

УДК 662.217

ВОЗБУЖДЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫХ ГАЗОВЫМИ ПОРАМИ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ**С. А. Горинев, И. Ю. Маслов**

ЗАО «Спецхимпром»

ул. Профсоюзная, 3, г. Москва, 117036, Россия. E-mail: akaz2006@yandex.ru; ilmaslov@mail.ru

В. П. Куприн

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»

просп. Гагарина, 8, г. Днепропетровск, 49000, Украина. E-mail: ooo-ekkkom@mail.ru

Осуществлена оценка условий возбуждения детонации в эмульсионных взрывчатых веществах, сенсibiliзирoванных газовыми порами, под действием скользящей детонационной волны, вызываемой взрывом линейного промежуточного детонатора. Произведен учет структуры и химического состава эмульсионных взрывчатых веществ на характер развития детонационных процессов. Получено уравнение для определения достигаемого при заданном воздействии детонационного давления в эмульсионных взрывчатых веществах. Установлены зависимости промежуточных детонаторов из различного типа взрывчатых веществ от структурных особенностей эмульсионных взрывчатых веществ различного типа.

Ключевые слова: промежуточный детонатор, эмульсионные взрывчатые вещества.

ЗБУДЖЕННЯ ДЕТОНАЦІЇ В ЕМУЛЬСІЙНИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИНАХ, СЕНСИБІЛІЗОВАНИХ ГАЗОВИМИ ПОРАМИ КОВЗНОЮ ДЕТОНАЦІЙНОЮ ХВИЛЕЮ**С. О. Горінов, І. Ю. Маслов**

ЗАТ «Спецхімпром»

вул. Профсоюзна, 3, м. Москва, 117036, Росія. E-mail: akaz2006@yandex.ru; ilmaslov@mail.ru

В. П. Купрін

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

просп. Гагарина, 8, м. Дніпропетровськ, 49000, Україна. E-mail: ooo-ekkkom@mail.ru

Здійснена оцінка умов збудження детонації в емульсійних вибухових речовинах, сенсibiliзованих газовими порами, під дією ковзної детонаційної хвилі, що викликається вибухом лінійного проміжного детонатора. Проведений облік структури та хімічного складу емульсійних вибухових речовин на характер розвитку детонаційних процесів. Отримано рівняння для визначення досяжного за заданої дії детонаційного тиску в емульсійних вибухових речовинах. Установлені залежності проміжних детонаторів із різного типу вибухових речовин від структурних особливостей емульсійних вибухових речовин різного типу.

Ключевые слова: проміжний детонатор, емульсійні вибухові речовини.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Практика ведения взрывных работ на карьерах с использованием наливных эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ), сенсibiliзирoванных газовыми порами, выявляет тенденцию к применению все более мощных промежуточных детонаторов (ПД). Это объясняется стремлением избежать возникновения режимов низкоскоростного взрывчатого разложения ЭВВ, при которых снижается эффективность и безопасность взрывных работ, но повышается выброс токсичных газов в атмосферу [1–3].

Для снижения массы ПД при инициировании наливных ЭВВ, сенсibiliзирoванных газовыми порами, предлагается использовать удлиненные ПД (УДП) [2, 4, 5]. Однако методики расчета основных геометрических параметров УДП, изложенные в данных работах, не учитывают влияние структуры и химического состава ЭВВ на характер развития детонационных процессов в рассматриваемых взрывчатых веществах (ВВ), отмеченные в [6–9].

В настоящей работе осуществлена оценка условий возбуждения нормальной детонации в ЭВВ, сенсibiliзирoванных газовыми порами, под действием скользящей детонационной волны, вызываемой взрывом линейного промежуточного детонатора, с учетом структуры, химического состава ЭВВ и кинетики детонационного процесса.

Учет отмеченных параметров позволяет более обоснованно подходить к вопросам проектирования УДП, что делает настоящую работу полезной для горной практики.

Цель работы – исследование возможностей возбуждения детонации в ЭВВ, сенсibiliзирoванных газовыми порами скользящей детонационной волны.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Рассмотрим линейный промежуточный детонатор радиусом r_0 , помещенный соосно в цилиндрический заряд ЭВВ радиусом R_c .

ВВ боевика характеризуем следующими параметрами: ρ_0 , D_0 , k_0 – плотность, скорость детонации и коэффициент политропы ВВ ПД соответственно.

Возбуждаемое ЭВВ характеризуется: ρ_0 – плотностью, R_0 – радиусом поры, Δ – размером частицы эмульсии и ударной адиабатой $D_y = A + BW_y$, где A , B – параметры ударной адиабаты инициируемого ВВ. Здесь D_y – скорость ударной волны, W_y – массовая скорость.

Введем линейную систему координат «Оу» с осью у линейного ПД. Начало данной системы координат совместим точкой инициирования ПД.

