

УДК 622.235.477

В.А. ПОПЛАВСЬКИЙ (канд. тех. наук, проф.)

Державна установа «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці», Україна, м. Київ

В.В. ПАВЛЕНКО (магістрант)**А.М. ШУКЮРОВ** (аспірант)**В.Г. КРАВЕЦЬ** (д-р. тех. наук)

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна, м. Київ

ФІЗИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ ФОРМУВАННЯ ДЕТОНАЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ СВЕРДЛОВИННИХ ЗАРЯДІВ ЕМУЛЬСІЙНИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН

Розглянуто вплив фізичного стану та складу емульсійної вибухової речовини, геометричних параметрів і умов підривання заряду, особливостей динамічних процесів в заряді та руйнованому масиві на прояви явища десенсибілізації емульсійних ВР. Також розглянуто вплив взаємодії фізичних та динамічних чинників на механізм розвитку детонаційних процесів та їх наслідки при масових вибухах системи свердловинних зарядів емульсійних вибухових речовин.

Ключові слова: десенсибілізація, швидкість детонації, критичний діаметр, густина, гідростатичний тиск, газогенерація, ударна хвиля, негабарит.

Вступ. Сучасні промислові вибухові речовини (ПВР) для відкритих гірничих робіт представлені переважно сипкими та рідкими вибуховими сумішами на основі аміачної селітри (АС). Вони відрізняються за режимами вибухового перетворення, механічним ефектом та безпекою вибуху. Прогнозовані результати вибуху досягаються за умови дотримання режиму вибухового перетворення свердловинного заряду з характерною для даної ВР стаціонарною по всій його довжині детонацією. На жаль, у більшості сучасних малочутливих ВР складно отримати нормальний детонаційний режим; нерідко їх хімічне перетворення відбувається в режимі низькошвидкісної нестаціонарної детонації, подібному до детонації вибухового перетворення або нормального чи конвективного горіння [1]. Для сипких вибухових речовин ці явища завдяки їх фізичній та хімічній стабільності в промислових зарядах менш характерні, проте в рідких ВР типу емульсій, особливо сенсібілізованих газогенерацією, проявляються набагато частіше, суттєво впливаючи на якість і результати масового вибуху. Джерела [2...4] вказують на можливі негативні наслідки взаємодії детонаційних та ударних хвиль в окремому колонковому заряді, фізичних перетворень в тимчасово пасивних зарядах під впливом інтенсивних ударних хвиль, генерованих в часі короткосповільненого підривання.

Мета роботи полягає в оцінці сукупного впливу фізичних та динамічних чинників на механізм розвитку детонаційних процесів та їх наслідки при масових вибухах системи свердловинних зарядів емульсійних вибухових речовин.

Аналіз основних фізичних чинників формування детонаційних характеристик ВР свідчить, що режим детонації ВР функціонально пов'язаний майже з усіма термодинамічними параметрами вибуху, які визначають його руйнівну дію на породний масив. Це, зокрема, теплота вибуху, детонаційний тиск і середній тиск у свердловині, масова швидкість продуктів вибуху, їх температура тощо. Для кожної ВР у конкретних умовах підривання паспортна швидкість детонації є постійною величиною. Але вона може змінюватися у широкому діапазоні значень залежно від сукупного впливу діаметра заряду d_z , густини заряду ρ_z , якості змішування компонентів сумішевої ВР, зовнішніх умов перебування заряду (температура, вологість, обводнення, характер та інтенсивність тріщинуватості, гідростатичний тиск, породне засмічення).

Відомо, що при постійності всіх інших умов швидкість детонації D залежить від діаметра заряду, тобто обмежується мінімальним або критичним значенням стабільної D при критичному діаметрі заряду $d_{кр}$, та ідеальним значенням D_i , яке досягається при граничному діаметрі детонації $d_{гр}$. Діапазон між $d_{кр}$ і $d_{гр}$ є вузьким для високочутливих ВР і дуже широким для грубодисперсних вибухових сумішей на основі АС. Критичний діаметр, як характеристика чутливості ВР до ініціюючого

імпульсу, фактично є константою для кожного типу ВР, але змінюється навіть при однаковому хімічному складі зі зміною фізичного стану вибухової речовини. Для крупнодисперсної, зволоженої та ущільненої ВР він більший, ніж для тонкодисперсної та сухої ВР за оптимальної густини суміші.

