

КРИТИЧЕСКИЙ ДИАМЕТР ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ. ВЛИЯНИЕ ОБОЛОЧКИ

И. Ф. Кобылкин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва
kobytkin_ivan@mail.ru

Выполнен анализ зависимости критического диаметра зарядов промышленных взрывчатых веществ (ВВ) от характеристик их состояния (состава, плотности, структуры) и наличия у них оболочки. Основной причиной увеличения критического диаметра при увеличении плотности зарядов аммиачно-селитряных ВВ является уменьшение скорости энерговыделения в зоне химической реакции детонационной волны. Влияние размера частиц компонентов и количества сенсибилизирующего компонента на критический диаметр порошкообразных и гранулированных ВВ укладывается в концепцию взрывного горения. Получена аналитическая формула для критического диаметра детонации эмульсионных ВВ, правильно описывающая экспериментальные данные. Рассмотрен возможный механизм влияния металлических оболочек на критический диаметр детонации пористых ВВ, скорость детонации которых меньше скорости звука в оболочке.

Ключевые слова: детонация, критический диаметр, аммиачно-селитряные ВВ, эмульсионные ВВ.

Критический диаметр детонации d_{cr} является важнейшей характеристикой детонационной способности зарядов взрывчатых веществ (ВВ), определяющей возможность их практического использования. В настоящей работе сделана попытка применить разработанную ранее автором теорию критического диаметра детонации неоднородных высокоплотных зарядов ВВ [1–3] к объяснению зависимостей d_{cr} зарядов промышленных ВВ от характеристик их состояния (состава, плотности, структуры) и наличия у них оболочки. Известно, что эти зависимости обладают рядом особенностей [4–10].

1. При одинаковом размере частиц смесевых аммиачно-селитряных ВВ увеличение плотности зарядов ВВ — переход от пористого состояния к малопористому (прессованные заряды) или вовсе беспористому (водонаполненные ВВ) — приводит к существенному росту d_{cr} . Критический диаметр зарядов мощных ВВ, наоборот, уменьшается при увеличении их плотности до некоторой критической, близкой к максимально возможной плотности.

2. Увеличение размера частиц структурных составляющих как смесевых, так и индивидуальных ВВ (переход от порошкообразных к гранулированным взрывчатым составам) существенно увеличивает критический диаметр изготовленных из них зарядов ВВ.

3. Наличие стальной оболочки у промышленных аммиачно-селитряных ВВ по сравнению с зарядами в бумажной оболочке уменьшает d_{cr} не в 5–8 раз, как предсказывает теория [1–3] для неоднородных высокоплотных зарядов мощных ВВ, а в 2.5–3 раза у эмульсионных взрывчатых веществ (ЭмВВ) [9, 10] и примерно в 4 раза у гранулитов.

Перед тем как перейти к анализу этих особенностей, приведем основную формулу теории критического диаметра [1–3]:

$$d_{cr} = \frac{4uc^2 \cos \varphi_{st}}{\Gamma Q_{p,V} W}, \quad (1)$$

где u и c — соответственно массовая скорость и скорость звука в ударно-сжатом ВВ непосредственно за ударным скачком; φ_{st} — угол наклона детонационного фронта к образующей цилиндрической поверхности заряда ВВ, обеспечивающий стационарность фронта; Γ — параметр Грюнайзена ударно-сжатого ВВ; $Q_{p,V}$ — тепловой эффект разложения ВВ при постоянных давлении p и объеме V ; W — начальная скорость разложения ВВ. Числитель формулы (1) зависит от динамической сжимаемости взрывчатого состава и скорости детонации, а знаменатель определяется скоростью энерговыделения $Q_{p,V} W$ в самом начале зоны химической реакции.

1. Влияние плотности зарядов промышленных ВВ на критический диаметр детонации. Изменение плотности пористых зарядов аммиачно-селитряных ВВ и индивидуальных ВВ оказывает противоположное влияние на их критические диаметры. Но так как динамические сжимаемости пористых зарядов аммиачно-селитряных ВВ и индивидуальных ВВ во всем диапазоне плотностей принципиально не отличаются, то различное влияние плотности на величину d_{cr} является следствием различного изменения скорости начального энерговыделения $Q_{p,V}W$.

