

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КРИТИЧЕСКОГО ДИАМЕТРА ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ОТ ПЛОТНОСТИ В СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКЕ *

Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭМВВ) на основе эмульсионной матрицы с мелкими капельками окислителя имеют высокую детонационную способность. Критический диаметр и ширина зоны реакции при детонации ЭМВВ известны для случая тонких оболочек с низким акустическим импедансом. В настоящей работе исследовалась зависимость критического диаметра ЭМВВ в акустически жесткой стальной оболочке от начальной плотности ВВ в диапазоне $0,75-1,37$ г/см³. Плотность варьировалась содержанием микробаллонов из стекла, являющихся сенсбилизатором. Экспериментально показано, что при заключении ЭМВВ в жесткую оболочку характерная величина $d_{cr}/2a_R < 1$. Это может быть связано с уменьшением кривизны детонационного фронта в жесткой оболочке. С критическим диаметром и шириной зоны реакции неразрывно связано время реакции. Предложена модель для описания экспериментальной зависимости времени реакции ЭМВВ от концентрации сенсбилизатора, основанная на анализе разогрева слоя эмульсии, окружающей каждый микробаллон.

Ключевые слова: эмульсионное взрывчатое вещество, критический диаметр, жесткая оболочка, время реакции, влияние плотности.

Определение зависимости критического диаметра d_{cr} от начальной плотности ρ для эмульсионного взрывчатого вещества (ЭМВВ) в акустически жесткой оболочке представляет интерес для оценки предельной детонационной способности ВВ. Эта зависимость связана с такими характеристиками ВВ, как ширина зоны химической реакции a_R и d_{cr} в акустически слабой оболочке. Одним из основных процессов, определяющих значение d_{cr} без оболочки, является потеря энергии в зоне реакции вследствие боковой разгрузки продуктов взрыва (ПВ); соотношение Харитона $d_{cr} \approx 2a_R$ выводится с учетом этого процесса. В работе [1] указано на качественное нарушение этого соотношения для ЭМВВ в области низких плотностей $\rho < 1,04$ г/см³. Причина такого

качественного несоответствия в настоящий момент неясна. Размещение заряда ЭМВВ в жесткой оболочке позволяет практически полностью исключить влияние боковой разгрузки ПВ на процесс химического превращения в зоне реакции. При этом за счет уменьшения внешних потерь энергии скорость детонации D увеличивается и приближается к идеальной скорости D_i , соответствующей заряду бесконечного диаметра. В предельном случае «идеальной» оболочки, при полном отсутствии внешних потерь энергии в зоне реакции, фронт детонации становится плоским [2]. В реальности полностью убрать внешние потери энергии невозможно, поэтому в случае жесткой оболочки можно ожидать, что характерная величина $d_{cr}/2a_R$ имеет значение от 0 до 1.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ-247.2012.1.

Автор признателен научному руководителю В. В. Сильвестрову за постановку задачи и обсуждение результатов работы, А. В. Пластинину за помощь в проведении экспериментов, [В. Ф. Нехаеву], А. В. Нехаеву за помощь в изготовлении экспериментальных сборок.

Важным параметром для анализа зависимости $d_{cr}(\rho)$, и характеристик ВВ в целом является время химической реакции t_R . Экспериментальные данные [1] указывают на особый ход зависимости $t_R(\rho)$, когда при $\rho < 1,2$ г/см³ время реакции меняется очень слабо по сравнению с дальнейшим резким возрастанием при $\rho > 1,2$ г/см³.

Для объяснения этой зависимости в настоящей работе предложена физическая модель оценки времени реакции, протекающей по механизму гетерогенного разложения эмульсии. Модель основана на анализе среднего расстояния между микросферами и скорости сгорания объема эмульсии, окружающей каждую микросферу, в зависимости от концентрации микросфер.