Критичний діаметр детонації відкритого заряду в 2...3 рази більший, ніж заряду у міцній оболонці або в скельній гірській породі. Міцна оболонка заряду підвищує швидкість детонації тільки за умови, що його діаметр менший граничного. Далі за межами $d_{гр}$ на величину D_i може впливати теплота вибуху Q і густина ВР. Для малочутливих ВР ідеальна швидкість детонації не досягається навіть у свердловинах великого діаметра (≥ 250 мм).

Стаціонарна швидкість детонації встановлюється і зберігається такою після досягнення граничної величини діаметра заряду вже незалежно від його величини. Значно складніша ситуація з впливом на її значення густини ВР. Залежність швидкості детонації від густини сумішевих ВР $D(\rho)$ має екстремальний характер: починаючи від низьких значень густини по мірі її зростання швидкість детонації даної ВР також збільшується, а далі, з досягненням певного значення – спадає аж до цілковитого затухання. Густина, за якої досягається максимум D , називають критичною ($\rho_{кр}$). Будь-яке відхилення густини ВР в більшу або меншу сторону від значення $\rho_{кр}$ призводить до падіння швидкості детонації і навіть її загасання. До того ж вона залежить від типу ВР, діаметра й міцності оболонки заряду, дисперсності, вологості, якості приготування ВР тощо.

Технологічний аспект значення цього чинника особливо важливий, якщо оцінювати його вплив на детонаційну здатність ВР у вертикальному свердловинному заряді, оскільки при цьому необхідно брати до уваги реальність зміни густини нисхідного заряду по глибині. Густина ВР у вертикальному свердловинному заряді зростає пропорційно зростанню гідростатичного тиску у ньому з віддаленням від верхнього торця. Особливо сильно ця закономірність проявляється для рідких емульсійних ВР, сенсibilізованих газогенерацією [4]. Таким чином, навіть при сталому складі рідкої ЕВР через зміну густини по колонці від нормальної у верхньому торці заряду до підвищеної внизу колонки заряду практично неможливо очікувати стабільної його детонації і відповідно ефективного й безпечного використання ЕВР.

Розглядаючи **вплив механізму ініціювання** промислового свердловинного заряду на розвиток в ньому детонаційного процесу, слід приділити увагу способів ініціювання, потужності, масі, конструкції та розташуванню проміжного детонатора (бойовика) чи системи бойовиків. В наш час застосовують дві системи ініціювання: на основі детонуючого шнура (ДШ) і на основі детонуючого хвилевода з неелектричним детонатором і бойовиком у вигляді тротилової шашки чи патрона амоніту.

Якщо зважити на те, що при конструюванні свердловинного заряду, довжина якого перевищує 10м, застосовується дублювання мережі, значним негативним чинником є утворення вибухом нитки ДШ в набивці та в масі свердловинного заряду газового каналу, який може сприяти частковому вивільненню вибухових газів. Крім того, навколо цього каналу сипка або емульсійна ВР набуває підвищеної щільності, яка, можливо, значно перевищує значення оптимальної.

Застосування на вибухових роботах неелектричних систем ініціювання позбавило технологію від небезпечного бічного (канального) ефекту. Разом з тим для малочутливих ВР виключно важливим з позицій повноцінного та надійного ініціювання свердловинного заряду є добір проміжного детонатора, або бойовика. Основним його параметром є детонаційний тиск, який сильно залежить від швидкості детонації ініціатора. Для досягнення високих значень R_d використовують, як правило, потужні індивідуальні ВР чи їхні суміші у пресованому чи литому стані. Іншим параметром ініціюючого імпульсу є його тривалість, яка, у свою чергу, зростає при збільшенні маси проміжного детонатора (бойовика) $m_{ПД}$. Між R_d і $m_{ПД}$ за мінімально прийнятної маси проміжного детонатора і незмінності інших його параметрів існує тісний нелінійний зв'язок: зі збільшенням маси тиск зменшується з поступово затухаючою інтенсивністю [5]. Кожній конкретній ВР властива своя залежність $R_d(m_{ПД})$. Оскільки критичний тиск, потрібний для успішного ініціювання ВР, сильно зростає при збільшенні її густини, малощільні заряди однієї і тієї ж ВР ініціюються легше, ніж високощільні [1]. Геометрія ПД також впливає на його ініціувальну здатність. Довжина ПД має бути більшою за діаметр не менше ніж у 1,5 рази.

