

## КРИТИЧЕСКИЕ ДИАМЕТР И ТОЛЩИНА ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

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

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

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

Для высокодисперсного эмульсионного ВВ определена зависимость скорости детонации  $D$  от диаметра цилиндрического заряда  $d$  и толщины плоского слоя  $\Delta$ . Показано, что рассматриваемое эмульсионное ВВ имеет небольшие значения критических диаметра ( $d_{cr} \approx 5$  мм) и толщины ( $\Delta_{cr} \approx 2$ ) мм. В соответствии с теорией «кривого фронта» выполняется соотношение  $D(d) \approx D(2\Delta)$ , а отношение  $d_{cr}/\Delta_{cr}$  составляет  $2.4 \div 2.5$ .

Ключевые слова: эмульсионное ВВ, критический диаметр, критическая толщина.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о соотношении критического диаметра  $d_{cr}$  цилиндрического заряда и критической толщины  $\Delta_{cr}$  плоского заряда конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) до сих пор привлекает внимание исследователей. В рамках теории «кривого фронта» [1], или в современном варианте DSD-теории (Detonation Shock Dynamics) [2–4], зависимость скорости детонации  $D$  от диаметра  $d$  цилиндрического заряда или от толщины  $\Delta$  плоского слоя ВВ определяется кривизной детонационного фронта, при этом должны выполняться соотношения [3]

$$D(d) \approx D(2\Delta), \quad \alpha = d_{cr}/\Delta_{cr} \approx 2. \quad (1)$$

В качественном отношении эти результаты понятны: при одинаковом поперечном размере кривизна квазисферического детонационного фронта в цилиндрическом заряде в два раза больше кривизны цилиндрического фронта в плоском заряде, потому что в осесимметричном заряде течение продуктов взрыва искривляется в двух ортогональных плоскостях, а в плоском заряде — только в одной плоскости [5]. В современных вариантах DSD-теории показано, что ее основные результаты слабо зависят от кинетики взрывного превращения и уравнения состояния продуктов взрыва (см., например, [3]). Но теория DSD справедлива, если ширина зоны реакции ВВ  $a_R$  много меньше радиуса кривизны детонационного фронта  $R$ , т. е.

$a_R/R \ll 1$  [2–4]. В то же время хорошо известно, что при приближении к критическому диаметру ширина зоны реакции растет [6], а радиус кривизны фронта волны уменьшается [7], т. е. отношение  $a_R/R$  увеличивается. Дополнительно на ширину зоны реакции и кривизну детонационного фронта существенно влияет оболочка заряда. Поэтому экспериментальную проверку соотношений (1) необходимо выполнять, применяя в цилиндрическом и плоском случаях в максимальной степени одинаковую оболочку с низким акустическим импедансом [8], и использовать ВВ с минимальной шириной зоны реакции, чтобы оставаться в рамках справедливости теоретического подхода.

Экспериментальные данные по обсуждаемому вопросу для конденсированных ВВ ограничены. Большинство имеющихся результатов позволяют определить отношение критического диаметра свободного заряда к критической толщине плоского полуограниченного заряда, контактирующего с одной стороны с металлическим основанием; это отношение составляет  $\alpha = 2 \div 4$  [5, табл. 9.8]. Известны, по видимому, только три работы, в которых обсуждаемой проблеме — установлению количественной связи критического диаметра с критической толщиной зарядов в легкой оболочке или без нее — уделялось особое внимание. Для заряда РВХ-9502 без оболочки получено значение  $\alpha = 2 \div 2.2$ , при этом отмечается сильное влияние акустического импеданса материала оболочки на величину  $\Delta_{cr}$ , даже в случае покрытия призматического заряда ВВ тонкими фольгами из алюминия, меди или свинца [8]. При использовании оболочки из плексигла-

Работа выполнена при частичной поддержке фонда Президента РФ (НШ-8583.2006.1).

са для смеси жидкого нитрометана с полиметилметакрилатом, сенсibilизированной микробаллонами из стекла, при массовом содержании последних  $w = 0.5 \div 3$  % отношение  $\alpha \approx 2.0 \pm 0.5$  и оно возрастает до 3.2 при  $w = 0.25$  % [9]. Для пяти различных взрывчатых веществ: от чистого нитрометана до эмульсионного ВВ — в оболочке из алюминия или из ПММА  $\alpha = 2.3 \div 3.9$  [10]. Максимальное значение  $\alpha$  наблюдалось для эмульсионного ВВ Apex Elite™, в состав которого входили микрочастицы алюминия и сенсibilизатор в виде стеклянных микробаллонов типа ЗМ ( $w = 1$  %).