Оценка времени реакции

Рассмотрим детонацию ЭМВВ с позиции теории горячих точек, где в роли горячей точки выступает полая стеклянная микросфера. Внутренняя структура эмульсии не рассматривается; будем считать, что влияние состава и размера капелек окислителя эмульсии заключено в данной модели в коэффициентах пропорциональности. Будем рассматривать «идеальную» детонацию, когда заряд ВВ имеет достаточно большой поперечный размер и боковая разгрузка слабо влияет на зону реакции. Зависимость

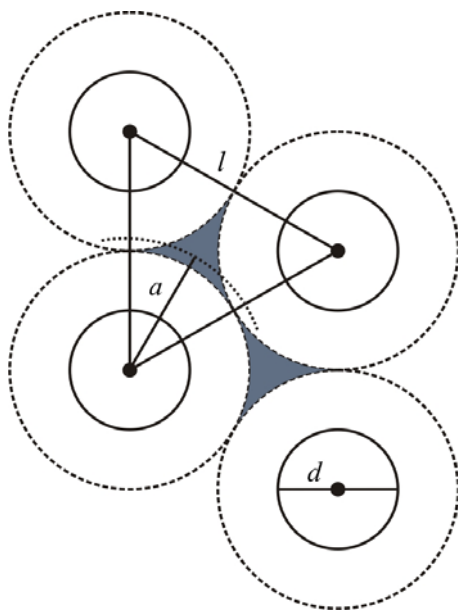


Рис. 1. Механизм гетерогенного превращения

скорости взрывного разложения $\dot{\lambda}$ от концентрации микросфер можно построить следующим образом: во-первых, будем считать, что все микросферы имеют одинаковый размер. Тогда для полного разложения эмульсии каждая из них должна разогреть слой эмульсии, обозначенный пунктиром на рис. 1. Будем называть соответствующий объем элементарным объемом горения микросферы. Здесь не рассматривается возможность распространения стационарной детонации при неполном разложении эмульсии, которое может иметь место при небольшой концентрации микросфер и большом объеме эмульсии, окружающей каждую микросферу. Тогда можно установить однозначную связь между концентрацией микросфер и величиной элементарного объема, а скорость разложения эмульсии будет пропорциональна концентрации микросфер, площади поверхности, с которой происходит разложение, и обратно пропорциональна объему эмульсии, окружающей каждую микросферу.

Можно записать уравнение скорости разложения эмульсии в форме [3] с коэффициентом $\frac{S_a n_m}{V(S_a) - V_{m,0}}$, соответствующим переменной концентрации микросфер:

$$\dot{\lambda} = A_1 (1 - \lambda) \frac{S_a n_m}{V(S_a) - V_{m,0}} (p - p_c)^{\gamma_1}, \quad (1)$$

где λ – массовая доля продуктов реакции; S_a – площадь поверхности элементарного объема горения; $V(S_a)$ – элементарный объем горения одной микросферы; $V_{m,0}$ – объем микросферы; n_m – концентрация микросфер; p – давление детонации; A_1 , p_c , γ_1 – подгоночные коэффициенты. Нужно отметить, что сумма всех элементарных объемов горения в предположении, что все микросферы имеют одинаковый размер, всегда равна 0,74 объема ВВ. При этом оставшиеся 0,26 объема эмульсионного ВВ приходится на эмульсию, находящуюся между ячейками элементарных объемов (заштрихованная область на рис. 1). Учесть горение этой эмульсии можно, приняв значение радиуса элементарного объема горения $a = \left(1 \div \frac{2}{\sqrt{3}}\right) \frac{l}{2}$, где l – расстояние между центрами микросфер, и считая, что

симметрично расположенные объемы этой эмульсии слабо нарушают сферичность элементарного объема горения. Такое предположение оправданно, учитывая, что увеличение радиуса составляет всего $\sim 10\%$. Доля такой эмульсии от общего объема эмульсии увеличивается при увеличении концентрации микросфер, поэтому данная поправка имеет большее значение для ЭМВВ с высокой концентрацией микросфер МС-В. Оптимальное значение поправки $\alpha = \frac{2a}{l} = 1,1$, в таком случае сумма элементарных объемов горения равна объему всего ВВ.

В исследуемой постановке предположение о равенстве размера всех микросфер достаточно оправданно, как следует из распределения микросфер по размерам (рис. 2). Предельное значение массовой доли микросфер при таком предположении $\mu = 0,46$ близко к наблюдаемому в эксперименте. В данном случае μ определяется как отношение массы микросфер к массе эмульсии. Для получения большей точности нужно вычислять сумму $\sum_{N=1}^{N_m} \frac{S_a(N)}{V(S_a) - V_{m,0}(N)}$ при условии «хаотичности» расположения микросфер в пространстве, учитывая распределение их по размерам. В этой сумме сложно определить вид функции $S_a(N)$.