Процесс сжатия пористого смешанного ВВ сопровождается перемещением частиц ТНТ и аммиачной селитры (АС) относительно друг друга, их интенсивным деформированием, разрушением и трением друг о друга. Все эти процессы вызывают интенсивный разогрев поверхностных слоев частиц и, самое главное, интенсивное перемешивание раздробленных частиц АС и ТНТ, способствуя тем самым более глубокому протеканию химических реакций в зоне химической реакции детонационной волны. Понятно, что при увеличении плотности заряда ВВ интенсивность перечисленных процессов резко убывает, что приводит к уменьшению как скорости реакции W , так и ее теплового эффекта $Q_{p,V}$.

О количестве выделяемой в зоне химической реакции энергии в определенной степени можно судить по величине так называемой «детонационной» теплоты взрыва $Q_d = D^2/[2(\gamma^2 - 1)]$, где γ — показатель политропы продуктов взрыва. В таблице приведены вычисленные значения Q_d для зарядов аммонита 6ЖВ различной плотности. Необходимые данные для зарядов большого диаметра (>100 мм) взяты из работ [11, 12]. Сравнение значений Q_d свидетельствует о том, что при увеличении плотности зарядов аммонита 6ЖВ количество энергии, выделяемой в зоне химической реакции, резко падает. Уже одно это обстоятельство

позволяет понять причину существенно-го роста d_{cr} при повышении плотности зарядов ВВ.

Еще в большей степени на критический диаметр детонации влияет увеличение плотности смешанных зарядов из гранулированных ТНТ и АС за счет наполнения их водой или насыщенным водным раствором АС. Вследствие заполнения пор водой исключаются интенсивный разогрев, дробление частиц и перемешивание компонентов. Кроме того, часть тепловой энергии, выделяющейся при разложении ТНТ и АС, затрачивается на прогрев и испарение воды, что дополнительно способствует уменьшению скорости энерговыделения, а следовательно, и d_{cr} .

Таким образом, проведенный анализ позволяет в качестве основной причины увеличения d_{cr} при росте плотности зарядов аммиачно-селитряных ВВ выделить уменьшение скорости энерговыделения в начале зоны химической реакции как за счет снижения теплового эффекта разложения $Q_{p,V}$, так и за счет уменьшения скорости разложения W .

2. Влияние размера частиц и количества сенсибилизатора. Влияние размера частиц сенсибилизирующих компонентов состава (δ) на критический диаметр детонации промышленных порошкообразных и гранулированных ВВ (в том числе и гранулитов АСДТ) в общем укладывается в концепцию взрывного горения, согласно которой в первом приближении справедливо соотношение пропорциональности $d_{cr} \sim \delta$. Это соотношение находит разумное объяснение с позиций развиваемой нами теории критического диаметра [3].

Что касается влияния количества сенсибилизатора на величину d_{cr} гранулированных ВВ, то по детонационной способности их можно уподобить глубокофлегматизированным (водой) малочувствительным взрывчатым составам, для которых в работе [13] получена следующая формула:

$$d_{cr} = \frac{A\delta}{x^{1.5}}, \quad (2)$$

где A — коэффициент пропорциональности, δ — средний размер частиц сенсибилизирующего ВВ, x — массовая доля сенсибилизатора.

Важнейшим классом современных промышленных ВВ являются эмульсионные. Как известно, ЭмВВ не содержат индивидуальных ВВ и к взрывчатым веществам их можно от-

«Детонационная» теплота взрыва зарядов аммонита 6ЖВ различной плотности

ρ , г/см ³	D , км/с	γ	Q_d , МДж/кг
1.0	4.6	1.9	4.05
1.45	5.7	3.55	1.4
1.7	5.65	3.52	1.4

нести только тогда, когда в их состав входят сенсibiliзирующие стеклянные или полимерные микросферы или газовые пузырьки [14]. Именно они являются первоначальными очагами возникновения химической реакции во фронте детонационной волны. Для того чтобы применить формулу (1) для анализа детонационной способности ЭмВВ, необходимо определить значения входящих в нее величин. Будем следовать работам [3, 13], в которых это сделано для некоторых типов ВВ.

