

Возбуждение и распространение детонации в зарядах конденсированных взрывчатых веществ

возбуждение детонации ударными волнами

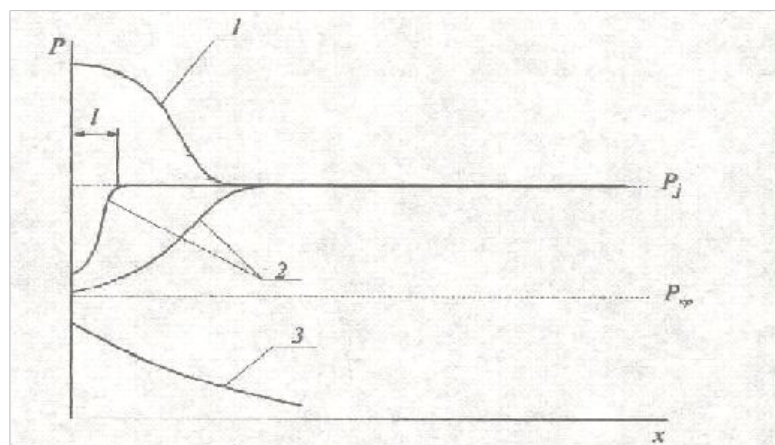


Рис. 12.1 Изменение давления в волне, распространяющейся по заряду ВВ, в зависимости от исходной величины ($P_{ив}$).

- 1- появление участка пересжатой детонации,
- 2- “разгон” детонации (l - глубина возникновения ДВ) до стационарного режима,
- 3- затухание УВ или возникновение низкоскоростного режима

Механизм возбуждения детонации УВ (проникающая УВ, или УВ, возникающая при ударе тела, летящего со сверхзвуковой скоростью) заключается в следующем. При проникновении УВ в заряде ВВ создается зона сжатия, в которой возникает экзотермическая химическая реакция.

Для неоднородных (гетерогенных) ВВ (прессованные, литые заряды ВВ) наиболее высокая скорость разложения вещества имеет место в “горячих точках”. Причинами возникновения горячих точек являются следующие причины:

- трение между кристаллами ВВ или твердыми частицами компонентов;
- “вязкостный” разогрев в результате быстрого течения вещества;
- трение на поверхности сдвига, под действием касательных напряжений;
- взаимодействие косых УВ, возникающих из-за неоднородности системы;
- адиабатическое сжатие газовых включений.

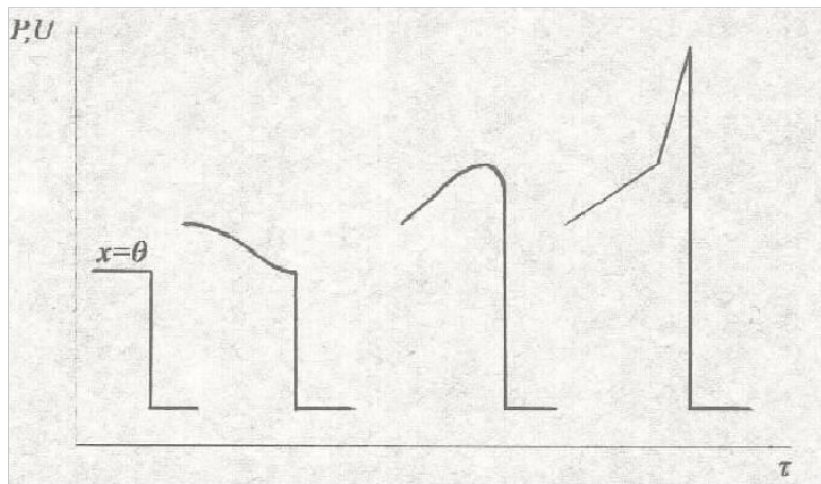


Рис. 12.2 Изменение профиля волны в случае разгона детонации

Образовавшиеся в горячих точках очаги разложения укрупняются и объединяются. Выделяющаяся в них энергия посредством волн сжатия идет на усиление фронта УВ.

