

УДК 622.235.22

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

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВА МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ОТКРЫТЫМ ЗАРЯДОМ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

Взрывы газа метана в забоях горных выработок имеют место в угольных шахтах, опасных по газу и разрабатывающих угольные пласты, опасные по взрывам пыли. Поэтому в этих условиях угольных шахт допускается применять при взрывных работах только предохранительные взрывчатые вещества (ВВ). Данные ВВ предохранительного типа отличаются от остальных тем, что при взрыве их зарядов не воспламеняются взрывчатые метановоздушные и пылевоздушные смеси (МВС и ПВС) и тем самым обеспечивается безопасность проведения взрывных работ в особоопасных условиях шахт. Совершенствование предохранительных ВВ, направленное на повышение их безопасности и эффективности применения в шахтах, опасных по газу, является актуальной проблемой, имеющей важное научное и практическое значение.

Анализ последних исследований и публикаций показал, что повышение безопасности применения ПВВ в угольных шахтах связано с увеличением уровня их предохранительных свойств по отношению к взрывоопасным смесям воздуха и газа метана.

Уровень предохранительных свойств ВВ имеет количественное значение – это максимальная масса предельного заряда, которая не воспламеняет МВС при испытании в опытном штреке с взрывоопасной средой.

Ранее проведенными исследованиями [1, 2] установлено, что величина предельного заряда ВВ зависит от скорости детонации ВВ и энергии его взрыва. В работах [3, 4] начаты исследования критических параметров антигрязутности (безопасности ВВ по отношению к взрывчатой смеси метана с воздухом) предохранительных ВВ в зависимости от условий перехода детонационной волны, движущейся по заряду, в окружающую его взрывчатую смесь метана и воздуха.

Целью настоящей статьи является рассмотрение критических условий инициирования взрыва МВС открытым зарядом ВВ при его испытании в опытном штреке. Исследования такого рода очень важны для разработки и создания новых безопасных ВВ для угольных шахт.

В работе [4] для зарядов предохранительных ВВ, взрывааемых в открытом виде (свободно подвешенные во взрывной камере опытном штреке или расположенные в уголковой мортире), установлено, что существует показатель, который характеризует уровень предохранительных свойств ВВ. Он получил название показателя антигрязутности ВВ – Π и определяется следующим выражением:

$$\Pi = \frac{(n+1)^2 \cdot \rho_{ВВ}^2}{n \cdot P_n} = \frac{(n+1)^2 \cdot \rho_{ВВ}}{n \cdot D^2}, \quad (1)$$

где n – показатель политропы процесса детонации ВВ;

$\rho_{ВВ}$ – плотность ВВ, кг/м³;

P_n – давление во фронте детонационной волны, Па;

D – скорость детонационной волны, м/с.

В уравнении (1) выражение $\frac{D^2 \cdot n}{(n+1)^2} = Q_D$ представляет собой энергию,

выделяющуюся во фронте детонационной волны. Анализ уравнения (1) показывает, что чем больше энергия детонации ВВ, тем меньше его показатель антигрязутности Π и, следовательно, более низкий уровень предохранительных свойств (малый предельный заряд) во взрывоопасной МВС.

Рассмотрим взрыв открытого заряда ВВ во взрывоопасной МВС. В результате перехода детонационной волны ВВ в окружающую заряд МВС последняя передается энергия $E_{ВВ}$, величина которой зависит от массы заряда – $m_{ВВ}$ и его энергии детонации – Q_D . Скорость передачи энергии взрыва ВВ – E метановоздушной смеси равна:

$$\frac{dE_{ВВ}}{d\tau} = \frac{m_{ВВ} \cdot Q_D}{\tau_D}, \quad (2)$$

где τ_D – время детонации заряда.

Величина τ_D зависит от скорости движения детонационной волны в заряде ВВ и длины заряда $l_{зар}$:

$$\tau_D = \frac{l_{зар}}{D} \quad (3)$$

Преобразуем уравнения (2) и (3), предварительно выразив массу ВВ в цилиндрическом заряде через его объем и плотность патронирования ВВ – $\rho_{ВВ}$. Окончательно получим:

$$\frac{dE}{d\tau} = \frac{\pi}{4} d_3^2 \cdot \rho_{ВВ} \cdot D^3, \quad (4)$$

где d_3 – диаметр заряда ВВ.

