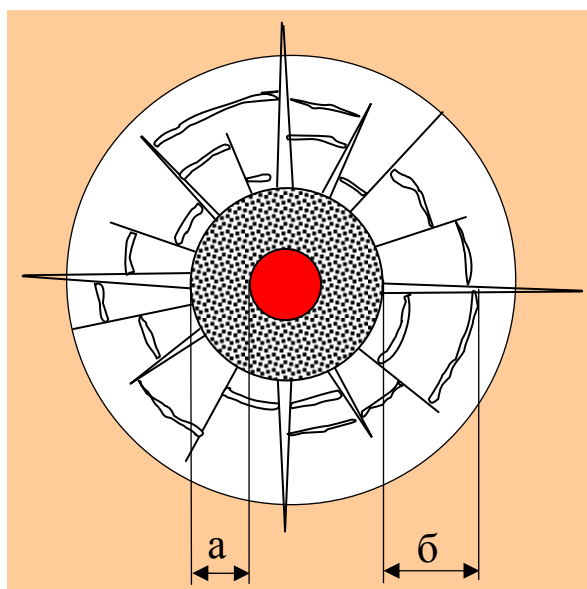


Рис. 5.9. Схема распределения трещин в породе около места взрыва (по Г.И. Покровскому):
а – зона сжатия (измельчения); б – зона разрыхления

По мере удаления от заряда напряжения в волне сжатия быстро снижаются и на определенном расстоянии становятся меньше сопротивления породы раздавливанию, изменяется характер деформации, что приводит, соответственно и к изменению характера разрушения среды. Под действием прямой волны напряжений, распространяющейся от заряда ВВ, в породе в радиальном направлении возникают сильные сжимающие напряжения, а в тангенциальном – растягивающие, обеспечивающие появление радиальных трещин. В результате такого действия в породе нарушается связное строение, и она распадается на отдельные куски. Эту зону называют *зоной разрыхления*.

В слоях более удаленных от заряда ударная волна вырождается в упругую волну, растягивающие и тангенциальные напряжения уменьшаются и становятся меньше величины сопротивления породы растяжению, связь между части-

цами среды не нарушается – имеют место лишь колебательные смещения частиц. Разрушение породы прямым действием волны за пределами этого расстояния не происходит. Сильно сжатая порода смещается в сторону центра заряда и участки породы, прилегающие к полости, испытывают напряжения растяжения в радиальном направлении: в породе появляются кольцевые тангенциальные трещины. Эта зона называется *зоной сотрясения*.

Между зонами измельчения, разрыхления и сотрясения нет четких границ. Каждая из названных зон плавно переходит одна в другую и в целом эти зоны называют *зоной разрушения*. Радиус зоны разрушения зависит от величины заряда, параметров ВВ. Очевидно, что чем больше заряд и его мощность, тем больше *радиус действия взрыва*.

При взрыве заряда вблизи открытой поверхности частицы среды под влиянием волны напряжений, достигшей этой поверхности, начинают свободно перемещаться в ее сторону, вовлекая в этот процесс все более отдаленные участки среды. Волна напряжений, дойдя до поверхности, отражается, и в массиве возникают растягивающие напряжения, рис. 5.10. При этом волна растяжения, распространяющаяся в массив, представляет собой фронт, который распространялся бы от мнимого заряда ВВ такой же массы, но находящегося над поверхностью на расстоянии, равном ЛНС реального (взорванного) заряда.

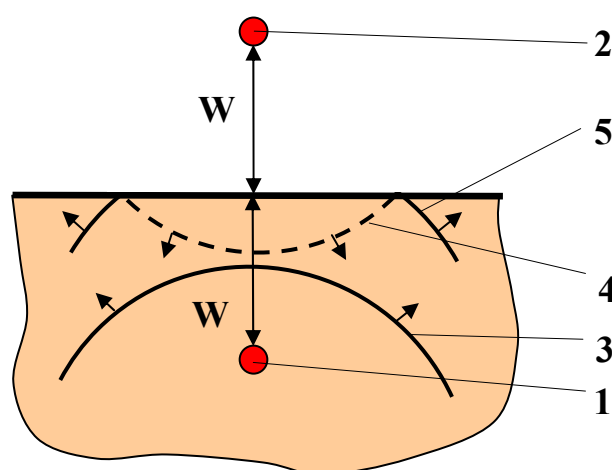


Рис. 5.10. Схема образования у открытой поверхности отраженной волны:
 1 – реальный заряд ВВ; 2 – мнимый заряд ВВ; 3, 4 – прямые волны сжатия;
 5 – отраженная волна

Так как горная порода имеет в 10 – 30 раз меньшее сопротивление растягивающим нагрузкам по сравнению с сжимающими, то у открытой поверхности происходит разрушение массива отраженной волной с образованием трещин и формированием откольной воронки. Отраженная волна "провоцирует" процесс разрушения породы от поверхности в глубь массива. Разрушения, вызванные отраженной волной, смыкаются с разрушениями, происшедшими ранее вокруг заряда, что приводит к разрушениям всего объема породы внутри воронки.

В сторону массива породы разрушения не распространяются на заметные расстояния, поскольку волны разрежения здесь нет, и порода испытывает только всестороннее сжатие.

5.4. Взрыв заряда в трещиноватом скальном массиве

Особенностью разрушения трещиноватых пород является совмещение двух механизмов: под действие газов взрыва и под действием волн напряжений (разрушения распространяются от заряда ВВ и от открытой поверхности массива навстречу друг другу). При взрыве заряда в породе вокруг полости, образованной взрывом, располагается зона разрушений. Трещины являются поверхностями раздела, препятствующими распространению волн напряжений и разрушениям породы за пределами зоны, которая ограничена этими трещинами. При пересечении трещины происходит скачкообразное падение напряжений волны, обусловленное частичным ее отражением от поверхности трещины. Качественная картина зависимости характера изменения напряжений при пересечении трещин упругой волной приведена на рис. 5.11.

Из рис. 5.11 видно, что напряжения снижаются более интенсивно, чем в монолитном массиве. За пределами трещин порода разрушается главным образом под действием механического соударения кусков породы (разрушенной вокруг заряда) с остальным разрушаемым объемом. Таким образом, в трещиноватом массиве породы под действием прямых и отраженных волн создается несколько зон разрушения.

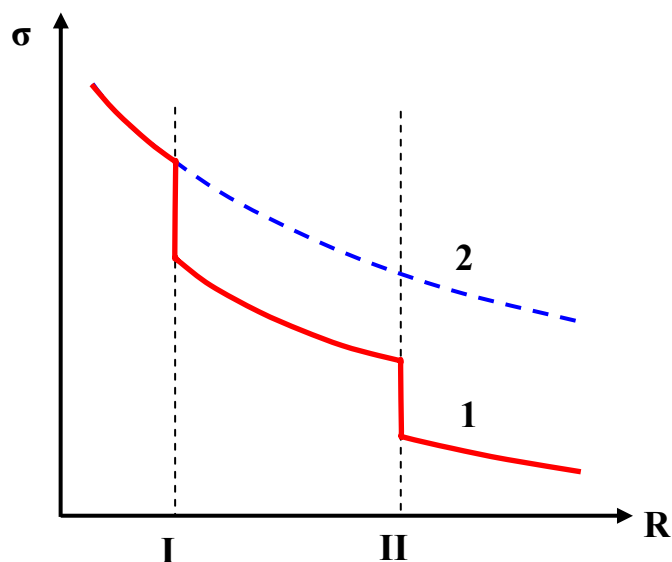


Рис. 5.11. График изменения величины напряжений на разных расстояниях от места взрыва в трещиноватом (1) и монолитном массиве (2):
I, II – плоскости трещин в массиве

5.5. Некоторые закономерности взаимодействия группы зарядов

Взаимодействия между зарядами, как правило, изучают с использованием оптически активных и прозрачных моделей при скоростной съемке (СФР) развития процесса. Экспериментально показано, что до момента встречи волн напряжений среда вокруг каждого заряда ведет себя так, как буд-то произошел взрыв одиночного заряда, а затем возникает сложная картина интерференции волн напряжений с заметной разницей в интенсивности дробления среды по линии, соединяющей заряды, и в направлении ЛНС. При встрече волн напряжений от соседних зарядов общее напряженное состояние среды резко меняется: в направлении, перпендикулярном к линии, соединяющей соседние заряды, действуют увеличенные по сравнению с одиночным взрыванием растягивающие напряжения, вызывающие в этом направлении усиленное действие взрыва и образование магистральной трещины, рис. 5.12. Появление трещины обусловлено растягивающими напряжениями, вызванными отраженными волнами. В этой зоне порода подвергается наименьшему дроблению, рис. 5.13.

В объемах породы в глубине взрываемого массива существуют зоны, в которых происходит взаимная компенсация напряжений, появляющихся в массиве от соседних зарядов, и общее ослабление напряженного состояния, рис. 5.14. В таких зонах порода подвергается наименьшему дроблению.

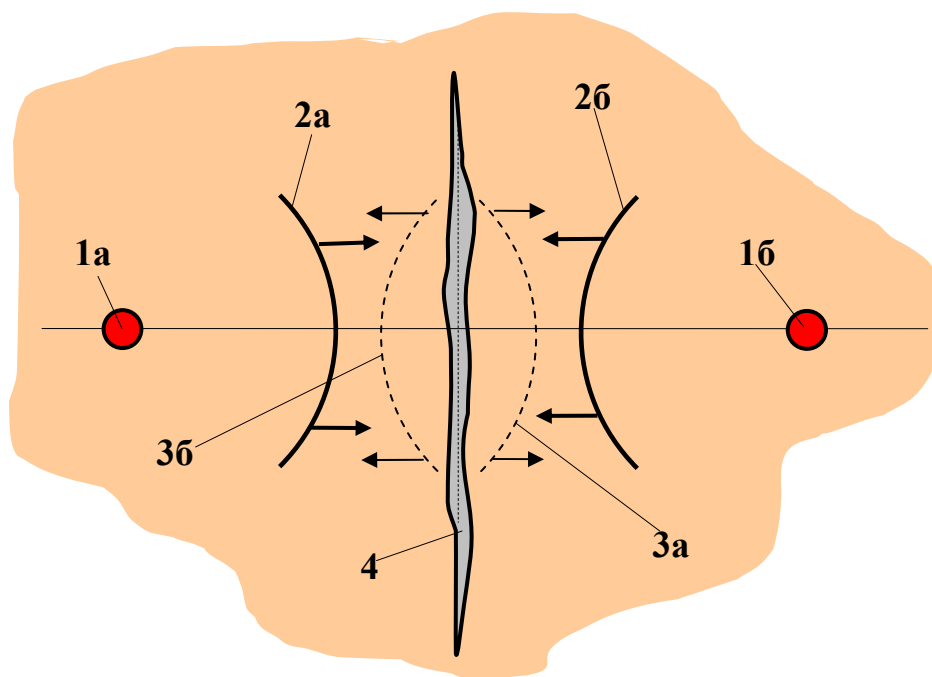


Рис. 5.12. Взаимодействие двух сосредоточенных зарядов ВВ:
 1а, 1б – заряды ВВ; 2а и 2б – прямые волны напряжений, распространяющиеся от зарядов 1а и 1б соответственно; 3а и 3б – волны, отраженные после "лобового" соударения волн сжатия 2а и 2б; 4 – магистральная трещина

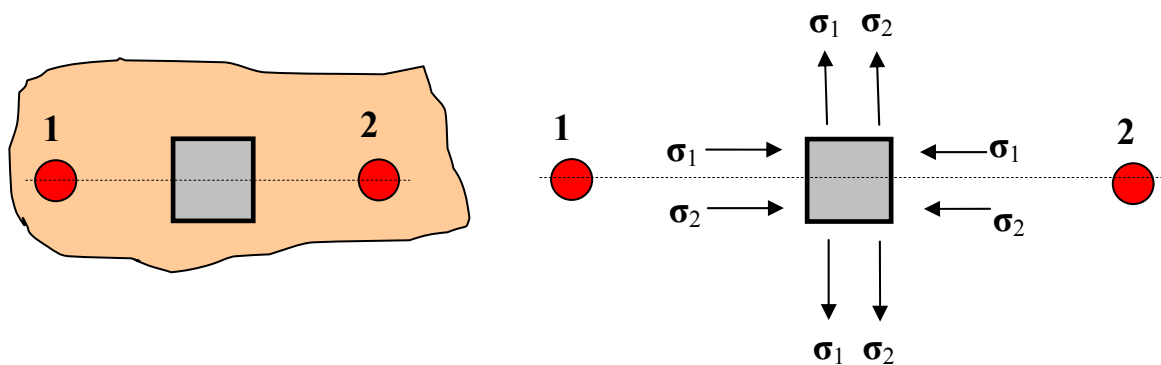


Рис. 5.13. Схема напряженного состояния массива при одновременном взрывании 2-х зарядов ВВ: $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$

Зоны пониженной дробимости пород (как и зоны переизмельчения) являются нежелательным результатом ведения взрывных работ. Задача максимального уменьшения размеров таких зон решается путем увеличения коэффициента сближения скважин, уменьшением диаметра скважин и разновременным взрыванием зарядов ВВ.

