

## КРИТИЧЕСКИЙ ДИАМЕТР ДЕТОНАЦИИ НИЗКОСКОРОСТНОГО ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В ОБОЛОЧКЕ

А. В. Пластинин<sup>1</sup>, С. А. Бордзиловский<sup>1,2</sup>, С. М. Караханов<sup>1</sup>,  
В. В. Сильвестров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, plastinin@hydro.nsc.ru

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Экспериментально рассмотрено влияние оболочки на критический диаметр детонации высокодисперсного низкоскоростного эмульсионного взрывчатого вещества. Критический диаметр цилиндрического заряда в оболочке из металла уменьшается в семь раз по сравнению с зарядом в тонкостенной оболочке из полиэтилена.

Ключевые слова: эмульсионные ВВ, детонация, критический диаметр, влияние оболочки.

### ВВЕДЕНИЕ

Наличие жесткой оболочки оказывает существенное влияние на величину критического диаметра  $d_{cr}$  цилиндрических зарядов взрывчатых веществ (ВВ). Для мощных индивидуальных ВВ критический диаметр детонации ВВ в жесткой оболочке  $d_{cr,case}$  существенно меньше критического диаметра зарядов без оболочки: обычно  $d_{cr}/d_{cr,case} = 5 \div 8$  [1]. Оболочка ограничивает проникновение боковых волн разрежения в зону реакции, что способствует более полному химическому превращению в детонационной волне, и поэтому заключение заряда в оболочку значительно расширяет область устойчивой детонации в сторону меньших диаметров.

Для грубодисперсных промышленных ВВ это отношение существенно меньше:  $d_{cr}/d_{cr,case} = 2 \div 4$ . Для мелкодисперсной аммиачной селитры, которая является основным компонентом большинства промышленных ВВ,  $d_{cr} = 60$  мм для зарядов без оболочки [2] и около 7 мм для зарядов в стальной оболочке [3], т. е. уменьшение критического диаметра достигает девяти раз. Возможная причина столь значительного различия — влияние дисперсности взрывчатых компонентов на обсуждаемое отношение.

Цель данной работы — эксперименталь-

ное определение отношения  $d_{cr}/d_{cr,case}$  для эмульсионного взрывчатого вещества (ЭмВВ). Эти ВВ являются типичными представителями современных промышленных ВВ и по ряду причин: возможность изготовления на месте производства взрывных работ, высокая безопасность, существенно меньшее количество вредных выбросов и пр. — широко применяются в горнодобывающей промышленности [4]. Для промышленного ЭмВВ обсуждаемое отношение для зарядов без оболочки и в стальной оболочке составляет 2.9 [5]. Ниже показано, что для высокодисперсного ЭмВВ с большим числом «горячих точек» это отношение существенно выше и достигает  $7 \div 8$ , как и для индивидуальных ВВ.

### ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Использовалось ЭмВВ лабораторного изготовления с размером капель окислителя не более  $1 \div 2$  мкм, сенсibilизированное полыми стеклянными микросферами среднего диаметра 60 мкм с массовым содержанием микросфер  $\mu = 50$  % сверх массы эмульсии [6]. Выбор данного ВВ обусловлен большим значением критического диаметра, равным 12.4 мм для заряда, заключенного в тонкостенную оболочку из полиэтилена, и невысоким детонационным давлением ( $\approx 7 \div 8$  кбар). Для этого ЭмВВ любая металлическая оболочка является достаточно жесткой, поэтому при ее использовании ожидалось значительное уменьшение критического

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-08-00164-а), программ Президиума РАН (проект 2.10 и 2.11) и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (№ НШ-5770.2010.1).

диаметра, так как основная причина, его определяющая, — боковая разгрузка была сведена практически к нулю. Другие параметры этого ЭмВВ: плотность  $\rho_0 = 0.5 \text{ г/см}^3$ ; скорость детонации  $D \approx 1.8 \div 2.1 \text{ км/с}$ , очень слабо зависящая от диаметра заряда  $d$ ; критическая скорость детонации  $D_{cr} = 1.8 \div 1.9 \text{ км/с}$ , близкая к скорости звука для материала эмульсионной матрицы.