Анализ уравнения (4) показывает, что величина произведения $\pi d^2 = S$ характеризует площадь поверхности заряда, контактирующего с МВС, а $\frac{\rho_{ВВ} \cdot D^2}{4} = P_n$ – давление во фронте детонационной волны при $n=3$. Произведение площади – S на давление детонации ВВ – P_n дает силу – F_D , с которой продукты детонации ВВ воздействуют на МВС. Произведение силы – F на скорость детонационной волны – D дает развиваемую при этом мощность детонационной волны при переходе ее в окружающую заряд МВС. Тогда скорость передачи энергии взрыва заряда ВВ в МВС характеризуется мощностью детонационной волны:

$$\frac{dE}{d\tau} = N_D, \quad (5)$$

где N_D – мощность детонационной волны, Дж/с.

Аналогично рассмотрим развитие взрыва МВС в результате инициирования в ней химической реакции окисления метана кислородом воздуха. В результате возникновения реакции окисления метана выделяется энергия $E_{МВС}$, которая равна произведению $m_{МВС} \cdot q_{МВС}$ массы МВС вовлеченной в реакцию окисления на выделяющуюся при этом удельную энергию – $q_{МВС}$.

По аналогии с уравнением (2) можно записать скорость развития реакции окисления метана в МВС:

$$\frac{dE_{МВС}}{d\tau} = m_{МВС} \cdot q_{МВС} \cdot K_p, \quad (6)$$

где K_p – константа скорости реакции окисления метана кислородом воздуха, c^{-1} .

Сравнивая уравнения (2), (3) и (6), можно определить критические условия, которые необходимы для инициирования реакции окисления метана в МВС при взрыве в этой смеси заряда ВВ. Их можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \tau_D \cdot K_p \geq 1 \\ \frac{E_{ВВ}}{E_{МВС}} \geq 1, \text{ или } N_{ВВ} \geq N_{крит} \end{cases}, \quad (7)$$

где $N_{крит}$ – значение критической величины мощности инициирования.

Произведение времени детонации ВВ τ_D на константу скорости реакции окисления метана K_p должно быть больше или равно единице. Это условие указывает на то, что время действия источника, который вызывает инициирование реакции окисления в МВС (характеризуется временем детонации ВВ) больше или равно необходимого времени на реакцию окисления, которое характеризует величины скорости реакции и ее константы. За это время в МВС в результате реакции окисления метана должна выделяться энергия, которая идет на поддержание процесса инициирования взрыва (тепловое инициирование) или на вынужденное горение смеси под действием источника инициирования. Величина энергии, передаваемой МВС при взрыве ВВ в течение всего периода времени передачи всегда должна быть больше энергии окисления, выделяющейся в МВС. В противном случае произойдет затухание процесса инициирования взрыва МВС, так как реакция окисления не успевает развиться до стационарного процесса в результате теплотеря на расширение газа.

Теоретические выводы указывают на то, что если величина параметров процесса инициирования не достаточна и не удовлетворяет условиям (7), то взрыва МВС не произойдет. Это подтверждает существование критической величины заряда (мощности инициирования) ВВ и его параметров детонации, при которых вызвать взрыв МВС невозможно, и дает объяснение этому факту. На практике такую величину заряда ВВ называют предельным зарядом и он характеризует антигризутность ВВ. Вместе с тем интересно установить, насколько устойчивы критические условия, описывающие развитие процесса инициирования взрыва МВС при взрыве в ней открытого заряда ВВ. До настоящего времени критическая величина $N_{крт}$ для МВС не определена.

Исследования воспламеняющей способности зарядов ВВ по отношению к МВС проводили в опытном штреке МакНИИ. При анализе данных испытаний были использованы результаты опытов, полученных при взрывании свободноповешенных зарядов ВВ в песчаных (из кварцевого песка) (П. А. Парамонов), водяных, воздушных оболочках (Н. Р. Шевцов и В. И. Стикачев), а также открытых зарядов и зарядов в угловой мортире с отражательной стенкой (Б. И. Вайнштейн и Б. Н. Кукиб). Взрывание проводили во взрывчатой МВС, концентрация метана в которой находилась в пределах 8,5...9,5%. Инициирование взрыва МВС осуществлялось взрывом зарядов из предохранительных или не предохранительных ВВ, которые подвешивались в центре взрывной камеры опытного штрека или располагались на грани угловой мортиры. Результаты исследований обобщены и обработаны с помощью компьютерной программы Curve Expert 1.3.