Так как сжимаемость продуктов детонации ПД ниже, чем сжимаемость пористого вещества ЭВВ, то происходит истечение продуктов детонации ПД в ЭВВ. Начальная скорость смещения границы «про-

$$W_{ro} = \frac{2k_{\delta} D_{\delta}}{k_{\delta}^2 - 1} \left[1 - \left(\frac{(k_{\delta} + 1) \rho_{oo}}{\rho_{\delta}} \frac{(A + BW_{ro}) W_{ro}}{D_{\delta}^2} \right)^{\frac{k_{\delta} - 1}{2k_{\delta}}} \right]. \quad (1)$$

В соответствии с [11], детонационная волна в ЭВВ имеет двухслойную структуру:

1. зона сжатия, представленная конденсированным веществом, в расширяющихся из-за горения порах которого происходит разложение ВВ;

2. газовая зона, представленная сильно уплотненным газовым телом, в котором происходит догорание ВВ. Поэтому возбуждение процесса детонации в ЭВВ не является мгновенным.

Для осуществления данного процесса вещество ЭВВ необходимо сжать, обеспечить его возгорание и прогорание между «горячими» точками [10]. Данный процесс происходит за определенное время τ_* , которое определяется особенностями инициируемого ЭВВ. За данное время граница раздела «продукты детонации – ЭВВ» смещается в радиальном направлении на расстояние x_* , а вглубь продуктов детонации в радиальном направлении проникает возникающая в них волна разряжения на глубину Δr_* .

Согласно [11]

$$\tau_* \approx \tau_o, \quad (2)$$

где τ_o – время прогорания ЭВВ между сенсibiliзирующими порами.

$$\tau_o = \frac{R_o}{V_{zop}} \left[\left(\frac{\pi}{6\chi_o} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (3)$$

где V_{zop} – скорость прогорания межпорового пространства эмульсии.

Величина V_{zop} определяется на основании теории горения Зельдовича-Беляева [12, 13]. Принимая порядок реакции горения ЭВВ равным двум [11], имеем:

$$V_{zop} = \frac{1}{\rho_k} \sqrt{\frac{2K_m}{Q_2} \left(\frac{R T_*^2}{E_A} \right)^3 \frac{3!}{(T_* - T_o)^2} \frac{M}{N_A} Z \exp\left(\frac{E_A}{RT} \right)}, \quad (4)$$

где ρ_k – плотность ЭВВ в зоне сжатия в момент прогорания; E_A – энергия активации аммиачной селитры; N_A – число Авогадро; M – средний молекулярный вес продуктов детонации ЭВВ; K_m – коэффициент теплопроводности первичных продуктов детонации ЭВВ (K_m определяется для температуры T_* с учетом поправок Сезерланда);

$Q_2 = \frac{P_f}{2} \left(\frac{1}{\rho_3^o} - \frac{1}{\rho_k} \right) + Q_v^o$, где ρ_3^o – плотность ЭВВ в

дукты взрыва ПД–ЭВВ» W_{ro} в направлении, перпендикулярном оси ПД, можно найти на основании решений [10] для скользящей детонационной волны:

момент начала термического разложения [6,7], Q_v^o – теплота разложения ЭВВ до первичных продуктов (распад по схеме Баума [10] на H_2O , CO , NO , N_2); Z – предэкспоненциальный множитель [12].

Оценим величину давления в продуктах детонации ПД и скорость смещения в радиальном направлении границы «продукты детонации ПД–ЭВВ» в момент τ_* в сечении «у». Принимаем, что время прихода детонационной волны, распространяющейся в ПД, в сечении «у» соответствует моменту времени $\tau = 0$. На основании [10] можно показать, что начальные распределения плотности $\rho(y)$ и давления $P(y)$ в продуктах взрыва ПД в момент τ_* в области, неохваченной радиальной волной разряжения, будут описываться следующими учитывающими действие аксиальной волны разряжения уравнениями:

$$\rho(y) = \rho_{\delta} \frac{k_{\delta} + 1}{k_{\delta}} \left(1 - \frac{k_{\delta} - 1}{k_{\delta}} \frac{D_{\delta} \tau_*}{y + D_{\delta} \tau_*} \right)^{\frac{2}{k_{\delta} - 1}}, \quad (5)$$

$$P(y) = P_n \left(1 - \frac{k_{\delta} - 1}{k_{\delta}} \frac{D_{\delta} \tau_*}{y + D_{\delta} \tau_*} \right)^{\frac{2k_{\delta}}{k_{\delta} - 1}}, \quad (6)$$

$P_n = \frac{\rho_B D_B^2}{k_B + 1}$ – давление в точке Чепмена-Жуге в продуктах взрыва ПД.

Величина проникновения радиальной волны разряжения вглубь продуктов детонации ПД равна:

$$\Delta r_* = \int_0^{\tau_*} c(y) dt, \quad (7)$$

где $c(y) = \frac{D_{\delta}}{k_{\delta} + 1} \left(1 + \frac{(k_{\delta} - 1)y}{y + D_{\delta} \tau_*} \right)$ – скорость звука

в продуктах детонации ПД в области, неохваченной радиальной волной разряжения, в сечении «у».

Уравнение (7) справедливо при

$$\tau_* \leq \min \left\{ \frac{2y}{D_{\delta}}; \tau_{oo} \right\}, \quad (8)$$

где $\tau_{oo} = z_{oo} \frac{y}{D_{\delta}}$. z_{oo} – корень уравнения

$$z + (k_{\delta} + 1) \ln(1 + z) = (k_{\delta} + 1) r_o y^{-1}.$$

При выполнении (8) величина Δr_* определяется из (7) и равна

$$\Delta r_* = D_{\delta} \tau_* (k_{\delta} + 1)^{-1} \left[1 + (k_{\delta} - 1) y (D_{\delta} \tau_*)^{-1} \ln(1 + D_{\delta} \tau_* y^{-1}) \right]. \quad (9)$$

В случае $\tau_* \geq \tau_{oo}$ радиальная волна разряжения доходит до оси ПД, поэтому в этом случае принимаем, $\Delta r_* \equiv r_o$.