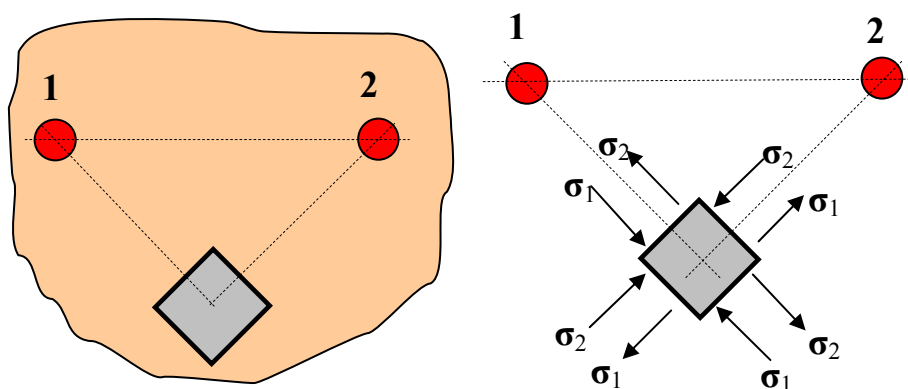


Рис. 5.14. Схема напряженного состояния массива при одновременном взрывании 2-х зарядов ВВ: $\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$

5.6. Разрушение пород короткозамедленным взрыванием

Короткозамедленное взрывание – есть последовательное взрывание серий или отдельных зарядов с интервалами в тысячные доли секунды. Этот способ взрывания называют иногда миллисекундным. Короткозамедленное взрывание (КЗВ) впервые было применено инженером Берлиным в 1934-1935 гг. с 1951 г. этот метод начал внедряться на карьерах.

Основными факторами, определяющими эффективность короткозамедленного взрывания, являются:

- интервал замедления;
- последовательность разрушения участков массива.

Перечисленные параметры применяются в зависимости от свойств горных пород, схемы расположения зарядов и задачи взрыва. При КЗВ происходит не только взаимодействие взрывов соседних зарядов, но и смежных серий. Эффективность разрушения при КЗВ определяется следующими факторами:

- интерференцией волн напряжений от соседних зарядов (достигается при *малых* интервалах замедлений);
- образованием дополнительных открытых поверхностей (при *средних* интервалах замедлений);
- соударением разлетающихся кусков при взрыве соседних зарядов (при *больших* интервалах замедлений).

Перечисленные факторы являются составными элементами единого процесса взаимодействия зарядов при короткозамедленном взрывании.

Интерференция волн напряжений, рис. 5.15, происходит в том случае, когда направления смещения частиц от предыдущего взрыва совпадают, при этом увеличиваются суммарные смещения, напряжения и интенсивность разрушения массива.

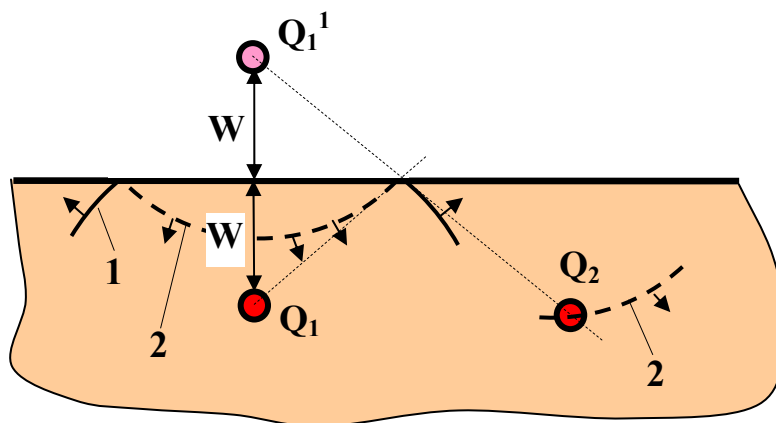


Рис. 5.15. Схема интерференции волн напряжений при КЗВ соседних зарядов:

1 – волна напряжений; 2 – отраженная волна; Q_1 , Q_2 – заряды ВВ;
 Q_1^1 – мнимый заряд ВВ

Волна напряжений 1 от заряда Q_1 распространяется до открытой поверхности и, отражаясь от нее, образует отраженную волну растяжения 2, которая распространяется вглубь массива, как от мнимого заряда ВВ Q_1^1 . Взрыв второго заряда Q_2 должен быть произведен в момент, когда волна растяжения 2 от первого заряда пересекает место расположения второго заряда ВВ. В этом случае облегчается действие заряда 2 и увеличивается эффект разрушения породы. Опытом установлено, что наиболее эффективное срабатывание зарядов 2 происходит в случае, когда время подрыва заряда 2 совпадет с моментом пересечения места расположения этого заряда волной растяжения, либо отличается не более чем на 0,1 мс.

С увеличением числа открытых поверхностей до 2-х – 3-х, рис. 5.16, у взрываемого заряда объем разрушения увеличивается примерно пропорционально их числу. Дробление породы сопровождается увеличением ее первоначального объема при смещении в сторону открытых поверхностей. Ширина пространства между нарушенной и ненарушенной частями массива должна быть пропорциональна ЛНС и коэффициенту разрыхления данной породы. Не-

обходимая ширина пространства (по экспериментальным данным) для получения открытой поверхности должна быть в пределах $(1/10 - 1/30)W$.

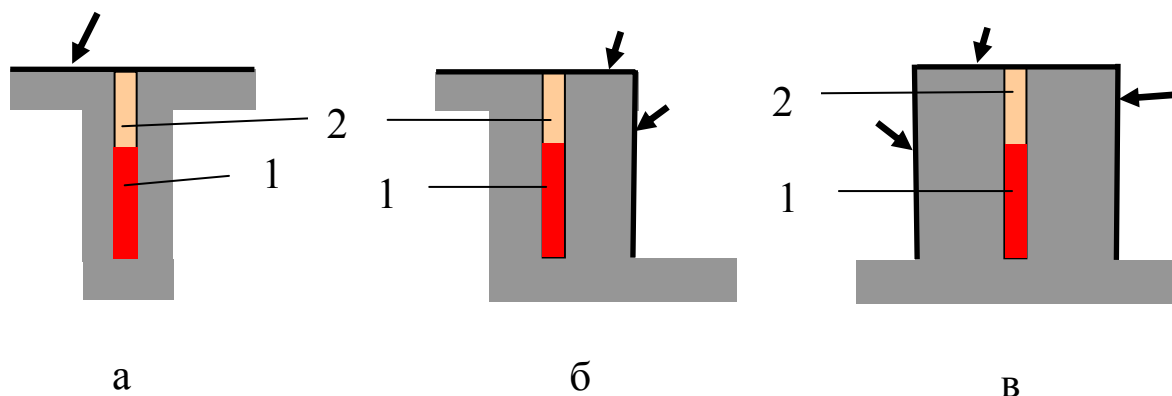


Рис. 5.16 – Схемы расположения зарядов при одной (а), двух (б) и трех (в) открытых поверхностях:

1 – заряд взрывчатого вещества в шпуре (скважине); 2 – забойка;
стрелками показаны открытые поверхности

Схема разрушения массива при образовании дополнительных поверхностей показана на рис. 5.17. Расчетный интервал замедления в этом случае должен быть в пределах 25 – 75 мс. С увеличением крепости пород интервал замедления уменьшается.

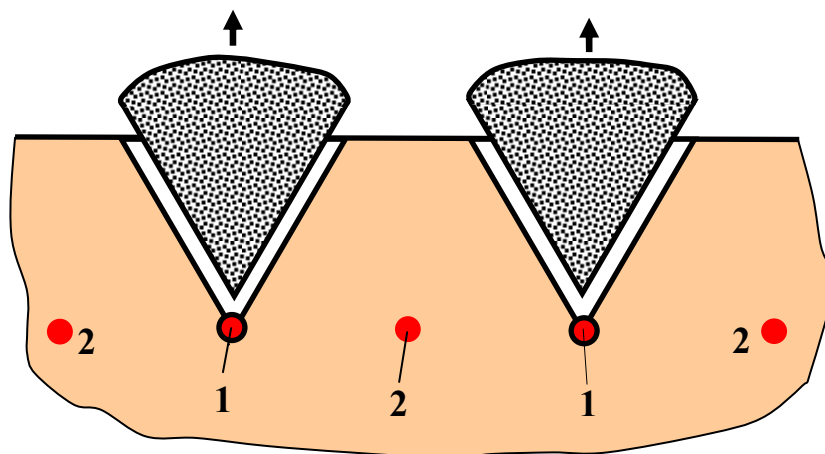


Рис. 5.17. Схема разрушения массива при образовании дополнительных открытых поверхностей короткозамедленным взрыванием:

1 – заряды ВВ первой очереди взрывания; 2 – заряды ВВ второй очереди взрывания

Соударение кусков породы, перемещающихся в результате взрыва, обусловлено тем, что разные участки массива при взрыве имеют разные скорости и направления движения. При столкновении кусков происходит их дополнитель-

ное дробление. Опыт показывает, что дробление породы существенно улучшается, если траектории разлета кусков породы пересекаются под углом 90° .

При короткозамедленном взрывании процесс разрушения массива зарядами первой очереди протекает так же, как и в результате действия одиночного заряда ВВ. При взрыве группы зарядов второй и следующих очередей с малыми интервалами замедлений в массиве возникает сложная картина интерференции волн напряжений. Время, в течение которого массив находится в напряженном состоянии, увеличивается, происходит уменьшение сейсмического эффекта действия взрыва на окружающие сооружения.

Одной из разновидностей способа КЗВ является взрывание с внутрискважинными миллисекундными замедлителями отдельных частей зарядов в скважинах, что позволяет увеличить импульс действия взрыва на массив. В результате этого достигаются лучшие результаты взрыва по дроблению и сейсмике.

Вопросы для самоконтроля знаний

1. Какие бывают заряды ВВ по форме?
2. Как различают заряды ВВ по положению и конструкции?
3. Какие бывают заряды ВВ по характеру действия на среду?
4. Кумулятивный заряд и особенности его действия на среду. Приведите пример использования кумулятивного эффекта в средствах взрывания.
5. Основные элементы воронки выброса и понятие показателя действия взрыва.
6. Какой параметр считается наиболее чувствительным к изменению условий взрывания по породе с коэффициентом крепости по М.М. Прододеяконову больше 12?
7. Какие основные способы изменения характера действия на среду Вам известны?
8. Раскройте особенности действия взрыва в грунтах?
9. В чем заключаются отличия действия взрыва в скальном монолитном массиве от действия взрыва в грунтах?
10. Особенности механизмов разрушения трещиноватого скального массива.
11. Особенности взаимодействия группы зарядов.
12. Какой способ взрывания называют короткозамедленным (КЗВ) или миллисекундным?
13. Перечислите факторы, определяющие эффективность короткозамедленного взрывания.
14. Как используется на практике интерференция волн напряжений при осуществлении способа короткозамедленного взрывания?
15. Какие преимущества дают дополнительные открытые поверхности и каким способом достигают их образование?

Список рекомендованной литературы

1. Взрывное дело / С.А. Ловля, Б.Л. Каплан, В.В. Майоров и др. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
2. Богацкий В.Ф., Пергамент В.Х. Сейсмическая безопасность при взрывных работах. – М.: Недра, 1978. – 128 с.
3. Дубнов Л.В., Бахареви́ч Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1988. – 358 с.
4. Таранов П. Я., Гудзь А. Г. Разрушение горных пород взрывом. – М.: Недра, 1976. – 253 с.
5. Шевцов М.Р., Таранов П.Я., Левіт В.В., Гудзь О.Г. Руйнування гірських порід вибухом. – Донецьк: ТОВ "Лебідь", 2003. – 272 с.
6. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом (взрывные технологии в промышленности). – М.: Из-во Московского государственного горного университета, 1994. – 448 с.
7. Единые правила безопасности при взрывных работах. – К.: Норматив, 1992. – 171 с.
8. Соболев В.В., Усик І.І., Терещук Р.М. Технологія та безпека виконання вибухових робіт. Практикум: Навч. посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 114 с.
9. Соболев В.В., Мандрікевич В.М., Орел М.В., Шломіна Л.С. Українсько-російсько-англійський термінологічний словник з гірничовибухової справи. – Д.: Національний гірничий університет, 2004. – 245 с.
10. Коровченко Г.М. Мастер-взрывник. – М.: Недра, 1972. – 192 с.

6. ВЗРЫВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК

При ведении взрывных работ в угольных шахтах в основном используются шпуровые заряды. Последовательность операций: в массиве по забою бурят шпуры, в шпуры помещают заряд ВВ, забойку, затем собирают взрывную сеть и взрывают заряды с заданной очередностью в соответствии с утвержденным паспортом буровзрывных работ.

6.1. Взрывание шпуровыми зарядами ВВ

Шпур – это полость, выполненная в виде цилиндра диаметром до 75 мм и длиной до 5 м, пробуренная в породе и предназначенная для размещения заряда ВВ. Начало шпура называют *устьем*, а конец шпура (торцевая часть) – *забоем* или *дном шпура*, боковую поверхность – *стенками шпура*.

Основные параметры шпура: диаметр $d_{ш}$, длина $l_{ш}^1$ и глубина $l_{ш}$ (рис. 6.1). Из-за того, что стенки шпура имеют выступы до 1,5 мм и на патронах ВВ имеются также неровности (вмятины, уширения и др.), в угольных шахтах при бурении используют коронки диаметром 41 – 43 мм для патронов ВВ диаметром 36 и 32 мм. Коронками диаметром 51 – 53 мм бурят шпуры для патронов ВВ диаметром 45 мм.

