УДК 662.235

С.А. Горинов, И.Ю. Маслов

ИНИЦИИРОВАНИЕ ЭВВ КОГЕРЕНТНЫМ ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ДЕТОНАТОРОМ

Предложена методика расчета параметров инициирования зарядов эмульсионных ВВ когерентным промежуточным детонатором (системой сближенных сосредоточенных зарядов). В методике учитываются размеры зарядов ПД, расстояния между зарядами ПД, детонационные параметры ВВ, из которого изготовлен ПД, а также химический состав, плотность и структура возбуждаемых ЭВВ, а также физико-механические свойства окружающих горных пород.

Ключевые слова: промежуточный детонатор, эмульсионные ВВ.

Актуальность работы

Практика ведения взрывных работ на карьерах с использованием наливных ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, выявляет тенденцию к применению все более мощных промежуточных детонаторов (ПД), как линейных (удлиненных) ПД [1–4], так и мощных сосредоточенных ПД [4, 5–8]. Это объясняется стремлением избежать возникновения режимов низкоскоростного взрывчатого разложения ЭВВ, при которых не только снижается эффективность и безопасность взрывных работ, но и ухудшается экология вследствие повышенного выброса ядовитых газов в атмосферу.

Однако в настоящее время промышленностью освоен выпуск большой номенклатуры сосредоточенных промежуточных детонаторов (в виде «шашек») небольшой и средней мощности, успешно зарекомендовавших себя при инициировании простейших и гранулированных ВВ. Многие горные предприятия уже давно используют две (и более) такие шашки для инициирования наливных ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами. Однако отсутствие методики расчета параметров ПД, для инициирования зарядов ВВ указанным способом, затрудняет применение данного способа инициирования ЭВВ.

В настоящей работе представлена методика расчета, позволяющая определять размеры зарядов ПД, оптимальные расстоя-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 293–304.
© 2017. С.А. Горинов, И.Ю. Маслов.

ния между зарядами ПД в зависимости от детонационных параметров ВВ, из которого изготовлен ПД, а также химического состава, плотности и структуры возбуждаемых ЭВВ. Это позволяет считать данную работу актуальной.

Материал и результаты исследований

Эффективность инициирующего воздействия на ЭВВ сближенных сосредоточенных ПД вытекает из эффекта взаимодействия встречных ударных волн при взрыве сближенных зарядов. В этом случае (при равенстве данных сближенных зарядов) отражение ударных волн друг от друга происходит, как от абсолютно жесткой стенки. Это способствует увеличению коэффициента отражения в $(1+\frac{\rho_{oo}D_*}{\rho_c C_p})$ раз по сравнению с отражением от стенки скважины. Данная система зарядов и будет тем самым ПД, который в дальнейшем будем ее называть «когерентным ПД».

При разработке расчетной схемы инициирования ЭВВ сближенными сосредоточенными промежуточными детонаторами, исходим из следующих данных:

1. Заряды, составляющие когерентный ПД, моделируются сферами радиуса $R_б$. Расстояние между центрами сближенных зарядов ПД принимается равным h ($h > 2R_б$).

2. ВВ, используемое в ПД, характеризуется следующими параметрами: $\rho_б$, $D_б$, $k_б$ – плотность, скорость детонации и коэффициент политропы ВВ ПД, соответственно.

3. ЭВВ в инициируемом заряде характеризуется: ρ_{oo} – плотностью, $R_о$ – радиусом поры, Δ – размером частицы эмульсии и ударной адиабатой $D_у = A + BW_у$, где A, B – параметры ударной адиабаты инициируемого ВВ ($D_у$ – скорость ударной волны, $W_у$ – массовая скорость).

4. Возбуждение процесса детонации в ЭВВ не является мгновенным. Для возбуждения данного процесса, вещество ЭВВ необходимо сжать, обеспечить его возгорание и прогорание между «горячими» точками. Данный процесс происходит за определенное время τ_*, которое определяется особенностями инициируемого ЭВВ и величиной нагружающего импульса [9].

При взрыве сферического заряда (ПД) в ЭВВ возникает расширяющийся в радиальном направлении газовый пузырь, который при расширении испускает ударную волну, также распространяющуюся в радиальном направлении.

Введем обозначения: $R_п$ – текущий радиус газового пузыря; $R_у$ – текущий радиус фронта ударной волны.