Величину смещения x_* границы «продукты детонации ПД–ЭВВ» определим из уравнений:

$$x_* = W_* \tau_* \text{ и } W_* \approx 0,5(W_{r_o} + W_{r1}), \quad (10)$$

где W_{r1} – радиальная компонента скорости смещения границы «продукты детонации ПД–ЭВВ» в момент времени τ_* .

Оценим величину W_{r1} из закона сохранения энергии. Рассмотрим объем вещества ПД и ЭВВ, ограниченный сечениями y и $y + dy$. Тогда:

$$d(\Delta E_\tau) = d(E_{к.ПД}) + d(E_{к.ЭВВ}) + d(A), \quad (11)$$

где $d(\Delta E_\tau)$ – изменение тепловой энергии продуктов взрыва ПД в области $(y; y + dy)$ за промежуток времени τ_* с учетом не только радиального расширения, но и потерь энергии вследствие аксиального движения продуктов детонации ПД; $d(E_{к.ПД})$ – кинетическая энергия радиального движения продуктов взрыва ПД в области $(y; y + dy)$ в момент времени $\tau = \tau_*$; $d(E_{к.ЭВВ})$ – кинетическая энергия радиального движения вещества ЭВВ, находящегося в области $(y; y + dy)$ в момент $\tau = \tau_*$; $d(A)$ – работа на ударное сжатие вещества ЭВВ,

$$\begin{aligned} \frac{D_6^2}{k_6^2 - 1} \left(1 - \frac{k_6 - 1}{k_6} \frac{D_6 \tau_*}{y + D_6 \tau_*} \right)^{\frac{2k_6}{k_6 - 1}} \left[1 - \frac{1}{(1 + x_*)^{2(k_6 - 1)}} \right] = \frac{2\rho_o}{\rho_6} W_{r_o}^2 \frac{(A + BW_*) \tau_*}{r_o} + \\ + \frac{k_6 + 1}{4k_6} W_{r1}^2 \left(1 - \frac{k_6 - 1}{k_6} \frac{D_6 \tau_*}{y + D_6 \tau_*} \right)^{\frac{2}{k_6 - 1}} \end{aligned} \quad (12)$$

На основании (6), (10) определяем статическую составляющую давления в продуктах детонации ПД в момент τ_* :

$$P(y, \tau_*) = \frac{P_n}{(1 + x_*)^{2k_6}} \left(1 - \frac{k_6 - 1}{k_6} \frac{D_6 \tau_*}{y + D_6 \tau_*} \right)^{\frac{2k_6}{k_6 - 1}}. \quad (13)$$

Кинетическая составляющая давления P'_k продуктов взрыва ПД в момент τ_* найдется из уравнения:

$$P'_k = \frac{k_6 + 1}{2k_6} \rho_o W_{r1}^2 \left(1 - \frac{k_6 - 1}{k_6} \frac{D_6 \tau_*}{y + D_6 \tau_*} \right)^{\frac{2}{k_6 - 1}} (1 + x_*)^{-2}. \quad (14)$$

При распаде зоны сжатия $P_f > P(y, \tau_*) + P'_k$, где

$$\sqrt{\frac{2P_o}{\rho}} \frac{\frac{P_*}{P_o} - 1}{\sqrt{(k_6 + 1) \frac{P_*}{P_o} + k_6 - 1}} = \frac{2k_{эм}}{k_{эм}^2 - 1} \left(\frac{P_f}{P_*} \right)^{\frac{k_{эм} - 1}{2k_{эм}}} \left[1 - \left(\frac{P_*}{P_f} \right)^{\frac{k_v - 1}{2k_{эм}}} \right] \sqrt{\frac{(k_{эм} + 1) P_*}{\rho_o}}, \quad (15)$$

находящегося в области $(y; y + dy)$ к моменту $\tau = \tau_*$.

При оценке величины W_{r1} из уравнения (11) полагаем:

1. $d(E_{к.ЭВВ}) = d(A)$ – т.к. вещество ЭВВ подвергается ударному сжатию – [10];

2. Радиальная скорость движения материала ЭВВ в зоне сжатия изменяется по закону

$$W_r = W_{r_o} \left(\frac{r_o}{r} \right)^{0,5} \quad [14];$$

3. Радиальная скорость разлетающихся взрывных газов ПД изменяется линейно с изменением текущего радиуса, а плотность продуктов взрыва ПД внутри области, охваченной радиальной волной разряжения и границей «продукты детонации ПД–ЭВВ», постоянна – [15].

Решение задачи распадается на два случая:

а) $\tau_* \geq \tau_{oo}$ – к моменту распада зоны сжатия в ЭВВ радиальная волна разгрузки доходит до оси ПД;

б) $\tau_* < \tau_{oo}$ – к моменту распада зоны сжатия в ЭВВ радиальная волна разгрузки охватывает только часть сечения ПД.

