

УДК 534.222.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА НА ШИРИНУ ЗОНЫ РЕАКЦИИ

А. С. Юношев, А. В. Пластинин, В. В. Сильвестров

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, asyn@ngs.ru

Приведены экспериментальные зависимости ширины зоны реакции и критического диаметра детонации от начальной плотности при изменении плотности эмульсионного взрывчатого вещества (ВВ) от 0.5 до 1.33 г/см³. В качестве сенсibilизатора использовались микробаллоны из стекла. Для эмульсионного ВВ характерна U-образная зависимость критического диаметра от плотности, а время реакции и ширина зоны реакции монотонно увеличиваются с плотностью ВВ. Давление детонации исследуемых композиций изменяется в диапазоне 0.6 ÷ 12 ГПа.

Ключевые слова: эмульсионные ВВ, ширина зоны реакции, критический диаметр детонации, влияние плотности, соотношение Харитона.

ВВЕДЕНИЕ

Изменение ширины зоны реакции для эмульсионных взрывчатых веществ (ЭмВВ) в широком диапазоне начальных плотностей ρ_0 представляет интерес, по крайней мере, по двум причинам. Во-первых, наблюдается немо- нотонная зависимость скорости детонации D от плотности ВВ ρ_0 , что связано с предполагаемым ростом ширины зоны реакции при увеличении плотности ВВ [1, 2]. Но прямого экспериментального доказательства этого утверждения нет. Совокупность имеющихся данных [3–8] указывает на монотонный рост времени реакции t_R и ширины зоны реакции a_R при увеличении плотности. Но эти результаты получены для ЭмВВ различного состава, с неконтролируемой дисперсностью эмульсии, с использованием различных методик (от электромагнитного датчика до метода протонной радиографии) и, как правило, при одном значении плотности [3–5, 8], за исключением работ [6, 7]. Суть всех методик в этой задаче состоит в поиске «химического пика» на временном профиле параметра, определяемого за фронтом детонационной волны (массовая скорость, давление или плотность), и в оценке длительности

t_R и ширины «химпика» a_R .

Во-вторых, для ЭмВВ с сенсibilизатором в виде полых микросфер из стекла характерна U-образная зависимость критической толщины [9] и критического диаметра детонации d_{cr} [10] от начальной плотности композиции. Подобная зависимость дает возможность качественной проверки при одной и той же физической структуре ЭмВВ известного соотношения Харитона, которое сыграло значительную роль при исследовании проблем, связанных с критическим диаметром мощных ВВ:

$$d_{cr} \approx 2a_R. \quad (1)$$

Согласно (1) величина критического диаметра обусловлена в основном потерями энергии детонационной волны при разгрузке продуктов взрыва с боковой поверхности цилиндрического заряда ВВ и конечной скоростью протекания химической реакции за фронтом детонационной волны, которая, в свою очередь, определяет конечную ширину зоны реакции [11]. При формулировке (1) ограничения на пределы его справедливости и на тип ВВ не накладывались. Логическим следствием соотношения (1) является предположение, что при изменении начальной плотности ВВ поведение критического диаметра и ширины зоны реакции должны быть качественно подобны. Для индивидуальных мономолекулярных ВВ указанная пропорциональность действительно имеет место. Но количественное несоответствие (1) опытным данным отмечалось неоднократно, например, известные примеры с литым и прессован-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-08-00164-а), интеграционного проекта СО РАН № 2.10 и частично гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (№ НШ-247.2012.1).

© Юношев А. С., Пластинин А. В., Сильвестров В. В., 2012.

ным тротилом: при одинаковой плотности ВВ ширины их зон реакции при стационарной детонации практически одинаковы, а критические диаметры отличаются в 3–10 раз [12, 13]. Этот факт связывали с влиянием на критический диаметр физической структуры ВВ, которая определяет количество «горячих точек», влияющих на инициирование реакции за фронтом ведущей ударной волны и формирование стационарной зоны реакции во фронте детонации.