Инициирование однородных (гомогенных) ВВ (обезгаженные жидкие и монокристаллы ВВ, не имеющие дефектов или включений) может происходить только в результате гомогенного разогрева вещества. По этой причине возбуждение детонации в гомогенных ВВ зачастую в значительной мере затруднено, по сравнению с гетерогенными.

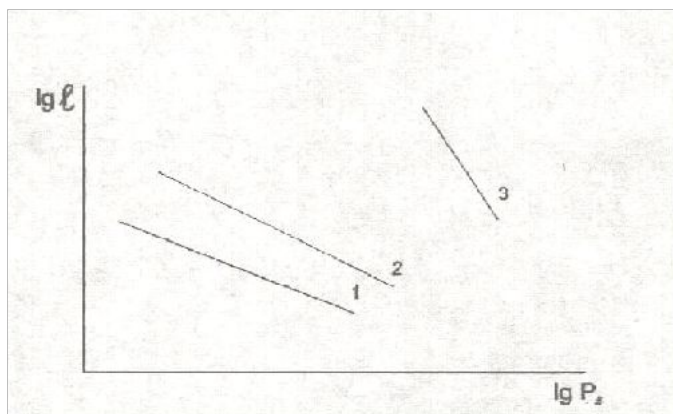


Рис 12.3 Глубина возникновения детонации (l) от величины ($P_{ив}$)

- 1,2 - прессованные заряды ($\rho_1 < \rho_2$),
 3 - литой заряд или монокристалл ВВ ($\rho_{мк}$)

Глубина преддетонационного (разгонного) участка (l) для одного и того же ВВ зависит как от интенсивности УВ, так и от характеристик заряда (рис 12.3). Причина - изменение механизма возбуждения детонации при переходе из гетерогенной (пористой) системы в гомогенную.

2. Диаметр заряда ($d_{зар}$) ВВ должен быть больше некоего критического значения ($d_{кр}$). При приближении величины ($d_{зар}$) к ($d_{кр}$) величина скорости детонации резко снижается, а при ($d_{зар} < d_{кр}$) детонация вообще невозможна (рис. 12.4)

При проникновении УВ в заряд ВВ возбуждение детонации возможно только при одновременном выполнении двух условий.

1. Давление в инициирующей УВ ($P_{ив}$) должно быть больше некоего критического значения ($P_{кр}$). В зависимости от величины ($P_{ив}$) по сравнению с ($P_{кр}$) или (P_j) могут быть следующие случаи, показанные на рис. 12.1.

В случае разгона детонации профиль волны последовательно изменяется (рис. 12.2) за счет протекания химических реакций за ее фронтом.

Критический диаметр детонации ВВ

При ($d_{зар}$) больше предельного ($d_{пр}$) величина скорости детонации изменяется мало. Для мощных индивидуальных ВВ по сравнению со смесевыми интервал между ними довольно узкий.

Величина ($d_{кр}$) зависит от природы ВВ. В таблице (12.1) приведены значения ($d_{кр}$) для некоторых ВВ.

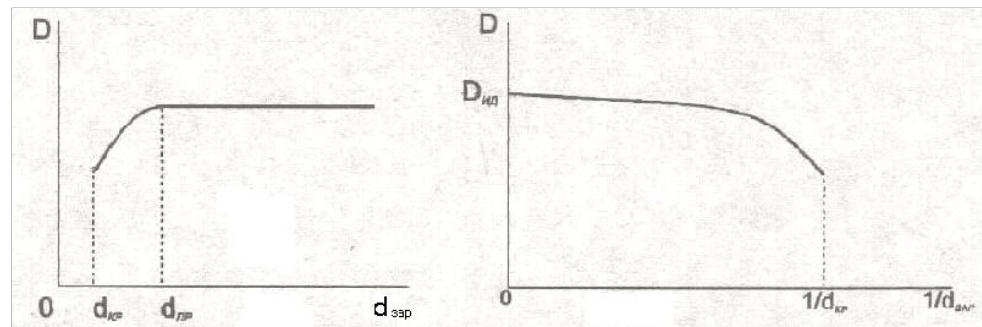


Рис 12.4 Зависимость скорости ДВ (D)
от диаметра заряда ($d_{зар}$)