Схема проведения экспериментов приведена на рис. 1, а. Полость диаметром  $d = 1 \div 8 \text{ мм}$  внутри цилиндрической оболочки из фторопласта, дюралюминия марки Д16Т или стали вручную заполнялась исследуемым ЭмВВ. Внешний диаметр оболочки 16 мм, длина  $L = 40 \text{ мм}$ . При  $d \approx 2 \text{ мм}$   $L/d \approx 20$ . Через отверстия диаметром 0.8 мм в стенке оболочки вводились датчики для регистрации скорости детонации. Первый располагался на расстоянии 5 мм от секции инициирования. Базы измерения указаны на рисунке. К оболочке примыкала инициирующая секция, которая включала заряд того же ЭмВВ диаметром 10 мм, длиной 20 мм, находящийся также в дюралюминиевой трубке внешнего диаметра 16 мм. ЭмВВ инициировалась боевиком из более мощного ЭмВВ ( $\mu = 20 \%$ ) длиной 20 мм, который подрывался детонирующим шнуром или высоковольтным детонатором ЭДВ-1.

При детонации по оболочке распространяется волна сжатия, скорость которой близка к скорости звука  $c_b$  для материала стержня. Для стали и дюралюминия  $c_b \approx 5 \text{ км/с}$  и  $D < c_b$ , для фторопласта  $c_b = 1.3 \div 1.8 \text{ км/с}$  и  $D > c_b$ , т. е. в случае оболочки из металла перед фронтом детонации по оболочке распространяется волна сжатия, которая может оказывать влия-

ние на процесс детонации. В случае оболочки из фторопласта процесс детонации боковой волной сжатия не возмущен, но акустический импеданс материала оболочки недостаточно велик для того, чтобы ее можно было считать «жесткой» и свести влияние боковой разгрузки продуктов взрыва к минимуму.

Для установления факта детонации ЭмВВ в канале и измерения ее скорости были использованы различные методики. Основные требования к технике измерений — минимальное влияние на процесс детонации и несрабатывание датчиков скорости за счет волны сжатия в оболочке, опережающей детонационную волну. Применение ионизационных датчиков, действие которых основано на появлении проводимости за фронтом детонационной волны, для данного ЭмВВ оказалось затруднительным ввиду нестабильности их срабатывания, что обусловлено, по-видимому, локально низкой электрической проводимостью продуктов взрыва. Отметим, что при меньшем содержании микросфер проблем со срабатыванием ионизационных датчиков не наблюдалось.

Применение пластин-свидетелей из свинца для регистрации факта детонации также оказалось ненадежным: в опытах при замене ЭмВВ в измерительном канале модельным инертным материалом (вазелин плюс полые микросферы, плотность композиции  $0.5 \text{ г/см}^3$ ) после взрыва на пластине-свидетеле наблюдался отпечаток, мало отличимый от отпечатка, характерного для детонации. По-видимому, это связано с тем, что давление в инициирующей секции было достаточно велико, чтобы ускорить инертный материал, или с влиянием волны сжатия в оболочке, обжимающей вещество внутри канала.

Поэтому основная часть экспериментов была проведена с использованием специально разработанных контактных датчиков, чувствительных к импульсу давления амплитудой  $2 \div 3 \text{ кбар}$ , электрически изолированных от исследуемой среды. Главный их недостаток — значительные для данной работы размеры (наружный диаметр 0.8 мм, длина рабочей части  $3 \div 4 \text{ мм}$ ) и необходимость их введения в заряд ВВ. В силу этого датчики частично перекрывали исследуемое ЭмВВ (рис. 1, б), возмущая процесс детонации.

