

$$M_t(x, \varphi) = -\frac{Ph^2}{3\pi r^4 \Delta\varphi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\alpha_{2n}x} \sin(n\Delta\varphi) n(1-4n^2)}{\alpha_{2n}^2} (\sin \alpha_{2n}x - \cos \alpha_{2n}x) \cos 2n\varphi;$$
$$T_t(x, \varphi) = -\frac{4Ph^2}{3\pi r^5 \Delta\varphi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\alpha_{2n}x} \sin(n\Delta\varphi) n^3(1-4n^2)}{\alpha_{2n}^2} (\sin \alpha_{2n}x - \cos \alpha_{2n}x) \cos 2n\varphi;$$
$$S(x, \varphi) = \frac{2P}{\pi\Delta\varphi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\alpha_{2n}x} \sin(n\Delta\varphi) \alpha_{2n}}{n^2} \sin \alpha_{2n}x \sin 2n\varphi,$$

где  $T_x$  – осевое усилие,  $T_t$  – окружное усилие,  $M_t$  – окружной момент,  $S$  – сдвигающее усилие,  $P$  – реакции натяжения канатов талевой системы,  $r$  – радиус срединной поверхности обсадной трубы,  $\Delta\varphi$  – угол раствора крепежного окна,  $h$  – толщина стенки трубы,  $\alpha_n = \frac{n}{r} \sqrt{\frac{(n^2-1)^2 h^2}{48r^2}}$ .

Погрешность при определении максимальных напряжений (рис. 3, рис. 4) составляет 18%, что определяет допустимую погрешность, так как при более мелкой разбивке модели эта точность увеличится.

Таким образом, для проведения дальнейших исследований напряженно-деформированного состояния обсадной колонны в зоне крепежного окна можно использовать рассмотренную математическую модель оболочки, так как влияние кольцевых ребер на эту зону минимально.

### **Библиографический список**

1. Бульчев Н. С., Абрамсон Х. И. Крепь вертикальных стволов шахт. – М.: Недра, 1978. – 301 с.
2. Амиро И. Я., Зарупский В. Я. Методы расчета оболочек. Т. 2. Теория ребристых оболочек. – Киев.: Наук. думка, 1980. – 368 с.
3. Жиленко Н. П., Краснощек А. А. Справочное пособие по реактивно-турбинному бурению. – М.: Недра, 1987. – 309 с.

© Царенко С. Н., 2006

УДК 622.235.22

Канд. тех. наук. КАЛЯКИН С. А. (ДонНТУ)

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ВВ ОТ ЕГО ДАВЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ**

Развитие угольной промышленности Украины связано с непрерывным увеличением глубины разработки угольных пластов и повышением их газообильности и выбросоопасности. Подавляющее число взрывов газа метана или его смеси с угольной пылью и воздухом имеет место в шахтах III категории, сверхкатегорных по газу метану и опасных по внезапным выбросам. Современная концепция взрывозащиты горных выработок базируется на комплексе мероприятий по предупреждению воспламенения взрывоопасной среды при горных работах, включая предупреждение взрывов метана при взрывных работах, которое достигается только за счет применения высокопредохранительных взрывчатых веществ (ВВ) и средств их взрывания. Поэтому совершенствование предохранительных ВВ направленное на повышение их

безопасности и эффективности применения в шахтах является актуальной проблемой, имеющей важное научное и практическое значение.

Анализ последних исследований и публикаций показал, что наметилась четкая тенденция в совершенствовании высокопредохранительных ВВ для угольных шахт, которая заключается в следующем. Данные ВВ должны иметь более высокий уровень работоспособности, чем у существующих: 0,72...0,75 от уровня работоспособности ВВ IV класса (160 – 165 см<sup>3</sup> по методу Трауцля). Уровень предохранительных свойств должен быть таким, чтобы исключить воспламенение метана в трещинах шнура или со стороны открытой боковой поверхности заряда длиной не менее 0,5 м. При этом уровень предохранительных свойств ВВ имеет количественное значение – массу предельного заряда, которая подлежит определению в опытном штреке путем взрывания заряда во взрывоопасной среде. Ранее проведенными исследованиями [1,2] установлено, что величина предельного заряда ВВ, которая не воспламеняет метановоздушную смесь при его испытании в опытном штреке, в сильной степени зависит от скорости детонации ВВ и энергии его взрыва. В работах [3, 4] автором начаты исследования критических параметров антигризутности (безопасности ВВ по отношению к взрывчатой смеси метана с воздухом) предохранительных ВВ в зависимости от удельной энергии взрыва ВВ и условий перехода детонационной волны, движущейся по заряду, в окружающую его взрывчатую смесь метана и воздуха.