$D_{ид}$ - "идеальная", максимально возможная скорость ДВ
при ($d_{зар} \rightarrow \infty$)

Критический диаметр детонации
различных ВВ. Таблица 12.1

Вид ВВ ($\rho \approx 0.9 \div 1.0 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$)	$d_{\text{кр}}$, мм
Азид свинца	0.01-0.02
ТЭН	1.0-1.5
Гексоген	1.0-1.5
Пикрат свинца	2-3
Пикриновая кислота	6
Тротил	8-10
Аммонийная селитра	100
Нитроглицерин (30 ⁰ С)	2.0

Причина существования ($d_{кр}$) по Харитону - возникновение критических условий, когда время проникновения волны разгрузки (R) с образующей заряда к его центру ($\tau_{раз}$) становится равным времени химических реакций ($\tau_{хр}$).

$$\tau_{хр} = \tau_{раз} \quad . \quad (12.1)$$

Харитоном постулировалась плоская форма ДВ и постоянство ширины ЗХР (а) с изменением ($d_{зар}$).

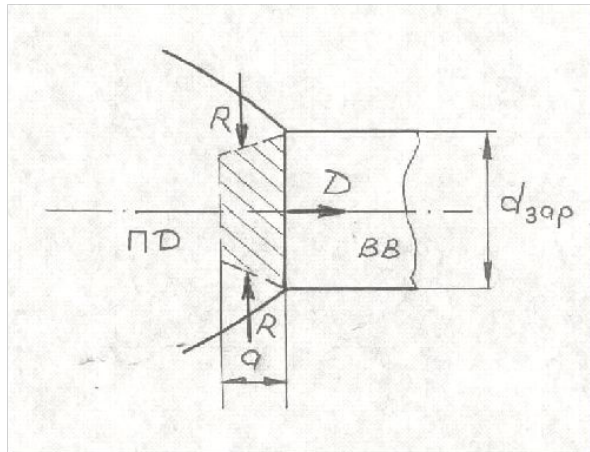


Рис 12.5. Воздействие волны разгрузки (R) на ЗХР

Волна разгрузки (R), проникающая с боковой поверхности заряда, разгружает ЗХР (рис. 12.5). По мере снижения ($d_{зар}$) количество энергии, идущее на поддержание фронта ДВ (заштрихованная область), будет уменьшаться, а по достижении ($d_{кр}$) оно будет иметь минимальное значение, необходимое для поддержания детонации.

Учитывая, что скорость ВР близка к скорости звука в ПД (c_j)

$$d_{кр} \approx 2c_j \bar{\tau}_{xp} \quad . \quad (12.2)$$

Эта формула хотя и не может претендовать на количественную строгость (Зельдович, Компанеец), но показывает, что всякое вещество, способное к экзотермической реакции, способно к детонации.