Поэтому цель настоящей работы состояла в измерении ширины зоны реакции ЭмВВ при изменении их начальной плотности в максимально широком диапазоне при выполнении следующих условий: одна эмульсия, одна дисперсность матрицы, один сенсibilизатор, одна методика и единый подход к определению точки перегиба на профиле измеряемого параметра за фронтом детонации.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследовалась композиция на основе высокодисперсной эмульсии с размером капель окислителя не более $1 \div 2$ мкм. Массовый состав эмульсионной матрицы: окислитель — водный раствор аммиачной и натриевой селитры — 94 %; горючее — смесь индустриального масла, парафина и эмульгатора — 6 % [10]. Плотность эмульсионной матрицы 1.41 г/см^3 . Полые стеклянные микросферы МС-В насыпной плотностью 0.15 г/см^3 использовались как физический сенсibilизатор. Характерный размер микробаллонов составлял 60 мкм. Плотность ЭмВВ варьировалась от 0.5 до 1.37 г/см^3 за счет количества сенсibilизатора μ , замещаемого в эмульсию, $\mu = 50 \div 0.5$ % сверх массы матрицы. При этом пористость композиции изменялась, но ее физическая структура была одной и той же.

Для измерения времени реакции на оси заряда (t_R) определялся профиль массовой скорости $u(t)$ за детонационным фронтом на границе раздела ЭмВВ / оптическое окно из плексигласа толщиной 25 мм при помощи лазерного доплеровского интерферометра VALYN VISAR типа VMBV-04 с постоянной от 450 до 1934 м/с на интерференционную полосу [14]. Излучение лазера фокусировалось по оси сборки в области размером ≈ 1 мм, отражалось от «зеркала» — матированной фольги из алюминия толщиной

7 мкм, расположенной вблизи указанной границы, и через оптический пробник с фокусным расстоянием 30 мм поступало на вход интерферометра.

Использовались заряды ЭмВВ диаметром $d = 6 \div 48$ мм, длиной не менее $L \geq 8d$. В отдельных опытах диаметр заряда был увеличен до 90 и 115 мм при $L \approx 4d$ и $2d$. Заряды находились в цилиндрических оболочках из полипропилена или стали. Как правило, диаметр заряда не менее чем в 2–2.5 раза превышал критический диаметр ЭмВВ (при данных плотности ВВ и материале оболочки). Все заряды инициировались при помощи боевика из 5%-го ЭмВВ ($\mu = 5$ %), которое инициировалось электрическим детонатором.

При помощи серии контактных датчиков измерялась скорость детонации D и контролировалась ее стационарность в пределах $1 \div 2$ %. Скорость детонации изменялась от 1.9 до 6 км/с, а критический диаметр композиций — от 5 до 40 мм при варьировании количества сенсibilизатора. Самое низкое значение D близко к скорости звука в эмульсии без сенсibilизатора $1.6 \div 1.8 \text{ км/с}$. Зависимость $D(\rho_0)$ описывается прямой $D = -0.59 + 4.96\rho_0$ (рис. 1) с типичными для ЭмВВ значениями коэффициентов [15].

В более широком диапазоне начальных плотностей ЭмВВ подтвержден U-образный характер зависимости $d_{cr}(\rho_0)$ (см. ниже рис. 5). Согласно [10] критический диаметр изменяет-

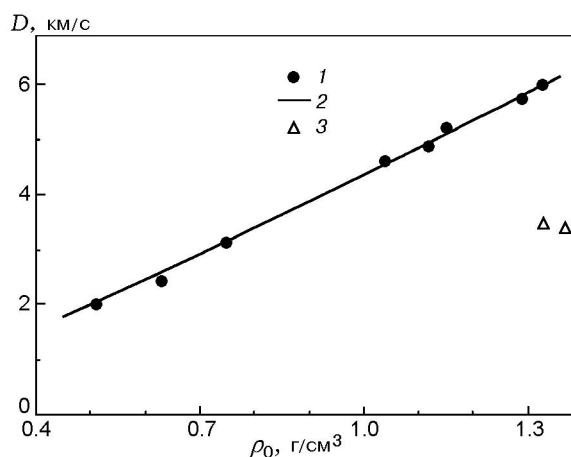


Рис. 1. Зависимость скорости детонации эмульсионного ВВ от плотности:

1 — детонация, 2 — приближение формулой $D(\rho_0)/D_* = (\rho_0/\rho_*)^m$, $m = 1.12$, 3 — взрывной процесс