Согласно [10] время расширения газового пузыря до размеров сферы радиуса $R_п$ определяется по формуле

$$t_n = \sqrt{\frac{\rho_{oo}}{2}} \int_{R_б}^{R_g} R_n \sqrt{\frac{R_n}{H}} dR_n \tag{1}$$

где

$$H = \int_{R_б}^{R_n} R_n^2 \Phi\left(R_n\right) dR_n . \tag{2}$$

описывается уравнением

$$\Phi\left(R_n\right) = P_н \left(\frac{R_б}{R_n}\right)^{3k_б} \tag{3}$$

где $P_н$ – начальное детонационное давление ПД.

На основании (1)–(3) имеем

$$t_n = R_б \sqrt{\frac{3\left(k_б - 1\right)}{2} \frac{\rho_{oo}}{P_н}} \int_1^{\frac{R_n}{R_б}} z_n \sqrt{\frac{z_n}{1 - \frac{1}{z_n^{3(k_б - 1)}}}} dz_n , \tag{4}$$

где $z_n = \dfrac{R_n}{R_б}$.

Точного решения в элементарных функциях интеграл, входящий в (4), не имеет. Однако при $R_п / R_б < 1{,}7$ уравнение (4) можно с точностью до 0,1% представить в виде (учитываем, что $P_н = \dfrac{\rho_б D_б^2}{k_б + 1}$)

$$t_n \approx \frac{R_б}{D_б} \sqrt{\frac{3\left(k_б^2 - 1\right)}{2} \frac{\rho_{oo}}{\rho_б}} \cdot \tag{5}$$

$$\cdot\left(\left(0{,}1588 z_n^2 - 0{,}5848 z_n + 0{,}4066\right) k_б + 2{,}2226 z_n - 2{,}0937\right)$$

Вследствие резкого падения давления во взрывных газах ПД при их расширении, практический интерес представляет область $R_п / R_б < 1{,}7$, т.к. при $R_п / R_б \geq 1{,}7$ давление взрывных газах ПД упадет в $>1{,}7^9 \approx 120$ раз. Согласно [11] давление во фронте детонационной волны в составе В (60% гексогена и 40% тротила) при плотности ВВ 1,67–1,68 г/см^3 (данный состав «ТГФ» является одним из самых мощных при производстве промышленных ПД) составляет 24,3–25,6 ГПа.

При падении давления в 120 раз его остаточная величина составляет примерно 0,2 ГПа (практически это граница области

расширения продуктов взрыва с коэффициентом политропы $k_б$ [12]). Данная область давлений не представляет интереса при рассмотрении вопроса о непосредственном возбуждении высокоскоростной детонации при воздействии ПД на ЭВВ (в соответствии с критериями [13, 14]).

Так как сжимаемость продуктов детонации ПД ниже, чем сжимаемость пористого вещества ЭВВ, то происходит истечение продуктов детонации ПД в ЭВВ. Начальная скорость смещения границы «продукты взрыва ПД-ЭВВ» $W_{го}$ можно найти на основании равенства давлений в ЭВВ и взрывных газов ПД на границе «продукты взрыва ПД-ЭВВ» [15]:

$$\rho_{оо}\left(A + BW_{го}\right)W_{го} = P_{го}\left(1 - \left(W_{го} - \frac{D_б}{k_б + 1}\right)\frac{k_б^2 - 1}{2k_б D_б}\right)^{\frac{2k_б}{k_б - 1}}. \qquad (6)$$

Величину массовой скорости за фронтом ударной волны в ближней зоне определяем по уравнению [16]

$$W_r \approx W_{го}\frac{R_б}{R_y}. \qquad (7)$$

Тогда скорость ударной волны на расстоянии $R_у$ будет равна

$$D_{yr} \approx A + BW_{го}\frac{R_б}{R_y}. \qquad (8)$$

Учитывая, что $D_{yr} = \dfrac{dR_y}{dt}$, интегрируя (8), получаем уравнение движения фронта ударной волны в ближней зоне заряда

$$R_y \approx R_б + At + \frac{BW_{го}}{A}R_б \ln\left(\frac{\dfrac{R_y}{R_o} + \dfrac{BW_{го}}{A}}{1 + \dfrac{BW_{го}}{A}}\right). \qquad (9)$$

На рис. 1 представлена схема взаимодействия двух сближенных зарядов. Принятые обозначения: сплошные линии – начальная граница зарядов; штрихпунктирные линии – граница «продукты взрыва ПД-ЭВВ»; штриховые линии – граница фронта ударной волны; O_1 и O_2 – центры зарядов; $ABCD$ – область взаимодействия ударных волн (область повышенного давления).