Целью настоящей статьи является определение влияния энергии детонации ВВ на его предохранительные свойства – предельный заряд, который не воспламеняет взрывчатую метановоздушную смесь (МВС) и установление критического значения энергии, которое может быть реализовано при детонации заряда ВВ.

Исследованиями, результаты которых приведены в работе [3], установлено, что существует показатель  $\Pi$ , определяющий безопасную величину предельного заряда ВВ, при его взрывании во взрывчатой МВС. Чем больше величина показателя  $\Pi$ , тем больше величина предельного заряда ВВ, который не воспламеняет МВС. Для условий взрывания заряда ВВ в канале стальной мортиры без забойки установлено, что показатель  $\Pi$  зависит прямо пропорционально от массы введенного в состав ВВ ингибитора –  $m$  и обратно пропорционально от удельных теплоты взрыва ВВ –  $Q_v$  и объема газообразных продуктов взрыва –  $V$ :

$$\Pi = f\left(\frac{m}{Q_v \cdot V}\right) \quad (1)$$

Если учитывать, что скорость детонации заряда ВВ –  $D$  зависит от удельной теплоты взрыва ВВ:

$$D \approx \sqrt{Q_v},$$

то показатель в форме записи (1) можно преобразовать к виду:

$$\Pi = \frac{m}{D \sqrt{Q_v} \cdot V} \quad (2)$$

Далее уравнения (1) и (2) можно представить в еще более выгодном виде:

$$\Pi = \frac{\beta}{D \sqrt{Q_v}} = \frac{\beta}{Q_v}, \quad (3)$$

где  $\beta$  – концентрация ингибитора в продуктах взрыва ВВ, кг/м<sup>3</sup>.

Основным преимуществом уравнения (3) является то, что оно позволяет оценивать и правильно осуществлять управление предохранительными свойствами ВВ. Так, например, если необходимо их увеличить (предельный заряд должен расти), то величину концентрации ингибитора необходимо также увеличить, если сохранить их на одном приемлемом уровне, но увеличить работоспособность ВВ, то необходимо соблюсти равенство показателей  $\Pi$  до и после увеличения работоспособности ВВ:

$$P_1 = P_2 = \frac{\beta_1}{Q_{v1}} = \frac{\beta_2}{Q_{v2}}.$$

В работе [4] для зарядов предохранительных ВВ, взрываемых в открытом виде (свободно подвешенные во взрывной камере опытного штрека или в уголковогой мортире), установлено, что существует критическая скорость детонации заряда ВВ –  $D_{кр}$ , которую если превысить, то при взрыве такого заряда в МВС будут регулярно наблюдаться ее воспламенения. Соответственно критическому значению скорости детонации –  $D_{кр}$  имеется вполне определенное значение критической энергии детонации –  $Q_{кр}$ , которая выделяется при движении детонационной волны по заряду ВВ:

$$Q_{кр} = \left[ \left( \frac{D_{МВС}}{\theta} \right) \frac{(n+1)}{(k+1)} \right]^2 / 2(n^2 - 1) \quad (4)$$

где  $D_{МВС}$  – скорость детонации МВС;

$k = \frac{c_p}{c_v}$  – показатель адиабаты МВС;

$c_p, c_v$  – теплоемкости продуктов взрыва МВС при постоянном давлении и объеме соответственно;

$\theta$  – критический параметр, равный:

$$\theta = 1 + \frac{2n}{(n-1)} \left[ 1 - \left( \frac{r_3}{r_{кр}} \right)^n \right]^{\frac{(n-1)}{2n}};$$

$n$  – показатель политропы ВВ;

$r_3$  – радиус заряда;

$r_{кр} = r_3 + r_{кр}$ ;

$r_{кр}$  – критический радиус реагирующей МВС.

Согласно уравнению (4), критическая величина энергии детонации ВВ зависит от скорости детонации МВС и показателей  $n, k, \theta$  и  $r_3/r_{кр}$ . Если величины этих показателей изменяются в достаточно узких интервалах, то значение скорости детонации МВС находится в пределах от 600 до 1800 м/с в зависимости от условий ее взрывания и мощности источника инициирования. Поэтому до настоящего времени не удалось установить вид зависимости между величиной критической энергии детонации заряда ВВ и его массой предельного заряда –  $M_{пр}$ .