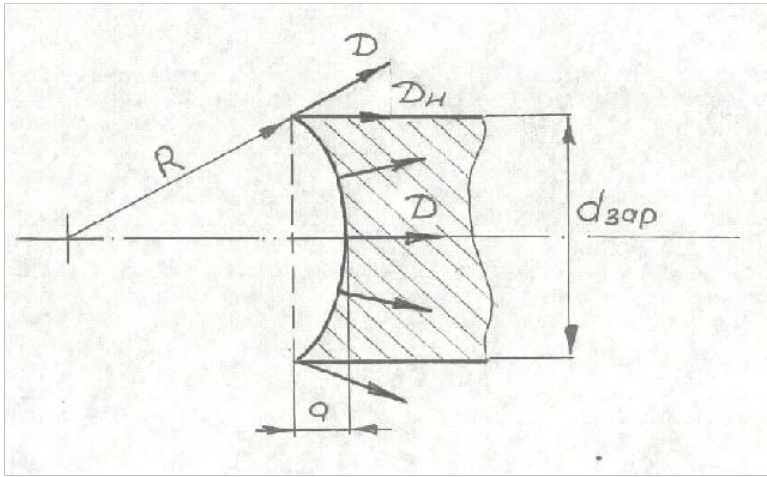


Рис 12.6. Искривление фронта ДВ для цилиндрического заряда

Разгрузка с боковой поверхности приводит к искривлению фронта ДВ. В цилиндрических зарядах он является сферическим (Кук) (рис. 12.6). Для зарядов критического диаметра

$$\frac{R_{\max}}{d_{\text{зар}}} = 0.5 \quad (12.3)$$

где: R_{\max} - максимальный радиус кривизны. Влияние ($d_{\text{зар}}$) на (D) в работах других авторов приводится в виде уравнений:

$$\left(\frac{D}{D_{\text{ид}}}\right)^2 = 1 - 3.2 \left(\frac{a}{d_{\text{зар}}}\right) \quad (\text{Джонс}), \quad (12.4)$$

$$\frac{D}{D_{\text{ид}}} = 1 - \frac{a}{d_{\text{зар}}} \quad (\text{Эйринг}) \quad (12.5)$$

Основной недостаток этих зависимостей - постоянство ширины ЗХР (a) при изменении $d_{зар}$.

Современные представления базируются на анализе расхода потока расширяющихся ПД и связи нормальной составляющей ДВ (D_n) с тепловыделением (Кобылкин, Чен, Кеннеди). Эти представления позволяют найти подходы для расчета $d_{кр}$ и взаимосвязь возникновения критических условий для зарядов произвольной формы

$$\frac{d_{кр}}{2} = l_{кр} = \left(\frac{a \cdot b}{a + b} \right)_{кр}, \quad (12.6)$$

где $d_{кр}$ - диаметр цилиндра;
 $l_{кр}$ - толщина листа;
 a, b - толщина и ширина бруска.

Зависимость критического диаметра детонации ВВ от различных факторов

На величину ($d_{кр}$) оказывает влияние множество факторов:

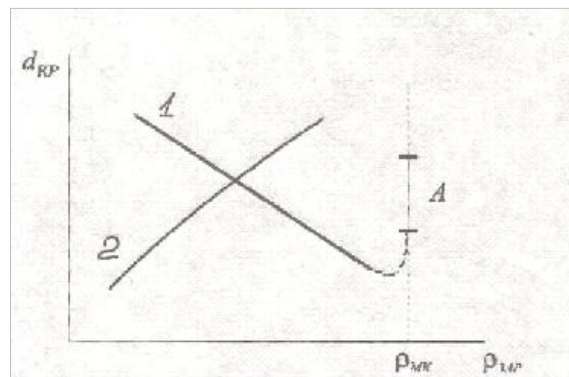


Рис. 12.7. Влияние (ρ_0) заряда на ($d_{кр}$)

1- для мощных индивидуальных ВВ
2- для маломощных и смесевых ВВ
А- возможный разброс при ($\rho_0 \approx \rho_{мк}$)

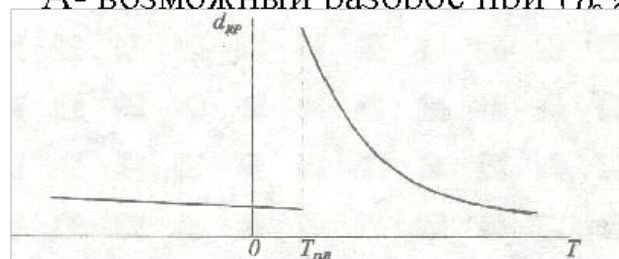


Рис. 12.8 Влияние температуры заряда (T) на ($d_{кр}$)

$T_{пл}$ - температура плавления

а) плотность заряда ВВ (рис. 12.7).

