

УДК 534.222.2+662.215.1

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ТОНКИХ СЛОЯХ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА С ИНЕРТНЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ

И. Ф. Кобылкин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва  
kobylikin\_ivan@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования передачи детонации в тонких слоях пластичного взрывчатого вещества ПВВ-12М (90 % гексогена, 10 % связки) через сплошные и перфорированные перегородки. Для слоев ВВ толщиной  $2 \div 12$  мм определены критические толщины перегородок из стали и оргстекла, при превышении которых детонация не передается. Показано, что ударные волны в ограничивающих заряд ВВ пластинах могут опережать инициирующую ударную волну в пассивной части заряда ВВ и с боковой поверхности нагружать заряд ВВ. Тем самым создаются периферийные десенсибилизированные слои ВВ, уменьшающие толщину слоя детонационноспособного ВВ и затрудняющие передачу детонации. Для передачи детонации через перегородки толщиной больше критической предложено использовать отверстия в перегородке, закрытые тонкими пластинами. Определены толщины пластин, при которых детонация распространяется через отверстие как в прямом и обратном направлениях, так и только в прямом направлении.

Ключевые слова: тонкие слои ВВ, передача детонации, критическая толщина перегородки, десенсибилизация, детонационный диод.

DOI 10.15372/FGV20160114

Интерес к изучению распространения детонации в зарядах взрывчатого вещества (ВВ) в виде тонких слоев обусловлен тем, что они достаточно широко используются в различных взрывных технологиях и устройствах, например, для упрочнения и сварки металлов взрывом [1], для создания кратковременных нагрузок большой амплитуды при испытании конструкций [2], для метания пластин в устройствах динамической защиты бронетехники [3]. В ряде технических устройств плоские заряды ВВ больших размеров набираются из отдельных элементов стандартных размеров, представляющих собой тонкие слои ВВ, заключенные, как правило, в тонкостенные металлические или пластмассовые корпуса. В связи с этим приобретают актуальность вопросы изучения пределов распространения детонации в тонких слоях ВВ с металлическими или пластмассовыми перегородками.

Как известно, между двумя зарядами ВВ, разделенными преградой, детонация может передаваться от одного заряда ВВ к другому, если толщина преграды  $f$  меньше некоторой критической  $f_{кр}$  [4]. Критическая толщина преграды в определенной степени характеризу-

ет ударно-волновую чувствительность заряда ВВ. В стандартных испытаниях по передаче детонации через преграду ее критическая толщина  $f_{кр}$  определяется для зарядов цилиндрической симметрии и зависит от свойств заряда ВВ, его диаметра и от материала преграды. Поскольку геометрия и характер бокового ограничения плоских зарядов ВВ в различных технических устройствах существенно отличаются от стандартных испытаний [4], были выполнены специальные эксперименты по определению значений  $f_{кр}$  для тонких слоев пластичного взрывчатого состава ПВВ-12М, состоящего из 90 % гексогена и 10 % связки [4]. Выбор пластичного ВВ в качестве объекта исследования обусловлен тем, что из него в лабораторных условиях можно изготавливать достаточно однородные слои различной толщины плотностью  $1.55 \div 1.60$  г/см<sup>3</sup>.

Прежде всего была определена критическая толщина плоских зарядов ( $h_{кр}$ ) из ПВВ-12М. Факт прохождения детонации или «отказа» фиксировался по остаткам ВВ и по следовому отпечатку на алюминиевой пластине-«свидетеле», на которую помещался плоский заряд ВВ на картонной подложке толщиной  $1.0 \div 1.1$  мм. Последняя позволяла

исключить влияние металлической пластины-«свидетеля» на значение  $h_{кр}$ . Определенная в экспериментах критическая толщина находится в пределах  $h_{кр} = 1.75 \div 1.85$  мм. При меньшем значении из этого диапазона детонация в заряде ВВ затухает, при большем — устойчиво распространяется.