Для решения этой задачи поступаем следующим образом. Показатель, определяющий уровень предохранительных свойств ВВ в форме зависимости (2) или (3), преобразуем согласно работе [4] к виду:

$$P = \frac{\varepsilon}{Q_v V \sqrt{1 - \varepsilon}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – содержание ингибитора (кг) в 1 кг ВВ.

Тогда поскольку детонационная волна распространяется по ВВ, размеры которого ограничены размерами заряда, у которого удельный объем будет равен  $V = 1/\rho_{ВВ}$ , а  $Q_D = D^2$ , то, учитывая это, уравнение (5) принимает следующий вид:

$$P = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \frac{\rho_{ВВ}}{D^2} = C \frac{\rho_{ВВ}}{Q_D}, \quad (6)$$

где  $Q_D$  – удельная энергия детонации, которая выделяется в детонационной волне, кДж/кг;

$\rho_{ВВ}$  – плотность патронирования ВВ в заряде, кг/м<sup>3</sup>.

Константа  $C$  определяет степень влияния на уровень предохранительных свойств ВВ скорости реакции ингибирования при окислении метана кислородом воздуха на поверхности кристаллов солей ингибиторов, которые введены в состав ВВ. Для зарядов

ВВ, взрываемых в открытом виде при непосредственном контакте поверхности заряда ВВ с взрывчатой МВС, наблюдаем аномальное поведение ингибиторов во фронте детонации ВВ, которое выражено в том, что кристалл соли в результате динамического воздействия на него детонационной волны теряет способность рекомбинировать радикалы – активные центры на поверхности соли и возникает дезрекомбинационный эффект, который описан в работе [5]. Причем время релаксации кристалла соли ингибитора намного превышает время детонации заряда. Учитывая это, константой  $C$  для взрываемых открытых зарядов в МВС можно пренебречь, тогда в уравнении (6) числитель и знаменатель умножаем на величину плотности ВВ во фронте детонационной волны –  $\rho_H = \frac{n+1}{n} \rho_{ВВ}$ . После этого показатель  $\Pi$  согласно уравнения (6) преобразуем к следующему виду:

$$\Pi = \frac{\rho_{ВВ}}{Q_D} \cdot \frac{\rho_H}{\rho_H} = \frac{(n+1) \cdot \rho_{ВВ}^2}{n \cdot P_H} = \frac{(n+1)^2 \cdot \rho_{ВВ}}{nD^2} \quad (7)$$

где  $P_H$  – давление детонации ВВ, Па;

$Q_D = \frac{D^2 \cdot n}{(n+1)^2}$  – энергия детонации ВВ, выделяющаяся во фронте детонационной волны, кДж/кг.

Таким образом, установлен вид зависимости, который позволяет определить уровень предохранительных свойств зарядов ВВ, имеющих контакт по боковой поверхности заряда с взрывчатой МВС. Учитывая то, что показатель  $\Pi$  согласно работы [4] имеет функциональную связь с величиной массы предельного заряда можно установить вид его зависимости от плотности патронирования ВВ в заряде и той энергии детонации, которая выделяется во фронте детонационной волны.

Для этого сделаем анализ показателей, характеризующих энергию детонации у хорошо изученных промышленных образцов ВВ II – VII классов по результатам работы [6], а также определены значения показателя политропы процесса детонации у опытных образцов предохранительных ВВ согласно работы [7].

Основные результаты этих работ сведены в таблицу, в которой также для каждого ВВ дается значение величины его предельного заряда, который определен в опытном штреке МакНИИ при взрывании открытых зарядов в уголковой мортире.

Табл. 1. Детонационные показатели промышленных ВВ

ВВ	Класс	Плотность ВВ, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Показатель политропы, $n$	Скорость детонации, м/с	Энергия детонации, кДж/кг	Показатель, $\Pi$	Предельный заряд, кг
Аммонит №6ЖВ	II	1050	2,24	4205,0	3772,8	$2,783 \cdot 10^{-4}$	~0,005
Аммонит Т-19	IV	1050	2,26	4164,0	3687,2	$2,848 \cdot 10^{-4}$	~0,010
Угленит Э-6	V	1220	2,05	2224,0	1090	$1,119 \cdot 10^{-3}$	0,125-0,14
Угленит 12ЦБ	VI	1350	2,23	1927,0	793,7	$1,701 \cdot 10^{-3}$	0,8-0,825
Угленит Н-12	VI	1250	2,01	1911,0	810,2	$1,543 \cdot 10^{-3}$	0,6-0,65
Ионит	VII	1170	2,21	1676,0	602,5	$1,942 \cdot 10^{-3}$	1,0-1,4
Угленит 13П	V	1220	2,09	2320,0	1161,3	$1,036 \cdot 10^{-3}$	0,1-0,11
Угленит 12П	VI	1250	2,52	1948,9	771,2	$1,618 \cdot 10^{-3}$	0,7-0,8
Угленит 10П	VI	1250	2,1	1985,0	861,0	$1,452 \cdot 10^{-3}$	0,48-0,55
НИИТ-2	V	1200	2,16	2080,0	935,8	$1,282 \cdot 10^{-3}$	0,2-0,3