Для зарядов ВВ с водяной оболочкой, взрываемых в МВС, получена следующая зависимость:

$$\delta = 5,3079 \cdot \ln N_D - 125,6527, \text{ мм}, \quad (8)$$

где δ – толщина предохранительной оболочки из воды, при которой взрыв МВС не происходит, мм;

N_D – мощность детонационной волны ВВ действующей на оболочку, Дж/с;

коэффициент корреляции $r = 0,979$;

среднеквадратичное отклонение $S = 1,081$.

Для зарядов ВВ с песчаной оболочкой, взрываемых в МВС, получена следующая зависимость:

$$\delta = 0,104242(N_D - 1,4173357 \cdot 10^{10})^{0,23823}, \text{ мм}, \quad (9)$$

коэффициент корреляции $r = 0,993$, среднеквадратичное отклонение $S = 2,414$.

Для зарядов ВВ, взрываемых в воздушной оболочке, которая контактирует со взрывчатой МВС, получена следующая эмпирическая зависимость:

$$\delta = 430,418 \ln N_D - 8400,1448, \text{ мм}, \quad (10)$$

коэффициент корреляции $r = 0,912$, среднеквадратичное отклонение $S = 143,6$.

По результатам взрываний открытых зарядов ВВ в бумажных парафинированных гильзах, которые контактировали с МВС со всех сторон, получено эмпирическое уравнение, описывающее зависимость массы предельного заряда M_{np} от мощности детонационной волны ВВ - N_D :

$$M_{np} = \exp \left[48,228763 - \frac{2,031655 \cdot 10^9}{N_D} - 2,1172 \ln N_D \right], \text{ кг}, \quad (11)$$

коэффициент корреляции $r = 0,9236$, среднеквадратичное отклонение $S = 0,1796$.

Для зарядов ВВ, взрывааемых в угловой мортире с отражательной стенкой на расстоянии 0,6 м от грани мортиры, расположенной во взрывной камере опытного штрека, получено эмпирическое уравнение следующего вида:

$$M_{np} = \frac{5,4964 \cdot 10^9}{N_D} - 0,2471, \text{ кг}, \quad (12)$$

коэффициент корреляции $r = 0,893$, среднеквадратичное отклонение $S = 0,1697$.

Полученные зависимости (8)–(12) позволяют в целом проанализировать критические условия инициирования взрыва в МВС открытым зарядом ВВ. В начале оценим критическую мощность детонационной волны, которая образуется чистой МВС при сферической детонации большого объема этой смеси (более 10 м^3). Согласно уравнению (4), найдем мощность детонационной волны для сферического объема детонирующей метановоздушной смеси:

$$N_{D_{CH_1}} = 12,56 \cdot r_{MBC}^2 \cdot \rho_{MBC} \cdot D^3, \text{ Дж/с}. \quad (13)$$

Принимаем в уравнении (13) значение радиуса сферы МВС равное критическому радиусу сферической детонации - $r_{крт}$, а значение критической скорости детонации МВС - $D_{крт}$ критической скорости детонационной волны, вызывающей сферическую детонацию смеси. По данным В.В. Адушкина, С.М. Когарко [5] $r_{крт} = 0,65 \text{ м}$, а величина $D_{крт}$, по данным Э.О. Миндели с сотр. [6] и В.Л. Мюррея [7], находится в интервале $1255 \dots 1450 \text{ м/с}$. Подставив средние значения этих величин в уравнение (13), получим:

$$N_{крт}^{CH_1} = 12,56 \cdot 0,65^2 \cdot 1,17 \cdot 1353,0^3 = 1,537785 \cdot 10^{10}, \text{ Дж/с}.$$