Вначале проанализируем возможную зависимость начальной скорости химической реакции от пористости заряда и размера микросфер сенсibiliзатора. В зависимости от соотношения размера микросфер и ширины зоны химической реакции количество начальных центров реакции n пропорционально либо числу микросфер n_s , приходящихся на единицу площади поверхности фронта, либо числу микросфер в единице объема n_V . Исходя из этого, вполне обоснованно можно предположить, что начальная скорость химической реакции W в детонационном фронте пропорциональна произведению количества начальных центров реакции n на среднюю площадь поверхности микросфер или пузырьков $s_b = \pi\delta_b^2/4 \sim \delta_b^2$ (δ_b — средний диаметр микросфер или пузырьков):

$$W = W_0(p)n_s s_b,$$

где $W_0(p) = Bp^\nu$ — скорость горения смеси водного раствора АС с дизельным топливом, B и ν — постоянные в законе горения.

Обозначим через m объемную долю микросфер в заряде ЭмВВ. Поскольку m численно равна объему пор в единице объема заряда ВВ, то справедливы следующие соотношения:

$$n_V = \frac{m}{4\pi\delta_b^3/3} \sim \frac{m}{\delta_b^3}, \quad n_s = (n_V)^{2/3} \sim \frac{m^{2/3}}{\delta_b^2}. \quad (3)$$

Тогда для начальной скорости разложения ВВ в зоне химической реакции детонационного фронта можно записать

$$W = W_0(p)n_s s_b = aW_0(p)\frac{m^{z/3}}{\delta_b^{z-2}},$$

где a — коэффициент пропорциональности, z — показатель, равный 2 или 3 в зависимости от того, какая величина определяет число центров реакции: n_s или n_V . Для ЭмВВ характерен достаточно широкий диапазон плот-

ностей, а следовательно, скоростей D и давлений p_d детонации. Поэтому в законе горения необходимо учесть зависимость давления p_d от плотности ВВ $\rho_0 = (1-m)\rho_{em} + m\rho_b$ ($\rho_{em} = 1.38 \div 1.41$ г/см³ — плотность матричной эмульсии, ρ_b — собственная плотность микросферы, равная отношению ее массы к занимаемому ею объему). Будем считать, что $p_d = C\rho_0^k$, где $k \approx 2$, C — коэффициент пропорциональности. Поскольку $\rho_b < 0.2 \div 0.25$ г/см³, для зарядов с небольшой пористостью можно считать $\rho_0 \approx (1-m)\rho_{em}$. Полагая $\nu = 1$, для начальной скорости реакции окончательно получаем соотношение

$$W = aBC\rho_{em}\frac{m^{z/3}(1-m)^k}{\delta_b^{z-2}}. \quad (4)$$

При $z = 2$ ($n = n_s$) скорость реакции W не зависит от диаметра микросфер, при $z = 3$ ($n = n_V$) — зависит линейно.

Что касается теплового эффекта разложения единицы массы ЭмВВ, то его следует уменьшить вследствие содержания в ВВ инертных стеклянных или полимерных микросфер:

$$Q_{p,V} = (1-\mu)Q_{p,V}^{em}, \quad (5)$$

где $Q_{p,V}^{em}$ — тепловой эффект разложения эмульсии, μ — массовая доля микросфер в пористой эмульсии. Взаимосвязь между объемной и массовой долями микросфер имеет вид

$$\mu(m) = \frac{m}{m + R(1-m)},$$

где $R = \rho_{em}/\rho_b$. Для значений $\mu < 0.1$ можно записать приближенное соотношение $\mu \approx m/R$. При использовании в качестве сенсibiliзатора стеклянных микросфер МСВ $R = 6.17$ [15] и $\mu \approx 0.16m$.