Важливим чинником впливу на ініціювання свердловинного заряду є співвідношення між діаметрами ПД і свердловини. Найкращі умови ініціювання досягаються за рівності чи близькості цих діаметрів. Саме у цьому разі найлегше забезпечується перетиснутий режим ініціювання з найменшою довжиною зони розгону детонаційного процесу, який виходить на стаціонарний режим детонування

заряду з високим значенням D . У разі малих діаметра або маси ПД в лінійному заряді спостерігається в місці розташування бойовика сплеск швидкості детонації, що відповідає значенню D_1 для бойовика, а в подальшому на профілі швидкості виникає провал певної глибини, після якого D зростає до стаціонарного рівня D_2 , нижчого за D_1 . Якщо процес ініціювання не виходить із провалу, то вибухове перетворення ВР свердловинного заряду поступово затухає на певній відстані, яка для сучасних малочутливих ВР може складати перші десятки діаметрів заряду. Звідси очевидно, що найкращим є режим ініціювання свердловинного заряду без провалу в зоні розгону детонації, бо саме він забезпечує високий рівень і стабільність детонаційного процесу, отже, надійність вибуху.

Технологічні чинники десенсибілізації газогенерованих емульсійних ВР в подовженому заряді пов'язані в першу чергу з рухливістю їх компонентів, відповідно піддатливістю разовим чи тривалим імпульсним навантаженням, а також з особливостями розвитку силових та деформаційних процесів в взаємодіючих свердловинних зарядів.

Після спрацювання ініціатора вздовж свердловинного заряду поширюється детонаційний фронт, а в породі на контакті з зарядом генерується інтенсивне збурення у вигляді ударної хвилі, яка з часом (і з відстанню від заряду) трансформується у хвилю напружень, а потім – у сейсмічну. Хвиля напружень, з якою асоціюється зона дроблення породи, поширюється на десятки діаметрів заряду, тобто вона практично існує в межах відстані між сусідніми зарядами. Швидкість розповсюдження вибухового хвильового збурення є максимальною біля місця вибуху, але відразу зменшується до швидкості подовжньої хвилі V_v .

Детонаційний фронт рухається вздовж свердловинного заряду зі стаціонарною швидкістю детонації D , на величину якої впливає якість і густина ЕВР (відповідно й концентрація газового сенсоризатора), діаметр заряду, а також міцність оточуючих порід. Від співвідношення швидкостей V_p і D залежить стан ЕВР перед фронтом детонації в ініційованому свердловинному заряді.

Якщо $D > \eta V_p$ (де $\eta \geq 1,0$ – коефіцієнт, що характеризує збільшення швидкості вибухової хвилі біля стінки свердловини у породі порівняно з V_p), то початкове хвильове збурення у породі на стінках свердловини відстає від фронту детонації і синхронно переміщується за ним у заряді. Отже, в цьому разі ударна хвиля в прилеглому до свердловини масиві не взаємодіє з детонаційною хвилею в заряді та не існує чинників вибухової десенсибілізації ЕВР, бо хвильові процеси у породі не досягають ділянки свердловинного заряду, поки вона не прореагувала. Тут вибухове перетворення заряду ЕВР відбувається у нормальному режимі детонування. В ударній хвилі на фронті детонації газові пухирці адіабатично інтенсивно стискаються й нагріваються та виконують роль "гарячих точок", які ініціюють і підтримують детонаційний процес у заряді.

Інші явища відбуваються у заряді ЕВР перед фронтом детонації у разі, коли $D < \eta V_p$. Фронт вибухового збурення у породі біля стінки свердловини випереджає фронт детонації в заряді. Від цього передуючого збурення з породи в ЕВР випромінюється окрема хвиля (чи комплекс хвиль) стискання, яка у заряді має майже конічний профіль і рухається вздовж свердловини, безперервно віддаляючись від детонаційного фронту та постійно підживлюючись від нього. Інтенсивність конічної хвилі залежить від акустичних властивостей породи та ЕВР. Вона слабкіша за детонаційну. Під її впливом навантажуються газові пухирці та матрична емульсія, внаслідок чого густина ЕВР зростає.

Зростання густини сприяє підвищенню швидкості детонації (якщо вона менша за критичну величину), але зменшує чутливість ЕВР до ініціювання, що є негативним чинником. Якщо ж вихідна густина ЕВР становить $\rho_{кр}$, то подальше ущільнення емульсійної ВР призведе до падіння швидкості детонації і навіть її загасання.