Согласно критическим условиям в виде уравнений (7), при взрыве ВВ в МВС будет происходить инициирование детонации, если $N_{D_{ВВ}} \geq N_{крт}^{CH_1}$. Проверим это критическое условие. Для этого в уравнениях (8), (9) и (10) принимаем значение предохранительной оболочки $\delta = 0$. Решаем их, и в результате получаем значения мощности детонационной волны ВВ, развиваемой в начальный момент ее действия на предохранительную оболочку: для воздуха $N_D^B = 2,990876 \cdot 10^8 \text{ Дж/с}$, песчаной оболочки $N_D^H = 1,4173357 \cdot 10^{10} \text{ Дж/с}$ и водяной оболочки $N_D^{H_2O} = 1,90965 \cdot 10^{10} \text{ Дж/с}$. Сравним полученные результаты с критическим значением для МВС. Получается, что критические условия абсолютно невыполнимы для воздушной оболочки ($\frac{N_B}{N_{крт}} = 0,0194$), т.е. воздушная оболочка очень сильно облегчает и

усиливает инициирование взрыва МВС от заряда ВВ. Это связано с протеканием в воздухе вторичных химических реакций при его смешении с продуктами взрыва ВВ. Для песчаной оболочки из сухого кварцевого песка критические условия практически выполняются для зарядов ВВ, которые в них взрываются ($\frac{N_H}{N_{крт}} \approx 0,93$), и надежно выполняются для зарядов ВВ

в водяной оболочке ($\frac{N_a}{N_{крт}} = 1,24$).

Учитывая полученные результаты, можно утверждать, что истинное значение $N_{крт}$ для МВС должно быть достаточно близкое к расчетному $N_{крт}^{CH_4} = 1,537785 \cdot 10^{10}$ Дж/с. На это указывает простой анализ физико-химических свойств материала оболочки для взрываемых зарядов. Кварцевый песок для песчаной оболочки представляет не связанный пористый материал, поэтому можно предположить, что та часть воздуха, которая находилась в оболочке, оказала неблагоприятное влияние на антигризутность таких зарядов. При этом нельзя забывать о пьезоэлектрических свойствах кварца, которые могут проявляться при ударных нагрузках на песчаную оболочку. Поэтому получено несколько заниженное значение $N_{крт}$ по сравнению с расчетным. Противоположное влияние оказывает на продукты взрыва ВВ вода, которая находится в оболочке. В этом случае водяная оболочка является эффективным тепловым фильтром, который отделяет и охлаждает продукты детонации и практически не изменяет параметры ударной волны, образованной в окружающей заряд среде. Поэтому истинное значение $N_{крт}$ ближе к значению, полученному для водяной оболочки, нежели для песчаной, и в первом приближении его можно принять равным расчетному, т.е. $N_{крт} = 1,537785 \cdot 10^{10}$ Дж/с. Далее можно проанализировать выполнение критических условий инициирования взрыва МВС уже непосредственно открытыми зарядами ВВ, взрываемыми в опытном штреке в открытом виде без защитной оболочки. В этом случае преобразуем уравнения (4) и (13) к иному виду, выразив радиус заряда через предельную массу ВВ:

$$m_{BB} = \frac{6,0216 \cdot N_D^{1,5015}}{\rho_{BB}^{0,5015} \cdot D^{4,5045}}, \text{ кг.} \quad (14)$$

Для выполнения критических условий инициирования взрыва МВС открытым зарядом ВВ необходимо, чтобы $N_{ВВД} \geq N_{крт}$. Подставив значение $N_{крт}$ в уравнение (14), окончательно получим:

$$m_{кр} = m_{BB} = \frac{1,18942114 \cdot 10^{16}}{\rho_{BB}^{0,5015} \cdot D^{4,5045}}, \text{ кг.} \quad (15)$$

С помощью уравнения (15) определены массы предельных зарядов ПВВ, которые применяются на угольных шахтах Украины, России, Чехии. Величины масс этих расчетных зарядов ПВВ сравнили с предельными зарядами, полученными по уравнениям (11) и (12), а также с фактическими значениями безопасных масс зарядов, полученных в результате испытаний в опытном штреке. Результаты этих расчетов сведены в табл. 1.