С увеличением (ρ_0) для мощных индивидуальных ВВ ($Q_{взр} \geq 4^{МДЖ/кг}$) увеличивается энерговыделение в единице объема, что способствует снижению ($d_{кр}$), но при приближении (достижении) к ($\rho_{мк}$) изменяется механизм возбуждения детонации. Для маломощных индивидуальных ($Q_{взр} < 4^{МДЖ/кг}$) и смесевых ВВ с увеличением (ρ_0) до некоторого значения количество выделяющейся в ЗХР энергии оказывается недостаточным для поддержания детонации.

б) Температура заряда ВВ

Изменение механизма возбуждения детонации приводит к резкому изменению ($d_{кр}$) при переходе из одного агрегатного состояния в другое (рис. 12.8).

с) Размер частиц ВВ (рис. 12.9)

Измельчение ВВ увеличивает степень неоднородности и, следовательно, количество возможных очагов возбуждения, что приводит к снижению ($d_{кр}$).

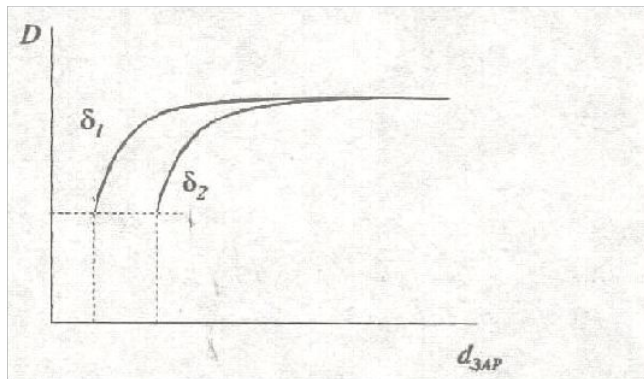


Рис. 12.9. Влияние размера частиц (δ) на величину ($d_{кр}$) ($\delta_1 < \delta_2$)

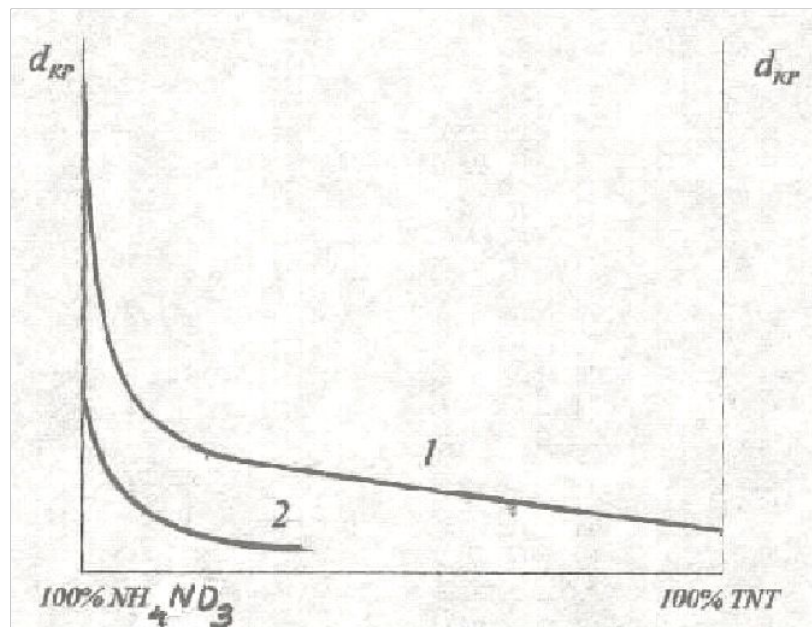


Рис. 12.10. Влияние состава смеси и наличия оболочки для смесевых ВВ (NH_4NO_3/TNT) (1- без оболочки, 2- в оболочке)

d) Наличие оболочки.

Помещение любого ВВ в толстостенную труднодеформируемую оболочку препятствует быстрому разлету ПД (разгрузке ЗХР) и снижает ($d_{кр}$) (рис. 12.10).

e) Введение порошков металлов.