Существенное отличие отношения  $d_{cr}/\Delta_{cr}$  от 2 связано, возможно, либо с недостаточной точностью определения этого отношения в [9], либо с наличием «несимметричной» оболочки, влияющей на картину течения продуктов детонации в плоской постановке, либо с относительно протяженной зоной реакции для алюминизированного эмульсионного ВВ [10].

Цель данной работы — экспериментальная проверка соотношения  $D(d) \approx D(2\Delta)$  для эмульсионного взрывчатого вещества (ЭВВ) при изменении в широком диапазоне поперечного размера цилиндрического и плоского зарядов в легкой оболочке и определение величины  $\alpha$ . Отметим, что ранее для этого типа ВВ наблюдалось максимальное значение  $\alpha = 3.9$  [10].

ЭВВ было заключено в тонкую оболочку с низким акустическим импедансом и имело высокую степень перемешивания компонентов смеси. В этом случае влияние оболочки на кривизну детонационного фронта минимально, а ширина зоны реакции мала из-за большого количества сенсibilизирующих включений, в качестве которых использовались стеклянные микробаллоны.

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**Состав эмульсионного ВВ.** Использовалась эмульсионная матрица лабораторного изготовления следующего состава (по массе): аммиачная селитра — 67 % (производитель ОАО «Азот», г. Кемерово), натриевая селитра — 14 %, вода — 12 %, твердый парафин — 3 %, эмульгатор сорбитанмоноолеат — 2 % (производитель ОАО «Алтайспецпроект», г. Бийск), промышленное масло И-40 — 2 % (входило в состав эмульгатора). Плотность эмульсии  $1.415 \pm 0.005$  г/см<sup>3</sup>, кислородный баланс составлял  $-2.1$  %.

Для повышения дисперсности эмульсии и получения полного контакта между частицами окислителя и горючего использовалась высокооборотная мешалка. В результате получалась эмульсия с размером капель окислителя не более  $1 \div 2$  мкм. Основной размер капель окислителя был менее 1 мкм, и они были практически неразличимы в оптическом микроскопе при увеличении  $\times 1000$ .

Для получения ВВ в эмульсию при помощи низкооборотного миксера подмешивались полые стеклянные микросферы марки МСВ (производитель ОАО «Терм», г. Москва) в количестве 8 % сверх массы эмульсии (объемная концентрация микросфер  $\approx 45$  %). Насыпная плотность микробаллонов  $0.144$  г/см<sup>3</sup>.

Средний размер микросфер  $\bar{\delta}$  определяли двумя методами. В первом случае по нескольким микрофотографиям, полученным с помощью сканирующего электронного микроскопа (рис. 1, а), измерялся размер  $\delta_i$  некоторого количества микросфер. Диапазон изменения размера разбивался на интервалы по 10 мкм, в каждом из них подсчитывалось число частиц  $n_i$  и их суммарный объем  $V_i$  по фракциям, попадающим в  $i$ -й интервал и строилась функция распределения числа частиц по размеру, средневзвешенная по объему фракций:

$$f(\delta_i) = \bar{\delta}_i n_i w_i / \sum \bar{\delta}_i n_i w_i, \text{ где } w_i = V_i / \sum V_i.$$

Этому распределению соответствуют кривые 1 и 3 на рис. 1, б для отечественных микросфер МСВ и импортных микросфер ЗМ фракции К1 соответственно. Для микробаллонов МСВ максимум распределения соответствует значению  $\bar{\delta} = 58$  мкм, для микросфер ЗМ — значению  $\bar{\delta} = 55$  мкм. Видно, что функция  $f(\delta)$  для микробаллонов МСВ в целом мало отличается от функции для микросфер ЗМ. Толщина стенки полых микросферы, по оценкам, составляла  $0.5 \div 0.7$  мкм.