Зростання тривалості дії конічної хвилі тим більше, чим більше швидкість вибухового збурення у породі на контакті зі стінкою свердловини відрізняється від швидкості детонації ЕВР. Це можливо у глибоких свердловинах невеликого діаметра ($\gg 100$ мм), неякісній чи засміченій інертними домішками ЕВР і лише у міцних монолітних породах з високою V_p ($> 5,0$ км/с). За таких умов довжина l ділянки заряду ЕВР, навантаженої конічною хвилею, визначається виразом

$$l = (\eta V_p - D)t,$$

де t - час від моменту ініціювання проміжного детонатора у заряді.

Якщо $\eta = 1,2$, $V_p = 5000$ м/с, $D = 3000$ м/с, то вже через $1,0$ мс довжина ділянки заряду, звантаженого ударною хвилею, складе $l = 3,0$ м.

Розглянуті фізичні процеси формування конічної хвилі в окремому подовженому заряді, явища взаємодії її з компонентами ЕВР і фронтом детонації належать до складних і недостатньо дослі-

джених. Ця обставина, зокрема, стосується закономірностей заломлення вибухової хвилі з породи у свердловину з ЕВР, стисливості матричної емульсії й газових пухирців, швидкості теплообміну останніх з емульсією тощо.

Під час групового короткосповільненого підривання, що є типовим для масових вибухів у кар'єрах, причиною десенсибілізації зарядів, що підриваються з заданим мілісекундним інтервалом, можуть стати хвилі напружень, генеровані попередніми вибухами. Поширюючись, вони набігають на ще не здетоновані заряди та спричиняють зміну фізичного стану, а отже, і детонаційних властивостей ВР у пасивних зарядах.

Прояви цієї дії можуть бути різними залежно, принаймні, від інтенсивності вибухового навантаження, відстані між зарядами, фізико-механічних, структурних і акустичних властивостей породи та породного масиву, характеристик ЕВР й часових інтервалів короткосповільненого вибуху тощо. Стислі дані стосовно цього феномену наведено в публікації [6], в якій ідеться про зниження чутливості свердловинного заряду емульсійної ВР через неправильний вибір інтервалу сповільнення. Автори експериментально встановили, що для зарядів ЕВР з відносною густиною $\bar{\rho} = 0,85 \dots 0,90$ при відстані між зарядами до 4,0м безпечний час сповільнення не має перевищувати 67мс. Цей висновок потребує більш уважного аналізу з урахуванням наступних міркувань.

Описані вище інтенсивні взаємодії детонаційних та ударних хвиль в процесі вибуху окремого заряду та в часі короткосповільненого підривання системи зарядів відбуваються за надзвичайно короткий час, який вимірюється інтервалом від сотень мікросекунд до однієї-кількох мілісекунд. Тому така рекомендація не вписується в уявлення про вплив безпосередньої взаємодії інтенсивних ударних та детонаційних хвиль на густину і чутливість ЕВР в заряді до ініціюючого імпульсу. На фіксовану ділянку блоку, що ще не підривається, короткосповільнений режим попередніх вибухів генерує довгу низку повторних слабких імпульсів від віддалених груп зарядів. Ці імпульси справляють на ще не здетоновані заряди ЕВР вібраційний вплив, спричиняючи зміну фізичного стану газогенованої емульсії.

Основною емульсійних ВР є матричні емульсії, які являють собою типову структуру сумішевої ВР з паливних і окислювальних компонентів, сенсibilізованої газогенеруючою домішкою в кількості перших відсотків за масою. Для ЕВР, сенсibilізованої газогенерацією, дуже важливим фізичним параметром є її густина. Змінюючи густину за рахунок концентрації газових пухирців, можна регулювати вибухові властивості ЕВР. Густина ЕВР завжди менша від густини емульсії і залежить від концентрації газу в ній. Згідно з експериментальними даними зменшення густини ЕВР обумовлює підвищення її детонаційної здатності, зменшуючи критичний діаметр детонації. Саме тут може знаходитись пояснення непередбачуваних змін детонаційної здатності колонкового заряду. Під дею подовжених в часі відносно слабких імпульсів на заряди в ще не висадженій частині блоку має відбуватись міграція газових пухирців по колонці заряду. Нижня частина заряду втрачає частину газового сенсibilізатора, верхня перенасичується ним. Цей процес перерозподілу компонентів потребує певного часу, який, можливо, для конкретних умов, наведених в [6], має відбуватись довше 67мс. Навпаки, щоб зберегти вихідні детонаційні характеристики зарядів ЕВР, слід дотримуватись наданих рекомендацій.

Висновки.