В результате при  $d < 4 \text{ мм}$  использовалась бесконтактная методика. В отверстия в оболочке вместо контактных датчиков вводи-

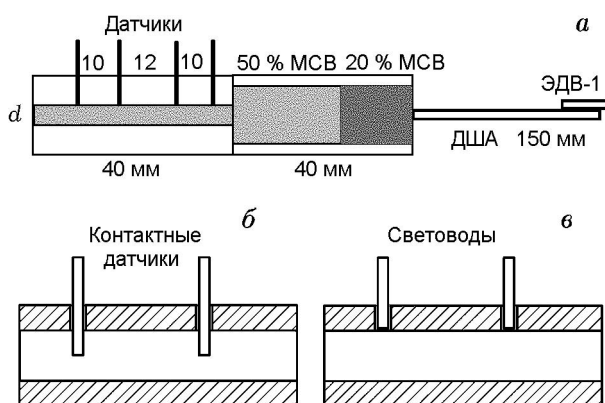


Рис. 1. Схема постановки экспериментов

лись светопроводы из кварцевого оптоволокна диаметром 0.8 мм, не перекрывающие ВВ (рис. 1, в), при помощи которых оптическое излучение от реагирующего ЭмВВ выводилось из взрывной камеры и регистрировалось фотумножителями. Чтобы убедиться в том, что регистрируемое свечение связано с взрывным процессом, а не со свечением газа при схлопывании микросфер за счет сходящейся ударной волны в исследуемой субстанции, генерируемой волной сжатия в оболочке, был поставлен контрольный эксперимент. Эмульсионное ВВ было заменено модельной смесью вазелина с полыми микросферами. Нагружение смеси стандартным для данной серии инициатором при диаметре канала 2 мм показало полное отсутствие свечения.

На рис. 2 приведены осциллограммы от трех светопроводов, полученные при регистрации фотумножителями свечения детонационного процесса при  $d = 2$  мм. Амплитуда сигналов плавно нарастает в течение  $\approx 0.4$  мкс, а затем резко увеличивается до максимального значения. Время нарастания свечения довольно стабильно во всей серии экспериментов и в первую очередь обусловлено тем, что ЭмВВ является частично прозрачной, рассеивающей средой и излучение от фронта детонационной волны попадает на световод несколько раньше, чем фронт волны пересекает отверстие в стенке оболочки. Данное предположение было

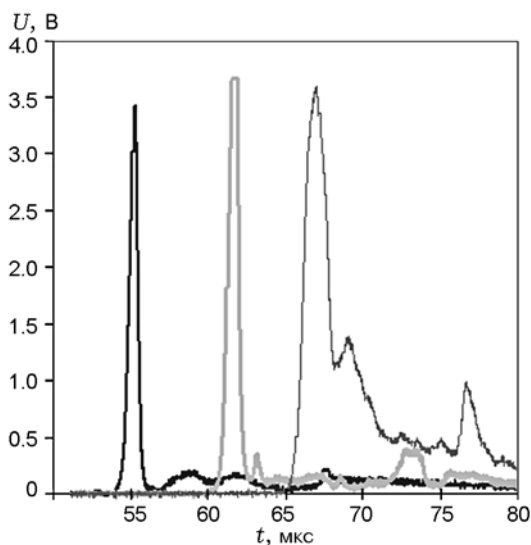


Рис. 2. Типичные регистрируемые оптические сигналы

проверено постановкой специальных экспериментов, в которых свечение регистрировалось в направлении, нормальном к фронту детонационной волны. Оказалось, что световод начинает фиксировать излучение с фронта волны с глубины около  $2 \div 4$  мм. Резкое увеличение амплитуды сигналов определяется прохождением фронта детонации через места расположения светопроводов. В то же время ширина сигнала на полувысоте изменяется в пределах  $1 \div 3$  мкс и определяется, по-видимому, характером разрушения световода после прохождения детонационной волны. При расчете скорости детонации момент времени прохождения фронта через датчик определялся по переднему фронту импульса на 20%-м уровне от максимальной амплитуды сигнала. Стационарность процесса контролировалась постоянством скорости детонации в пределах точности ее измерения, которая была не хуже 2 %.