Для определения значения  $\bar{\delta}$  использовали также «сухое» рассеивание микросфер МСВ с последующим взвешиванием фракций. Функция распределения определялась как

$$f(\delta_i) = m_i / \sum m_i,$$

где  $m_i$  — масса  $i$ -й фракции (кривая 2 на рис. 1, б). Определенный ситовым методом средний размер составлял  $\bar{\delta} = 102$  мкм. Результаты по средним размерам микробалло-

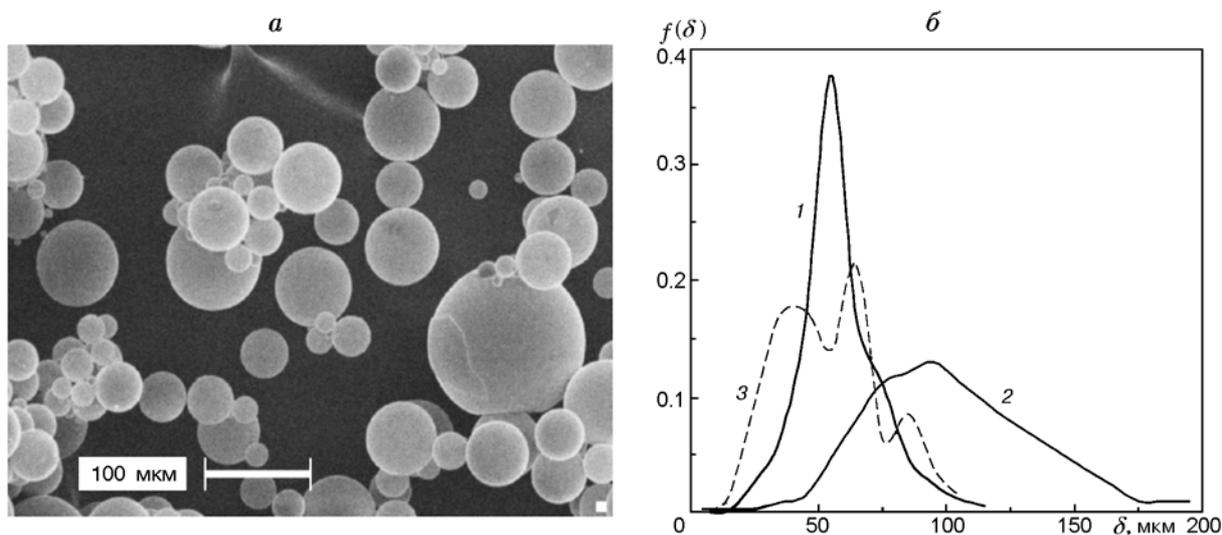


Рис. 1. Фотография микробаллонов МСВ в состоянии поставки (а) и функция распределения микросфер по размерам (б):

средневзвешенное распределение (оптический метод): 1 — МСВ ( $N = 682$ ), 3 — 3М фракции К1 ( $N = 1011$ ); 2 — массовое распределение (ситовый метод)

нов МСВ, полученные двумя методами, отличаются примерно в два раза. Ситовый метод не позволяет получить достоверный результат по размеру микросфер, так как «сухие» микросферы слипаются за счет электризации в конгломераты большего размера.

В результате смешения эмульсии и микробаллонов получалось эмульсионное ВВ плотностью  $0.99 \pm 0.01$  г/см<sup>3</sup>. ЭВВ представляло собой вязкую субстанцию, напоминающую мягкий пластилин, и допускало ручное наполнение тонкостенных трубок и коробок, используемых в качестве оболочек для испытываемых зарядов. ЭВВ было чувствительно к инициированию детонатором типа ЭДВ-1 без дополнительного боевика из более мощного вторичного ВВ. Экспериментальные сборки использовались в течение 2–10 дней после изготовления ЭВВ.

Собственно эмульсия без сенсibilизатора не взрывается. Это было доказано при попытке подрыва эмульсии в трубе из пластика с внутренним диаметром 80 мм и длиной 100 мм. Использовался мощный боевик из литого ТГ 50/50  $\varnothing 80$  мм массой 160 г. В эмульсии зарегистрирована затухающая ударная волна, скорость которой по длине трубы уменьшалась от 4.8 до 3.6 км/с.