В следующей серии экспериментов определялась критическая толщина стальных перегородок в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1,а. Плоский заряд ВВ размеров  $h \times 80 \times 125$  мм с обеих сторон ограничивался стальными пластинами толщиной 2 мм. Толщина слоя ВВ изменялась в пределах  $h = 2 \div 12$  мм. Детонация в слое ВВ возбуждалась четырехточечным дискретным детонационным волновым генератором (ДВГ) [1], изготовлен-

ным из полосок эластичного взрывчатого состава ЭВВ-34 (80 % тэна, 20 % связки) [4] сечением  $2 \times 4$  мм. Полученные результаты представлены на рис. 1,б. В диапазоне исследованных толщин слоя ВВ аппроксимирующая экспериментальные данные зависимость критической толщины стальной перегородки от толщины слоя ВВ имеет вид

$$f_{кр} = 0.7(h - \gamma h_{кр}) \text{ [мм]},$$

где  $\gamma = 0.166$  — коэффициент, характеризующий уменьшение критической толщины слоя ВВ вследствие размещения его между стальными пластинами [4]. На рис. 1,б эта зависимость представлена прямой линией.

В связи с тем, что корпуса отдельных элементов могут изготавливаться из различных пластмасс, была определена критическая толщина перегородки из оргстекла для слоя ВВ толщиной  $h = 6$  мм. При ограничении слоя ВВ стальными пластинами толщиной 2 мм она составила  $f_{кр} = 14 \div 16$  мм, при увеличении толщины ограничивающих пластин до 20 мм возросла до  $f_{кр} = 17.5 \div 22.5$  мм. Здесь и ниже первое число диапазона представляет значение толщины перегородки, при котором осуществляется передача детонации, второе — при котором детонация не передается.

Для выявления роли ограничивающих пластин в следующей серии экспериментов определялись значения  $f_{кр}$  для свободных зарядов ВВ. Отсутствие ограничения слоя ВВ толщиной  $h = 6$  мм привело к существенному уменьшению критической толщины перегородок: для перегородок из стали  $f_{кр} = 2.8 \div 3.0$  мм, для перегородок из оргстекла  $f_{кр} = 5.5 \div 6.1$  мм. Полученный результат можно объяснить возрастанием влияния боковых волн разгрузки на развитие детонации в пассивном заряде ВВ при отсутствии ограничивающих пластин [4].

Труднее объяснить достаточно сильную зависимость критической толщины перегородки от толщины слоя ВВ (рис. 1,б) в случае его ограничения пластинами, когда влияние боковых волн разгрузки ослаблено. Одно из возможных объяснений этой зависимости представлено ниже.

Для анализа конфигурации ударных волн, возникающих при передаче детонации через перегородку, методом  $p$ - $u$ -диаграмм была выполнена оценка давления  $p_{ВВ}$  ударно-волнового нагружения пассивного заряда ВВ без учета за-

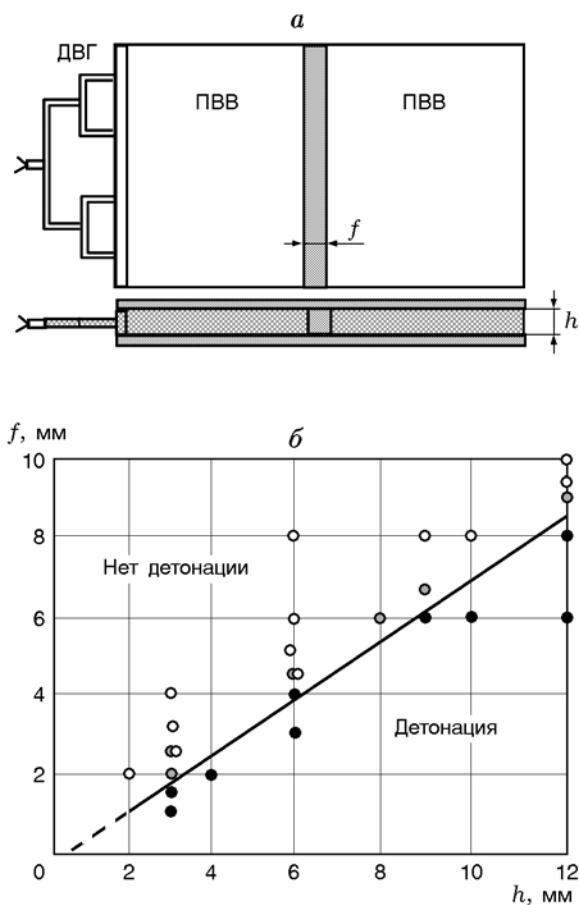


Рис. 1. Схема (а) и результаты (б) исследования передача детонации в тонких слоях ВВ через перегородки:

светлые значки — детонация не передается, темные — детонация передается, серые — детонация затухает

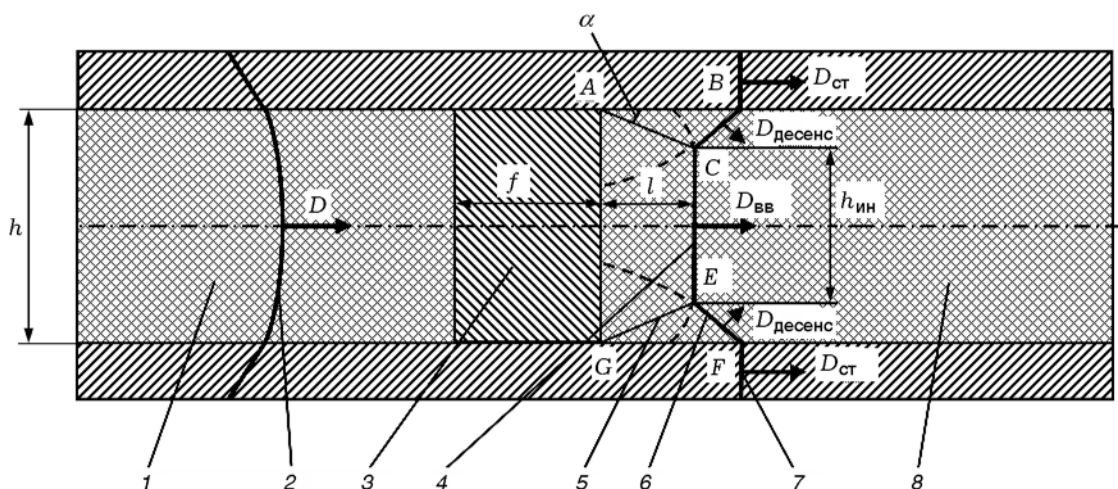


Рис. 2. Возможная конфигурация волн при передаче детонации через перегородку в тонком слое ВВ: 1 — активная часть заряда ВВ, 2 — фронт детонационной волны в активной части заряда ВВ, 3 — перегородка, 4 — фронт инициирующей ударной волны в пассивной части заряда ВВ, 5 — траектория точки пересечения инициирующей ударной волны с боковой десенсибилизирующей ударной волной, 6 — боковая десенсибилизирующая ударная волна, 7 — ударная волна в оболочке, 8 — пассивная часть заряда ВВ

тухания ударной волны в перегородке. В расчетах использовалась ударная адиабата для стали  $D_{ст} = 4570 + 1.49u$ , где  $u$  — массовая скорость, м/с [5], для ПВВ-12М использовалась ударная адиабата близкого по составу пластичного ВВ С-4:  $D_{ВВ} = 2200 + 1.8u$  [6]. При определении давления торможения продуктов детонации на стальной перегородке предполагалось, что для них справедливо политропное уравнение состояния с показателем политропы  $k = 3$ . Давление торможения оказалось равным 42.4 ГПа. Ему соответствует скорость ударной волны в стальной перегородке  $D_{ст} = 5930$  м/с. С такой же скоростью, по крайней мере в начальный момент времени, распространяются ударные волны и в ограничивающих пластинах. При дальнейшем распространении ударных волн давление в них, вследствие боковой разгрузки, быстро уменьшается.

Ударная волна, переходящая из перегородки в ПВВ-12М, без учета ее затухания в перегородке имеет амплитуду  $p_{ВВ} = 12.2$  ГПа и распространяется в ВВ со скоростью  $D_{ВВ} = 4940$  м/с. Поскольку скорость ударных волн в ограничивающих пластинах  $D_{ст}$  превосходит скорость инициирующей ударной волны в ВВ  $D_{ВВ}$ , то в заряде ВВ будет формироваться конфигурация волн, представленная на рис. 2.