Массовая скорость u и скорость звука c в ударно-сжатом ВВ пропорциональны скорости детонации D , т. е.

$$u^2 c \sim D^3. \quad (6)$$

Значение «звукового» угла φ_* (при котором за ударным скачком реализуется звуковой режим течения ударно-сжатого ВВ [11]) для пористых зарядов ВВ плотностью $1 \div 1.2$ г/см³ заключено в пределах $50 \div 53^\circ$. Параметр Грюнайзена Γ для большинства ВВ по порядку величины равен 1. Для скорости детонации D во

фронте ударного скачка примем следующее соотношение пропорциональности:

$$D \sim \sqrt{(1 - \mu)Q_{p,V}^m}. \quad (7)$$

Подставляя соотношения (4)–(7) в формулу для критического диаметра (1) и объединяя постоянные величины и коэффициенты пропорциональности в общий коэффициент A , получаем окончательное выражение для d_{cr} :

$$d_{cr} = \frac{A\delta_b^{z-2}\sqrt{1-\mu}}{m^{z/3}(1-m)^k}. \quad (8)$$

Для малых значений μ эту формулу можно переписать в виде

$$d_{cr} = \frac{A\delta_b^{z-2}}{m^{z/3}(1-m)^k}. \quad (9)$$

При фиксированной объемной доле микросфер критический диаметр детонации d_{cr} зависит от диаметра микросфер δ_b , увеличиваясь с ростом δ_b [16, 17]. Однако остается открытым вопрос о значении показателя z . Для похожей на ЭМВВ смеси нитрометана со стеклянными микросферами в области небольших значений $\mu < 0.1$ в работе [18] экспериментально получена линейная зависимость d_{cr} от удельной поверхности микросфер в единице объема заряда ВВ, которая равна $n_V s_b$. Поскольку $n_V s_b \sim \delta_b/m$, то в зависимостях (8) и (9) для этой смеси следует принять $z = 3$.

Однако для ЭМВВ из работы [17] эта зависимость оказывается слабее линейной. Так, согласно экспериментальным данным, приведенным в [17], в случае $m = 0.17$ при увеличении диаметра ячеистых полистироловых микросфер в 5 раз (в интервале $\delta_b = 0.47 \div 2.42$ мм) d_{cr} возрастает примерно в 2–3 раза — от 24 до 55 мм (количественные данные взяты с графика). Если исходить из этих данных, то их удовлетворительное согласие с формулами (8) и (9) получается при $z = 2.5$. Однако необходимо принимать во внимание различие температур разогрева при сжатии ячеистых полистироловых и полых стеклянных микросфер.

Зависимости (8) и (9) d_{cr} от m имеют U-образный характер, что соответствует экспериментальным данным [15, 19]. Критический диаметр зарядов ЭМВВ очень быстро возрастает при малом содержании микросфер $m < 0.1 \div 0.2$ при уменьшении m и при большом содержании $m > 0.5 \div 0.6$ при увеличении m [15,

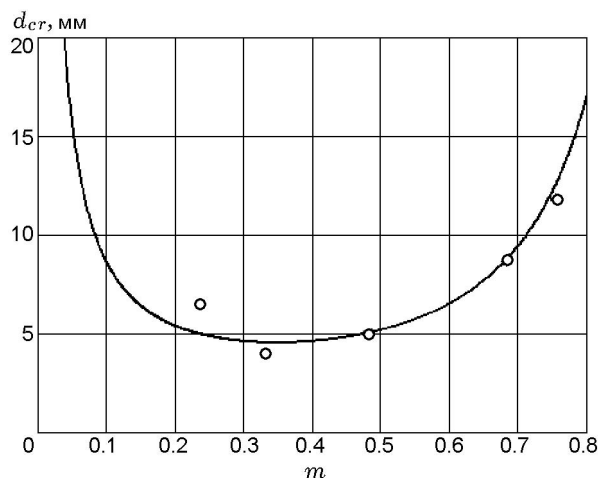


Рис. 1. Зависимость критического диаметра зарядов ЭМВВ от объемной доли микросфер: линия — зависимость (10), кружки — экспериментальные данные [15]