Длина шпура – расстояние по оси шпура от дна до его устья ($l_{ш}^1$).

Глубина шпура – перпендикуляр, опущенный от дна шпура до поверхности забоя ($l_{ш}$), т.е. это есть глубина заложения шпура в горном массиве:

$$l_{ш} = l_{ш}^1 \sin \alpha,$$

где α – угол между забоем выработки и осью шпура.

Практикой при взрывах в забоях с одной открытой поверхностью установлены рациональные длины шпуров в зависимости от крепости пород

- в крепких породах: $l_{ш}^1 = 1,5 - 1,8$ м;
- в породах средней крепости: $l_{ш}^1 = 1,8 - 2,2$ м;
- в слабых породах: $l_{ш}^1 = 2,2 - 2,5$ м.

При взрывах с двумя открытыми поверхностями длина шпуров составляет 1,8 – 5,0 м, но чаще $l_{ш}^1 = 2,2 - 3,0$ м. При взрывании по углю и породе длина

шпуров должна быть не менее 0,6 м.

Как правило, шпуровой заряд разрушает породу в зоне, ближайшей к забою. Донная часть остается в неразрушенной породе в виде так называемого "стакана", рис. 6.2.

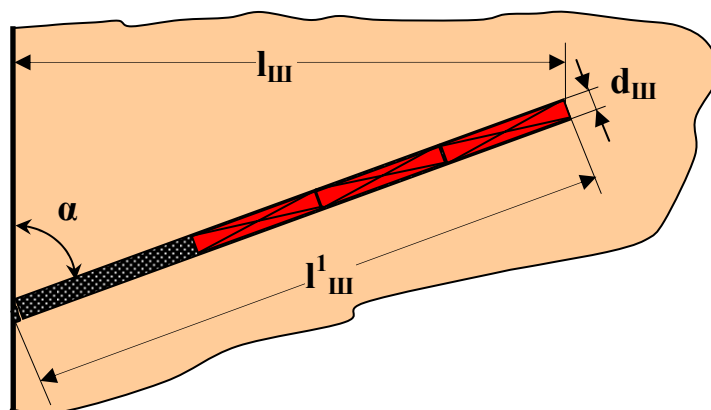


Рис. 6.1. Основные параметры шпура

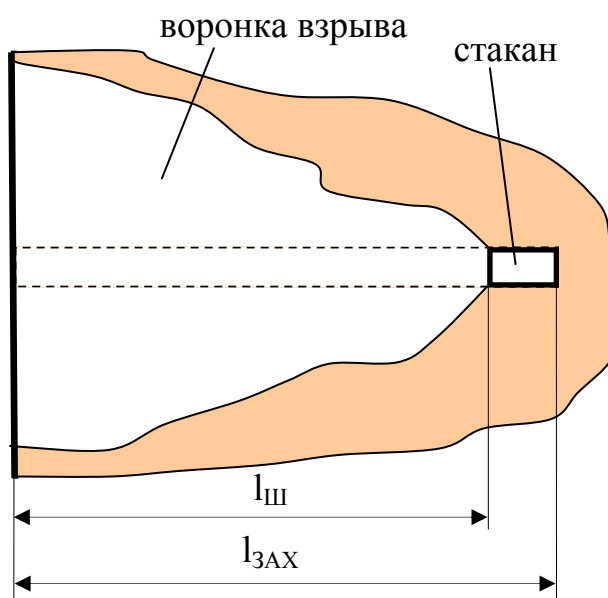


Рис. 6.2. Часть массива пород после взрыва шпурового заряда

Запрещается во всех случаях разбуривать "стаканы" вне зависимости от наличия или отсутствия в них остатков ВМ.

Строго запрещено бурить шпуры следующего цикла через стаканы, поскольку в стаканах часто остается ВВ.

Важным параметром является $l_{\text{ЗАХ}}$ – продвижение забоя за одно взрывание или за один цикл; $l_{\text{ЗАХ}}$ всегда меньше $l_{\text{Ш}}$.

Отношение продвижения забоя за одно взрывание к глубине шпуров называется *коэффициентом использования шпуров* – КИШ:

$$\text{КИШ} = l_{\text{ЗАХ}} / l_{\text{Ш}}; \quad (\text{КИШ} \leq 1).$$

Нормативное значение КИШ равно 0,8. На передовых проходках КИШ достигает 0,9 – 0,95 иногда 0,97 – 1,0 в слабых породах. При проектировании буровзрывных работ значения КИШ рекомендуется выбирать следующие:

- на одну открытую поверхность 0,8 – 0,85;
- на две открытые поверхности 0,9 – 0,95.

При проведении промышленных испытаний новых типов ВВ и новых технологий ведения взрывных работ КИШ устанавливают по продвижению забоя за определенный период времени, как правило, за 10 взрываний за этот контрольный период (циклов).

6.1.1. Основные взрывные врубы

При проведении выработок имеется чаще всего одна открытая поверхность – забой, в котором перпендикулярно и наклонно к его поверхности бурят и взрывают комплект шпуров (от 10 до 60 и более). *Взрыв комплекта шпуров должен отвечать следующим требованиям:*

1 – первоначально необходимо создать взрывом части шпуров дополнительную вторую открытую поверхность, чтобы усилить разрушительное действие остальных зарядов;

2 – разрушить породу в сечении выработки на куски требуемых размеров, а навал породы получить компактным для эффективной работы погрузочных машин, обеспечить безопасность людей и исключить повреждения крепи и оборудования выработок;

3 – образовать сечение выработки, максимально близкое к проектному, сведя к минимуму недоборы и переборы породы, обеспечить высокий КИШ, а также исключить нарушение естественной прочности массива за контуром сечения выработки.

Критерием правильного оконтуривания является коэффициент излишка сечения (КИС) – отношение фактической площади поперечного сечения выработки в проходке $S_{ф.пр.}$ к площади проектного поперечного сечения вчерне $S_{вч.}$

$$КИС = S_{ф.пр.} / S_{вч.}$$

Нормативное значение КИС равно 1,03...1,05.

4 – затраты времени и стоимостные показатели БВР (удельные затраты) должны быть минимальные.

Для достижения указанных результатов взрыва в комплекте шпуров применяют врубовые, отбойные, оконтуривающие и наклонные шпуры, прямые (призматические врубы) и комбинированные врубы.

Врубовые шпуры (на рис. 6.3 №№ 1–4) – взрыв зарядов создает дополнительную (вторую) открытую поверхность забое и улучшает условия взрывания остальных шпуров. Врубовые шпуры обычно бурят на 0,2–0,3 м глубже остальных, а величина зарядов врубовых шпуров на 15–20% больше, чем в остальных.

Отбойные шпуры (на рис. 6.3 №№ 5–9) взрывают после врубовых, предназначены для расширения полости, образованной врубом. При малых сечениях выработки отбойных шпуров может не быть, а при большом сечении отбойными шпурами разрушают основную часть породы в забое.

Оконтуривающие шпуры (на рис. 6.3 №№ 10–22). Заряды в этих шпурах взрывают последними. Они предназначены для придания выработке проектного сечения. Концы оконтуривающих шпуров в крепких породах выпускают за проектный контур на 100–150 мм, а в мягких породах располагают на проектном контуре выработок. В выработках прямоугольного, трапециевидного и сводчатого сечения применяют наклонные и прямые врубы.

Наклонные врубы образуют шпурами, пробуренными наклонно под углом 60°–70° к поверхности забоя. Расстояние между концами шпуров 10–20 см. В трещиноватых породах шпуры располагают так, чтобы они пересекали поверхности трещин под углом 90°.

Прямые (призматические) врубы (рис. 6.4) образуют шпурами, пробуренными перпендикулярно поверхности забоя (параллельно оси выработки). При этих врубах, как правило, один или несколько шпуров оставляют незаряженными для создания дополнительных открытых поверхностей, облегчающих

разрушительное действие остальных шпуров. Расстояние между соседними шпурами 20–30 см, в очень крепких породах – 5–10 см.

Наиболее надежные врубы: щелевые, рис. 6.4,а, призматические, рис. 6.4,б, и спиральные шагающие, рис. 6.4,в. Применение спирально-шагающих врубов требует использования только прессованных ВВ.

Области применения прямых и наклонных врубов зависят от глубины шпуров (l), сечения выработки (S), коэффициента крепости пород (f) и могут быть определены по графикам, рис. 6.5.

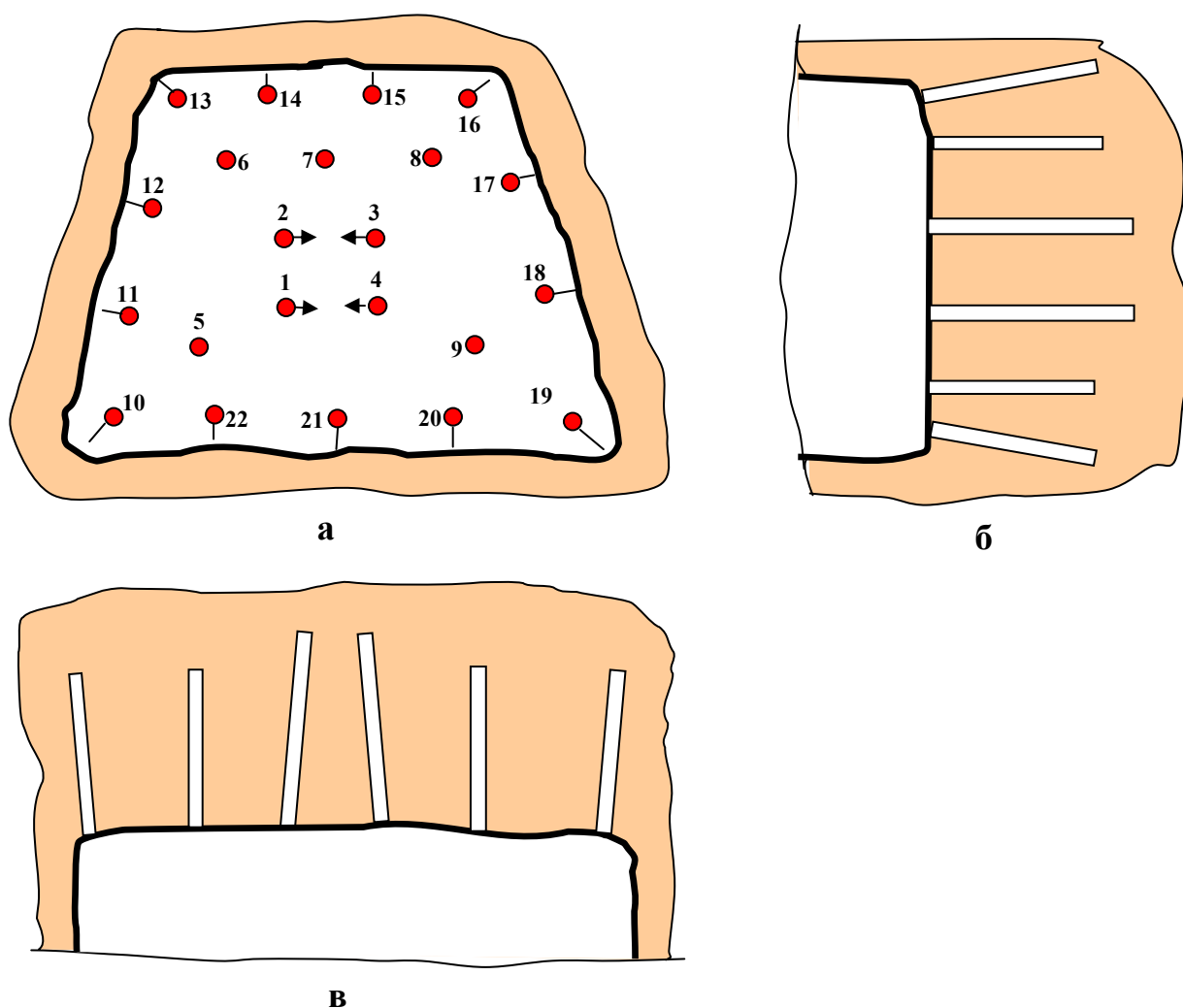


Рис. 6.3. Схема расположения врубовых, отбойных и оконтуривающих шпуров:
а – пример размещения шпуров в сечении забоя; б – вид сбоку; в – вид сверху

Из комбинированных врубов наибольший интерес представляет *шагающий пирамидально-клиновой вруб*, рис. 6.6, состоящий из девяти шпуров.

Шпур №1 – центральный, имеет наименьшую глубину (1 – 1,2 м) заряд из одного патрона ВВ. Этот шпур бурится перпендикулярно поверхности забоя.

Шпуры №№ 2 – 5 располагаются на равных расстояниях от №1. Глубина этих шпуров, считая от центрального, постепенно увеличивается с интервалом 0,2 – 0,33 м. Заряды также увеличиваются на один патрон, т.е. на 0,25 – 0,3 кг в каждом последующем шпуре по сравнению с предыдущим. Бурят с некоторым наклоном к оси шпура №1. Очередность взрывания соответствует номерам шпуров. После взрыва шпуров 1 – 5 через 15 – 30 мс взрывают заряды в шпурах №№ 6 – 9.