С учетом сделанных выше предположений, получим: $S_a = \pi l^2$, $\eta = \frac{\pi}{6} n_m l^3 = 0,74$,

$V(S_a) - V_{m,0} = \frac{\pi}{6} ((\alpha l)^3 - d^3)$, где d – диаметр микросферы. Тогда

$$\frac{\dot{\lambda}}{1-\lambda} = B \frac{1}{\frac{l}{d} \left(\left(\alpha \frac{l}{d} \right)^3 - 1 \right)} \left(\frac{p-p_c}{p_0-p_c} \right)^{\gamma_1},$$

где B, p_0 – нормировочные константы. Величина в правой части имеет размерность обратного времени и представляет собой обратное характерное время реакции с точностью до константы, равное обратному времени реакции t_{he} для гетерогенного процесса разложения эмульсии. Отсюда получим оценку времени реакции:

$$t_{he} = \tilde{t}_{he} x \left((\alpha x)^3 - 1 \right) \left(\frac{p_0 - p_c}{p - p_c} \right)^{\gamma_1}, \quad (2)$$

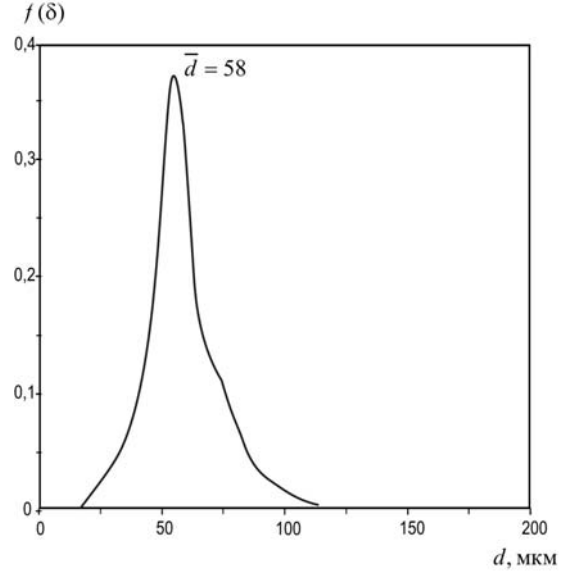


Рис. 2. Распределение относительного объема микросфер МС-В по размерам (оптический анализ)

где $x = \frac{l}{d} = \sqrt[3]{\eta \frac{1+6,2\mu}{6,2\mu}}$ – относительное расстояние между центрами микросфер, $\eta = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \approx 0,74$ – коэффициент заполнения для ГЦК решетки, $\tilde{t}_{he} = \text{const}$ и находится из условия нормировки. Зависимость $p(\mu)$ выражается через $p(\rho_0) = 5\rho_0^3 - 0,6\rho_0^2$ [1], полученную в эксперименте, где $\rho_0 = \rho_{эм} \times \frac{1+\mu}{1+6,2\mu}$ – начальная плотность ЭМВВ. Таким образом, формула (2) выражает неявную зависимость времени реакции t_{he} от массовой доли микробаллонов μ .

Можно видеть, что в (2) $t_{he} \rightarrow \infty$ при $\mu \rightarrow 0$. Это связано с тем, что при существенном уменьшении концентрации горячих точек механизм гетерогенного разложения эмульсии становится неэффективным и гомогенное разложение имеет большее значение. Чтобы это учесть, необходимо добавить в уравнение (1) слагаемое, отвечающее за гомогенное разложение. Выберем это слагаемое в виде

$$\dot{\lambda} = (1-\lambda) \times \left(A_1 \frac{S_a n_m}{V(S_a) - V_{m,0}} (p-p_c)^{\gamma_1} + A_2 p^{\gamma_2} \right), \quad (3)$$