20]. На рис. 1 представлены экспериментальные данные из [15] и удовлетворительно описывающая их кривая, уравнение которой получено из зависимости (8):

$$d_{cr} = \frac{0.7\sqrt{1-\mu(m)}}{m(1-m)^2} \text{ [мм]}. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что экспериментальные данные взяты с графика рис. 4 из работы [15] и поэтому характеризуются невысокой точностью. В качестве характеристики состава ЭМВВ в [15] используется относительная масса микросфер $\mu_1 = m_b/m_{em}$, которая пересчитывалась в их объемную долю m по соотношению

$$m = \frac{\mu_1 R}{1 + \mu_1 R}.$$

3. Влияние оболочки. Рассматриваемая теория критического диаметра применима для анализа влияния оболочки на величину d_{cr} только тогда, когда ударная волна, возникающая в оболочке, присоединена к точке пересечения детонационного фронта с оболочкой [3]. Одним из необходимых условий существования такой конфигурации является выполнение неравенства $D > c_c$, в котором c_c — скорость звука в материале оболочки. При детонации зарядов промышленных ВВ в металлических оболочках это условие не выполняется, поскольку критическая скорость детонации

большинства промышленных ВВ меньше скорости звука в материале оболочки ($D < c_c$). В этом случае ударная волна или волна сжатия в оболочке будет опережать детонационный фронт и оказывать предварительное воздействие на ВВ, уплотняя его (рис. 2). При уплотнении ВВ впереди детонационного фронта возможно образование зазора между зарядом ВВ и оболочкой. На рентгенограммах детонирующих зарядов промышленных ВВ, расположенных на стальных пластинах, отчетливо видны зазор и область уплотненного ВВ [4, 21]. Поскольку уплотнение промышленных ВВ резко снижает их детонационную способность, то есть все основания полагать, что уплотненная

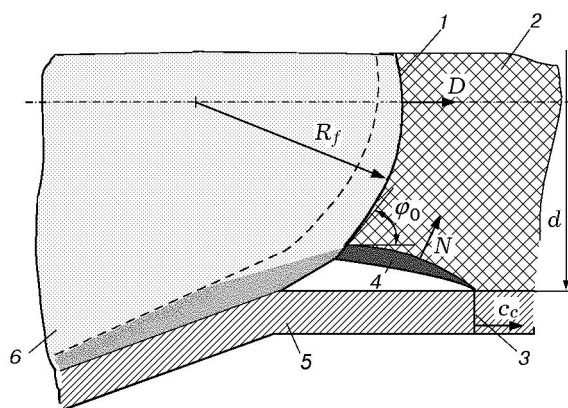


Рис. 2. Схема течения на границе заряда с металлической оболочкой:

1 — фронт детонации, 2 — заряд ВВ, 3 — фронт волны сжатия в оболочке, 4 — область уплотненного ВВ, 5 — оболочка, 6 — продукты детонации

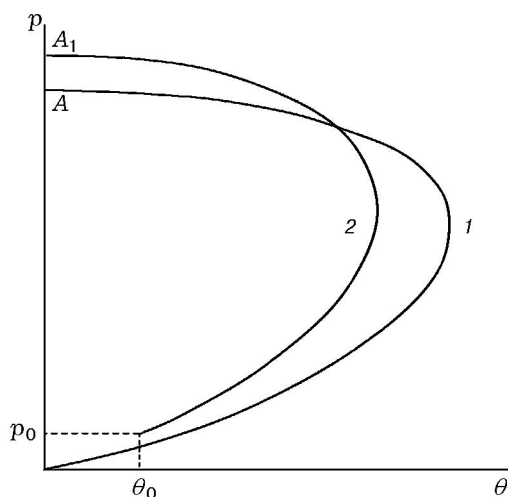


Рис. 3. Ударные поляризованные состояния исходного пористого ВВ (1) и уплотненного ВВ (2)