Распространяющиеся в ограничивающих пластинах ударные волны опережают инициирующую ударную волну  $CE$ . Вследствие это-

го заряд ВВ с боковой поверхности нагружается боковыми ударными волнами  $BC$  и  $EF$ . Без учета затухания ударных волн в ограничивающих пластинах оценка давления  $p_{десенс}$  в ударных волнах  $BC$  и  $EF$  с помощью  $p$ - $u$ -диаграмм дает величину  $p_{десенс} = 4.69$  ГПа. Этому давлению соответствует волновая скорость  $D_{десенс} = 3620$  м/с. В действительности, вследствие быстрого затухания ударных волн в ограничивающих пластинах, амплитуда боковых ударных волн  $BC$  и  $EF$  будет значительно меньше.

Поскольку давление в этих ударных волнах существенно меньше, чем в прямой ударной волне  $CE$ , их можно считать десенсибилизирующими в том смысле, что в точках их пересечения с прямой ударной волной скорость разложения предварительно сжатого ВВ резко уменьшается [7]. Суммарная толщина периферийных зон, охваченных предварительным сжатием боковыми ударными волнами, равна (см. рис. 2)

$$h - h_{ин} = 2l \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $h_{ин}$  — толщина центральной части слоя ВВ, не охваченной предварительным сжатием;  $l$  — длина перехода инициирующей ударной волны в детонационную;  $\alpha$  — угол, который составляет траектория  $AC$  точки пересечения  $C$  боковой ( $BC$ ) и прямой ( $CE$ ) ударных волн с поверхностью заряда ВВ. Развитие детонации

фактически осуществляется в центральной части заряда толщиной  $h_{\text{ин}}$ , ограниченной с боковых сторон ударно-сжатым десенсибилизированным ВВ. Похожая конфигурация ударных волн наблюдается в ограниченных оболочкой зарядах ВВ при распространении детонации со скоростью, меньшей скорости звука в материале оболочки [8].

После перехода прямой ударной волны  $CE$  (см. рис. 2) в детонационную ее дальнейшее распространение будет возможным, если  $h_{\text{ин}} \geq h_{\text{кр}}$  или

$$h - 2l \operatorname{tg} \alpha \geq h_{\text{кр}}.$$

Таким образом, достаточно сильная зависимость критической толщины перегородки от толщины ограниченного пластинами слоя ВВ может быть объяснена десенсибилизирующим действием боковых ударных волн, уменьшающих толщину слоя детонационноспособного ВВ\*.

При толщине перегородки меньше критической детонация в слое ВВ может передаваться через нее в как в прямом, так и обратном направлении. Критическая толщина сплошной перегородки для ограниченного с обеих сторон слоя ПВВ-12М толщиной 6 мм равна  $f_{\text{кр}} = 4.0 \div 4.5$  мм. Для передачи детонации через перегородки толщиной больше критической предложено использовать перфорированные перегородки. Наиболее подробно исследовалась передача детонации через отверстие в перегородке, ограниченное со стороны зарядов ВВ тонкими стальными пластинами (рис. 3).

Успех в передаче детонации был достигнут при толщине метаемых и экранирующих пластин  $\delta_1 = \delta_2 \leq 0.5$  мм и  $f = 8$  мм. При этом детонация передавалась даже через отверстие диаметром  $d = 2.8$  мм. При  $f = 8$  мм и  $\delta_1 = \delta_2 = 0.8$  мм детонация между элементами уже не передавалась. При уменьшении толщины перегородки до  $f = 4$  мм и толщине метаемых и экра-

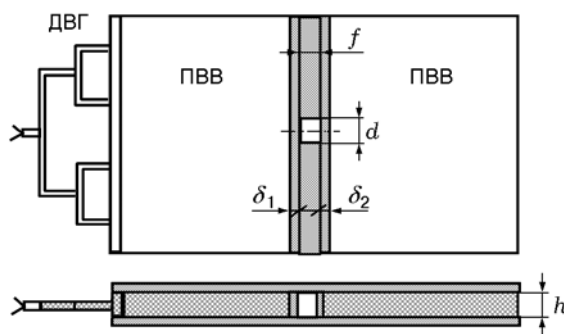


Рис. 3. Схема исследования передачи детонации в тонком слое ВВ через перфорированную перегородку

нирующих пластин  $\delta_1 = \delta_2 = 2$  мм детонация также не передается при любом диаметре отверстия.