Обработка результатов, приведенных в данной таблице, позволяет получить эмпирические зависимости, которые описывают, как изменяется величина предельного заряда ВВ, взрываемого в уголковой мортире от значений плотности патронирования ВВ в заряде и энергии детонации ВВ, которая выделяется во фронте детонационной волны.

Эти зависимости имеют следующий вид:

$$M_{кр} = \exp \left[ -3,894 - \frac{7,426 \cdot 10^{-3}}{П} - 1,265 \ln П \right], \text{ кг} \quad (8)$$

Среднеквадратичное отклонение  $S = 0,00565$ , коэффициент корреляции  $|r|=0,9999$ ;

$$M_{кр} = 12,517415 Q_D^{-5,67562 \cdot 10^{-4} Q_D}, \text{ кг} \quad (9)$$

Среднеквадратичное отклонение  $S = 0,0382$ , коэффициент корреляции  $|r|=0,9985$ .

Зависимости (8) и (9) позволяют на стадии разработки предохранительных ВВ по экспериментальным значениям их детонационных показателей определить величину предельного заряда ВВ, которую можно получить при их испытании в опытном штреке. При этом не нужно проведение трудоемких и сложных натуральных штрековых испытаний.

### Выводы

1. Решена задача определения влияния энергии детонации ВВ на его предохранительные свойства.

2. Установлен вид зависимости, описывающей изменение уровня предохранительных свойств ВВ от плотности патронирования ВВ в заряде и величины энергии детонации, которая выделяется в детонационной волне.

3. Получены эмпирические зависимости, описывающие изменение величины предельного заряда ВВ, невоспламеняющего МВС, от величины энергии детонации и плотности ВВ в заряде. Данные зависимости позволяют определить критическое значение энергии детонации ВВ в зависимости от необходимого уровня его предохранительных свойств и могут быть использованы при разработке новых более совершенных высокопредохранительных ВВ.

Дальнейшие исследования необходимо проводить в направлении изучения процессов энерговыделения за фронтом детонационной волны и определения его влияния на уровень предохранительности ВВ.

### Библиографический список

1. Вайнштейн Б.И. Эмпирические соотношения для оценки предохранительных свойств ВВ. – В кн.: «Взрывное дело», № 84/41. М., Недра, 1982.-с. 54-60.
2. Вайнштейн Б.И., Кукиб Б.Н. Расчет предохранительных свойств ВВ с учетом селективности детонации ВВ //Безопасность взрывных работ в угольных шахтах. Сб.науч.тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ. –1979.-с. 12-16.
3. Калякин С.А., Расторгуев В.М. О критических параметрах антигризутности предохранительных ВВ// Снижение травматизма при ведении взрывных работ в угольных шахтах. Сб.науч.тр. МакНИИ.- Макеевка-Донбасс: МакНИИ.- 1987.-с.41-49.
4. Калякин С.А. Предотвращение воспламенения метана от выгорания заряда при взрывных работах в угольных шахтах: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.26.01/МакНИИ: Макеевка, 2002.- 21 с.
5. Шевцов Н.Р., Калякин С.А. О явлении временной утраты кристаллическим ингибитором способности рекомбинировать радикалы на своей поверхности при взрыве ВВ// Современные проблемы шахтного и подземного строительства/ Весник. Вып. 5.- Донецк: Норд-Пресс. –2004.- с. 36-48.
6. Условия создания предохранительных накладных зарядов /В.И. Зенин, С.А. Калякин и др./ Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах. Сб. науч. тр. МакНИИ.- Макеевка-Донбасс: МакНИИ.- 1987.- с. 37-41.
7. Калякин С.А., Расторгуев В.М Исследование скорости детонации ПВВ V и VI классов в зависимости от плотности патронов и условий взрывания// Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах. Сб. науч. тр. МакНИИ.- Макеевка-Донбасс: МакНИИ.- 1990.- с. 58-64.