при предварительном сжатии область ВВ, первоначально примыкающая к оболочке, не детонирует, а образует своеобразную оболочку заряда (рис. 2). Следовательно, условие стационарности детонационного фронта на границе с оболочкой будет определяться не координатами точки пересечения ударных поляризованных ВВ и материала оболочки [1–3], а координатами точки пересечения ударных поляризованных исходного и уплотненного ВВ (рис. 3). При этом ударная поляризованная ВВ начинается в точке с координатами (p_0, θ_0) , определяемыми интенсивностью уплотняющей волны N и углом ее наклона к образующей заряда ВВ в точке пересечения с детонационным фронтом. Для того чтобы на границе раздела исходное ВВ — уплотненное ВВ существовала ударно-волновая конфигурация, изображенная на рис. 2, необходимо, чтобы ударные поляризованные на рис. 3 пересекались, а для этого должно выполняться неравенство

$$p_{A_1} > p_A. \quad (11)$$

Пусть уравнение ударной адиабаты исходного ВВ имеет вид $D = c_0 + \lambda_0 u$, а уплотненного — $D = c_1 + \lambda_1 u$, тогда неравенство (11) при условии близости точки (p_0, θ_0) к началу координат сведется к следующему ограничению на характеристики «оболочки» из уплотненного ВВ:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} > \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \frac{D - c_0}{D - c_1}. \quad (12)$$

Для построения ударных поляризованных необходимо знать ударные адиабаты исходных и уплотненных ВВ и координаты начального состояния (p_0, θ_0) уплотненного ВВ. Приблизительно ударные адиабаты исходных пористых ВВ могут быть определены с помощью методики, изложенной в работах [22, 23]. Для построения ударных адиабат уплотненных ВВ необходимо знать хотя бы степень их уплотнения, которая неизвестна. Предположение о том, что уплотнение пористого ВВ в процессе предварительного сжатия происходит до сплошного состояния, не вполне обоснованное, поскольку уплотнение осуществляется достаточно слабыми волнами сжатия, но в первом приближении для оценочных расчетов оно может быть использовано.

При увеличении сжимаемости материала оболочки критический диаметр зарядов ВВ в оболочке d_{cr}^c возрастает [3]. Сжимаемость даже уплотненных до сплошного состояния ВВ заметно выше сжимаемости металлов, из которых изготавливаются оболочки зарядов ВВ. По-

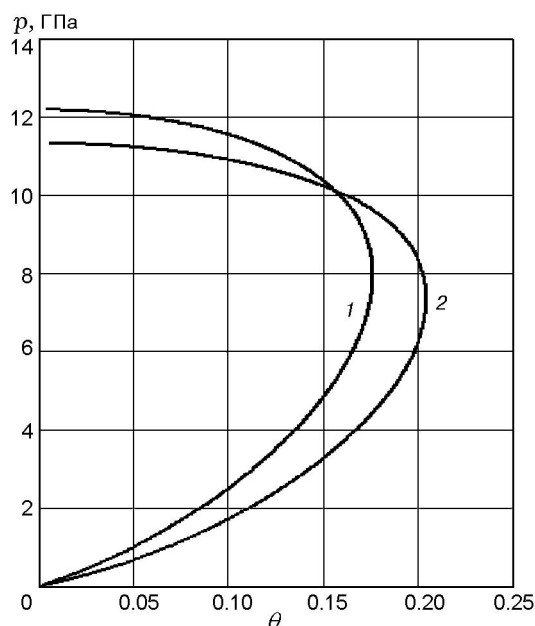


Рис. 4. Ударные поляры эмульсии плотностью $\rho_1 = 1.38 \text{ г/см}^3$ (1) и пористого ЭмВВ плотностью $\rho_1 = 1.2 \text{ г/см}^3$ (2) при $D = 5000 \text{ м/с}$