**Постановка опытов.** Критический диаметр ЭВВ определялся методом цилиндрических за-

рядов. ЭВВ помещалось в трубки из пластика, внутренний диаметр  $d$  которых изменялся от 46 до 4 мм. Относительная длина зарядов  $L/d = 10 \div 12$  при  $d = 15 \div 46$  мм и  $L/d = 12 \div 20$  при  $d = 4 \div 12$  мм. Во всех случаях инициирование ЭВВ осуществлялось электродетонатором ЭДВ-1, погруженным в ЭВВ. При  $d \leq 20$  мм эмульсионное ВВ размещалось внутри тонкостенных трубок из полиэтилена с толщиной стенки  $\delta = 0.7 \div 0.8$  мм. Иницирование зарядов диаметром  $< 20$  мм проводилось при помощи дополнительной инициирующей секции диаметром 20 мм, заполненной тем же ЭВВ (рис. 2, а).

Критическую толщину слоя ЭВВ определяли методом плоских зарядов, ширина которых составляла  $b = 80$  мм, а толщина  $\Delta$  изменялась от  $\approx 2$  до 15 мм (толщина ВВ измерялась с точностью 0.1 мм). Длина зарядов  $L = 200$  мм, т. е.  $L/\Delta \approx 100 \div 13$  и  $b/\Delta \approx 40 \div 5$ . Эмульсионное ВВ размещалось внутри плоских коробок из пластика ПЭТ (полиэтилентерефталат, плотность материала 1.27 г/см<sup>3</sup>) толщиной 0.5 мм. Масса оболочки на единицу площади и для цилиндрических, и для плоских зарядов была примерно одинаковой —  $63 \div 68$  мг/см<sup>2</sup>. Заряды инициировали при помощи дополнительной секции, выполненной из ПММА в виде плоской прямоуголь-

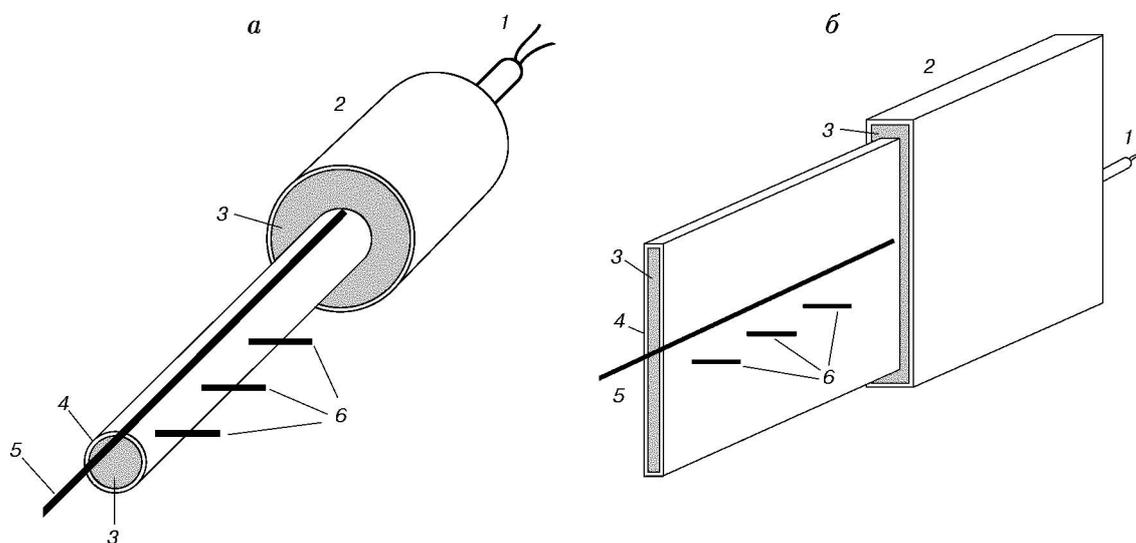


Рис. 2. Постановка эксперимента:

*a* — цилиндрический, *б* — плоский заряд; 1 — детонатор, 2 — инициирующая секция, 3 — ЭВВ, 4 — оболочка заряда, 5 — резистивный датчик, 6 — контактные зонды

ной полости длиной и шириной 100 мм с размером основания 20 мм, заполненной тем же ЭВВ (рис. 2, *б*). В ряде опытов о взрыве тонкого слоя ЭВВ судили по факту сварки медной фольги толщиной 0.1 мм, метаемой скользящей детонацией слоя ЭВВ, со стальным основанием.

Таким образом, испытания и цилиндрических, и плоских зарядов были выполнены в одинаковых условиях — при близких по массе и акустическому импедансу внешних оболочках. И единственным существенным отличием была геометрия зарядов.