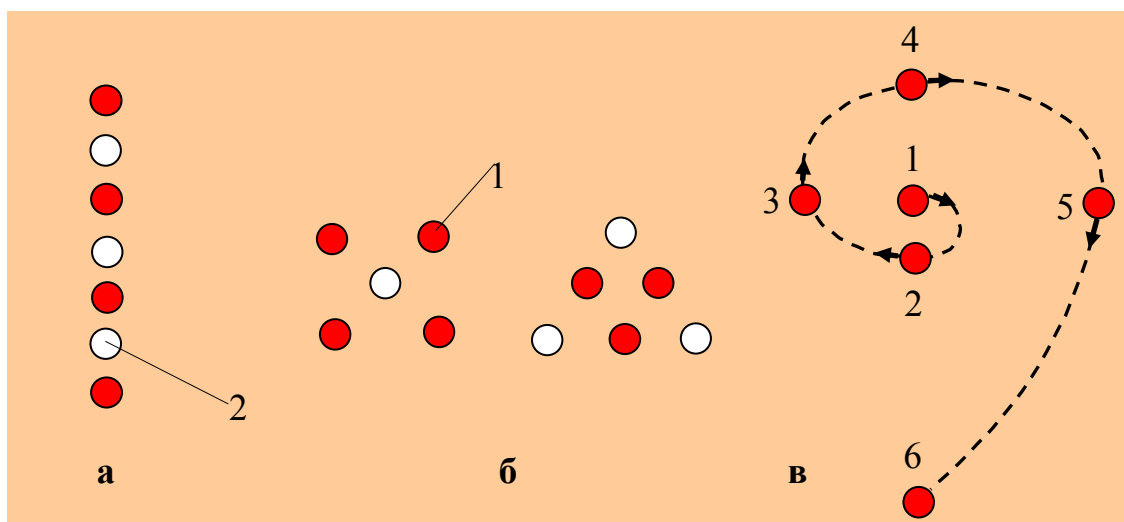


Рис. 6.4. Некоторые схемы расположения прямых врубов:

а – щелевой вруб; **б** – призматический вруб; 1 – заряженный шпур; 2 – незаряженный шпур;
в – спиральный шагающий вруб: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – номера зарядов и соответствующая последовательность их взрывания

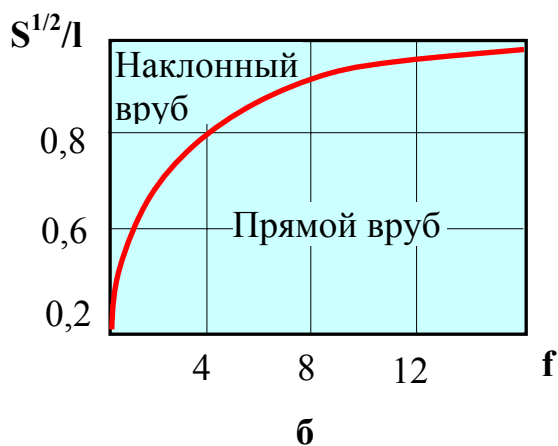
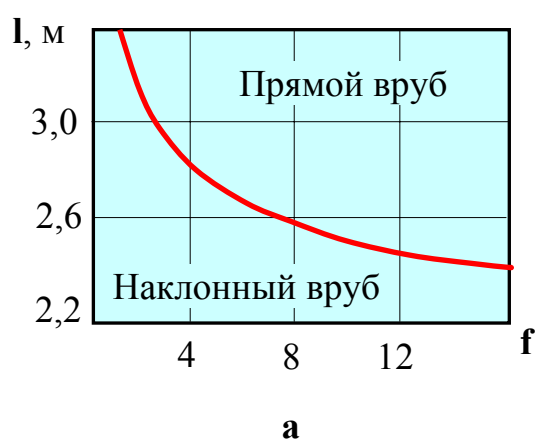


Рис. 6.5. Графики зависимости области определения наклонных и прямых врубов от глубины шпуров (а) и сечения выработки (б)

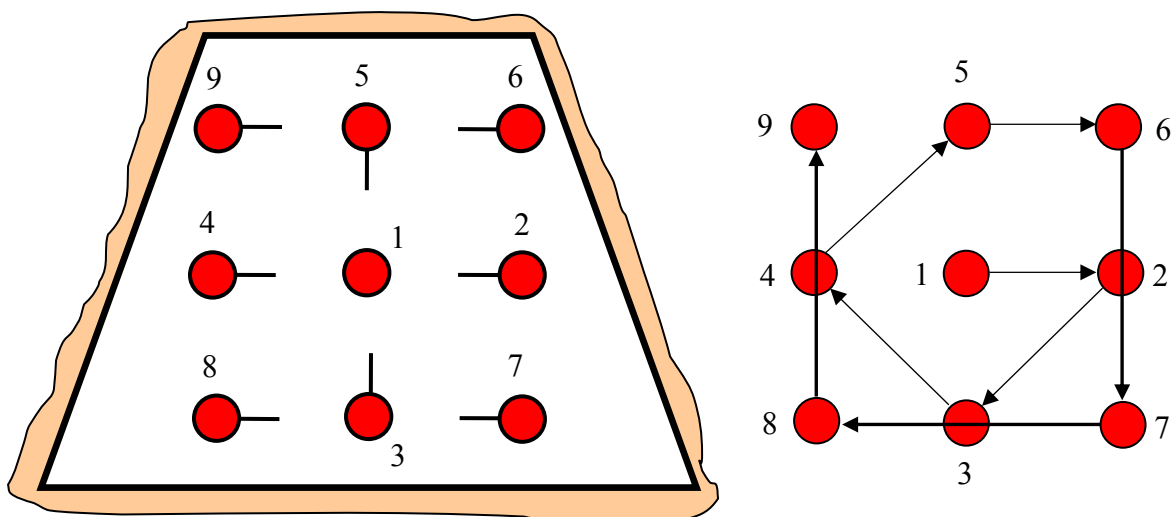


Рис. 6.6. Шагающий пирамидально-клиновый вруб

Прямые вruby с глубокими шпурами, в которых использован эффект взрывной запрессовки, свободной от заряда части шпуров, взрывааемых с замедлением, а также прямые вruby с дополнительными очищающими врубную полость зарядами, показаны на рис. 6.7,а и 6.7,б соответственно.

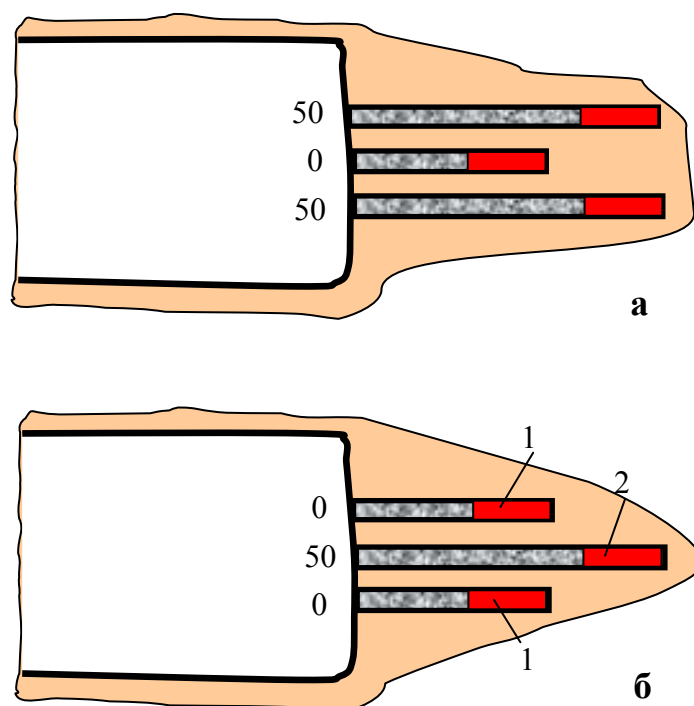


Рис. 6.7. Схема расположения прямых врубов с глубокими шпурами:
а – со взрывной запрессовкой; б – с очищающими врубную полость зарядами;
1 – разрушающий заряд; 2 – очищающий заряд; 0, 50 – время замедления, мс

На рис. 6.8 приведены схемы врубов, которые наиболее часто применяются в шахтах при взрывных работах.

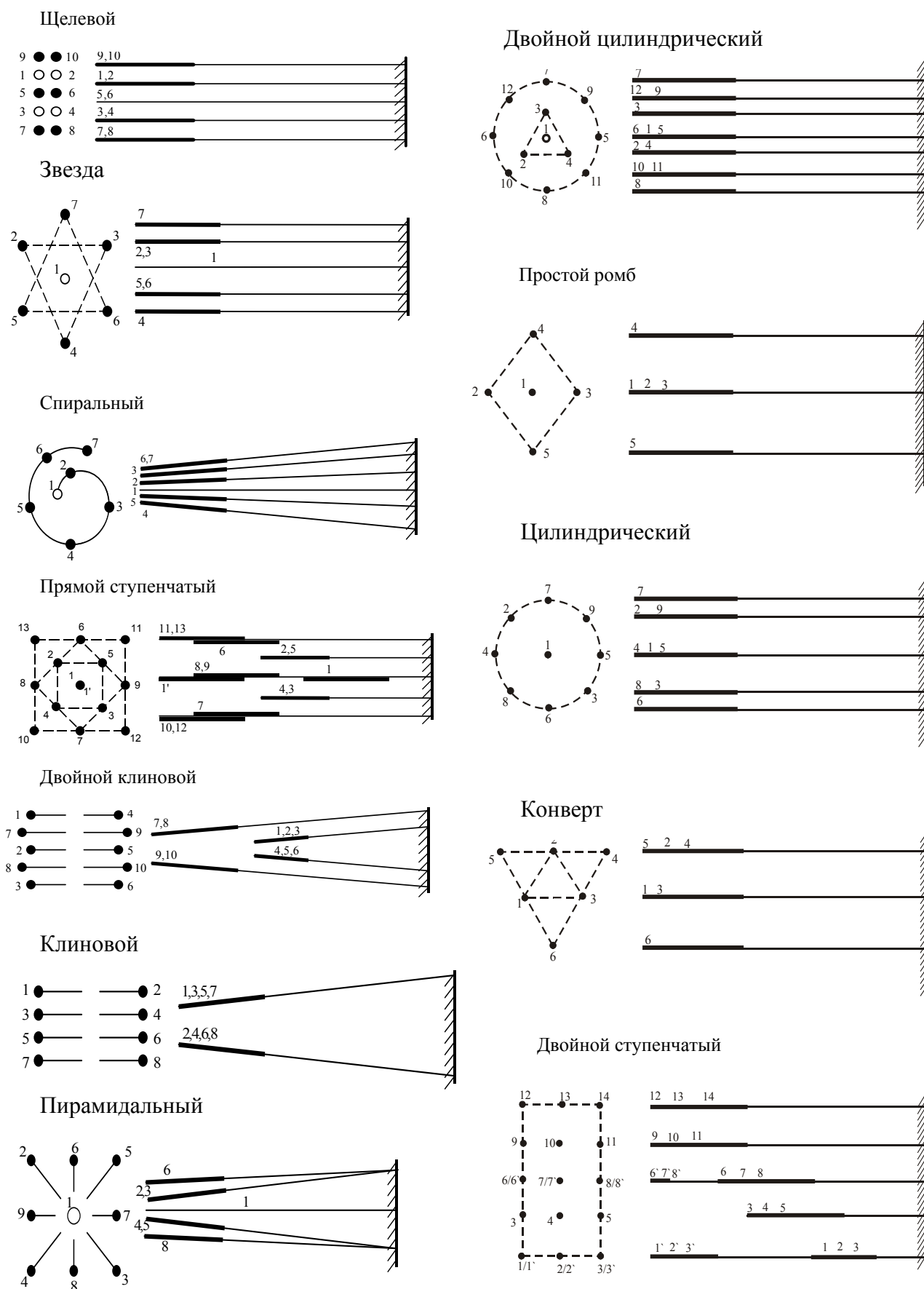


Рис. 6.8. Типичные схемы расположения шпуров во взрывных врубах

Целесообразный интервал замедления между врубовыми и отбойными шпурами составляет 50 – 75 мс, а между отбойными и оконтуривающими шпурами – 15 – 25 мс. С увеличением крепости пород интервал замедления уменьшается. Увеличенный интервал замедления между врубовыми и отбойными шпурами объясняется тем, что время разрушения породы врубовыми зарядами, работающими при одной открытой поверхности, больше чем у отбойных и оконтуривающих.

Минимально допустимое расстояние между смежными шпуровыми зарядами должно составлять не менее величин, указанных в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Минимально допустимые расстояния между шпурами

Условия взрывания	Минимально допустимое расстояние (м) между смежными шпуровыми зарядами при применении ВВ, класса			
	II	III–IV	V	VI
по углю	0,6	0,6	0,5	0,4
по породе: при f менее 7 при $f = 7-10$				
	0,5	0,45	0,3	0,25
	0,4	0,3	–	–

В породах с $f > 10$ расстояние между смежными шпуровыми зарядами должно определяться нормативами, разработанными по согласованию с организацией-экспертом по безопасности работ.

6.2. Забойка шпуров при взрывании в угольных шахтах

Взрывные работы в угольных шахтах являются источником повышенной опасности, связанной с высокой вероятностью воспламенения МВС и ПВС продуктами детонации зарядов ВВ. Одним из путей решения этой проблемы является применения в шпуровом заряде специальных забоечных материалов, которые, с одной стороны, могли бы поглощать часть энергии продуктов взрыва и тем самым способствовать быстрому их охлаждению, а с другой – как можно дольше удерживать продукты взрыва в зарядной камере шпура. Это позволит повысить коэффициент полезного действия взрыва и создать условия для охлаждения продуктов взрыва до температуры, при которой воспламенение МВС и ПВС не происходит.