Расчет параметров когерентного ПД осуществляется из требования выполнения следующего условия [13, 14]: для возбуж-

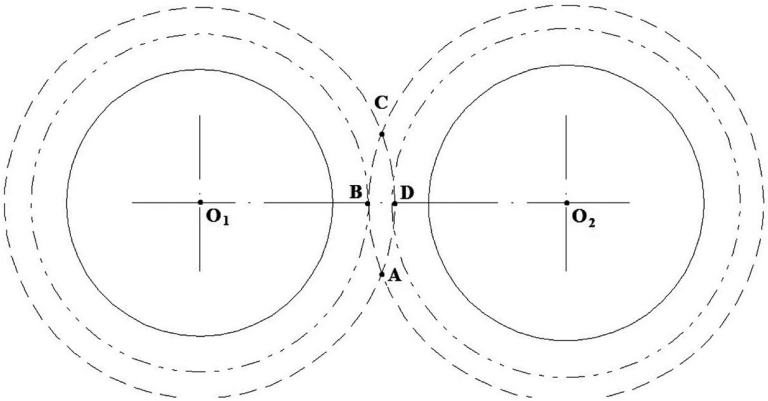

Рис. 1. Схема взаимодействия сближенных зарядов когерентного ПД

дения детонации с величиной фронтального давления P_f необходимо в слое возбуждаемого ЭВВ, размером не менее $d_{krit}(P_f)$, в течении времени $t(P_f)$ поддерживать давление с наименьшим значением на указанном временном промежутке – P_f ($d_{krit}(P_f)$, $t(P_f)$ – критический диаметр заряда и время химической реакции при фронтальном давлении P_f).

Принимаем за момент $t = 0$ момент выхода детонационной волны ПД на внешнюю поверхность ПД.

Допустим, что инициирование ЭВВ вследствие взаимодействия ударных волн произошло в момент времени t_n, когда радиус газового пузыря достигнет размера $R_n(t_n) = z_n R_б$. Радиус фронта ударной волны при этом определяется на основании (5) и (9). Величину этого радиуса можно представить в виде функции $R_y = R_y(t_n)$.

Из рис. 1 имеем следующие ограничения на $R_n(t_n)$ и $R_y(t_n)$:

$$R_n(t_n) + R_y(t_n) \le h\,,\ R_y(t_n) > h/2\,. \tag{10}$$

На основании (9) и рис. 1 имеем:

А) время встречи ударных волн $t_y^{(1)}$

$$t_y^{(1)} = \left(\frac{h}{2R_б} - 1 - \frac{BW_{ro}}{A} \ln\left(\frac{\dfrac{h}{2R_б} + \dfrac{BW_{ro}}{A}}{1 + \dfrac{BW_{ro}}{A}} \right) \right) \frac{R_б}{A}; \tag{11}$$

Б) время выхода ударной волны на поверхность газового пузыря смежного заряда $t_y^{(2)}$

$$t_y^{(2)} = \left(\frac{h - R_n}{R_б} - 1 - \frac{BW_{ro}}{A} \ln \left(\frac{\frac{h - R_n}{R_б} + \frac{BW_{ro}}{A}}{1 + \frac{BW_{ro}}{A}} \right) \right) \frac{R_б}{A} \qquad (12)$$

При времени $t > t_y^{(2)}$ происходит инжекция эмульсии в газовые полости смежных зарядов, что сопровождается резким падением давления в эмульсии. Поэтому, если ЭВВ не будет инициировано к моменту $t = t_y^{(2)}$, то инициирования не произойдет вовсе.

В соответствии с (10) имеем следующее ограничение на характерные моменты времени для когерентного ПД

$$t_y^{(1)} < t_n < t_y^{(2)}. \qquad (13)$$

Время существования области высокого давления *ABCD* (рис. 1) равно

$$t_* = t_n - t_y^{(1)} \qquad (14)$$

Наименьшее давление в области высокого давления соответствует времени t_n. В соответствии с закономерностью падения давления при удалении от сферического заряда [12] имеем

$$P(t_n) \approx \rho_{oo} W_{ro} \frac{R_б}{R_y(t_n)} \left(A + BW_{ro} \frac{R_б}{R_y(t_n)} \right) \left(\frac{h}{2R_y(t_n)} \right)^2 k_{отр}^{ж.с.} \qquad (15)$$

где $k_{отр}^{ж.с.} \approx 2(1 + \varphi_{BB}\chi_{oo})$ – коэффициент отражения ударной волны в ЭВВ от жесткой стенки.