Скорость детонации измеряли на второй половине заряда по его длине на базе 5 ÷ 10 калибров для цилиндрических зарядов и на базе 10 ÷ 70 калибров для плоских зарядов при помощи 3–4 контактных датчиков диаметром 0.6 мм, погруженных в ЭВВ. В одинаковых опытах скорость детонации повторялась с точностью 20 ÷ 30 м/с. Изменение скорости по длине как цилиндрических, так и плоских зарядов дополнительно контролировали при помощи резистивного датчика [11], выполненного на основе капилляра из никеля  $\varnothing 0.6 \times 0.05$  мм. Датчик приклеивали скотчем к внешней поверхности оболочки заряда. В случае стационарного процесса скорость замыкания резистивного датчика отличалась не более чем на 3 % от скорости детонации, измеренной контактными зондами.

**Результаты.** При взрыве цилиндрических

зарядов ЭВВ детонация проходит по всей длине заряда с постоянной скоростью (рис. 3, *а*, кривые 1, 2). При срыве детонации взрывной процесс проходит 5 ÷ 8 калибров и затухает (см. рис. 3, *а*, кривая 3). Зависимость скорости детонации от диаметра ВВ приведена на рис. 4, *а*. Скорость детонации изменяется в диапазоне 2.7 ÷ 4.5 км/с. В координатах  $(D, 1/d)$  данные хорошо описываются линейной зависимостью (рис. 4, *б*):

$$D = D_{CJ}(1 - A_R/d). \quad (2)$$

Здесь параметры  $D_{CJ} = 4.72$  км/с и  $A_R = 1.9$  мм имеют смысл «идеальной» скорости детонации Чепмена — Жуге при  $d \rightarrow \infty$  и величины, пропорциональной ширине зоны реакции [1]. Критическая скорость детонации составляет  $D_{cr} = 2.67$  км/с при  $d = 4.8$  мм. Для рассматриваемого ЭВВ отношение  $D_{cr}/D_{CJ} \approx 0.57$  относительно мало, что характерно для неидеальных ВВ. Например, для ANFO это отношение достигает 0.3 [4].

Исследуемое ЭВВ имеет небольшой критический диаметр —  $d_{cr} \approx 4.8 \div 5$  мм, при  $d \leq 4.3$  мм наблюдается срыв детонации (см. рис. 3, 5). Отметим, что для ЭВВ на основе высокодисперсной эмульсии, аналогичной по составу и имеющей кислородный баланс +0.5 %, критический диаметр также невелик —  $d_{cr} \leq 6$  мм, а критическая толщина, определяемая в клин-тесте для заряда в оболочке из ПММА толщиной 5 мм, составляла 0.5 мм при использовании

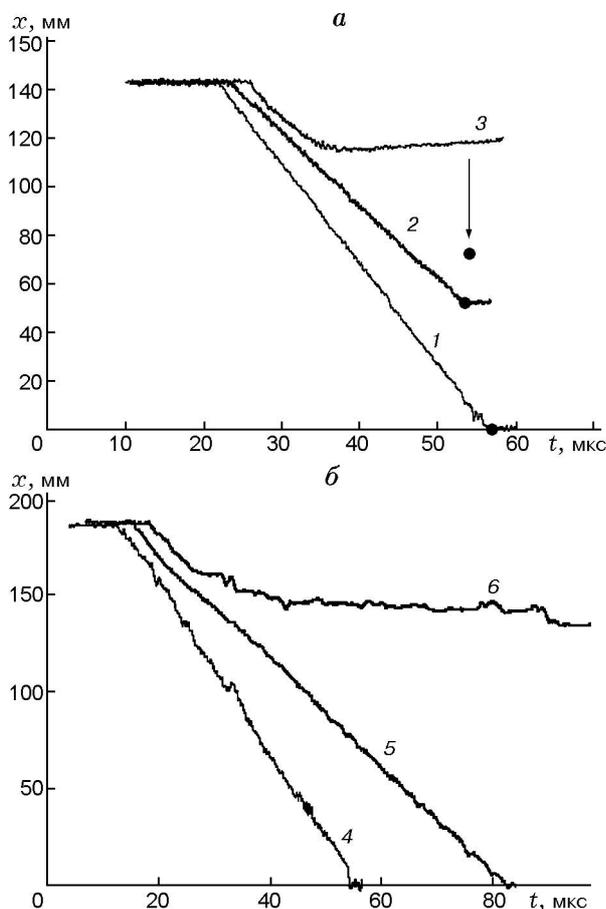


Рис. 3.  $x-t$ -Диаграммы, полученные с использованием резистивного датчика в экспериментах с цилиндрическими (а) и плоскими (б) зарядами ЭВВ:

$d$ , мм: 20 (1), 5 (2) — взрыв, 4.3 (3) — отказ;  $\Delta$ , мм: 9.8 (4), 2.2 (5) — взрыв, 1.8 (6) — отказ; точками отмечены координаты, соответствующие концу резистивного датчика

более мелких и более тонкостенных микробаллонов из стекла типа ЗМ фракции К1 при  $w = 4 \div 10 \%$  [12]. Складывается впечатление, что при использовании в качестве эмульгатора сорбитанмоноолеата высокая дисперсность эмульсионной матрицы с размером капель окислителя  $\lesssim 1$  мкм имеет определяющее значение для получения ЭВВ с  $d_{cr} < 10$  мм. Заметим, что высокая дисперсность эмульсионной матрицы существенно увеличивает и ударно-волновую чувствительность ЭВВ [13].

$x-t$ -Диаграммы, полученные с использованием резистивного датчика в экспериментах с плоскими зарядами, приведены на рис. 3, б. Они иллюстрируют стационарность детонационного процесса при  $\Delta \geq 1.9$  мм и срыв детонации

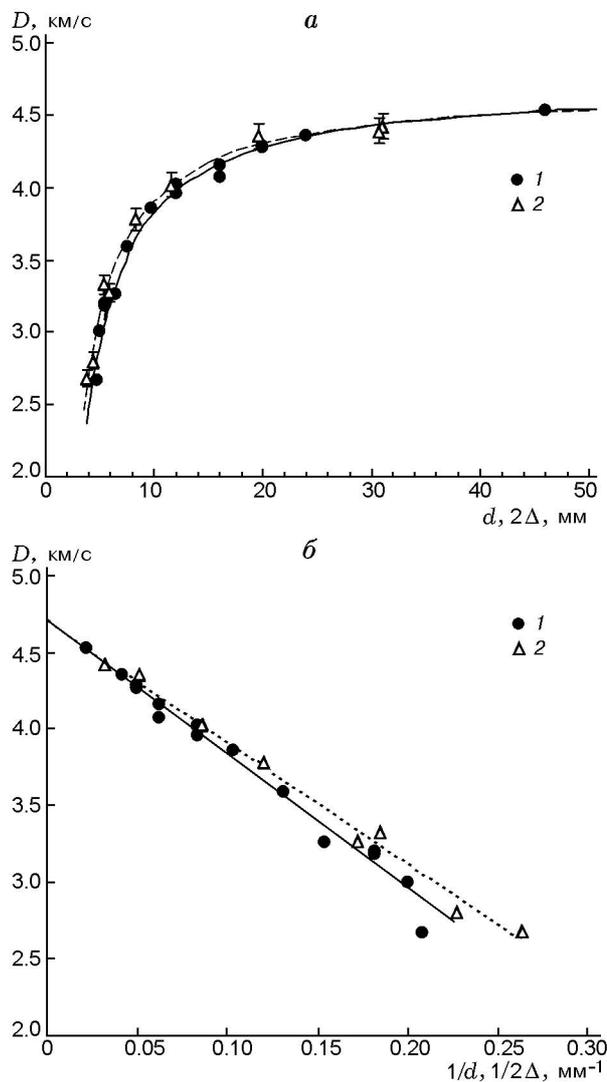


Рис. 4. Зависимость скорости детонации от диаметра (толщины) заряда:

1 — цилиндрические заряды, 2 — плоские; линии — приближения по формуле Эйринга (2), (3)

при меньшей толщине плоского слоя ЭВВ. Зависимость скорости детонации от двойной толщины слоя  $2\Delta$  приведена на рис. 4, а. Данные в координатах  $(D, 1/2\Delta)$  также хорошо описываются прямой (см. рис. 4, б)

$$D = D_{CJ}(1 - A_R/2\Delta) \quad (3)$$

с параметрами  $D_{CJ} = 4.69$  км/с и  $A_R = 1.7$  мм, имеющими тот же смысл, что и в уравнении (2). Данные при  $\Delta \approx 15$  мм примерно на 60 м/с ниже расчетной кривой (3). По-видимому, сказывается влияние ширины плоского слоя на скорость детонации при  $b/\Delta < 5 \div 7$  [14, п. 4.2].