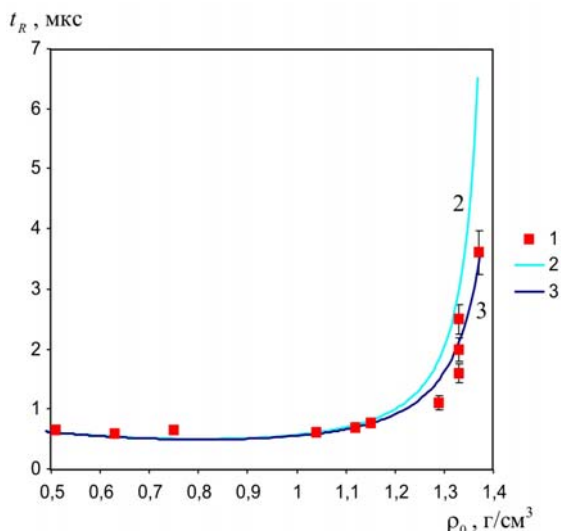


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные значения $t_R(\rho)$ для ЭМВВ: 1 – данные t_R из [1]; 2 – оценка t_R по (2) без учета механизма гомогенного разложения; 3 – оценка t_R по (2) и (4)

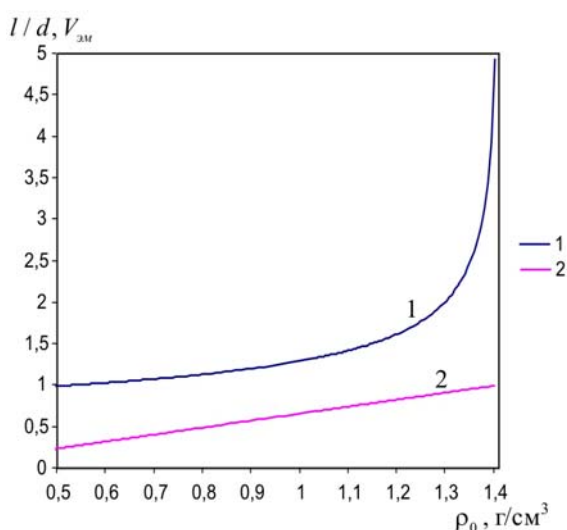


Рис. 4. Зависимость относительного расстояния между микросферами (l) и их объемной концентрации (2) от плотности ЭМВВ

$A_2, \gamma_2 = \text{const}$. Тогда получим $\frac{1}{t_R} = \frac{1}{t_{he}} + \frac{1}{t_{ho}}$,

и $t_R \rightarrow t_{ho}$ при $\mu \rightarrow 0$, где

$$t_{ho} = \tilde{t}_{ho} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\gamma_2}, \quad (4)$$

t_R – полное время реакции, t_{ho} – время, соответствующее механизму гомогенного разложения, $\tilde{t}_{ho} = \text{const}$.

По формулам (2), (4) проведен расчет зависимости времени реакции от плотности ЭМВВ. Экспериментальные данные t_R из [1] и расчетная зависимость приведены на рис. 3. Используемые значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1,1 \\ p_0 &= 12,5 \text{ ГПа} \\ p_c &= 0 \\ \gamma_1, \gamma_2 &= 1 \\ \tilde{t}_{he} &= 0,08 \text{ мкс} \\ \tilde{t}_{ho} &= 6,2 \text{ мкс} \end{aligned}$$

Имеется два характерных участка в экспериментальной зависимости $t_R(\rho)$: она слабо меняется при $\rho < \rho_h \approx 1,2 \text{ г/см}^3$, а затем возрастает. Расчетная зависимость времени реакции $t_{he}(\rho)$ без учета механизма гомогенного разложения хорошо описывает экспериментальные данные при $\rho < \rho_h$, а при $\rho > \rho_h$ резко растет из-за существенного уменьшения концентрации горячих точек. Зависимость $t_R(\rho)$ при $\rho > \rho_h$ хорошо описывается с учетом механизма гомогенного разложения эмульсии – кривая 3. Из сравнения кривых 2 и 3, а также с учетом формулы (4) и зависимости $p(\rho_0)$ ясно, что механизм гомогенного разложения практически не влияет на t_R при $\rho < \rho_h$ из-за большого падения давления на этом участке. Таким образом, можно считать, что значение $\rho_h \approx 1,2 \text{ г/см}^3$ является пограничным между участками преимущественно гомогенного и гетерогенного механизмов разложения ЭМВВ.