Ввиду громоздкости получающихся выражений приведем уравнение, полученное из (11), для определения скорости W_{r1} в случае $\tau_* \geq \tau_{oo}$. Тогда получаем:

$P_f = \rho_o (A + BW_{r1}) W_{r1}$ – давление в зоне сжатия.

Следовательно, при распаде зоны сжатия в ЭВВ возникнет торможение продуктов детонации ПД. Это приводит к возрастанию в них давления до величины P_x . Данная величина определяется из условия: скорости движения продуктов взрыва ПД и продуктов разложения ЭВВ на границе их раздела совпадают. На основании указанного условия получаем уравнение для определения, достигаемого при заданном воздействии, величины детонационного давления P_* в ЭВВ (принимаем, что $P_x = P_*$):

где k_s – коэффициент политропы ЭВВ; $\bar{\rho}$ – плотность продуктов взрыва ПД в момент $\tau = \tau_*$:

$$\bar{\rho} = \frac{k_6 + 1}{k_6} \rho_0 \left(1 - \frac{k_6 - 1}{k_6} \frac{D_6 \tau_*}{y + D_6 \tau_*} \right)^{\frac{2}{k_6 - 1}} (1 + x_*)^{-2}. \quad (16)$$

Система уравнений (4)–(16) позволяет оценить возбуждение ЭВВ скользящей детонационной волной для безоболочечного или неограниченного зарядов. В случае наличия в ЭВВ твердых включений или твердой оболочки инициирующий эффект скользящей детонационной волны усиливается из-за отражения от них ударных (детонационных) волн. В частности, при $R_c / r_o < (k_{3m} + 1) \rho_o W_{r1}^2 P_*^{-1}$ массовая скорость во фронте ударной волны будет превосходить массовую скорость в детонационной волне с давлением P_* в области зоны химической реакции. Поэтому основное возбуждение ЭВВ в этом случае будет происходить при взаимодействии опережающей зону реакции ударной волны с преградой.

$$k_{отр.} = \left[1 + n \frac{\rho_o}{\rho_{3m}} \frac{W_{r1}}{A} \left(1 + B \frac{W_{r1}}{A} \right) \right]^{-1} \left\{ 2 \left(2 + n \frac{\rho_o}{\rho_{3m}} \frac{W_{r1}}{A} \left(1 + B \frac{W_{r1}}{A} \right) \right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right\}^{\frac{2n}{n-1}}. \quad (17)$$

Расчеты $k_{отр.}$ на основании (17) показывают, что в диапазоне значений n , имеющий наибольший практический интерес $3 \leq n \leq 8$, колебания параметров ρ_o / ρ_{3m} и B в пределах $(0,6 < \rho_o / \rho_{3m} < 0,95; 1,5 < B < 2)$, величина $k_{отр.}$ зависит преимущественно только от отношения W_{r1} / A . Величину $k_{отр.}$ точно до 2–3 % можно определять по следующей аппроксимационной зависимости:

$$k_{отр.} \approx 2,5 + 1,32 W_{r1} / A. \quad (18)$$

Обсуждение результатов исследования. На основании выполненных исследований осуществлена оценка эффективности инициирования двух типов ЭВВ скользящей детонационной волной. Рассматривались следующие типы ЭВВ по химическому составу:

– Тип 1: NH_4NO_3 – 46,4 %, $Ca(NO_3)_2$ – 30 %, H_2O – 16 %, топливная фаза – 7,6 %. Плотность матричной эмульсии – 1,488 г/см³;

– Тип 2: NH_4NO_3 – 78,5 %, H_2O – 15,5 %, топливная

$$D_* \approx \left[3486 - 247,7 \left(\frac{\bar{R}_o}{\Delta} \right) + 6,3 \left(\frac{\bar{R}_o}{\Delta} \right)^2 \right] \bar{\rho}_o + \left[-9,54 \left(\frac{\bar{R}_o}{\Delta} \right)^2 + 397,3 \left(\frac{\bar{R}_o}{\Delta} \right) - 737 \right]. \quad (19)$$

– Тип 2:

$$\bar{\tau}_* \approx 0,59 \Delta \left(\frac{\bar{R}_o}{\Delta} \right)^{0,928} EXP \left[-4,08 \left(\frac{\bar{R}_o}{\Delta} \right)^{0,16} (1 - 0,75 \bar{\rho}_o) \right]$$

При значительных давлениях на фронте ударной волны (порядка 10⁹ Па), падающей на жесткую поверхность, определяющее влияние на давления в отраженной волне играют сжимаемости вещества ЭВВ и преграды [10, 16].

Положим, что сжимаемость матричной эмульсии ЭВВ описывается уравнением (закон Тэта)

$$P = \frac{\rho_{3m} c_{3m}^2}{n} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_{3m}} \right)^n - 1 \right],$$

где ρ_{3m} – плотность матричной эмульсии; c_{3m} – скорость звука в матричной эмульсии ($c_{3m} \approx A$); n – показатель, характеризующий сжимаемость матричной эмульсии. В предположении, что изменение энтропии в зоне сжатия незначительны, удается получить выражение для определения коэффициента отражения $k_{отр.}$ ударной волны от жесткой стенки при нормальном падении ($k_{отр.} = P_{отр.} / P_{пад.}$, где $P_{отр.}$ и $P_{пад.}$ – давление в отраженной и падающей волнах, соответственно):

фаза – 6 %. Плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см³.