Объем области высокого давления в момент t_n (сечение указанного объема представлено на рис. 1 фигурой *ABCD*) равен (необходимые сведения для определения объема указанной области заимствованы в руководстве [16])

$$V(t_n) = \frac{2\pi}{3} \left(R_y(t_n) - \frac{h}{2} \right)^2 \left(2R_y(t_n) + \frac{h}{2} \right). \qquad (16)$$

Диаметр сферы соответствующего объема (16), равен

$$d(t_n) = \left(4 \left(R_y(t_n) - \frac{h}{2} \right)^2 \left(2R_y(t_n) + \frac{h}{2} \right) \right)^{\frac{1}{3}} \qquad (17)$$

На основании уравнений (5)–(17) определяются все необходимые для дальнейшего анализа параметры t_n, $P(t_n)$, $d(t_n)$, харак-

теризующие воздействие когерентного ПД из двух сближенных зарядов на ЭВВ.

Если заряды когерентного ПД прижаты к стенке скважины, то при условии $\sqrt{R_y^2\left(t_n\right)-\frac{h^2}{4}} > R_б$, необходимо учитывать повторное отражение эмульсии, находящейся в области *ABCD* (рис. 1), от стенок скважины. Это приведет к возрастанию величины $P(t_n)$ в $\frac{2\rho_c C_p}{\rho_c C_p + \rho_{oo} D_y}$ раз (ρ_c, C_p – плотность окружающей заряд среды и скорость продольных волн в этой среде, соответственно).

Окончательное решение возможно после получения зависимостей P_f, $d_{krit}(P_f)$, $t(P_f)$ для инициируемого ЭВВ. Данные зависимости определяются для инициируемого ЭВВ с учетом его химического состава, плотности и структуры на основании методики, изложенной в работе [9].

Перейдем к обсуждению полученных результатов.

Для проверки выявленных закономерностей распространения детонационных волн в ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами, были осуществлены опытные взрывы, в которых скважинные заряды ЭВВ инициировались когерентными ПД. Ниже приведен характерный результат из данной серии опытов, выполненный на объекте открытых горных работ АО «Ураласбест». В опытах измерялись скорость детонации по длине заряда, плотность ЭВВ при атмосферном давлении, глубина скважины, высота колонки заряда, глубина расположения ПД.

Применялось ЭВВ «Порэмит-1А», имеющее следующие характеристики – плотность – 1,0 г/см^3, хим.состав: аммиачная селитра – 73,8%, вода – 18,5%, топливная фаза – 7,7%; способ сенсибилизации – газовые поры. Скважины бурились в прочных горных породах (коэффициент крепости по М.М. Протодьяконову $f = 13$). Глубина скважин – 17 м, длина заряда – 12 м, наклон скважин – 75°, диаметр – 250 мм. Заряды ЭВВ формировались при зарядке из одной зарядной машины. Измерения скорости детонации проводились реостатными приборами «Handitrap Vod Recorder» – датчиковый провод «VOD probecable-HT» устанавливался по длине заряда.

Инициирование зарядов (нижнее) производилось от промежуточных детонаторов, состоящих из шашек «ПТ-П750», расположенных одна над другой на расстоянии между ними 15 см, и внутрискважинных капсюлей неэлектрической системы Искра