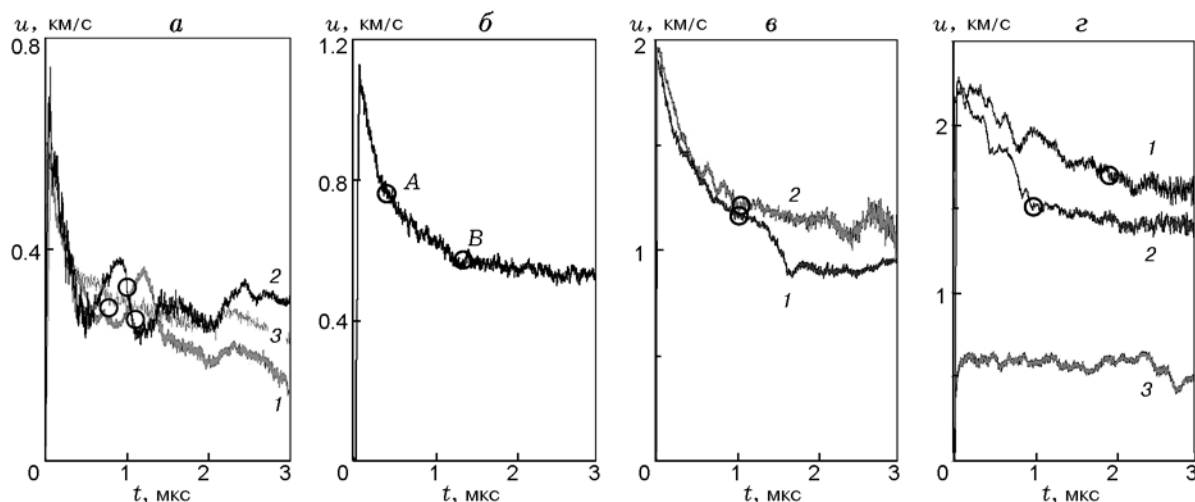


Рис. 2. Профили массовой скорости на границе ВВ / окно из плексигласа при различной плотности эмульсионного ВВ (отмечены предполагаемые точки перегиба):

- a:* 1, 3 — $\rho_0 = 0.51 \text{ г/см}^3$, $d = 36 \text{ мм}$, материал оболочки — полипропилен (ПП), толщина ее стенки — 2 мм; 2 — 0.51 г/см^3 , 6 мм, сталь, 5 мм, $D = 1.9 \div 2.1 \text{ км/с}$ ($\mu = 50 \%$);
- б:* 0.75 г/см^3 , 36 мм, ПП, 2 мм, 2.5 км/с ($\mu = 20 \%$);
- в:* 1 — 1.12 г/см^3 , 36 мм, ПП, 2 мм; 2 — 1.15 г/см^3 , 30 мм, сталь, 5 мм, $4.5 \div 4.6 \text{ км/с}$ ($\mu = 5 \%$);
- г:* 1 — 1.33 г/см^3 , 100 мм ($L = 4d$), ПП, 6.0 км/с ($\mu = 1 \%$); 2 — 1.29 г/см^3 , 30 мм, сталь, 5 мм, 5.8 км/с ($\mu = 2 \%$); 3 — 1.37 г/см^3 , 48 мм, сталь, 5 мм ($\mu = 0.5 \%$), взрывной процесс $D_* = 3.6 \div 3.4 \text{ км/с}$

ся начиная от 13 мм при $\rho_0 = 0.5 \text{ г/см}^3$ ($\mu = 50 \%$), достигает минимума ($\approx 5 \text{ мм}$) при $\rho_0 \approx 1.0 \div 1.05 \text{ г/см}^3$ ($\mu = 8 \div 10 \%$) и увеличивается до $7 \div 8 \text{ мм}$ при $\rho_0 = 1.12 \text{ г/см}^3$ ($\mu = 5 \%$). В работе методом цилиндрических зарядов определены значения $d_{cr} = 17 \text{ мм}$ при $\rho_0 \approx 1.28 \text{ г/см}^3$ ($\mu = 2 \%$) и $d_{cr} = 38 \text{ мм}$ при $\rho_0 \approx 1.33 \text{ г/см}^3$ ($\mu = 1 \%$). Критическая скорость детонации составила 2.7 и $2.9 \div 3.0 \text{ км/с}$ соответственно и была постоянной на последних 240 мм при длине заряда $L = 360 \text{ мм}$.

На рис. 2 приведены типичные профили массовой скорости от времени. На всех профилях наблюдается область повышенных скоростей, «химический пик», предсказываемый теорией Зельдовича — Неймана — Дёринга [12], с последующим более плавным спадом скорости в волне Гейлора. То есть структура детонационного фронта в ЭМВВ в широком диапазоне плотностей соответствует модели Зельдовича — Неймана — Дёринга.