этому следует ожидать возрастания d_{cr}^c заряда пористого промышленного ВВ в металлической оболочке или, что то же самое, уменьшения отношения d_{cr}/d_{cr}^c (здесь d_{cr} — критический диаметр заряда без оболочки) по сравнению с высокоплотными зарядами мощных ВВ. Для подтверждения этого вывода была выполнена количественная оценка отношения d_{cr}/d_{cr}^c для эмульсионного ВВ. На рис. 4 приведены ударные поляры для пористой и сплошной эмульсий ЭмВВ при $p_0 = 0$, $\theta_0 = 0$. Процедура построения ударных поляр и определения «звуковых» углов наклона φ_* детонационного фронта к образующей заряда ВВ и углов «безотражательного» взаимодействия φ_0 описана в [1–3]; ударная адиабата пористой эмульсии плотностью 1.2 г/см^3 $D = 1600 + 1.8u$ получена расчетом с помощью методики [22] на основе экспериментальной ударной адиабаты холодной сплошной эмульсии плотностью 1.4 г/см^3 $D = 2170 + 1.82u$, взятой из [24]. Пористый материал при ударно-волновом уплотнении разогревается, поэтому в качестве ударной адиабаты уплотненной эмульсии использовалась экспериментальная ударная адиабата горячей ($90 \div 95 \text{ }^\circ\text{C}$) эмульсии плотностью 1.38 г/см^3 $D = 2120 + 1.63u$ из той же работы

[24]. В результате проведенных расчетов определены значения углов φ_* и φ_0 : $\varphi_* = 50.3^\circ$, $\varphi_0 = 77.4^\circ$. Расчетное отношение критических диаметров свободного заряда (d_{cr}) и ограниченного металлической оболочкой (d_{cr}^c) равно [1–3]

$$\frac{d_{cr}}{d_{cr}^c} = \frac{\cos \varphi_*}{\cos \varphi_0} = 2.9.$$

Отношение экспериментально определенных критических диаметров зарядов ЭмВВ в бумажной и стальной оболочках равно 2.7 [9, 10], что хорошо согласуется с результатом расчета.

Подводя итоги, можно сказать, что зависимость критического диаметра зарядов промышленных ВВ от характеристик их состояния (состава, плотности, структуры) и наличия у них оболочки удовлетворительно объясняется теорией критического диаметра, представленной ранее в работах [1–3].

Основной причиной роста критического диаметра детонации при увеличении плотности зарядов аммиачно-селитряных ВВ является уменьшение скорости энерговыделения в зоне химической реакции детонационной волны вследствие снижения интенсивности процессов разогрева, дробления частиц и перемешивания компонентов как при увеличении плотности зарядов, так и при заполнении пор водой.

Влияние размера частиц компонентов и количества сенсibiliзирующего компонента на критический диаметр детонации промышленных порошкообразных и гранулированных ВВ (в том числе и гранулитов АСДТ) укладывается в концепцию взрывного горения, на основании которой удалось получить количественную зависимость критического диаметра от этих величин.

Получена аналитическая формула для критического диаметра детонации эмульсионных ВВ, правильно описывающая экспериментальные зависимости d_{cr} от диаметра сенсibiliзирующих микросфер и их количества.

Рассмотрен возможный механизм влияния металлических оболочек на критический диаметр детонации пористых промышленных ВВ, скорость детонации которых меньше скорости звука в оболочке. Предварительно уплотненная опережающей детонационный фронт волной сжатия в оболочке область ВВ, примыкающая к оболочке, не детонирует, а образует своеобразную оболочку заряда. Количественный анализ этого механизма для эмульсионных