На основании решений, изложенных в работе [7, 11], были найдены представленные ниже аппроксимационные зависимости для определения параметров D_* , τ_* для нормальной детонации (коэффициент пересжатия равен 1 [3]) с учетом структурных особенностей ЭВВ.

Введем обозначения: \bar{R}_o , $\bar{\Delta}$ – радиус поры и размер частицы эмульсии, мкм; $\bar{\tau}_*$ – время химической реакции, мкс; $\bar{\rho}_o$ – начальная плотность ЭВВ, г/см³. Тогда аппроксимационные зависимости можно записать в следующем виде:

– Тип 1:

$$\bar{\tau}_* \approx 0,23 \bar{\Delta} \left(\frac{\bar{R}_o}{\Delta} \right)^{0,85} EXP \left[-3,9 \left(\frac{\bar{R}_o}{\Delta} \right)^{0,1} (1 - 0,672 \bar{\rho}_o) \right],$$

$$D_* \cong \left[4911 - 214,2 \left(\frac{\bar{R}_o}{\bar{\Delta}} \right) - 2,8 \left(\frac{\bar{R}_o}{\bar{\Delta}} \right)^2 \right] \bar{\rho}_o + \left[2,81 \left(\frac{\bar{R}_o}{\bar{\Delta}} \right)^2 + 315,6 \left(\frac{\bar{R}_o}{\bar{\Delta}} \right) - 1721 \right]. \quad (20)$$

Выражения (19), (20) позволяют с точностью до 3% определять значения τ_* и с точностью до 1,5% значения D_* при следующих характерных для практики диапазонах изменения \bar{R}_o , $\bar{\Delta}$ и $\bar{\rho}_o$: $3 \mu\text{m} \leq \bar{\Delta} \leq 5 \mu\text{m}$, $5 \leq R_o / \Delta \leq 15$ и $0,6 < \rho_o / \rho_{эм} < 0,95$.

На рис.1, 2 представлены зависимости $\bar{\tau}_*$ от начальной пористости обоих типов ЭВВ при $\bar{\Delta} = 4$ мкм. Анализ графиков, представленных на данных рисунках, показывает, что химическая реакция в ЭВВ первого типа проходит значительно быстрее, чем в ЭВВ второго типа.

На рис. 3 представлены зависимости массы удлиненных эмульсионных промежуточных детонаторов, имеющих следующие характеристики: $L_{пд} = 1\text{м}$; $D_6 = 5200$ м/с; $\rho_6 = 1150$ кг/м³; $k_6 = 2,8$, от структурных особенностей ЭВВ (на рис. 3, 4 – $d_{тр} \equiv \Delta$). Рассматривалось возбуждение нормальной детонации только от бокового удара ПД в ЭВВ первого типа, имеющего начальную плотность 1,488 г/см³. Полагали, что ЭВВ размещено в скважинах радиуса $R_c = 0,125$ м, пробуренных в железистых кварцитах. Железистый кварцит является средой с высокой акустической жесткостью [17], поэтому принимали

коэффициент снижения давления в отраженной волне по сравнению с отражением от абсолютно жесткой равным 0,8 [18]. Тогда на основании (18), получили: $k_{отр}^{факт} \approx 2 + W_{r1} / A$.

Значение параметров ударных адиабат принимались по данным проф. Шведова К.К. [19]: $A = 2490$ м/с, $B = 1,63$ для ЭВВ типа 1; $A = 1920$ м/с, $B = 1,98$ для ЭВВ типа 2.

Значение величины «у» в расчетах принималось равным величине

$$y = L_{пд} - (R_c - r_o) - l_{дет} - D_6 \tau_*,$$

где $l_{дет}$ – длина капсюля-детонатора, при которой в сечении «у» не будет наблюдаться влияние «краевого эффекта» конца ПД, а продолжительность активного «набегания» ударной волны на стенку скважины в сечении «у» будет не менее τ_* (длина ПД $L_{пд}$ назначается так, чтобы выполнялось условие $y \geq L_{пд} / 2$, во избежание прихода в сечение «у» аксиальной стационарной волны разряжения до момента τ_*).

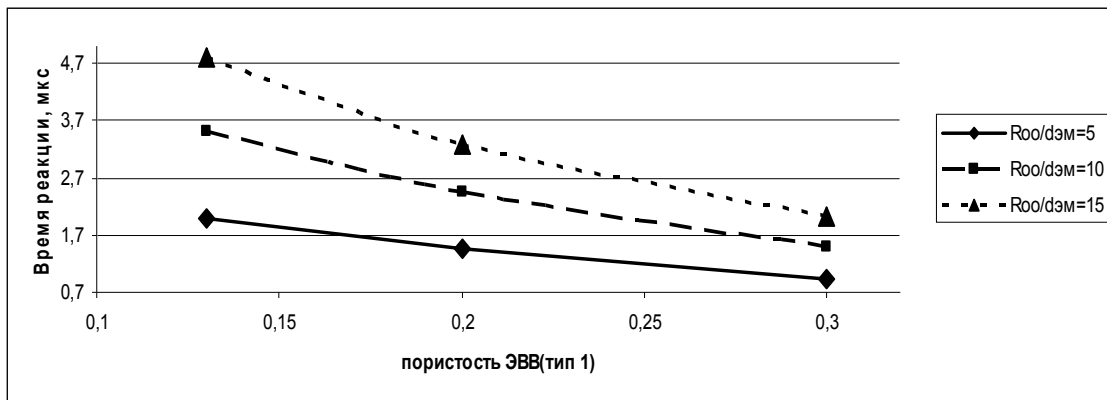


Рисунок 1 – Зависимость времени химической реакции от пористости ЭВВ (тип 1)