Проведений аналіз поведінки емульсійних вибухових речовин у свердловинних зарядах свідчить про існування значної низки фізичних та технологічних чинників, що визначають зміни їх детонаційних властивостей, що впливають на механічний ефект вибуху.

Розгляд взаємодії фізичних та динамічних чинників на механізм розвитку детонаційних процесів та їх наслідки при масових вибухах системи свердловинних зарядів емульсійних вибухових речовин свідчить, що в першу чергу слід приділяти увагу наступним механізмам, пов'язаним з відхиленням детонаційних процесів від норми:

- взаємному накладанню фронтів детонаційної хвилі в заряді ЕВР та переломленої в заряд ударної хвилі з прилеглою до свердловини масиву, яка на певній відстані від бойовика здатна призвести до переуцільнення ЕВР з переродженням та перерванням детонаційного процесу в колонці заряду;

- значно тривалішим явищем вібраційної взаємодії системи слабких сейсмічних імпульсів з структурою газогенованої ЕВР, здатної викликати перерозподіл газового компонента по колонці заряду і негативно вплинути на чутливість ЕВР до ініціюючого імпульсу, що призводить до відмов або неповної детонації свердловинних зарядів з відповідним погіршенням якості подрібнення гірської маси.

Кінцеві висновки про роль та ієрархію розглянутих фізичних та технологічних чинників у десенсибілізації свердловинних зарядів газогенерованих ЕВР можливі після детального аналізу наслідків конкретних масових вибухів.

Библиографический список

1. Андреев С.Г. Физика взрыва / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, -е, перераб. Ф.А. Баум и др./ Под ред. Л.П. Орленко. - Изд. 3-е, перераб. - в 2-х т. - Т.1. - М.: Физматлит, 2002. - 823 с.
2. Соснин В.А. Исследование процесса детонации в эмульсионных промышленных взрывчатых веществах / В.А. Соснин, Е.В. Колганов / Химическая физика, 2003. - Т.22. - №8. - С.100-107.
3. Сильвестров В.В. Критический диаметр и толщина эмульсионного взрывчатого вещества / В.В. Сильвестров, А.В. Пластинин, С.М. Краханов, В.В. Зыков / Физика горения и взрыва. - 2008. - Т.44. - №3. - С.121-127.
4. Поплавський В.А. Проблеми безпеки вибухової справи на ка/р'єрах / В.А. Поплавський / -К.: ННДПБОП, 2009. - 160 с.
5. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах / М.А. Кук / Пер. с англ. - М.: Недра, 1980. - 453 с.
6. Манаков В.Ф. Применение эмульсионного взрывчатого вещества украинит в карьерах Кривбасса / В.Ф. Манаков, А.В. Ивахненко, О.В. Колтунов / Укр. Союз инженеров-взрывников. Информ. Бюл., 2009, №1. - С. 8-12.

Надійшла до редакції 27.04.2017

В.А. Поплавский

Национальный научно-исследовательский институт промышленной безопасности и охраны труда, Украина, г. Киев

В.В. Павленко, А.М. Шукюров, В.Г. Кравец

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Украина, г. Киев

ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Рассмотрено влияние физического состояния и состава эмульсионного взрывчатого вещества, геометрических параметров и условий взрывания заряда, особенностей динамических процессов в заряде и разрушаемого массива на проявления явления десенсибилизации эмульсионных ВВ. Также рассмотрено влияние взаимодействия физических и динамических факторов на механизм развития детонационных процессов и их последствия при массовых взрывах системы скважинных зарядов эмульсионных взрывчатых веществ.

Ключевые слова: десенсибилизация, скорость детонации, критический диаметр, плотность, гидростатическое давление, газогенерации, ударная волна, негабарит.

V. Poplawski

National research institute of industrial safety and labour protection, Ukraine, Kyiv

V. Pavlenko, A. Shukyurov, V. Kravets

National technical university of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", Ukraine, Kyiv

PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL FACTORS FORMING ABILITY HOLE CHARGES DETONATION OF EMULSION EXPLOSIVES

In article considered the Influence of physical properties and composition of emulsive explosives, geometrical parameters and conditions of exploding charge, special features of dynamic processes in a charge and in destroyed array on the displays of the desensitizing phenomenon in emulsive explosivess. Also the impact of physical interaction and dynamic factors on the mechanism of detonation processes and their consequences during mass explosion system downhole emulsion explosives charges.

Keywords: desensitizing, speed of detonation, critical diameter, density, hydrostatical pressure, saturation, shock wave, unoverall piece.