По обеспечению безопасности работ, химическому взаимодействию с продуктами взрыва и характеру сопротивления (запирающим свойствам), препятствующему истечению из шпура высокотемпературных газов – продуктов детонации ВВ, все используемые в настоящее время типы забойки можно условно разделить на следующие группы: 1 - из пластичных материалов, 2 - из искусственных ингибиторных пластичных материалов, 3 - из сыпучих материалов, 4 - жидкостная забойка, 5 - пробками из твердых материалов, 6 - растворами быстротвердеющих вяжущих веществ и 7 - комбинированная забойка, табл. 6.2.

6.2.1. Ингибиторная забойка

Из данных табл. 6.2 видно, что одним из наиболее простых в исполнении и эффективных видов забоечного материала при ведении взрывных работ в угольных шахтах, опасных по газу и разрабатывающих пласты, опасные по взрывам пыли, является забойка из искусственных ингибиторных пластичных материалов. Ингибиторный пластичный забоечный материал на основе порошка КСВ-30 [7] разработан МакНИИ и УкрНИИпроект при участии Донецкого казенного завода химических изделий и ООО «Ингибитор». Этот материал удовлетворяет условиям пункта 2 табл. 6.2. По основным показателям разработанные составы значительно превосходят применяемые в настоящее время забоечные материалы. Новый материал сертифицирован и допущен к постоянному применению.

Использование ингибиторного пластичного забоечного материала в шахтах Донецкой и Луганской областей позволило значительно увеличить технико-экономические показатели ведения взрывных работ – КИШ возростал (в различных горно-геологических условиях) на 5–15%.

Вид забоечного материала играет важную роль в обеспечении безопасности и эффективности ведения взрывных работ в угольных шахтах, опасных по газу и разрабатывающих пласты, опасные по взрыву пыли.

6.2.2. Применяемые в настоящее время забоечные материалы

Эффективность применения забойки шпуров и скважин при взрывных работах обусловлена следующими преимуществами:

- повышается разрушающее действие взрыва;
- предотвращается воспламенение МВС и ПВС продуктами взрыва;

Таблица 6.2

*Основные характеристики забоечных материалов
(Кашиба О.И., Манжос Ю.В. – МакНИИ)*

Тип забойки	Характеристика	Достоинства	Недостатки
1. Забойка из пластичных материалов (глина, суглинки, смесь песка с глиной)	Запирающие свойства обусловлены совместным действием инерции массы забоечного материала, сил трения и сил внутреннего сцепления забоечного материала	Дешевизна, доступность в изготовлении, простота использования	Не защищает призабойное пространство от взрыва МВС и ПВС при воздействии продуктов взрыва и горении зарядов ВВ
2. Забойка из искусственных ингибиторных пластичных материалов	Запирающие свойства обусловлены совместным действием инерции массы забоечного материала, сил трения и сил внутреннего сцепления забоечного материала	Доступность в изготовлении, простота использования, надежная защита призабойного пространства от вспышек МВС и ПВС. Повышение КИШ, снижает выброс токсичных газов.	Повышенная стоимость
3. Забойка из сыпучих материалов (песок, гранулированный доменный шлак)	Запирающие свойства обусловлены совместным действием только за счет инерции массы забоечного материала и сил трения	Доступность в изготовлении, простота использования	Не защищает призабойное пространство от взрыва МВС и ПВС; технологические неудобства размещения забойки в шпуре и др.
4. Жидкостная забойка (с полной заливкой шпура водой и использование пластиковых ампул)	По запирающему эффекту занимает промежуточное положение между забойками из пластичных и жидких материалов	Дешевизна, доступность в изготовлении, простота использования; снижает выброс токсичных газов в выработку	Жидкость может вытекать из шпуров и ампул. Необходим дополнительный пыж из пластичного материала
5. Забойка шпуров пробками из твердых материалов (дерево, пластмасса, минеральная вата)	Запирающие свойства обусловлены за счет расклинивания пробок в устьях шпуров	–	Недостаточная эффективность
6. Забойка шпуров растворами быстротвердеющих вяжущих материалов	Запирающие свойства обусловлены совместным действием инерции массы забоечного материала, сил сцепления забоечного материала со стенками шпура и частично за счет сил трения	Надежность запираения зарядной камеры шпура, повышение КИШ	Повышенная стоимость, технологические сложности, требует больше времени на подготовку взрыва
7. Комбинированная забойка (ампула с двойной оболочкой, заполненной ингибитором)	Пространство между двумя пластиковыми оболочками заполняется гранулированным наполнителем, затем через клапан в оболочку нагнетается вода	Расклинивает оболочку в шпуре, что обуславливает надежность запираения зарядной камеры шпура и повышение КИШ	Повышенная стоимость. Технологические сложности при монтаже, требует больше времени на подготовку взрыва

- исключается поджиг легко воспламеняющихся предметов высокотемпературными частицами, выбрасываемыми при взрывании зарядов из шпуров и скважин;

- значительно уменьшается содержание токсичных газов в ПВ.

Например, при использовании в шахтах предохранительных аммонитов Т-19 и ПЖВ-20 эффективность взрыва при шпуровом методе составляет от 18% до 23%. Этот эффект связан с тем, что ПВ дольше находятся под высоким давлением и химические реакции разложения ВВ протекают более полно.

Время задержки вылета газов забоечным материалом при шпуровом методе составляет 5 – 15 мс.

В шахтах, опасных по газу и взрыву пыли, рекомендуется применять следующие виды забоечных материалов:

- жидкостная забойка (гидрозабойка), рис. 6.9, применяется в виде заливки наклонных шпуров водой и в виде водонаполненных полиэтиленовых ампул. Гидрозабойка используется в сочетании с запирающей песчано-глинистой забойкой. *Применение запирающей забойки является обязательным.*

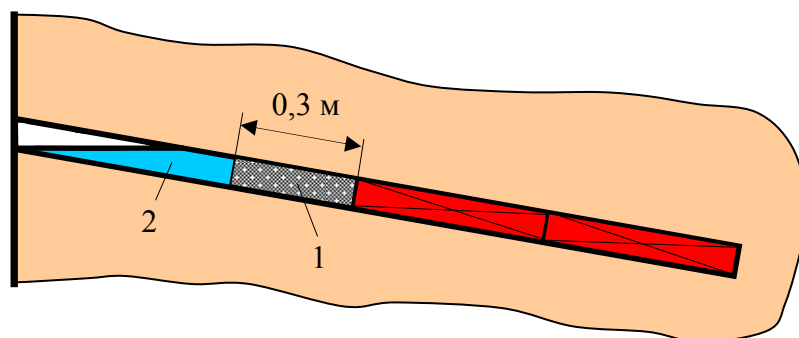


Рис. 6.9. Шпур с жидкостной (2) и запирающей (1) забойкой

- забойка из пластичных материалов (глина, смесь глины с песком, пастообразная смесь типа ПМЗ-3 или увлажненный мел);

- забойка из сыпучих материалов в виде взрывозащитной гранулированной пламелокализующей смеси состава ЗВС-1 и увлажненной смеси карбамида с хлоридом калия.

Гидрозабойка с использованием водонаполненных ампул с обратным клапаном является основным видом забойки при взрывных работах в шахтах, опасных по газу и пыли.

Водонаполненные ампулы в шпуре устанавливают между патронами ВВ и запирающей забойкой. Руководством по применению забойки при взрывных работах в угольных шахтах допускается применять водонаполненные ампулы, располагаемые у дна шпура впереди заряда ВВ и между глиняными пыжами.

При взрывании по углю и по породе минимальная величина забойки для всех забоечных материалов должна составлять:

- при глубине шпуров от 0,6 до 1,0 м – половину глубины шпура;
- при глубине шпуров более 1,0 м – 0,5 м;
- при взрывании зарядов в скважинах – 1,0 м.

Расстояние от заряда ВВ до ближайшей поверхности должно быть не менее 0,5 м по углю и не менее 0,3 м по породе, в т.ч. и при взрывании зарядов в породном негабарите. В случае применения ВВ VI класса при взрывании по углю это расстояние допускается уменьшить до 0,3 м.

6.3. Причины отказов и выгорания зарядов ВВ

По оценкам специалистов источником воспламенения метано-воздушной и пыле-воздушной смеси в опасных выработках шахт до 25% являются взрывные работы. Главные причины заключаются в выгорании зарядов (~25%) и в их обнажении (~25%), наличии трещин в массиве (~20%), в отсутствии или недостаточности забойки (~12%). Кроме этого, причиной отказов или неполных взрывов может быть низкая водостойчивость зарядов ВВ. Это говорит о том, что около 50% аварий связано с применением предохранительных ВВ, не соответствующих классу предохранительности, которые воспламеняют газ при обнажении заряда, при наличии трещин в массиве и отсутствии забойки.

Наиболее опасная ситуация создается в забое, когда детонация заряда затухает и переходит в горение. Причиной может быть неудовлетворительное качество предохранительных ВВ (повышенная влажность, слежавшиеся патроны и т.д.) или вследствие технологических нарушений детонация заряда в шпуре может прекратиться и перейти в горение. В первом и особенно во втором случаях качество взрыва может быть низкое, возможны аварии, связанные с ликвидацией отказов, и вспышки находящихся в атмосфере выработки метана и угольной пыли.

Так как выгорание зарядов ВВ происходит в течение нескольких секунд, то за это время с высокой долей вероятности может возникнуть взрывоопасная

атмосфера из-за выделившегося метана и образовавшейся угольной пыли. Экспериментально установлено, что обычное время образования взрывоопасной концентрации метана и пыли составляет 250–500 мс, а на некоторых пластах может быть еще меньше. В этом случае степень предохранительности горящего заряда ВВ не влияет на воспламенение метана. Очевидно, что возникает необходимость исключить условия взрывания, при которых могут произойти затухание детонации зарядов ВВ и последующее их выгорание.

Чаще всего отказ заряда происходит в результате канального эффекта, прорыва газа в соседний шпур, повышенного гидростатического давления в обводненных шпурах и т.д.

Затухание детонации заряда может привести к следующим отрицательным явлениям:

- горению заряда ВВ;
- образованию ядовитых газов;
- взрыву метано-воздушной смеси;
- взрыву пыле-воздушной смеси в забое.

Рассмотрим последовательно причины, по которым может произойти отказ.

1. *Канальный эффект* – проявляется при наличии зазора между патроном ВВ и стенкой шпура в результате распространения ударной волны в зазоре со скоростью, большей чем скорость детонации ВВ. Эта ударная волна уплотняет заряд до плотности выше критической, в результате чего детонация ВВ затухает или переходит в горение.

Отрицательными явлениями в этом случае могут быть образование ядовитых газов, взрыв метана или угольной пыли в забое.

Меры борьбы:

- необходимо уменьшить радиальный зазор между патронами и стенками шпура;
- применять ВВ с повышенной критической плотностью;
- применять специальные конструкции зарядов, устойчивых к воздействию канального эффекта.

Одним из способов борьбы является применение монопатронов, отдельные части которых выполнены из пластмассовых трубок со стенками толщиной 2–3 мм и с замковыми соединениями на концах, заполненных ВВ. Такая конструкция позволяет быстро собирать заряды любой длины и вводить их в шпур.

Применение пластмассовых оболочек (например, из капрона) не влияет на кислородный баланс при взрыве.

2. *Прорыв газа в соседний шпур.* При взрыве в угольном массиве вокруг заряда возникает система радиальных трещин, которые могут соединять зону взрыва с полостью рядом расположенного шпура. Скорость распространения трещин в углях составляет 360 – 900 м/с. По этим трещинам распространяются продукты взрыва со скоростью 300 – 400 м/с при давлении газов $(25 - 40) \cdot 10^5$ Па в полость соседнего заряженного шпура. Проникающий газовый поток при таких параметрах способен вызвать нарушение сплошности заряда между отдельными его частями (патронами) с образованием промежутков, заполненных воздухом или угольной пылью; подпрессовку заряда в радиальном или осевом направлении; выбрасывание патрона-боевика из шпура.

Перечисленные явления могут вызвать отказ детонации или ее переход в горение. Экспериментально установлено, что при расстоянии между шпурами 0,4 – 0,6 м, их глубине 1,6 – 1,8 м и заряде *угленита Э-6* массой 600 г газы проникают в соседний шпур за 0,7 – 1,5 мс, вызывая указанное нарушение заряда. Плотность отдельных частей ВВ при этом достигает 1,5 – 1,6 г/см³, т.е. превышает критическое значение ($\sim 1,4$ г/см³).

Аналогичная ситуация возникает при ведении взрывных работ по породе. При том же давлении газов скорость распространения трещин в породе может достигать 2000 м/с.

Отрицательные явления, связанные с отказом детонации или ее переходом в горение:

- образование большого количества ядовитых газов (до 1000%);
- взрыв метана или угольной пыли.

Меры борьбы:

– параметры расположения и конструкция применяемых зарядов должны исключить прорыв газов в соседний шпур или нейтрализовать их воздействие на заряд, что регламентировано Едиными правилами безопасности при взрывных работах;

– расстояния между шпурами в углях и в породе должны строго соответствовать данным табл. 6.1.