Незначительное изменение $t_R(\rho)$ при $\rho < \rho_h$ можно качественно пояснить следующим образом. Как показано выше, скорость превращения эмульсии в продукты реакции сильно зависит от относительного расстояния между центрами горячих точек

$x = \frac{l}{d}$. В свою очередь, это расстояние значительно

меняется только при небольшой концентрации микросфер, и, начиная с некоторого значения, медленно приближается к 1. Это показано на рис. 4, где приведена также зависимость объемного содержания эмульсии от плотности ЭМВВ.

Повышение скорости превращения эмульсии за счет уменьшения расстояния между

горячими точками компенсируется падением давления из-за уменьшения концентрации эмульсии и, следовательно, энерговыделения. Из-за этого скорость гетерогенного разложения эмульсии на участке $\rho = 0,5 \div 1,15$ г/см³ примерно постоянна. Также при уменьшении плотности имеет большое значение превращение эмульсии, заполняющей пространство между ячейками элементарных объемов горения, доля которой также постоянна.

С помощью данных о времени реакции в [1] получена оценка сверху зависимости ширины зоны реакции от плотности $a_R \approx (D - U_{cj})t_R$, а также зависимость $d_{cr}(\rho)$ для ЭМВВ в оболочке с низким акустическим импедансом. Для большинства ВВ d_{cr} и a_R пропорциональны друг другу с коэффициентом 2–4. В [1] показано, что для ЭМВВ при уменьшении плотности $\rho \leq 1,04$ г/см³ зависимость $d_{cr}(\rho)$ растет, при этом $a_R(\rho)$ уменьшается. Количественное нарушение соотношения $d_{cr} \approx 2a_R$ наблюдалось неоднократно [4; 5], но его качественное несоответствие экспериментальным данным было отмечено впервые. Механизм такого различия в поведении d_{cr} и a_R остается неясным. В частности, это означает, что значение d_{cr} определяется не только действием боковой разгрузки продуктов взрыва, на определяющей роли которой основано соотношение Харитона.

Критический диаметр ЭМВВ в оболочке

Исследование зависимости $d_{cr}(\rho)$ для ЭМВВ в жесткой оболочке имеет также практический интерес. Например, при сварке взрывом применяются плоские полуограниченные заряды ВВ (как правило, ограниченные с одной стороны металлической пластиной). Это позволяет существенно уменьшить критическую толщину ВВ. В [6] было показано, что для ЭМВВ плотностью $\rho = 0,5$ г/см³ значение d_{cr} уменьшается от ≈ 13 до 1,7 мм, т. е. в 7–8 раз, как и для мощных индивидуальных ВВ, причем $R_{cr} \approx a_R$ (a_R без оболочки). Интересно проверить, до какого предела может уменьшаться значение характерной величины

R_{cr} / a_R для ЭМВВ в стальной оболочке, при почти полном исключении влияния боковой разгрузки.

Критический диаметр определялся путем регистрации скорости детонации D для ЭМВВ с массовой долей микросфер $\mu = 1 \div 20$ % (при этом $\rho = 1,33 \div 0,75$ г/см³) при уменьшающихся значениях диаметра заряда. В качестве инициатора использовалось ЭМВВ с наибольшей детонационной способностью и $\rho = 1,04$ г/см³ диаметром, как минимум, на 2 мм больше диаметра заряда и всегда не менее 8 мм. Величина d_{cr} определяется как наименьший диаметр заряда, при котором регистрируется незатухающая скорость детонации D , а при меньшем диаметре зафиксирован отказ. Отношение длины заряда к его диаметру составляло 20 калибров, измерение D осуществлялось 3–4 контактными датчиками на длине 10–15 калибров, чтобы убедиться в стационарности процесса. Скорость детонации зарядов $d = 2 \div 2,5$ мм измерялась ионизационными датчиками, так как они вносят меньшее возмущение в процесс.