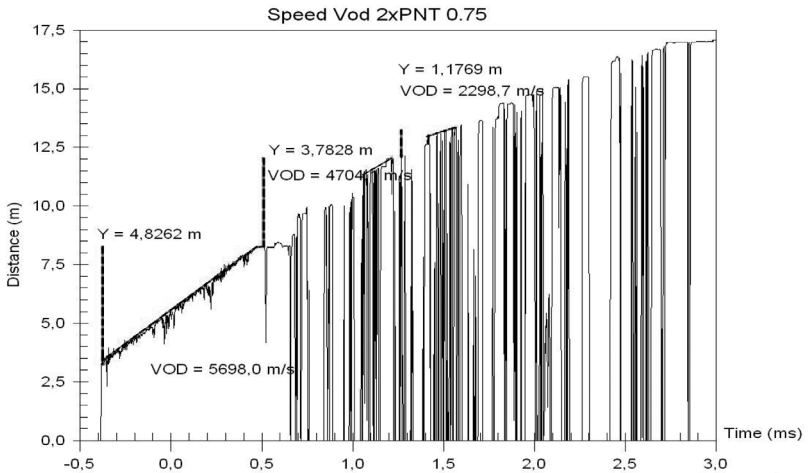

Рис. 2. Зависимость длины (м) заряда от времени детонации (мс) ЭВВ. Промежуточный детонатор, состоящий из 2 шашек «ПТ-П750»

С-500-18. Результаты обрабатывались в программе «HandiTrapII-v2p0», поставляемой изготовителем с прибором, и представлены на рис. 2.

На рис. 3 приведены графики экспериментально определенной и расчетной скоростей детонации по длине скважинного заряда. Расчет скоростей детонации осуществлялся по методике, изложенной в [9], а условий скачкообразного перехода на более низкоскоростной режим – по методике, изложенной в [17]. При выполнении расчетов исходили из приведенного выше химиче-

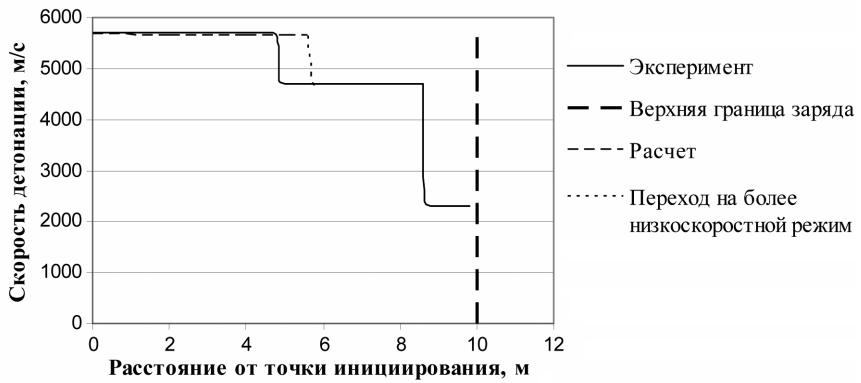

Рис. 3. Зависимости скорости детонации ЭВВ от места инициирования (экспериментальные и расчетные)

Расчетные значения параметров детонации в ЭВВ при их инициировании когерентным ПД (по длине заряда)

Расстояние от ПД, м	Текущая плотность ЭВВ, г/см^3	Текущий коэфф. политропы ЭВВ	Скорость детонации, м/с	Давление в т. Чепмена-Жуге, ГПа	Время прогоран. между порами, мкс
0,0	1,198	3,21	5661,2	8,68	5,6
5,64 (момент перехода на НСР)	1,137	3,06	5657,0	8,26	3,6

ского состава ЭВВ, его плотности при атмосферном давлении и структуры (размер эмульсии – 10 мкм, размер газовых пор – 300 мкм). Изменение плотности ЭВВ по длине заряда рассчитывали по методике [18].

Расчеты показали, что возбуждение высокоскоростного режима детонации происходит в результате 3-кратного ударного сжатия ЭВВ (сжатие в прямой ударной волне УВ – сжатие при взаимодействии УВ от сближенных зарядов ПД – сжатие в УВ, отраженной от стенки скважины). Результаты расчетов приведены в таблице.

Анализ рис. 3 показывает, что разработанная авторами методика расчета позволяет достаточно точностью определять параметры детонации, вызванной воздействием когерентного ПД. Кроме этого, расчетный и экспериментально определенный моменты перехода детонации на низкоскоростной режим (НСР) близки между собой (рис. 3). Это позволяет принять необходимые технологические меры для обеспечения полноты детонации (например, изменение места установки ПД, установка дополнительных ПД, изменение начальной плотности ЭВВ, изменение структуры ЭВВ и т.д.).

Выводы

В работе представлена методика расчета параметров системы сближенных сосредоточенных зарядов, представляющей промежуточный детонатор (ПД) для инициирования зарядов эмульсионных ВВ.

В методике учитываются размеры зарядов ПД, расстояния между зарядами ПД, детонационные параметры ВВ, из которого изготовлен ПД, химический состав, плотность и структура возбуждаемых ЭВВ, а также физико-механические свойства окружающих горных пород.