В ГосМакНИИ разработана конструкция заряда из гранулированных ВВ, разделенных резиновыми зажимами в полиэтиленовом шланге на порции по 200 г. В зависимости от требуемой величины заряда необходимое количество

порций соединяют в один шланговый монозаряд, при этом детонационная способность таких зарядов выше, чем зарядов, составленных из патронов.

3. *Повышение гидростатического давления в шпурах* происходит вследствие того, что шпур после заряжания герметизируется песчано-глинистой забойкой. За время заряжания забоя (30 – 40 мин.) давление по экспериментальным данным может повыситься до $3 \cdot 10^5$ Па.

Отрицательные явления. При давлении $3 \cdot 10^5$ Па водоустойчивость оболочки патрона ВВ снижается, что приводит к намоканию взрывчатого вещества и отказам зарядов.

Меры борьбы: требуется повышение водоустойчивости патронов ВВ и применение пористой забойки, исключающей повышение давления в шпурах.

Ни одно из ранее рассмотренных предохранительных ВВ не обеспечивает полной гарантии невоспламенения взрывоопасной рудничной атмосферы. В связи с этим для ведения взрывных работ разработан комплекс мероприятий, предотвращающих или локализирующих воспламенение МВС и ПВС.

Для увеличения гарантии качественного взрыва и полной детонации зарядов необходимо выполнить следующие правила:

- ЛНС для зарядов в шпурах должна быть не менее 0,5 м;
- содержание метана у забоя и на расстоянии до 20 м от забоя должно быть не более 1%;
- заряд, состоящий из нескольких патронов ВВ, следует вводить в шпур одновременно.

Суммарный интервал замедления при короткозамедленном взрывании в шахтах, опасных по взрыву газа и пыли, выбирают исходя из условий, чтобы в месте расположения зарядов за этот интервал не образовалось взрывоопасных концентраций метана и угольной пыли. Для угольных и смешанных забоев суммарный интервал замедления не должен превышать 200 мс, а для породных забоев подготовительных выработок – 300 мс.

6.3.1. *Некоторые способы инертизации взрывоопасной атмосферы*

Гарантией того, что рудничная атмосфера в призабойном пространстве выработки окажется "безразличной" к любым негативным ситуациям, возникающим при ведении взрывных работ, является замена взрывоопасной атмо-

сферы на инертную. С этой целью используют водяные завесы, воздушно-механическую пену, распыленные ингибиторы, инертные газы, инертную пыль, водяные заслоны и т.д. Кратко рассмотрим некоторые из этих способов.

Способ создания водяных завес состоит в предварительном (за 25 мс до взрыва врубовых шпуров) взрывании зарядами ВВ повышенной предохранительности (VII класс ВВ) полиэтиленовых мешков с водой емкостью от 20 до 50 л, подвешенных у забоя или укладываемых на почву выработки. В этом случае атмосфера в забое на участке 3 – 6 м при однорядном и двухрядном расположении сосудов насыщается тонкодиспергированной водой. Обычно заряды в сосудах взрывают мгновенно, а врубовые шпуры инициируют детонаторами ЭДКЗ с замедлением 25 мс (15 мс). Все заряды монтируют в единую сеть.

Иногда для создания водяных завес применяют специальные форсунки, из которых диспергированная вода выбрасывается на некотором расстоянии от взрываемого забоя. Количество воды принимают из расчета 5 л на 1 м² сечения забоя.

Применение воздушно-механической пены (разработка ИГТМ НАН Украины). Этот способ реализуется следующим образом. От пеногенератора пена воздушным вентиляционным потоком по трубам транспортируется в забой и заполняет все сечение выработки на протяжении 10 – 15 м. Все газы вытесняются из призабойного пространства, чем и обеспечивается безопасность взрыва. Используют пеногенераторы эжекционного типа, производительностью от 0,8 до 1,5 м³/мин. Необходимый напор рабочей жидкости на форсунки пеногенератора создается насосом. Давление в пене падает в 12 – 14 раз и сильную тенденцию к затуханию имеет при увеличении расстояния.

Применение распыленных ингибиторов. Ингибитор – вещество, снижающее скорость химических реакций. При определенном содержании этих веществ в воздухе вспышка взрывоопасной смеси не происходит. В качестве ингибиторов применяют KJ, NaJ, NaBr, которые нейтральны по действию на организм человека, химически стойкие. Распыление их достигается путем взрыва зарядов ВВ.

Использование инертных газов в призабойной зоне основано на том, что пробка (перегородка) из инертных газов толщиной около 1,5 м в выработке гарантирует локализацию вспышки метана или угольной пыли. Не дает возможности развиваться вспышке, если очаг расположен вплотную к забою.

Много десятков лет в угольных шахтах применяются водяные или пылевые заслоны, которые создаются путем размещения на некотором расстоянии от забоя стеллажей, на которых установлены ванны с водой или доски с инертной пылью. Стеллажи и доски легко опрокидываются воздушной ударной волной, идущей впереди пламени, прерывая его распространение образованной преградой из водовоздушной или пылевоздушной смеси.

6.4. Особенности взрывных работ при проведении выработок по выбросоопасным пластам

При отработке пластов, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа, а также на угрожаемых пластах, где текущим прогнозом получены значения "Опасно", в определенном режиме, направленном на защиту людей от последствий возможных выбросов, применяют сотрясательное взрывание.

Сотрясательное взрывание – способ обеспечения безопасности работ, согласно действующим единым правилам безопасности при взрывных работах. применяется при вскрытии опасных по выбросам пластов, при проведении подготовительных и очистных выработок по таким пластам, а также при вскрытии угрожаемых пластов.

Согласно современным представлениям, сотрясательное взрывание – это взрывные работы на пластах, склонных к внезапным выбросам угля, породы и газа, которые выполняются в определенном режиме, направленном на защиту людей от последствий возможных выбросов угля, породы и газа. *Сотрясательное взрывание имеет два принципиально разных значения:*

- полная отбойка угля и породы в заданном сечении выработки;
- предотвращение выбросов угля и газа.

Выбросы угля и газа, происходящие в результате сотрясательного взрывания, характеризуются следующими признаками:

- отбросом угля от забоя на расстояние, превышающее протяженность возможного размещения угля, отбитого взрывным способом;
- образованием в угольном массиве характерной полости;
- повышенным по сравнению с обычным газовыделением в горную выработку.

Основные признаки выброса:

- разрушение породы за пределами проектного сечения выработки;
- образование в массиве полости, оконтуренной породой, расслоившейся на тонкие чешуеобразные пластинки;
- отброс породы от забоя и дробление значительной части ее до размеров крупнозернистого песка;
- повышенное газовыделение в выработку.

Влияние на интенсивность выбросов оказывает угол падения пласта. Так, при пологом падении максимальная интенсивность не превышала 2000 т, при крутом – достигала 14000 т! Увеличение сечения выработки приводит к увеличению интенсивности выбросов угля и газа.

Сотрясательное взрывание условно делят на шесть видов (в данном разделе рассматривается три вида). Разработка нескольких видов сотрясательного взрывания зависит от назначения области и условий эффективного его применения. Каждый из видов имеет вполне определенную область применения, заданный режим взрывания, характеризуется специфическими параметрами ведения взрывных работ

1. *Вскрытие пласта* (этот вид взрывания предназначен для отбойки породы и угля в зонах приближения и удаления). Вскрытие пластов сотрясательным взрыванием производится с использованием ВВ IV класса (аммонит Т-19, аммонит ПЖВ-20). В забоях выработок, проводимых по породам с $f \geq 5$, допускается использовать до обнажения угольного пласта ВВ III класса (например аммонит АП-5ЖВ), имеющего высокую работоспособность.

Вскрытие или пересечение пласта – это комплекс работ, связанных с приближением к пласту, его пересечением и удалением от пласта. Чаще всего пересечение пластов производится квершлагами, рис. 6.10.

Во всех случаях следует считать:

- при вскрытии пологих, наклонных и крутонаклонных угольных пластов "*участком приближения*" – участок вскрывающей выработки с 4 до 1 м перед вскрываемым пластом и "*участком удаления*" – с 1 до 4 м за пластом (все расстояния принимать по нормали к пластам) рис. 6.10;
- при вскрытии крутых угольных пластов "*участком приближения*" участок вскрывающей выработки с 4 до 2 м перед вскрываемым пластом, а "*участком удаления*" – с 2 до 4 м за пластом.

При пересечении выбросоопасных пластов необходимо использовать такой паспорт БВР, при котором заряды ВВ располагаются в породной толще и в угольном массиве. Замедления электродетонаторов короткозамедленного действия должны быть расположены таким образом, чтобы вначале разрушилась породная пробка, а затем пласт угля. Выбор параметров паспорта БВР для выработок, проводимых по угольным пластам и породам, опасным по внезапным выбросам, должен обеспечивать полную отбойку угля (породы) по всему сечению выработки, если при сотрясательном взрывании не достигнута требуемая конфигурация забоя, следует провести повторное сотрясательное взрывание по оконтуриванию выработки. В местах геологических нарушений взрывание по углю и породе должно проводиться одновременно.

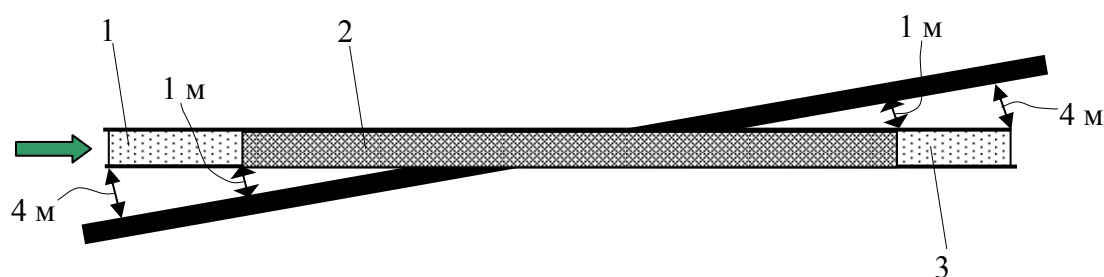


Рис. 6.10. Схема вскрытия пологого пласта квершлагом (по Б.Н. Кутузову):
1 – участок приближения; 2 – участок пересечения; 3 – участок удаления

При осуществлении сотрясательного взрывания должен вестись "Журнал проведения сотрясательного взрывания по шахте", форма которого утверждает-ся руководителем предприятия.

Задачей проведения сотрясательного взрывания в *угольных и смешанных забоях* подготовительных и очистных выработок является полная отбойка угля или угля и породы в заданном сечении выработки. Решение этой задачи обеспечивается применением ВВ IV класса и правильным выбором паспортов БВР, исключающих дополнительное оформление выработок с применением ручных ударных инструментов и машин.

Практика ведения взрывных работ показывает, что схема взрывания с *опережающей отбойкой угля* может быть использована при проведении выработок смешанными забоями на пластах средней мощности. Вторая схема взрывания, предусматривающая *одновременную отбойку угля и породы*, используется на тонких и весьма тонких пластах. Использование этой схемы сокращает

число взрываний и уменьшает вероятность воспламенения МВС и ПВС.

В паспорте БВР для проведения подготовительных выработок (пласты пологого и наклонного падения) устанавливается минимальное число сотрясательных взрываний при максимальном подвигании забоя. При взрывании по углю глубина шпуров составляет 1,8 – 2,9 м, КИШ должен быть не менее 0,85; при одновременном взрывании по углю и породе глубина шпуров 1,8 – 2,6 м, а КИШ – не менее 0,8.

В угольных и смешанных забоях выработок, проводимых по выбросоопасным угольным пластам, при взрывании зарядов только по углю или по углю и породе одновременно, а также по породе без опережающей выемки угля, при проведении выработок по выбросоопасным породам и при вскрытии таких пород, расстояние до укрытия мастера-взрывника должно быть не менее 600 м от забоя, но не ближе 200 м от места слияния исходящей из взрываемого забоя струи воздуха со свежей струей. При этом люди, не связанные с проведением взрывных работ, должны находиться на свежей струе воздуха на расстоянии не менее 1000 м от взрываемого забоя.

Выработка, в которой проводится сотрясательное взрывание, перед взрывными работами должна быть освобождена на протяжении не менее 100 м от забоя от вагонеток и других предметов, загромождающих ее более чем на одну треть поперечного сечения.

Руководство подготовкой и проведением сотрясательного взрывания в забое (группе забоев) должны осуществлять инженерно-технические работники участка, на котором проводятся взрывные работы.

Забои выработок, *проводимые по выбросоопасным породам*, – область сотрясательного взрывания, назначением которой является отбойка породы в заданном сечении выработки.

Оптимизация параметров взрывных работ, направленная на уменьшение интенсивности и частоты выбросов песчаника и газа, включает проведение выработок с опережающим забоем малого сечения, когда взрывные работы выполняются в обоих забоях за один прием (*локализация выбросов достигается тем, что отбитая взрывом порода основного забоя полностью перекрывает сечение опережающего*). В соответствии с паспортами БВР глубину шпуров выбирают равной 1,6–1,8 м, число шпуров в опережающем забое в зонах высокой степени опасности не более 12, а в зонах невысокой и средней степени опасности не более 21. Размеры опережающего забоя в зонах высокой степени

опасности следующие: ширина 1,6 м, высота 2,0 м, в зонах невысокой и средней степени опасности соответственно 3,2 и 2,0 м. Допустимое замедление не более 135 мс.

При проведении выработок одновременно по выбросоопасному слою песчаника и слою сланца или по выбросоопасным и невыбросоопасным песчаникам шпуров располагают в местах, показанных на рис. 6.11.