Введение порошков металлов затрудняет разлет ПД (эффект “внутренней” оболочки) и снижает ($d_{кр}$). Для мощных ВВ кроме того при введении горючих металлов возможно их сгорание в ЗХР с выделением энергии (рис. 12.11), что приводит к увеличению скорости ДВ.

Для индивидуальных мощных ВВ при (ρ_0), близких к насыпным, снижение диаметра заряда может приводить к изменению характера детонационного процесса (рис. 12.12)

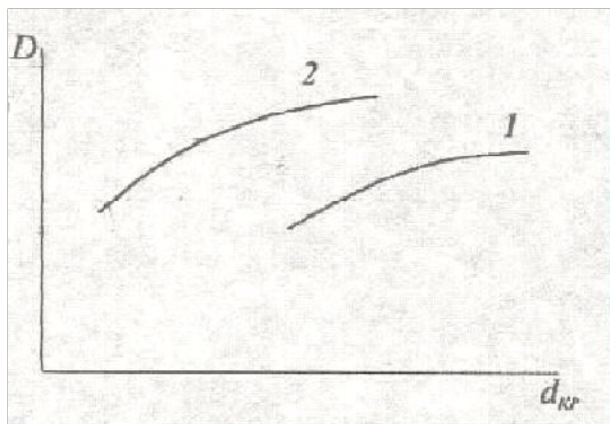


Рис. 12.11 Влияние введения порошков металлов на ($d_{кр}$).
(1- NH_4NO_3 ; 2- $\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{Al}$)

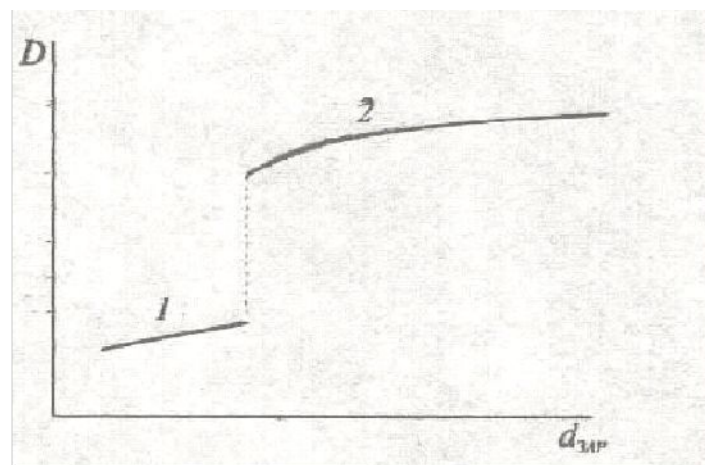


Рис. 12.12. Зависимость скорости низкоскоростной (1) и нормальной (2) детонации от $d_{зар}$ (тетрил)

Влияние плотности заряда на параметры детонации.

Повышение плотности (ρ_0) приводит к увеличению энерговыделения в единице объема и должно приводить к повышению скорости и давления ДВ, если диаметр заряда больше предельного ($d_{зар} > d_{пр}$). Однако зависимость $D(\rho_0)$ даже для мощных индивидуальных ВВ зачастую имеет сложный характер. С увеличением (ρ_0) (D) возрастает сначала быстро, затем более медленно, рост не прекращается даже при максимальных плотностях ($\rho_0 \approx \rho_{мк}$). Для этой группы ВВ зависимость $D(\rho_0)$ аппроксимируется степенной функцией (Шехтер):

$$D = B \cdot \rho_0^\alpha, \quad (12.7)$$

где B и α - эмпирические коэффициенты.

Широко используется линейная функция

$$D_2 = D_1 + M(\rho_2 - \rho_1), \quad (12.8)$$

где D_1 и D_2 - скорость ДВ, при ρ_1, ρ_2 соответственно.

Уравнение дает хорошие результаты только для узкого диапазона изменения $(\rho) - 0.2 \div 0.4 \text{ г/см}^3$.