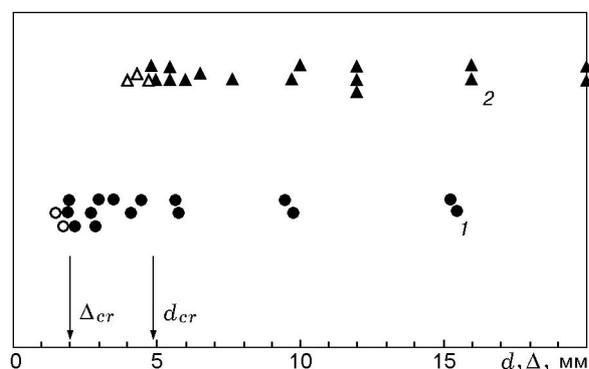


Рис. 5. Результаты определения критических диаметра и толщины для эмульсионного ВВ, сенсibilизированного стеклянными микробаллонами МСВ:

1 — плоские заряды, 2 — цилиндрические; темные значки — взрыв, светлые — отказ

Критическая скорость детонации для плоского слоя составляет  $D_{cr} \approx 2.68$  км/с. Значения  $D_{СЛ}$ ,  $D_{cr}$  и  $A_R$  для осесимметричного и плоского случаев практически совпадают. Критическая толщина рассматриваемого ЭВВ  $\Delta_{cr} = 1.9 \div 2.0$  мм, при  $\Delta \leq 1.8$  мм наблюдается срыв детонации (см. рис. 5).

В соответствии с теорией «кривого фронта» соотношение  $D(d) \approx D(2\Delta)$  выполняется достаточно хорошо, но скорость детонации плоских зарядов при условии  $d = 2\Delta$  значимо превышает скорость детонации цилиндрических зарядов и разница уменьшается при увеличении диаметра или толщины заряда (рис. 4, а). Это различие более заметно в координатах  $(D, 1/d)$  (см. рис. 4, б). Вблизи предела детонации взрываются более тонкие слои, чем следует из соотношения  $d = 2\Delta$ .

Эксперименты показывают, что для рассматриваемого ЭВВ отношение  $d_{cr} / \Delta_{cr}$  несколько больше 2 и составляет  $2.4 \div 2.5$ . Данный результат лучше соответствует выводам DSD-теории, чем результаты для эмульсионного ВВ Apex Elite™: возможно, заниженное значение критической толщины в опытах с плоскими зарядами в [10] получено из-за применения толстой и несимметричной подложки из ПММА.

Оценим отношение ширины зоны реакции ЭВВ  $a_R$  к радиусу кривизны детонационного фронта  $R$  без учета влияния оболочки. Для эмульсионного ВВ  $a_R \approx A_R/2$  [15], т. е. в нашем случае  $a_R \approx 0.9$  мм. Согласно [7] при  $d \gg d_{cr}$  для заряда без оболочки радиус кривизны

составляет  $R \approx 3 \div 4d$ , т. е.  $R \approx 35 \div 70$  мм при  $d = 2\Delta = 20$  мм; вблизи критического диаметра  $R \approx 0.5d$ , т. е.  $R \approx 2.5$  мм при  $d = 2\Delta = 5$  мм. Отсюда получаем оценку  $a_R/R \approx 0.014 \div 0.03$  вдали от пределов детонации и  $a_R/R \approx 0.4$  вблизи предела\*. Понятно, что при  $a_R/R \approx 0.01 \div 0.03$  условия применимости DSD-теории выполняются, и поэтому в пределах погрешности эксперимента соотношение  $D(d) \approx D(2\Delta)$  соответствует результатам при  $d = 2\Delta > 10$  мм. При  $a_R/R \rightarrow 1$  условие применимости теории нарушается и не удивительно, что  $\alpha > 2$ . Но первое из соотношений (1) по-прежнему выполняется вполне удовлетворительно (см. рис. 4, а).