Данные, приведенные в таблице, показывают, что, с одной стороны, имеется ряд ПВВ, у которых предельные заряды в МВС достаточно близкие по значению к расчетным зарядам. Это относится к тем ПВВ, которые в своем составе имеют, как правило, один ингибитор реакции окисления метана и однотипную схему построения, как это принято у классических предохранительных ВВ. С другой стороны, имеется ряд ПВВ, которые построены по другому принципу и величины их предельных зарядов существенно отличаются от расчетных значений. К этим ВВ относятся углениты 10П и 12ЦБ и Остравит Ц. Эти ПВВ в своем составе содержат два ингибитора окисления МВС. Поэтому расчет величины предельного заряда дает заниженное значение массы, что указывает на то, что условия инициирования взрыва МВС могут быть существенно изменены, если в продуктах взрыва ВВ находятся эффективные ингибиторы окисления метана. Как показали исследования, ингибиторы МВС могут существенно повысить уровень предохранительных свойств ПВВ.

Выводы

Исследования позволили определить критические условия инициирования взрыва МВС от детонирующего в ней заряда ВВ. Проверка выполнимости этих условий при испытании предохранительных ВВ во взрывчатой МВС показала, что существует ряд ПВВ, которые имеют массу предельного заряда существенно большую, чем дает расчет,

основанный на выполнении критических условий инициирования взрыва МВС. Это указывает на то, что в случае содержания в продуктах взрыва ВВ эффективных ингибиторов реакции окисления метана условия воспламенения МВС могут быть существенно изменены. Поэтому дальнейшие исследования необходимо проводить в направлении изучения влияния химического фактора ингибитора на условия инициирования взрыва МВС.

Табл.1 Массы предельных зарядов ПВВ, которые являются критическими по отношению к взрывоопасной МВС

ПВВ	Страна, в которой применяется	Параметры ВВ		Критическая масса по уравнению (15), кг	Предельные заряды ПВВ в МВС, расчет по уравнениям (11) и (12), кг		Масса безопасного заряда в опытном штреке, кг
		плотность, кг/м ³	скорость детонации, м/с		открытый	угловая мортира	
Аммонит Г-5	Украина	1050	4100	0,0194	0,008	-	0,02 - - откр. зар.
Аммонит ПЖВ-20	Россия	1050	4000	0,022	0,010	-	0,02 - - откр. зар.
Угленит Э-6	Россия	1220	2224	0,285	0,265	0,155	0,25 - - откр. зар.
Угленит 13П	Украина	1200	2320	0,235	0,213	0,113	0,10 - - углов. морт.
Угленит М	Россия	1220	2200	0,296	0,282	0,169	0,30 - - откр. зар.
Угленит № 5	Россия	1250	1750	0,82	0,99	0,560	0,50 - - углов. морт.
Угленит 10П	Украина	1220	1948	0,512	0,571	0,352	0,40 - - углов. морт.
Угленит 12ЦБ	Россия	1300	1925	0,524	0,541	0,335	0,60 - - углов. морт.
Ионит	Россия, Украина	1170	1676	1,03	1,408	0,734	1,00 - - углов. морт.
Ostravit (Ø 30 мм)	Чехия	1210	1960	0,50	1,1	0,61	0,60 - - углов. морт.

Литература

1. Кукиб Б.Н. Росси Б.Д. Высокопредохранительные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1980. – 175 с.
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. Влияние энергии детонации взрывчатого вещества на его предохранительные свойства / В сб.: Взрывное дело № 95/52. – М.: – 2005. – С. 68-75.
5. Адушкин В.В., Когарко С.М., Лямин А.Г. Расчет безопасных расстояний при газовом взрыве в атмосфере // В кн.: Взрывное дело № 75/32. – М.: Недра, 1975. – С. 82-94.
6. К вопросу о воспламеняющем действии воздушных ударных волн / Э.О. Миндели, Н.Ф. Кусов, Ф.М. Гельфанд и др. – Уголь, 1970. – № 2. – С. 49-53.
7. Murray W.L. Further studies of the ignition of methane-air by detonating explosives // Ministry of Technology "Safety in mines research establishment". – Sheffield: Crown Copyright, 1970. – 24 p.