Наблюдается хорошее согласие с экспериментальными данными.

Работа представляет практический интерес для организаций выпускающих и разрабатывающих ЭВВ и ПД, а также для инженеров руководящих взрывными работами на горнодобывающих предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калякин С. А.*, *Прокопенко В. С.* О линейном инициировании зарядов взрывчатых веществ // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничного виробництва. – 2013. – 1(11). – С. 41–47.

2. *Тогунов М. Б.*, *Сапронов Е. М.*, *Щукин Ю. Г. и др.* Повышение эффективности взрывания горных пород эмульсионными ВВ / Технология и безопасность взрывных работ. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. – С. 123–133.

3. *Щукин Ю. Г.*, *Чернышов С. Н.*, *Коломинов И. А. и др.* Перспективные взрывчатые материалы для горной промышленности / Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. – Екатеринбург, 2009. – С. 108–118.

4. *Фокин В. А.* Обоснование геометрических параметров удлиненной шашки-детонатора для обратного инициирования скважинных зарядов газифицированных эмульсионных взрывчатых веществ // Известия вузов. Горный журнал. – 2008. – № 3. – С. 49–54.

5. *Маслов И. Ю.*, *Пупков В. В.*, *Фоменкова В. Е. и др.* Улучшение качества взрывной подготовки горной массы за счет применения промежуточных детонаторов с оптимальными габаритными размерами при инициировании скважинных зарядов эмульсионных ВВ // Взрывное дело. – 2004. – № 94/51. – С. 125–130.

6. *Добрынин И. А.* Обоснование параметров промежуточных детонаторов в скважинных зарядах для повышения эффективности дробления горных пород. Автореф. дисс. на соиск. науч. степени канд. техн. наук. – М., 2010. – 20 с.

7. *Добрынин А. А.* Взрывчатые вещества. Химия, составы. Безопасность. – М.: изд. ИД Академии Жуковского, 2014. – 527 с.

8. *Калякин С. А.* Обоснование параметров промежуточных детонаторов для инициирования скважинных зарядов ВВ // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничного виробництва. – 2012. – 1(9). – С. 50–57.

9. *Кутузов Б. Н.*, *Горинов С. А.* Физико-технические основы создания эмульсионных и гранулированных ВВ и средств их инициирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельные статьи (специальный выпуск). Эмульсионные ВВ, гранэмиты и ANFO: структура, инициирование, физико-технические основы создания. – 2011. – № 7. – С. 34–52.

10. *Власов О. Е.* Основы теории действия взрыва. – М.: изд. ВИА, 1957. – 408 с.

11. *Кук М. А.* Наука о промышленных ВВ. – М.: Недра, 1980. – 453 с.

12. *Баум Ф. А.*, *Станюкович К. П.*, *Шехтер Б. И.* Физика взрыва. – М.: Физматгиз, 1959. – 800 с.
13. *Баум Ф. А.*, *Державец А. С.* Об инициировании детонации ударными волнами // Взрывное дело. – 1966. – № 60/17. – С. 68–83.
14. *Афанасенков А. Н.*, *Богомолов В. М.*, *Воскобойников И. М.* Критические давления инициирования взрывчатых веществ // Взрывное дело. – 1970. – № 68/25. – С. 68–92.
15. *Орленко Л. П.* Физика взрыва и удара. 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2008. – 304 с.
16. *Бронштейн И. Н.*, *Семендяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Глав.ред.физматлит, 1980. – 976.
17. *Горинов С. А.*, *Кутузов Б. Н.* О неустойчивости детонационных волн в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсибилизированном газовыми порами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 4. – С. 302–307.
18. *Фокин В. А.* Распределение плотности эмульсионных взрывчатых веществ по высоте колонки скважинного заряда // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 3. – С. 89–94. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Горинов Сергей Александрович[1] – кандидат технических наук,
e-mail: akaz2006@yandex.ru,
Маслов Илья Юрьевич[1] – кандидат технических наук,
e-mail: ilmaslov@mail.ru,
[1] ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 293–304.

UDC 662.235

S.A. Gorinov, I.Yu. Maslov

EE INITIATION BY COHERENT BOOSTER

Actual blasting of pourable gas-synthesized emulsion explosives (EE) calls for highly powerful relay detonators. However, under production is currently a wide range of low and medium capacity explosive cartridges successfully used to prime simplest and granular explosives.