Отношение массы стальной оболочки к массе ЭМВВ при $d = d_{cr}$ составляло 24–370 ($d_{in} = 10$ мм, $d_{out} = 18$ мм при $\rho = 1,33$ г/см³, при $\rho = 0,75$ г/см³ – 2,5 и 15 мм соответственно). Значения D и d_{cr} приведены на рис. 5, 6. Зависимости $a_R(\rho)$ и $d_{cr}(\rho)$ без оболочки взяты из [1]. Предполагается, что a_R слабо изменяется при заключении ЭМВВ в оболочку.

Для ЭМВВ с долей микросфер $\mu = 2$ % и $\mu = 20$ % при $d < d_{cr}$ приведены значения скорости затухающего взрывного процесса на начальном участке измерения. Методика определения скорости детонации с помощью контактных или ионизационных датчиков не позволяет проводить измерения при $d < 2$ мм, поскольку датчики диаметром 1–1,5 мм начинают существенно возмущать процесс детонации. Для ЭМВВ плотностью $\rho = 1,04$ г/см³, которое имеет наименьший критический диаметр без оболочки, не удалось зафиксировать «отказ» детонации. По-видимому, при $\rho = 1,04$ г/см³ значение $d_{cr} \leq 2$ мм. Значения R_{cr} для зарядов в оболочке уменьшаются в $\approx 2,5$ раза при $\rho = 0,75 \div 1,15$ г/см³ и в 4–7 раз на краях

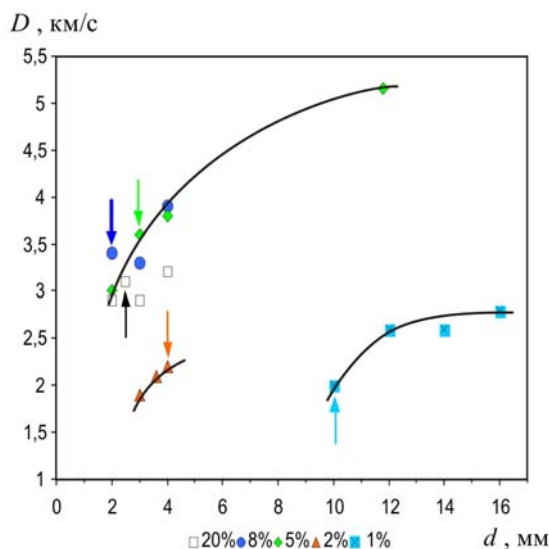


Рис. 5. Зависимость скорости детонации ЭмВВ в жесткой оболочке от диаметра при разных плотностях. Стрелками обозначены d_{cr} при данной плотности

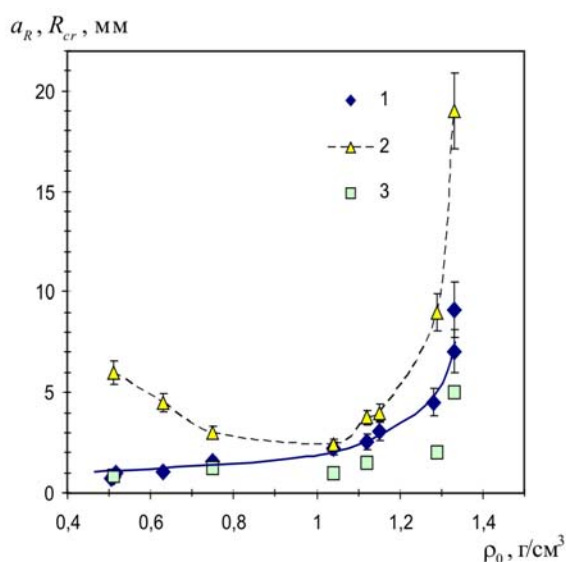


Рис. 6. Зависимости a_R и $R_{cr} = d_{cr}/2$ от плотности ЭмВВ: 1 – a_R для свободного заряда; 2 – R_{cr} для свободного заряда [1]; 3 – R_{cr} для заряда в стальной оболочке

диапазона. Можно полагать, что наблюдаемое отношение $R_{cr} / a_R \leq 1$ во всем диапазоне плотностей связано с тем, что при заключении заряда в оболочку и уменьшении энергопотерь фронт детонации становится более плоским, а скорость D приближается к идеальному значению D_i [2]. При этом часть энергии уносится ударной волной в оболочке, часть составляют потери импульса на границе со стенкой за счет трения, до-

ля которых возрастает при уменьшении диаметра заряда. Поэтому значение R_{cr} / a_R увеличивается приблизительно от 0,5 до 1 при уменьшении плотности ЭмВВ.