Использование оболочки из фторопласта (акустический импеданс  $\rho c_b \approx (2 \div 4) \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>·с)) уменьшает критический диаметр ЭмВВ приблизительно в два раза — до 6 мм. Критическая скорость детонации не изменилась по сравнению с зарядами в тонкой оболочке из полиэтилена и составила 1.87 км/с (рис. 3). Применение оболочки из металла ( $\rho c_b \approx (14 \div 38) \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>·с)) привело к уменьшению критического диаметра детонации ЭмВВ при  $D_{cr} = 1.88 \div 1.90$  км/с:  $1.3 < d_{cr} \leq 1.7$  мм для дюралюминия и  $1.5 < d_{cr} \leq 2.0$  мм для стали (см. рис. 3). В опытах при  $d = 1.0 \div 1.5$  мм зарегистрированы отказы и в канале оболочки содержались остатки ВВ. Наличие детонации или ее отсутствие дополнительно контролировалось по изменению диаметра канала, но вблизи критического диаметра детонации размер канала увеличивался незначительно, примерно на 0.1 мм. Наблюдаемый разброс данных обусловлен, по-видимому, неоднородностью плотности при заполнении трубки ЭмВВ и локальной неоднородностью содержания микросфер.

В опытах с оболочкой из металла боковая разгрузка продуктов детонации сведена практически к нулю. Детонационная волна может терять энергию только за счет теплопроводности в стенку оболочки, трения продуктов взрыва о стенку оболочки и на генерацию ударной волны в оболочке. В результате температура продуктов детонации уменьшается, и процесс химического превращения прекращается.

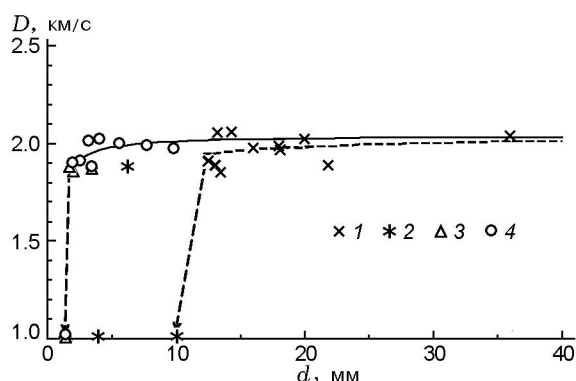


Рис. 3. Зависимость скорости детонации ЭмВВ от диаметра заряда:

1 — без оболочки [5]; 2–4 — в оболочке из фторопласта, дюралюминия и стали соответственно

Малый дефицит скорости детонации ( $\approx 10\%$ ), сравнимый с дефицитом скорости для однородных ВВ, указывает на то, что механизм детонации эмульсионного ВВ, возможно, близок к тепловому взрыву гетерогенно разогретой среды.

Кривые на рис. 3 — аппроксимация наборов экспериментальных данных известным уравнением Эйринга  $D(d) = D_i(1 - A_R/d)$  [1], где  $D_i = 2.04$  км/с, для зарядов без оболочки  $A_R = 0.6$  мм и для зарядов в металлической оболочке  $A_R = 0.15$  мм. Отсюда следует оценка времени реакции для исследуемого ЭмВВ:  $\tau_R \approx A_R/0.7D \approx 0.43 \div 0.12$  мкс.

### ВЫВОДЫ

Определены критические диаметр и скорость детонации малоплотного эмульсионного ВВ в оболочках из фторопласта, дюралюминия и стали. Критический диаметр во фторопластовой оболочке составил 6 мм, а в оболочке из

металла — 1.7 мм. Столь значительного уменьшения критического диаметра для эмульсионного ВВ, более чем в семь раз по сравнению с открытым зарядом, ранее не наблюдалось. Скорость детонации оставалась практически постоянной на уровне  $1.9 \div 2.0$  км/с вне зависимости от наличия/отсутствия оболочки и ее материала. Показано, что при исследовании детонации зарядов ЭмВВ малого диаметра применение оптической оптоволоконной методики обеспечивает надежную фиксацию траектории детонационной волны.

Авторы благодарны С. И. Рафейчику за помощь в постановке ряда экспериментов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика взрыва** / под. ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 1, § 9.2.
2. **Дремин А. Н. и др.** Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970. — Табл. 2.
3. **Беляев А. Ф.** Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. — М.: Наука, 1968.
4. **Колганов Е. В., Соснин В. А.** Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. — Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009.
5. **Лавров В. В.** Исследование затухающих взрывных процессов в гетерогенных пористых ВВ. Разработка стандартных методов оценки взрывоопасности: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Черногловка, 2008.
6. **Сильвестров В. В., Пластинин А. В.** Исследование низкоскоростных эмульсионных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 124–133.

Поступила в редакцию 4/V 2010 г.