Примем для ЭВВ показатель политропы продуктов взрыва равным 3.5 [15]. Тогда для рассматриваемого ЭВВ получим оценку: детонационное давление изменяется от  $\approx 1.6$  ГПа вблизи предела до  $4 \div 5$  ГПа при диаметре заряда  $d > 20$  мм (или толщине  $\Delta > 10$  мм). По скорости детонации ЭВВ уступает примерно 500 м/с тротилу с размером зерна  $\approx 100$  мкм при плотности  $1.0$  г/см<sup>3</sup>, но по значениям критического диаметра и скорости детонации близко к мелкодисперсному тротилу с плотностью  $0.85$  г/см<sup>3</sup> [16].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что эмульсионное ВВ на основе высокодисперсной эмульсии с размером капель окислителя  $\lesssim 1$  мкм и содержанием сенсibilизатора в количестве 8 % (по массе) характеризуется небольшими критическими значениями диаметра и толщины (около 5 и 2 мм соответственно). В соответствии с DSD-теорией соотношение  $D(d) \approx D(2\Delta)$  хорошо выполняется, а отношение  $d_{cr} / \Delta_{cr} \approx 2.4 \div 2.5$ , хотя оно и выше 2, вполне удовлетворительно соответствует теории.

Результаты работы представляют интерес при разработке патронированных эмульсионных ВВ малого диаметра и при использовании тонких слоев подобных ВВ для «деликатной» обработки материалов взрывом.

\* Согласно [6] при приближении диаметра заряда к критическому значению ширина зоны реакции увеличивается на  $10 \div 40$  %. Но это незначительное увеличение  $a_R$  не влияет на оценку отношения  $a_R/R$ , по порядку величины определяющего условия применимости теории.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Eyring H., Powell R. E., Duffey G. H., Parlin R. B. The stability of detonation // Chem. Rev. 1949. V. 45, N 1. P. 69–181.
2. Wood W. W., Kirkwood J. G. Diameter effect in condensed explosives: the relation between velocity and radius of curvature in the detonation wave // J. Chem. Phys. 1954. V. 22, N 11. P. 1920–1924.
3. Bdzil J. B. Steady-state two-dimensional detonation // J. Fluid Mech. 1981. V. 108. P. 195–226.
4. Bdzil J. B., Aslam T. D., Catanach R. A., Hill L. G., Short M. DSD front-models: non-ideal explosive detonation in ANFO // Proc. 12th Symp. Intern. on Detonation. 2002.
5. Физика взрыва. 3-е изд. / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. Т. 1, п. 9.2.3.
6. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
7. Cook M. The Science of High Explosives. New York: Reinhold Publ. Corp., 1958. Ch. 5.
8. Ramsay J. B. Effect of confinement on failure in 95TATB/5 KEL-F // Proc. 8th Symp. Intern. on Detonation. 1985. P. 372–379.
9. Gois J. C., Campos J., Mendes R. Extinction and initiation of detonation of NM-PMMA-GMB mixtures // Shock Compression of Condensed Matter-1995. 1996. V. 370, pt 2. P. 827–830.
10. Petel O. E., Mack D., Higgins A. J., Turcotte R., Chan S. K. Comparison of the detonation failure mechanism in homogeneous and heterogeneous explosives // Proc. 13th Symp. Intern. on Detonation. 2006. P. 2–11.
11. Горшков Н. Н., Сильвестров В. В. Метод измерения скоростей ударных волн в жидком водороде // Приборы и техника эксперимента. 1976. № 4. С. 239–240.
12. Yoshida M., Iida M., Tanaka K., Fujiwara S., Kusakabe M., Shiino K. Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // Proc. 8th Symp. Intern. on Detonation. 1985. P. 171–177.
13. Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Караханов С. М., Дерibas А. А. Ударно-волновая чувствительность эмульсионного ВВ // Труды междунар. конф. «IX Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. С. 133–138.
14. Симонов В. А. Области сварки взрывом. Основные параметры и критерии. Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 1995. С. 61.
15. Сильвестров В. В., Караханов С. М., Пластинин А. В., Дерibas А. А. Влияние плотности эмульсионного ВВ на ширину зоны реакции // Труды междунар. конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 132–137.
16. Боболев В. К. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда и скорость детонации вблизи предела // Физика взрыва: Сб. № 2. М.: Изд-во АН СССР, 1953. С. 167–174.

Поступила в редакцию 28/VI 2007 г.