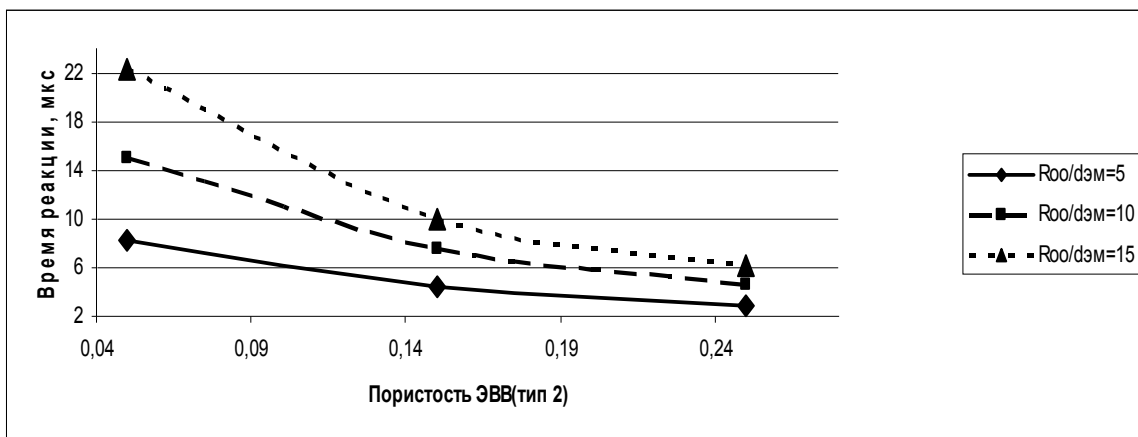


Рисунок 2 – Зависимость времени химической реакции от пористости ЭВВ (тип 2)

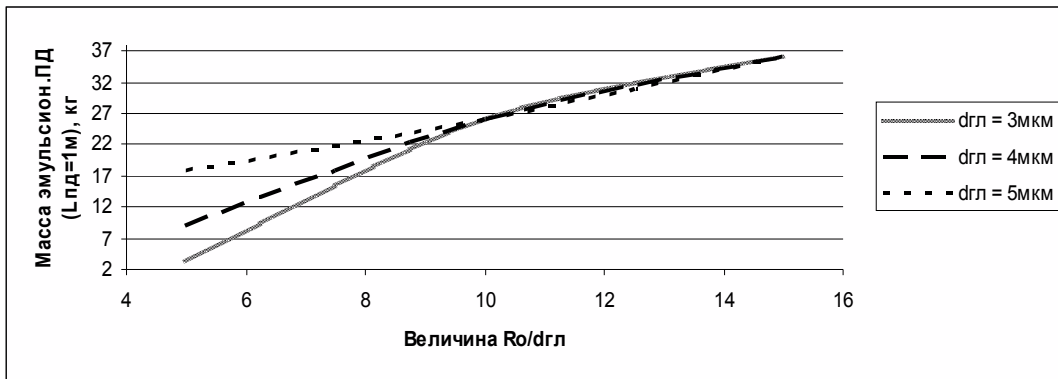


Рисунок 3 – Зависимость массы эмульсионного ПД от структурных особенностей ЭВВ (тип 1)

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3 показывает, что возбуждение детонации в ЭВВ первого типа в указанных выше условиях *только* от бокового удара эмульсионных ПД имеет смысл только, если размеры частиц эмульсии не более 3 мкм, а сенсibiliзирующих газовых пор – 15-20мкм, т.е. в случае, если ЭВВ весьма высококачественно.

На рис. 4 представлены зависимости массы удлиненных ПД имеющих следующие характеристики: $L_{пд}=0,4 м$; $D_6=7000 м/с$; $\rho_6=1600 кг/м^3$; $k_6=3,4$

(материал ПД – конверсионное ВВ), от структурных особенностей ЭВВ. Рассматривалось возбуждение нормальной детонации *только* от бокового удара ПД в ЭВВ первого и второго типов, имеющих начальную плотность $1,33 г/см^3$ и $1,26 г/см^3$, соответственно. Размер частиц эмульсии для обоих типов ЭВВ принимали равным – 4 мкм. Полагали, что ЭВВ размещено в скважинах радиуса $R_c=0,125 м$, пробуренных в железистых кварцитах.