Величина углового коэффициента (M) является не только индивидуальной характеристикой каждого ВВ (табл. 12.2), но и изменяется при переходе к другому диапазону (ρ) (также как и величина (k)).

Величина M для различных ВВ.

Таблица 12.2

ВВ	$\rho_0, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$D_1, \frac{\text{км}}{\text{с}}$	$M, \frac{\text{км}/\text{с}}{\text{г}/\text{см}^3}$
Тротил	1.0	5.010	3.225
Тэн	1.0	5.550	3.950
Гексоген	1.0	6.080	3.590
Тетрил	1.0	5.660	3.225
Пикриновая кислота	1.0	5.225	3.045
Азид свинца	4.0	5.100	4.560
Гремучая ртуть	4.0	5.050	4.890

Принимая, что на ограниченном участке течения процесс расширения ПД изоэнтропический (5.2), получим

$$K = \left(\frac{\partial \ln P}{\partial \ln \rho} \right)_s = - \left(\frac{\partial \ln P}{\partial \ln V} \right)_s, \quad (12.9)$$

$$\text{тогда } \frac{\rho_0 M}{D} = \frac{k-1}{2}. \quad (12.10)$$

Выражение (12.10) позволяет найти ориентировочное значение (K) и вычислить параметры ДВ (смотри уравнение (9.9)-(9.12)) при интересующей величине (ρ_0).

$$D=8.75 \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}, \quad M = 3.5 \frac{\text{км/с}}{\sqrt{\text{см}^3}}, \quad \text{получим } K = 2 \cdot \frac{1.8 \cdot 3.5}{8.75} + 1 \approx 2.5$$

Для смесевых ВВ (тротил - аммиачная селитра) рядом исследователей (Дотриш, Каст, Боболев) было установлено, что с увеличением $(\rho_0)(D)$ растет лишь до определенного предела, а затем резко падает вплоть до полного прекращения детонации, когда (ρ_0) не достигает еще своего максимального значения. Эта группа ВВ характеризуется большими величинами как $(d_{кр})$, так $(d_{пр})$, и при значительных $(d_{зар})$ зависимость $D(\rho_0)$ для них должна качественно иметь такой же вид, как и для гомогенных ВВ.

Особой сложностью отличается детонация смесевых ВВ, содержащих горючие металлы (Al, Mg и др.). При детонации таких ВВ в ЗХР реализуется одна из трех ситуаций (Тейлор):

- a) давление и температура в ПД и добавке не успевают выровняться за $(\tau_{x.p.})$ ВВ;
- b) давление успевает выровняться, а температурное равновесие не достигается;
- c) давление и температура в ПД и добавке выравниваются.

Очевидно, что реализация какой-либо ситуации зависит как от $(\tau_{x.p.})$ основного ВВ, так и от физических свойств добавки. По этим причинам введение небольших количеств добавки, Al например, (10÷20 % вес.) в маломощное ВВ (аммиачная селитра) приводит к увеличению скорости ДВ, а в мощное - к снижению.

Метод расчета критических диаметров взрывчатых композиций (А.А. Котомин, А.С. Козлов, СПбГТИ(ТУ))

Критический диаметр детонации взрывчатых композиций с инертными добавками d_k рассчитывается при максимальной плотности заряда (ρ_{\max}) по формуле:

$$d_k = \frac{d_{k_0}}{V_{\text{ВВ}}^n},$$

где d_{k_0} - критический диаметр чистого ВВ при реальной дисперсности и дефектности кристаллов и малой пористости ВВ, равной 1 - 2%, мм; $V_{\text{ВВ}}$ - объемная доля ВВ в композиции; n - параметр, определяемый дисперсностью ВВ и физическими свойствами добавок.