Представляет практический интерес организовать диодную схему передачи детонации — только в одном направлении. Такая схема может быть реализована при использовании перегородок с отверстием и метаемых и экранирующих пластин соответственно толщиной  $\delta_1$  и  $\delta_2$  (см. рис. 3). В результате проведенных экспериментов для слоя ПВВ-12М толщиной 6 мм установлены следующие характеристики детонационного диода:  $d = 5.1$  мм,  $f = 6$  мм,  $\delta_1 = 0.3$  мм,  $\delta_2 = 1.5$  мм. При таком сочетании конструктивных характеристик надежно осуществляется передача детонации в слое ВВ от более тонкой перегородки к более толстой, а в обратном направлении — нет.

Кратко сформулируем основные выводы работы.

1. Экспериментально определены критические условия передачи детонации в свободных и ограниченных металлическими пластинами тонких слоях пластичного ВВ марки ПВВ-12М через перегородки из стали и оргстекла. Для плоских зарядов ВВ, ограниченных металлическими пластинами, установлена зависимость критической толщины перегородки от толщины слоя ВВ.

2. Один из вариантов объяснения достаточно сильной зависимости критической толщины перегородки от толщины ограниченного пластинами слоя ВВ состоит в том, что ударные волны в ограничивающих пластинах могут опережать прямую инициирующую ударную волну в пассивной части заряда ВВ и с боковой поверхности нагружать заряд ВВ. Ес-

\* *Примечание редакции.* Другой вариант объяснения зависимости критической толщины перегородки от толщины ограниченного пластинами слоя ВВ был предложен рецензентом настоящей статьи, и состоит он в том, что решающую роль в передаче детонации через перегородку в критических условиях могут играть боковые ударные волны, которые при перегородках относительно большой толщины с увеличением толщины слоя ВВ сами разгоняются вплоть до возникновения детонации или же детонация возникает в зоне их столкновения. Такой механизм не реализуется в чрезмерно тонких слоях ВВ, где боковые ударные волны не успевают ускориться до достаточной для этого интенсивности.

ли интенсивность боковых ударных волн в ВВ недостаточна для быстрого инициирования детонации, они будут создавать периферийные десенсибилизированные слои ВВ, уменьшающие толщину детонационноспособного ВВ и тем самым затрудняющие передачу детонации.

3. Для передачи детонации через перегородки толщиной больше критической предложено использовать отверстия в перегородке, закрытые тонкими пластинами. Определены толщины метаемых и экранирующих пластин, при которых осуществляется передача детонации как в прямом и обратном направлениях, так и только в прямом направлении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Селиванов В. В., Кобылкин И. Ф., Новиков С. А. Взрывные технологии: учебник для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
2. Могилев В. А., Новиков С. А., Файков Ю. И. Техника взрывного эксперимента для исследования механической стойкости конструкций. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.
3. Частные вопросы конечной баллистики / И. Ф. Кобылкин и др.; под ред. В. А. Григоряна. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
4. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко: в 2 т. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 1.
5. LASL Shock Hugoniot Data / Ed. S. P. Marsh. — Univ. of California Press, 1980.
6. Urtiew P. A., Vandersall K. S., Tarver C. M., Garsia F., Forbes J. W. Shock initiation experiments and modeling of composition B and C-4 // The 13th Intern. Detonation Symp. — USA, Norfolk, 2006.
7. Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В., Соловьев В. С., Сысоев Н. Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. — М.: Физматлит, 2004.
8. Кобылкин И. Ф. Критический диаметр детонации зарядов промышленных взрывчатых веществ. Влияние оболочки // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 1. — С. 108–114.

*Поступила в редакцию 16/X 2014 г.*

---