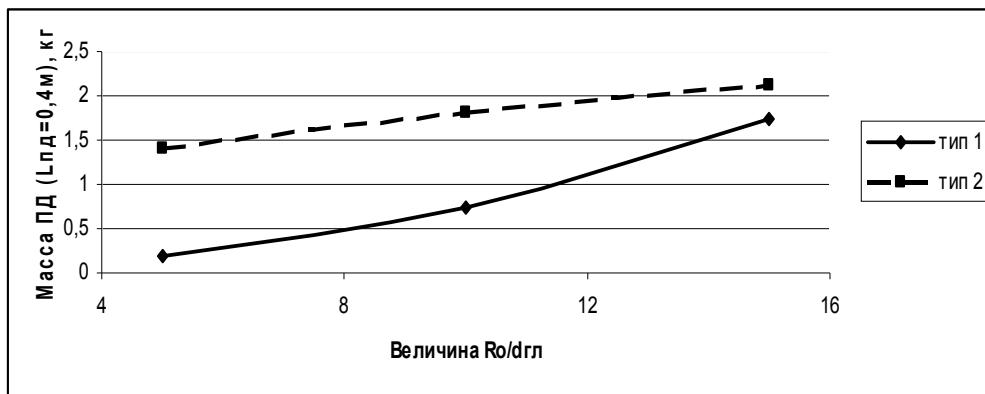


Рисунок 4 – Зависимость массы ПД из конверсионного ВВ от структурных особенностей ЭВВ различного типа

Анализ зависимостей, представленных на рис.4 показывает, что ЭВВ первого типа более легко возбуждаемо, чем ЭВВ второго типа. Вместе с тем, масса ПД для возбуждения «боковым ударом» ЭВВ первого типа весьма чувствительна к качеству газификации этого ВВ.

В заключении необходимо отметить, что выполненные при построении представленных на рис. 3, 4 зависимостей расчеты показали, что при назначенных значениях параметров, характеризующих процесс (длина ПД, радиус скважины, плотности ЭВВ и др.):

- при взрыве ПД в ЭВВ первого типа в нем сразу возбуждается недосжатая радиальная детонация, переходящая в нормальную детонацию при отражении от стенки скважины;
- при взрыве ПД в ЭВВ второго типа разложе-

ние этого ВВ под действием возникшей в нем ударной волны происходит медленно. Фронт ударной волны удаляется от зоны распада ЭВВ. Нормальная детонация в ЭВВ возникает лишь при отражении этой волны от стенки скважины.

При применении ПД из индивидуального ВВ (смеси индивидуальных ВВ) в случае значительных $L_{пд}$ и r_0 в ЭВВ обоих типов сразу возникает нормальная радиальная детонация.

ВЫВОДЫ. В работе осуществлена оценка условий возбуждения детонации в эмульсионных взрывчатых веществах (ЭВВ), сенсibiliзированных газовыми порами, под действием скользящей детонационной волны, вызываемой взрывом линейного промежуточного детонатора.

Полученные результаты представляют интерес, как при проектировании ЭВВ и ПД, так и при их применении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добрынин И.А. Обоснование параметров промежуточных детонаторов в скважинных зарядах для повышения эффективности дробления горных пород: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: спец. 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород и горная теплофизика». – М., 2010. – 20 с.
2. Щукин Ю.Г., Чернышов С.Н., Коломинов И.А. и др. Перспективные взрывчатые материалы для горной промышленности // В кн.: Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. – Екатеринбург, 2009. – С. 108–118.
3. Горинов С.А. Гофрировочная неустойчивость детонационных волн в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсibilизированном газовыми порами // В кн.: Технология и безопасность взрывных работ. – Екатеринбург, 2012. – С. 163–171.
4. 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 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 5. – С. 54–55.
5. Фокин В.А. Обоснование геометрических параметров удлиненной шашки-детонатора для обратного инициирования скважинных зарядов газифицированных эмульсионных взрывчатых веществ // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 2008. – № 3. – С. 49–54.
6. Горинов С.А., Куприн В.П., Коваленко И.Л., Собина Е.П. Влияние химической природы окислителя на детонационные характеристики ЭВВ // В кн.: III Уральский горно-промышленный форум «Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле». – Екатеринбург, 2010. – С. 191–201.
7. Горинов С.А. Теоретическая оценка детонационных параметров гранэммитов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 8. – С. 121–130.
8. Колганов Е.В., Соснин В.А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. (Составы и свойства). – Дзержинск Нижегородской области: Издательство ГосНИИ «Кристалл», 2009. – 592 с.
9. Ксюганг В. Эмульсионные взрывчатые вещества. – М.-Красноармейск, 2002. – 380 с.
10. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. – М.: Физматгиз, 1959. – 800 с.
11. Кутузов Б.Н., Горинов С.А. Иницирование эмульсионных ВВ и гранэммитов промежуточными детонаторами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 7. – С. 5–19. – Препринт.
12. Беляев А.Ф. О горении нитрогликоля // В кн.: Теория горения порохов и взрывчатых веществ. – М.: Наука, 1982. – С. 10–34.
13. Зельдович Я.Б. Теория горения порохов и взрывчатых веществ // В кн.: Теория горения порохов и взрывчатых веществ. – М.: Наука, 1982. – С. 49–86.
14. Медведева Н.С., Шемякин Е.И. Волны нагрузки при подземном взрыве в горных породах // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1961. – № 6. – С. 78–87.
15. Корявов В.П., Виленская Г.Г. Расчет движения в ближней зоне взрыва в твердой среде // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1968. – № 6. – С. 76–85.
16. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 688 с.
17. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: справочное пособие / М.М. Протодяконов, Р.И. Тедер, Е.И. Ильницкая и др. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
18. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара. – М.: Физматлит, 2008. – 304 с.
19. Отчет по теме: «Изучение разложения эмульсии под действием ударных волн» (заключительный) / Рук. К.К. Шведов, Институт проблем химической физики. – Черноголовка, 2004. – 17 с.