Критический диаметр детонации индивидуального ВВ d_{k_0} (мм) определяется с учетом адсорбционной удельной поверхности ВВ $S_{\text{ад}}$ ($\text{м}^2/\text{г}$) по формуле:

$$\frac{1}{d_{k_0}} = \frac{1}{d_{\text{mk}}} + 0,91S_{\text{ад}},$$

где d_{mk} - критический диаметр детонации монокристалла ВВ.

При отсутствии значения S_{ad} критический диаметр детонации ВВ может быть рассчитан приближенно, без учета дефектности кристаллов, с использованием удельной поверхности, определяемой по газопроницаемости ВВ (S_g , м²/г), например на приборе ПСХ

$$d_{k_0} = aS_g^{-b},$$

где a - критический диаметр детонации ВВ при $S_g = 1$ м²/г, мм, b - коэффициент: для бензотрифуроксана $a = 0,06$ мм, $b = 1,23$; ТЭНа $a = 0,08$ мм, $b = 0,93$; гексогена $a = 0,26$ мм, $b = 0,78$; октогена $a = 0,48$ мм, $b = 0,62$; тетрила $a = 0,79$ мм, $b = 0,44$; CL-20 $a = 0,43$ мм, $b = 0,51$; НФФ $a = 0,07$ мм, $b = 0,66$.

Полученные выражения действительны для S_g в интервале от 0,01 до 1 м²/г.

Для органических инертных компонентов (добавок) определяющей характеристикой является их акустическая жесткость, связанная с ударной сжимаемостью:

$$n = 2,95 + 1,2 \lg S_{ad} - 0,3\rho_d C_0,$$

либо

$$n = 4,14 + 1,39 \lg S_g - 0,3\rho_d C_0$$

где C_0 , ρ_d - скорость звука в органической добавке, км/с и ее плотность, г/см³.

Для неорганических добавок определяющими характеристиками являются: плотность, связанная с затратами энергии на разгон частиц в детонационной волне, и дисперсность, связанная, по-видимому, с характером диссипации энергии волны разрежения и скоростью звука в расширяющихся продуктах взрыва. При этом параметр n сложных взрывчатых композиций (ВК), содержащих как органические, так и неорганические добавки, рассчитывается по формуле:

$$n = A(n_{\text{орг}}) + B(n_{\text{неорг}}),$$

$$n_{\text{орг}} = 4,14 + 1,39 \lg S_g - 0,3\rho_{\text{од}}C_0,$$

$$n_{\text{неорг}} = g + 0,114\rho_{\text{нд}} + 0,897 \lg r$$

$$A = \frac{\beta}{\beta + \gamma}, \quad B = \frac{\gamma}{\beta + \gamma},$$

где $\rho_{\text{од}}$ - плотность органической добавки, г/см³; $\rho_{\text{нд}}$ - плотность неорганической добавки, г/см³; r - средний размер частиц неорганической добавки, мм; β, γ - массовые доли органической и неорганической добавки в ВК, соответственно; g - коэффициент: для металлов и оксидов $g = 3,46$, для солей $g = 3,32$.

Для высокодисперсных тяжелых неорганических добавок с r менее 5 мкм и $\rho_{нд}$ более 4 г/см³ при их содержании до 20% масс. (при этом проявляется эффект сенсбилизации ВК):

$$g = \frac{4,51\gamma - m}{0,004 + \gamma},$$

где m - коэффициент: для металлов и оксидов $m = 0,196$, для солей $m = 0,225$.

Критические диаметры детонации индивидуального ВВ или взрывчатой композиции при их максимальных плотностях $d_k(\rho_{max})$, рассчитанные по указанным формулам, приводятся к реальной плотности заряда $d_k(\rho_0)$ по формуле:

$$d_{k(\rho_0)} = d_k \cdot 10^{1,14 \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{max}}\right)}$$

Разработанный метод расчета дает среднюю погрешность для критических диаметров детонации композиций с органическими добавками 7-10%, для сложных систем, включающих органические и неорганические добавки – 15-20%. При этом суммарное содержание добавок – до 50% масс., дисперсность неорганических добавок – от 0,1 до 500 мкм.