Заключение

Получены экспериментальные данные зависимости $d_{cr}(\rho)$ в жесткой оболочке при плотности ЭмВВ $\rho = 0,75 \div 1,37$ г/см³. Сравнение данных настоящей работы с данными $a_R(\rho)$ и $d_{cr}(\rho)$ для зарядов без оболочки [1] показывает, что при подавлении боковой разгрузки d_{cr} уменьшается в 2,5–7 раз. В предположении неизменности $a_R(\rho)$ при заключении заряда в оболочку характерная величина $d_{cr} / 2a_R = 0,45 \div 0,95$. Из этого можно сделать вывод, что, помимо существенных потерь энергии в зоне реакции за счет боковой разгрузки ПВ, есть иные механизмы энергопотерь, определяющие значение d_{cr} . Значение величины $d_{cr} / 2a_R < 1$ может быть объяснено тем, что фронт детонации становится более плоским при заключении ЭмВВ в жесткую оболочку.

Приведена физическая модель оценки времени реакции ЭмВВ при изменении концентрации микробаллонов по механизму гетерогенного разложения. Имеющиеся экспериментальные данные $t_R(\rho)$ хорошо описываются этой моделью с добавлением механизма гомогенного разложения [3] при изменении объемной концентрации микросфер в диапазоне 6–75 %. Показано, что слабое изменение $t_R(\rho)$ при $\rho < 1,2$ г/см³ с последующим резким возрастанием может быть объяснено переходом определяющей роли в разложении эмульсии от механизма гетерогенного взрывного превращения эмульсии к механизму гомогенного превращения.

Список литературы

1. Юношев А. С., Пластинин А. В., Сильвестров В. В. Исследование влияния плотности эмульсионного взрывчатого вещества на ширину зоны реакции // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48, № 3. С. 79–88.
2. Jackson S. I., Kiyanda C. B., Short M. Precursor Detonation Wave Development in ANFO due to Aluminum Confinement // Proc.

14th Intern. Detonation Symposium. Idaho, 2010. P. 740–749.

3. Cooper J., Leiper A. G., Neilson W. G. Molecular and Microscopic Structural Effects in the Detonation of Fluid Explosives // Proc. 12th Intern. Detonation Symposium. California, 2002.

4. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. М: Наука, 1970.

5. Сильвестров В. В., Кравцов В. В. Влияние низкой температуры на параметры детонации литого тротила // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 3. С. 119–124.

6. Пластилин А. В., Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Сильвестров В. В. Критический диаметр низкоскоростного эмульсионного ВВ в оболочке // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 6. С. 107–110.

Материал поступил в редколлегию 03.10.2012

S. I. Rafeichik

DEPENDENCE OF CRITICAL DIAMETER OF EMULSION EXPLOSIVE ON DENSITY IN STEEL CONFINEMENT

Emulsion explosives (EMX) based on fine emulsion matrix are characterized by high detonation ability. Critical diameter (as minimum diameter when detonation occurs) and reaction zone length are known in the case of thin confinement with low acoustic impedance. The dependence of critical diameter of EMX in steel confinement with high acoustic impedance was examined in the range of initial density 0,75–1,37 g/cm³. Density was varied by the concentration of glass microballoons, which were used as the sensitizer. It was shown experimentally, that characteristic value is $d_{cr} / 2a_R < 1$ in the case of strong confinement. This can be due to the decrease of detonation front curvature. Comparison was made between the values of critical diameter in weak and strong confinement. The main distinction is that such dependence in strong confinement is lower and almost monotonic. This can indicate the influence of some processes besides lateral rarefaction wave. Period of reaction is closely connected with critical diameter and reaction zone length. Model based on heterogeneous kinetic of heating of emulsion surrounding single microballoon was proposed to describe the experimental dependence of the reaction zone time of EMX on concentration of microballons.

Keywords: emulsion explosive, critical diameter, strong confinement, reaction zone period, influence of density.