ВВ показывает удовлетворительное согласие с экспериментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кобылкин И. Ф., Соловьев В. С., Бойко М. М.** Критический диаметр стационарной детонации высокоплотных ВВ. Влияние оболочки // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 4. — С. 120–123.
2. **Кобылкин И. Ф., Соловьев В. С.** Критические условия распространения детонационных процессов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1991.
3. **Физика взрыва** / под ред. Л. П. Орленко. — В 2 т. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 1.
4. **Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И.** Промышленные взрывчатые вещества. — М.: Недра, 1988.
5. **Михайлов Ю. М., Колганов Е. В., Соснин В. А.** Безопасность аммиачной селитры и ее применение в промышленных взрывчатых веществах. — Дзержинск: ООО «Партнер-плюс», 2008.
6. **Энергетические конденсированные системы: Краткий энциклопедический справочник** / под ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 1999.
7. **Пацюк В. В., Анискин А. И., Шведов К. К.** Методика определения параметров детонации промышленных взрывчатых веществ в лабораторных условиях // Методы испытания низкочувствительных ВВ / под ред. К. К. Шведова. — Черногловка: Изд-во ОИХФ АН СССР, 1991.
8. **Шведов К. К., Анисимов В. Н.** Концепция и реальные пути создания промышленных ВВ для качественного дробления крепких горных пород // Горн. пром-сть. — 2008. — № 1.
9. **Лавров В. В.** Исследование затухающих взрывных процессов в гетерогенных пористых ВВ. Разработка стандартных методов оценки взрывоопасности: автореф. канд... физ.-мат. наук / ИПХФ РАН. — Черногловка, 2008.
10. **Кукиб Б. Н.** Влияние оболочки на величину критического диаметра детонации взрывчатых веществ // Взрывное дело. Сб. № 101/58. — М., 2009.
11. **Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К.** Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
12. **Шведов К. К., Дремин А. Н.** О параметрах детонации промышленных ВВ и их сравнительной оценке // Взрывное дело. Сб. № 76/33. — М.: Недра, 1976. — С. 137–150.
13. **Кобылкин И. Ф.** Критический диаметр детонации глубокофлегматизированных малочувствительных взрывчатых составов // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 6. — С. 108–114.
14. **Соснин В. А., Колганов Е. В.** Исследование процесса детонации в эмульсионных промышленных взрывчатых веществах // Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях: тр. междунар. конф. «V Харитоновские научные чтения». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. — С. 288–297.
15. **Сильвестров В. В., Пластинин А. В.** Исследование низкоскоростных эмульсионных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 124–133.
16. **Chaudhri M., Almgren L.-A., Persson A.** Detonation behavior of water-in-oil emulsion explosives, containing glass microballons of selected sizes // Proc. of the 10th Symp. (Intern.) on Detonation. — Boston, 1993.
17. **Hirosacki Y., Murata K., Kato Y., Itoh S.** Detonation characteristic of emulsion explosives as function of void size and volume // Proc. of the 12th Symp. (Intern.) on Detonation. — San Diego, 2002.
18. **Presles H. N., Vidal P., Gois J. C., Khasainov B. A., Ermolaev B. S.** Influence of glass microballons size on the detonation of nitromethane based mixture // Shock Waves. — 1995. — P. 325–329.
19. **Yoshida M., Iida M., Tanaka K., Fujivara S., Kusacabe M., Shiino K.** Detonation behavior of emulsion explosives, containing glass microballons // Proc. of The 8th Symp. (Intern.) on Detonation. — Albuquerque, 1985.
20. **Lee J., Sandstrom F. W., Craig B. G., Persson P.-A.** Detonation and shock initiation of emulsion explosives // Proc. of the 9th Symp. (Intern.) on Detonation. — Portland, 1989.
21. **Кудинов В. М., Коротеев А. В.** Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978.
22. **Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М.** Критические давления инициирования взрывчатых веществ // Взрывное дело. Сб. № 68/25. — М.: Недра, 1970. — С. 68–92.
23. **Афанасенков А. Н.** Динамическая сжимаемость некоторых компонент промышленных взрывчатых веществ // Взрывное дело. Сб. № 75/32. — М.: Недра, 1975. — С. 38–43.
24. **Ананьин А. В., Колдунов С. А.** К исследованию детонационной способности матрицы эмульсионного ВВ // Экстремальное состояние вещества. Детонация. Ударные волны: тр. междунар. конф. «IX Харитоновские научные чтения». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. — С. 93–96.

*Поступила в редакцию 14/1 2010 г.,
в окончательном варианте — 17/V 2010 г.*