Применение рассмотренных методов не изменяет состояние очага выброса, а лишь уменьшает интенсивность выброса, что является существенным недостатком. В связи с этим разработан ряд способов, которыми предусмотрены предварительные активные механические воздействия на очаг выброса, например, предварительная дегазация очага выброса глубинными взрывами. Этот способ характеризуется следующей последовательностью проводимых операций:

1 – разведочным бурением обнаруживают выбросоопасный очаг; расстояние от забоя до очага не должно быть меньше 5 м, что обеспечивает создание надежной породной пробки;

2 – в зону очага бурят 3–4 глубоких скважины диаметром 100–150 мм, мощные заряды в которых размещают таким образом, чтобы они не выходили за контур очага выброса. Сильное разрушение массива и трещинообразование приводит к дегазации метана, который выходит через скважины в выработку, выброс при этом не происходит;

3 – после полной дегазации возобновляются работы по проведению выработок сотрясательным взрыванием.

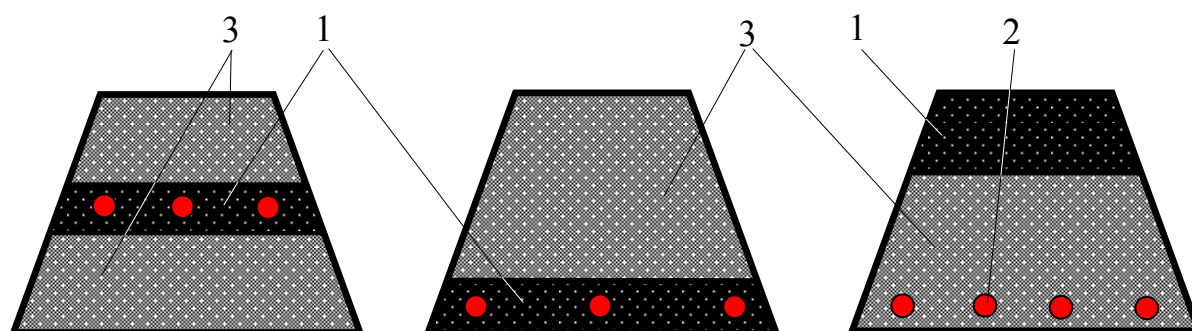


Рис. 6.11. Схемы расположения шпуров при одновременном проведении выработок по выбросоопасным и невыбросоопасным песчаникам (или сланцам):

1 – выбросоопасный песчаник; 2 – шпуров; 3 – невыбросоопасный песчаник (или сланец)

К основным способам снижения интенсивности выбросов при сотрясательном взрывании относятся:

- *взрывание зарядов в коротких шпурах* (осуществляется регулирование глубины шпуров в зависимости от размеров естественной разгруженной зоны угольного пласта впереди забоя выработки – составляет не менее 2 м;
- *передовое рыхление вмещающих пород* (создается опережающая разгрузка в массив угля за счет взрывания глубоких шпуров по породе вблизи выбросоопасного пласта);
- *проведение выработок с опережающим гидровзрыванием* (может осуществляться смешанными забоями только при одновременной отбойке угля и породы. На глубину опережающей части шпура устанавливают полиэтиленовые ампулы, заполненные водой. Оконтуривающие шпуры располагают таким образом, чтобы заряды ВВ выходили за проектный контур выработки не менее чем на 0,2 м, а опережающая забойка – не менее чем на 0,5 м; максимальная глубина шпуров принимается не более 4 м, а опережающая гидрозабойка - половину глубины шпуров. Масса заряда в шпурах с опережающей гидрозабойкой принимается на 0,3 кг больше массы зарядов в шпурах, используемых для отбойки угля);
- *проведение подготовительных выработок с опережающей отбойкой боковых пород* (используется на крутых пластах, склонных к высыпанию, мощностью до 0,8 м).

6.5. Взрывные технологии подземной отбойки угля

Взрывное разрушение угля в лавах в настоящее время не имеет широкого распространения. Однако на гидрошахтах для увеличения производительности гидромониторов разрушение и ослабление угольных пластов, подсечка угольных целиков тонких пластов крутого падения осуществляются с помощью взрыва. Широкое применение взрывного разрушения угля имеет место при щитовой системе разработки пластов крутого падения большой мощности – более 8 м.

Рассмотрим два варианта взрывной отбойки угля в лаве: без машинной подрубки и с машинной подрубкой.

Взрывная отбойка угля без машинной подрубки. Этот метод предусматривает расположение шпуров при мощности пласта ≤ 1 м в один ряд, а при

мощности пласта более 1 м в два ряда наклонно к линии забоя, чтобы обеспечить отбрасывание угля, рис. 6.12. При этом удельный расход ВВ составляет 0,2–0,4 кг/м³. Глубину шпуров выбирают в зависимости от устойчивости пород кровли, а если шпуры бурят под углом, то с учетом угла наклона.

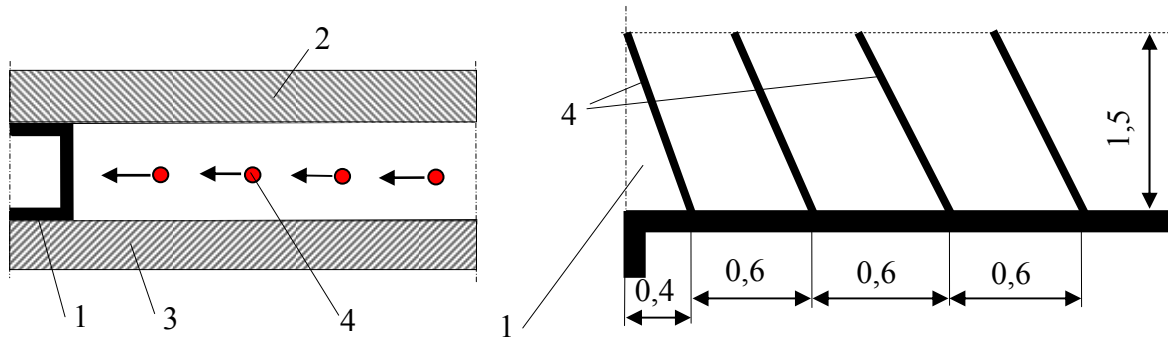


Рис. 6.12. Схема взрывного разрушения угля в лаве:
1 – угольный пласт; 2 – кровля; 3 – почва; 4 – заряженные шпуры

Продвигание забоя за один цикл при неудовлетворительной устойчивости кровли составляет 0,8–1,0 м, при нормальной – 1,0–1,2 м.

Число шпуров на лаву определяется по формулам:

при расположении в один ряд

$$N = L/a;$$

при расположении в два ряда

$$N = L (1/a_1 + 1/a_2),$$

где L – длина лавы (взрываемого участка); a – расстояние между шпурами в ряду; a_1 и a_2 – расстояние между шпурами, расположенными соответственно в первом и втором ряду.

Если расстояние между шпурами в рядах одинаковое, то число шпуров определяют по формуле:

$$N = L \cdot n/a \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

Рекомендуемая величина заряда ВВ на один шпур:

0,2 – 0,4 кг при $l_{ш} = 1,0 – 1,3$ м;

0,4 – 0,6 кг при $l_{\text{ш}} = 1,5 - 1,8$ м;

0,5 – 0,8 кг при $l_{\text{ш}} = \text{более } 1,9$ м.

Расстояние между шпурами в ряду на антрацитовых пластах находятся в пределах 1,2 – 1,8 м.

Отбойка угля в лавах с машинной подрубкой, рис. 6.13. При отбойке угля по этой схеме шпуры бурят перпендикулярно поверхности забоя на величину вруба ($l_{\text{ВРУБ}} = l_{\text{ш}}$) и заряжают их из расчета удельного расхода ВВ (типа аммонитов ПЖВ-20, Т-19) 0,1 – 0,2 кг/м³.

Образование ниш в лавах обычно производят с помощью взрывов, средств беспламенного взрывания или применяют отбойные молотки.

В результате взрыва может образоваться навес пачки угля, рис. 6.14. Чтобы этого не произошло необходимо $l_{\text{ш}}$ увеличить на 0,1 – 0,15 м по сравнению с величиной $l_{\text{ВРУБ}}$. В слабых углях рекомендуют выбирать $l_{\text{ш}} = l_{\text{ВРУБ}} - (0,1 - 0,15)$.

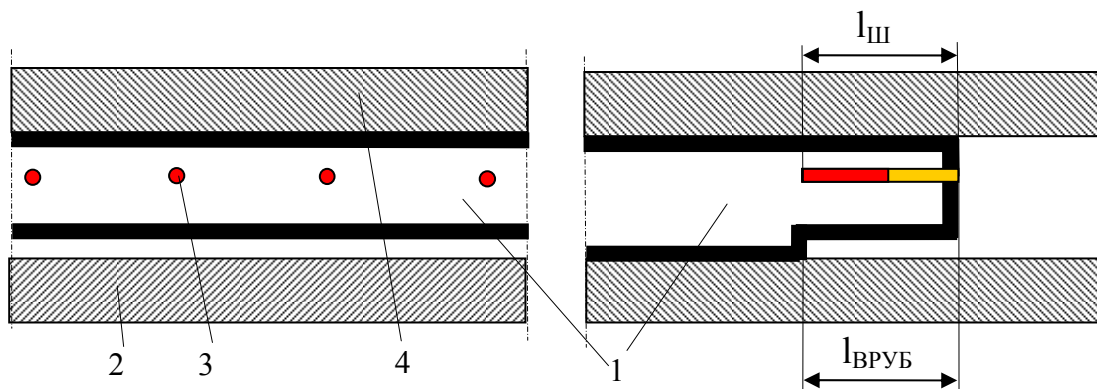


Рис. 6.13. Схема расположения шпуров в забое при машинной подрубке угля:
1 – угольный пласт; 2 – почва; 3 – шпур с зарядов ВВ; 4 – кровля

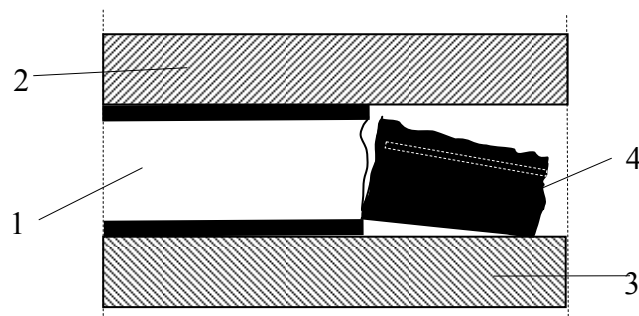


Рис. 6.14. Навес пачки угля:
1 – угольный пласт; 2 – кровля; 3 – почва; 4 – навес пачки угля

При хорошем отделении угля от кровли расстояние, на котором бурят шпуров от кровли, составляет 10 – 20 см (при $m_{пл} \geq 1,2-2,2$ м). Расстояние между шпурами в ряду на антрацитовых пластах составляет 1,8 – 2,5 м.

В шахтах, опасных по взрыву газа и пыли отбойка подрубленной пачки угля с применением ВВ представляет опасность. Так как подрубленная пачка под действием собственной массы и давления на нее кровли оседает с образованием трещин, в которых быстро накапливается метан. Заряд, пересекающий трещину, может легко воспламенить взрывчатую смесь. Поэтому в процессе машинной подрубки пачку надежно закрепляют подшашками, рис. 6.15.

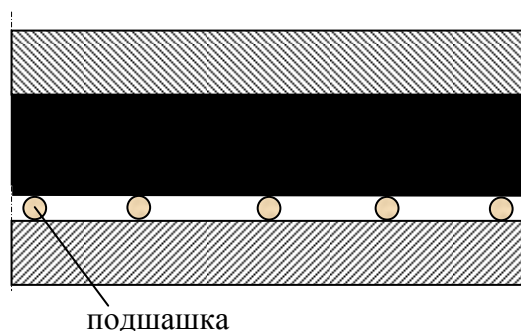


Рис. 6.15. Схема закрепления подрубленной пачки угля подшашками

В шахтах, опасных по газу и пыли, при взрывании в забоях применяют предохранительные ВВ в патронах диаметром 36 – 37 мм; в неопасных шахтах – диаметром 36 – 37 мм, 31 – 32 мм. Для контурного взрывания используют ВВ в патронах диаметром 28 мм. При проходке вертикальных стволов применяют ВВ в патронах диаметром 36 – 37 мм и 44 – 45 мм, для оконтуривания – диаметром 32 мм.

В угольных забоях бурят шпуров на 5 – 8 мм больше диаметра патрона ВВ. Диаметр шпуров породных забоев на 3 – 5 мм больше диаметра патрона ВВ (допускается 2 – 3 мм). Запрещается бурение шпуров сильно изношенными коронками и резцами, диаметр которых меньше диаметра патрона ВВ.

Выбор глубины шпуров производится с учетом площади и формы забоя, свойства взрываемых пород, работоспособности ВВ, типа бурового оборудования, требуемой величины продвижения забоя за один взрыв. На практике при одной свободной поверхности глубина шпура 1,5 – 3,0 м:

до 1,8 м в крепких породах ($f = 7-20$);

1,8– 2,2 м в породах средней крепости ($f = 4-6$);

2,2 – 2,5 м в слабых породах ($f = 1,5-3,0$).