In order to enhance efficiency of initiation, it is recommended to use a relay detonator constituted by closely spaced and concurrently fired explosive cartridges. The efficiency of such a booster is achieved due to interaction of meeting shock waves generated under explosion of closely spaced charges. In this case (given equality of the closely spaced charges), the shock waves are reflected as from absolute rigid wall.

The article proposes the calculation procedure for the parameters of initiation of emulsion explosives by a coherent booster (a system of closely spaced charges of concentrated explosives). The procedure takes into account sizes of booster charges, their spacing, proknock properties of explosives used to make the booster, as well as chemical composition, density and structure of the fired explosives, and physical properties of surrounding rocks.

The calculation of the coherent booster parameters based on the Baum–Derzhavets criterion (detonation at the value of the front pressure needs the least pressure to be maintained in the EE layer with the size not less than critical within the time sufficient for the chemical response execution) accounts for the shock adiabat of the initiatied emulsion explosive.

Key words: booster, emulsion explosives.

AUTHORS

Gorinov S.A.[1], Candidate of Technical Sciences,
e-mail: akaz2006@yandex.ru,
Maslov I.Yu.[1], Candidate of Technical Sciences,
e-mail: ilmaslov@mail.ru,
[1] Global Mining Explosive Group, 117036, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Kalyakin S.A., Prokopenko V.S. *Suchasni resursoenergozberigayuchi tekhnologii girnichnogo virobnitstva*. 2013. 1(11), pp. 41–47.

2. Togunov M.B., Sapronov E.M., Shchukin Yu.G. *Tekhnologiya i bezopasnost' vzryvnykh rabot* (Technology and safety of blasting), Ekaterinburg, IGD UrO RAN, 2012, pp. 123–133.

3. Shchukin Yu.G., Chernyshov S.N., Kolominov I.A. *Razvitie resursosberegayushchikh tekhnologiy vo vzryvnom dele* (Development of resource-saving technologies in the explosive case), Ekaterinburg, 2009, pp. 108–118.

4. Fokin V.A. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2008, no 3, pp. 49–54.

5. Maslov I.Yu., Pupkov V.V., Fomenkova V.E. *Vzryvnoe delo*. 2004, no 94/51, pp. 125–130.

6. Dobrynin I.A. *Obosnovanie parametrov promezhutochnykh detonatorov v skvazhinnykh zaryadakh dlya povysheniya effektivnosti drobleniya gornykh porod* (Justification of parameters of intermediate detonators in the borehole charges to improve the efficiency of rock crushing), Candidate's thesis, Moscow, 2010, 20 p.

7. Dobrynin A.A. *Vzryvchatye veshchestva. Khimiya, sostavy. Bezopasnost'* (Explosives. Chemistry, structures. Security), Moscow, izd. ID Akademii Zhukovskogo, 2014, 527 p.

8. Kalyakin S.A. *Suchasni resursoenergozberigayuchi tekhnologii girnichnogo virobnitstva*. 1/2012 (9), pp. 50–57.

9. Kutuzov B.N., Gorinov S.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. Special edition. 2011, no 7, pp. 34–52.

10. Vlasov O.E. *Osnovy teorii deystviya vzryva* (Fundamentals of the theory of explosion), Moscow, izd. VIA, 1957, 408 p.

11. Kuk M.A. *Nauka o promyshlennykh VV* (Science of industrial explosives), Moscow, Nedra, 1980, 453 p.

12. Baum F.A., Stanyukovich K.P., Shekhter B.I. *Fizika vzryva* (Physics of explosion), Moscow, Fizmatgiz, 1959, 800 p.

13. Baum F.A., Derzhavets A.S. *Vzryvnoe delo*. 1966, no 60/17, pp. 68–83.

14. Afanasenkov A.N., Bogomolov V.M., Voskoboynikov I.M. *Vzryvnoe delo*. 1970, no 68/25, pp. 68–92.

15. Orlenko L.P. *Fizika vzryva i udara*. 2-e izd. (Physics of explosion and shock. 2nd edition), Moscow, Fizmatlit, 2008, 304 p.

16. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* (Handbook of mathematics for engineers and pupils of technical colleges), Moscow, Glav.red.fizmatlit, 1980. 976.

17. Gorinov S.A., Kutuzov B.N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012, no 4, pp. 302–307.

18. Fokin V.A. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2007, no 3, pp. 89–94.