SHOCK INITIATION DETONATED BY A GLIDING BLAST WAVE IN THE EMULSION EXPLOSIVES SENSIBILIZED WITH GAS PORES

S. Gorinov, I. Maslov

Speckhimprom, CJSC

vul. Profsovnaya 3, Moscow, 117036, Russia. E-mail: mailto: akaz2006@yandex.ru

V. Kuprin

Ukrainian State University of Chemical Technology

prosp. Gagarina, 8, Dnipropetrovsk, 49000, Ukraine. E-mail: ooo-ekkom@mail.ru

In the article, the authors have presented results of condition evaluation for shock initiation detonated by a gliding blast wave caused by the linear priming charge blasting in the emulsion explosives sensibilized with gas pores. During the research the structure and chemical composition of emulsion explosives as for their detonation character development were studied. Also, it was obtained the equation determining the attainable detonation pressure in the emulsion explosives at the given impact. The dependencies of priming charges of various explosive types on the structural features of different emulsion explosives were obtained.

Key words: priming charge, emulsion explosives.

REFERENCES

- Dobrynin, I.A. (2010), "Justification of parameters of boosters in the hole charges to increase the efficiency of rock crushing", Thesis Abst. Cand.Sci., engineering, specialty 25.00.20 "Geomechanics, rock blasting and rock thermal physics", Moscow, Russia.
- Shchukin, J.G., Chernyshev, S., Colomina, I.A., et al. (2009), "Prospective explosives for mining", *Development of resource saving technologies in the explosive case*, pp. 108-118, Ekaterinburg, Russia.
- Gorinov, S.A. (2012), "Ripple instability of detonation waves in the emulsion explosive, gas-sensitized cell", *Technology and safety blasting*, Ekaterinburg, pp. 163-171.
- Maslov, I.Y., Pupkov, V.V., Fomenkova, V.E. et al. (2003), "Improving the quality of training of explosive rock mass through the use of boosters with optimal dimensions for initiating hole charges emulsion explosives", *Mountain information-analytical bulletin*, no. 5, pp. 54-55.
- Fokin, V., (2008), "Justification elongated geometry checkers detonator to initiate the return hole charges of gas-emulsion explosives", *Mining Journal*, no. 3, pp. 49-54.
- Gorinov, S.A., Kuprin, V.P. Kovalenko, I.L., Sobin, E.P. (2010), "The influence of the chemical nature of the oxidant on the detonation characteristics of emulsion explosives", *The development of resource-saving technologies in the explosive case. III Ural Mining and Industry Forum*, pp. 191-201, Ekaterinburg, Russia.
- Gorinov, S.A. (2010), "Theoretical estimation of the parameters of detonation granemites", *Mountain information-analytical bulletin*, no. 8, pp. 121-130.
- Kolganov, E.V., Sosnin, V.A. (2009), *Emulsionnye promyshlennye vzryvchatye veschestva (Sostavy i svoistva)* [Emulsion explosives industry. (Composition and properties)]. Crystal, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod, Russia.
- Ksyuguang, B. (2002), *Emulsionnye vzryvchatye veschestva* [Emulsion explosives]. M-Krasnoarmejsk, Russia.
- Baum, F.A., Stanyukovich, K.P., Schechter, B. (1959), *Fizika vzryvchatykh veschestv* [Physics of the explosion] Fizmatgiz, Moscow.
- Kutuzov, B.N., Gorinov, S.A. (2011), "Initiation of emulsion explosives and detonators granemito intermediate", *Mountain information-analytical bulletin*, Preprint, no. 7, pp. 5-19.
- Belyaev, A.F. (1982), "Combustion of nitroglycol", *The theory of combustion of gunpowder and explosives*, pp. 10-34, Nauka, Moscow, Russia.
- Zel'dovich, B. (1982), "The theory of burning gunpowder and explosives", *The theory of burning gunpowder and explosives*, pp. 49-86, Nauka, Moscow, Russia.
- Medvedev, N.S., Shemyakin, E.I. (1961), "Wave load at underground explosion in the rocks", *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, no. 6, pp. 78-87.
- Koryavov, V.P., Wilensky, G. (1968), "Calculation of the motion in the near field explosion in a solid medium", *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, no. 6, pp. 76-85.
- Zel'dovich, B. and Raiser, Y.P. (1966), *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavlenii* [Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena], Nauka, Moscow, Russia.
- Protod'iakonov, R.I., Téder, E.I. (1981), Il'inskaya, M.M. et al. *Raspredelenie i korrelyatsiya pokazatelei fizicheskikh svoistv gornykh porod* [Distribution and correlation parameters of the physical properties of rocks: Reference Guide], Nedra, Moscow, Russia.
- Orlenko, L.P. (2008), *Fizika vzryva i udara* [Shot blast and Physics], Fizmatlit, Moscow, Russia.
- Swedov, K.K. (2004), "The study of the decomposition emulsion under the action of shock waves", Institute of Problems of Chemical Physics, Chernogolovka, Ukraine.

Стаття надійшла 29.10.2013.