Среднюю глубину шпура в породных забоях в зависимости от величины коэффициента крепости по М.М. Протодяконову и площади забоя в проходке находят из таблиц. Также из таблиц находят среднюю глубину шпуров в угольных подготовительных забоях с одной открытой поверхностью с учетом коэффициента крепости пород и площади поперечного сечения забоя.

При проведении вертикальных стволов шахт:

- глубина шпуров 3 – 2,6 м при $f = 1,5 – 3,0$;
- глубина шпуров 2,5 – 2,2 м при $f = 4 – 6$;
- глубина шпуров 2,1 – 1,5 м при $f = 7 – 20$.

6.6. Ответственность персонала за нарушение порядка хранения, учета и использования взрывчатых материалов

Должностные лица и рабочие, виновные в нарушении требований нормативных документов о порядке хранения, использования и учета ВМ, несут ответственность в дисциплинарном, административном или уголовном порядке.

Руководитель и главный инженер шахты несут ответственность за:

- своевременное оформление разрешений на право производства взрывных работ, приобретение ВМ и их перевозку;
- своевременную подачу вышестоящей организации заявок на получение ВМ, обеспечение установленного порядка допуска лиц для руководства и производства взрывных работ, а также хранения ВМ и обращения с ними;
- обеспечение предприятий,строек, организаций необходимым числом складов ВМ требуемой вместимости, их исправное состояние, недопущение загрузки складов сверхустановленной вместимости;
- обеспечение складов ВМ охраной в соответствии с установленным порядком, обеспечение ежемесячной проверки порядка учета, хранения и наличия ВМ на складах;
- обеспечение порядка и охраны при разгрузке и транспортировании ВМ на склады и к месту работ;
- обеспечение правильной постановки учета ВМ на складах; разрешение применять только те ВМ, которые допущены к использованию в данных условиях работы;

- незамедлительное сообщение вышестоящей организации, непосредственно контролирующей организации и местному органу внутренних дел о случаях хищения и потерь ВМ;
- своевременное привлечение к ответственности нарушителей порядка хранения, использования и учета ВМ;
- безопасную организацию взрывных работ.

Руководитель взрывных работ несет ответственность за:

- обеспечение точного соблюдения подчиненным ему персоналом порядка хранения, учета, расходования и транспортировки ВМ;
- допуск к производству взрывных работ, испытанию ВМ только лиц, имеющих на это право;
- обеспечение контроля за своевременной отчетностью мастеров-взрывников об израсходованных ВМ и сдачу ими остатков на склад;
- организацию регулярного надзора за состоянием складов ВМ, участковых раздаточных пунктов, подземных раздаточных камер и за работой обслуживающего персонала и охраны;
- организацию проведения опытных взрываний для установления параметров паспорта буровзрывных работ; регулярную проверку правильности разработанных проектов и паспортов на производство взрывных работ;
- обеспечение соблюдения требований правил и инструкций и паспортов на производство взрывных работ;
- внесение записи в книги учета, выдачи и возврата ВМ на расходном складе;
- организацию переподготовки и инструктажа мастеров-взрывников, лаборантов, раздатчиков, доставщиков, подносчиков ВВ, помощников взрывников по вопросам ведения взрывных работ, обеспечения условий безопасности, правильного обращения с ВМ и использования их по назначению.

Начальник участка взрывных работ несет ответственность за:

- организацию проведения взрывных работ на шахте в соответствии с действующими правилами; своевременную разработку проектов на взрывные работы;
- ознакомление с утвержденным проектом лиц надзора участка и соот-

ветствующих производственных участков, а также мастеров-взрывников; осуществление контроля за наличием паспортов буровзрывных работ;

- допуск к производству взрывных работ только лиц, имеющих на это соответствующие права;

- определение в соответствии с паспортами буровзрывных работ норм расхода ВМ по отдельным объектам и в целом по предприятию, а также определение потребности в них взрывчатых материалов в целом по предприятию для представления заявок на планируемый период (квартал, год);

- обеспечение соблюдения правил хранения, использования и учета ВМ, а также их уничтожения в соответствии с требованиями правил;

- обеспечение ежемесячного приема отчетов у мастеров-взрывников (взрывников) о выполнении заданий на производство взрывных работ, а также о расходовании ВМ и возврате их остатков на склад;

- осуществление мер по предупреждению неполных детонаций, выгораний и отказов, организацию ликвидации невзорвавшихся зарядов в соответствии с требованиями правил; ведение постоянного учета всех случаев отказов и выгораний ВВ и средств инициирования, а также вспышек и взрывов метана и угольной пыли при взрывных работах;

- систематическое проведение инструктажа мастеров-взрывников (взрывников), лаборантов, раздатчиков, доставщиков, подносчиков ВМ по вопросам безопасности при взрывных работах, правильного обращения с ВМ и использования их по назначению;

- организацию обеспечения мастеров-взрывников (взрывников) исправными взрывными и контрольно-измерительными приборами, взрывными магистралями, сумками или другими емкостями для переноски ВМ, газоанализаторами, забойниками и другими принадлежностями, необходимыми для производства взрывных работ;

- своевременное выявление неисправных взрывных и контрольно-измерительных приборов и направление их в ремонт.

Начальник участка, на котором ведутся взрывные работы, несет ответственность за:

- своевременное проведение опытных взрываний для установления требуемых показателей при составлении паспорта БВР для каждого забоя (объек-

та), ознакомление с паспортом БВР (проектом) лиц надзора участка, горных мастеров (мастеров), начальников смен и рабочих соответствующей квалификации; обеспечение строгого соблюдения на участке паспортов БВР (проектов);

- точное соблюдениеб подчиненным ему персоналом порядка хранения, учета, использования и транспортировки ВМ;
- допуск к производству взрывных работ и обслуживанию зарядных машин только лиц, имеющих на это право;
- своевременную отчетность подчиненных ему мастеров-взрывников (взрывников) об израсходовании ВМ и сдачу ими остатков на склад ВМ; обеспечение правильности подтверждения данных о расходе ВМ лицами технического надзора (горными мастерами);
- привлечение в качестве доставщиков ВВ от склада ВМ к местам работы только стажеров-взрывников или проинструктированных рабочих;
- подготовку, оборудование и содержание в исправности контейнеров (сейфов, ящиков) для хранения ВМ на участках (вблизи места производства взрывных работ); своевременную перестановку контейнеров (сейфов, ящиков) и их ремонт;
- обеспечение мест хранения ВМ противопожарными средствами и телефонной связью с коммутатором предприятия, безусловной сохранности ВМ на участке.

Горный мастер, мастер, начальник смены участка, где производятся взрывные работы, несет ответственность за:

- подготовку забоя (объекта) к производству взрывных работ в полном соответствии с требованиями Правил безопасности в угольных и сланцевых шахтах или других ведомственных правил безопасности и выдачу письменного разрешения (на наряде-путевке) на взрывание;
- допуск на посты охраны места производства взрывных работ рабочих, прошедших соответствующий инструктаж; расстановку постов охраны и выставление ограждающих знаков до начала взрывных работ; осмотр места производства взрывных работ после взрывания и проветривания;
- руководство своевременной и безопасной ликвидацией невзорвавшихся зарядов (отказов); допуск рабочих в забой после взрывания и проветривания;
- обеспечение контроля за использованием ВМ только по назначению;

- подтверждение правильности сведений в наряде-путевке о фактическом расходе ВМ;
- выполнение буровзрывных работ по проекту или по паспорту.

Мастер-взрывник (взрывник) несет ответственность за:

- обеспечение постоянного надзора за полученными им ВМ, не допуская передачи их другим лицам (кроме случаев, оговоренных правилами), утери, разбрасывания или оставления в подземных выработках либо на поверхности, а также самовольного уничтожения;
- использование полученных ВМ только по назначению;
- проведение взрываний в соответствии с паспортом БВР (проектом) на взрывные работы;
- проведение взрывных работ только при наличии постов охраны и соблюдении всех других требований правил безопасности;
- своевременную сдачу на склад или участковый пункт хранения остатка неиспользованных ВМ, правильный учет расхода их в наряде-путевке;
- осмотр забоев после взрывания, своевременное сообщение лицу сменного надзора или руководителю взрывных работ о невзорвавшихся зарядах и отметку в "Журнале записи отказов при взрывных работах и времени их ликвидации", а также за своевременную ликвидацию невзорвавшихся зарядов;
- при невозможности ликвидации этих зарядов – за установку ограждающих знаков, предупреждающих об опасности подхода посторонних лиц к невзорвавшимся зарядам, и немедленное извещение лиц технадзора о их числе и местонахождении;
- строгое соблюдение правил транспортирования ВМ от склада ВМ до места работы и обратно;
- проверку на опасных по пыли шахтах качества орошения выработки или связывания осевшей пыли;
- производство взрывных работ в выработках шахт, опасных по газу, только при допустимых концентрациях взрывчатых газов;
- проверку подготовленности забоя к производству взрывных работ; расстановку постов охраны и выставление ограждающих знаков дог начала взрывных работ (в специальных случаях, оговоренных правилами);

- осмотр мест производства взрывных работ после взрывания и проветривания; подачу соответствующих сигналов об окончании взрывных работ и разрешение на допуск совместно с лицом сменного технического надзора рабочих к месту взрывания для последующих работ;
- осуществление контроля за правильностью выполненных буровых работ в соответствии с проектом или паспортом БВР;
- замер газоанализатором содержания метана на шахтах, опасных по газу, непосредственно перед заряджанием и взрыванием; замер содержания метана перед взрыванием у места нахождения взрывного прибора; выполнение мероприятий по предупреждению взрывов газа и пыли.

Вопросы для самоконтроля знаний

1. Что называется шпуром, и какими основными элементами и параметрами он характеризуется?
2. Как от крепости породы зависит характер и особенности ее разрушения?
3. Какие меры предусмотрены ЕПБ в случае образования "стакана"?
4. Что такое коэффициент использования шпура?
5. Перечислите требования, которым должен отвечать комплект шпуров.
6. Что такое коэффициент излишка сечения? Какие нормативные значения он имеет?
7. Какие шпуры называют врубовыми? Их назначение и очередность взрывания.
8. Какие шпуры называют отбойными? Их назначение и очередность взрывания.
9. Какие шпуры называют оконтуривающими? Их назначение и очередность взрывания.
10. В каких случаях применяют наклонные и врубовые шпуры?
11. Какие врубы называют призматическими (прямыми)? Их назначение и примеры расположения.
12. Приведите схему шагающего пирамидального вруба и охарактеризуйте его работу.
13. Приведите пример схемы применения прямых врубов с глубокими шпурами.
14. Какие интервалы замедления рекомендуются использовать между шпурами? Объясните почему рекомендуют такие интервалы.
15. Какие виды забойки разрешены ЕПБ использовать в угольных шахтах? Какую функцию выполняет забойка?
16. Какие возможные причины отказов и выгорания зарядов?
17. В каких случаях возможно проявление канального эффекта?
18. Каким образом происходит прорыв газа в соседний шпур, к каким последствиям это приводит и какие меры борьбы существуют с этим явлением?
19. Каким образом происходит повышение гидростатического давления в шпурах, к каким последствиям это явление приводит, и какие меры борьбы существуют с этим явлением?
20. Какие правила необходимо выполнять для увеличения гарантии качественного взрывания?
21. Какой суммарный интервал замедления рекомендуется по углю и породе?
22. Дайте характеристику способам инертизации взрывоопасной атмосферы.
23. Какой способ называют сотрясательным взрыванием, и какие он имеет принципиальные значения?

24. Охарактеризуйте вид сотрясательного взрывания, предназначенный для отбойки породы и угля в зонах приближения и удаления.
25. В чем состоит особенность ведения взрывных работ при пересечении выбросоопасных пластов?
26. Охарактеризуйте вид сотрясательного взрывания, предназначенный для отбойки угля, угля и породы в заданном сечении выработки.
27. Охарактеризуйте вид сотрясательного взрывания, предназначенный для отбойки породы в заданном сечении выработки. На что направлена оптимизация параметров взрывных работ?
28. Какие способы относятся к основным, снижающим интенсивность выбросов при сотрясательном взрывании?
29. Как осуществляется технология проведения взрывной отбойки угля без машинной подрубки?
30. Как осуществляется технология проведения взрывной отбойки угля с машинной подружкой?
31. Какую ответственность несут руководители шахт и участков и мастера-взрывники за нарушение порядка хранения, учета и использования ВМ?

Список рекомендованной литературы

1. Единые правила безопасности при взрывных работах. – К.: Норматив, 1992. –171 с.
2. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом (взрывные технологии в промышленности). – М.: Из-во Московского государственного горного университета, 1994. – 448 с.
3. Таранов П. Я., Гудзь А. Г. Разрушение горных пород взрывом. – М.: Недра, 1976. – 253 с.
4. Шевцов М.Р., Таранов П.Я., Левіт В.В., Гудзь О.Г. Руйнування гірських порід вибухом. – Донецьк: ТОВ "Лебідь", 2003. – 272 с.
5. Коровченко Г.М. Мастер-взрывник. – М.: Недра, 1972. – 192 с.
6. Соболев В.В., Мандрікевич В.М., Орел М.В., Шломіна Л.С. Українсько-російсько-англійський термінологічний словник з гірничовибухової справи. – Д.: Національний гірничий університет, 2004. – 245 с.
7. Составы порошковые взрывоподавляющие КСВ-30, КСВ-30М ./ Технические условия ТУ 6-18-1.0-87. – 1987. – 14 с.