На некоторых осциллограммах наблюдаются нерегулярные возмущения на профиле скорости. Возможные причины: опережающая волна сжатия, распространяющаяся по оболочке (рис. 2,а), и/или пространственная неоднородность детонационного фронта (рис. 2,в,г). Последнее предположение требует более тща-

тельного исследования. Рис. 2,а,в иллюстрирует относительно слабое влияние материала оболочки (полипропилен или сталь) на параметры «химпика» u_* и t_* .

На профилях $u(t)$ выделяются точки перегиба А и В (рис. 2,б), каждую из которых можно связать с концом зоны реакции. Положение точек с точностью $0.05 \div 0.1 \text{ мкс}$ оценивалось по отклонению касательных к передней и задней частям профиля $u(t)$. Выбор между точками перегиба А, В сделан на основе сравнения профилей $u(t)$ для зарядов в оболочках из полипропилена и стали (рис. 2,в). Анализ результатов при $\rho_0 = 0.51$ и 1.12 г/см^3 показал, что предпочтение следует отдать точке В, координаты (t_w, u_w) которой определяют наибольшее время и наименьшую массовую скорость, тем более что по мере роста детонационного давления точка А исчезает (рис. 2,г). Поэтому ниже рассматриваются данные, соответствующие точке В. Появление точки А, возможно, связано с влиянием волны сжатия, возникающей при отражении волны от поверхности окна из плексигласа, или с влиянием двух стадий (быстрой и медленной) реакции взрывного превращения на скорость реакции за фронтом детонации низкоплотных ЭМВВ.

На рис. 2,а приведены три профиля $u(t)$

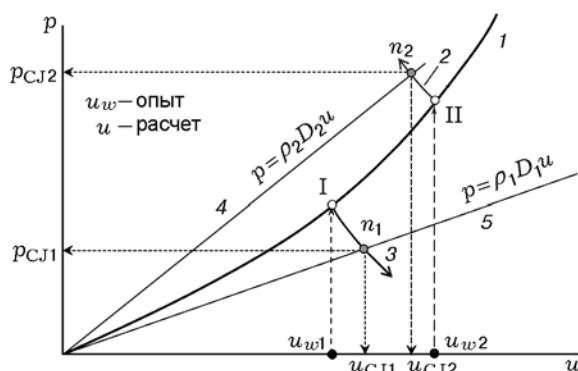


Рис. 3. К оценке детонационных параметров:

1, 2 — ударные адиабаты плексигласа и продуктов взрыва, 3 — адиабата разгрузки продуктов взрыва, 4, 5 — детонационные лучи

для наиболее неоднородной композиции при $\mu = 50\%$. «Химпик» присутствует и на осциллограмме для заряда диаметром 6 мм, заключенного в стальную оболочку (кривая 2). Наблюдается разброс значений массовой скорости ($u_* = 280 \div 350$ м/с) и времени ($t_* = 450 \div 700$ нс) в точках, соответствующих предполагаемым концам зоны реакции (отмечены кружками). По-видимому, разброс данных обусловлен объемной неоднородностью композиций с большим количеством включений. Относительная амплитуда «химического пика» (оценка по осциллограммам рис. 2) уменьшается от ≈ 2.1 до $1.3 \div 1.4$ при увеличении плотности ЭмВВ до 1.33 г/см³.

Для оценки детонационных параметров использовались метод p - u -диаграмм (рис. 3) и ударная адиабата плексигласа из [16]. Предполагалось, что продукты взрыва описываются политропой $p \sim \rho^n$ с постоянным показателем n , а массовая скорость u_{CJ} и давление p_{CJ} в плоскости Чепмена — Жузе связаны соотношениями классической теории детонации. Показатель политропы подбирался из условий: адиабата разгрузки/сжатия продуктов взрыва проходит через точку (u_w, p_w) и $n = D/u_{CJ} - 1$. При $\rho_0 \leq \rho_* \approx 1.05 \div 1.15$ г/см³ детонационное давление меньше давления в материале ударно-сжатого окна $p_{CJ} \leq p_w$ (состояние I на рис. 3), при $\rho_0 > \rho_*$, наоборот, $p_{CJ} > p_w$ (состояние II). Погрешность расчета массовой скорости u_{CJ} оценивается в $5 \div 10\%$, давления p_{CJ} — в $8 \div 10\%$ при $p_{CJ} \approx 5 \div 10$ ГПа и $20 \div 25\%$ при $p_{CJ} \approx 0.5$ ГПа, времени t_w — около $10 \div 15\%$.

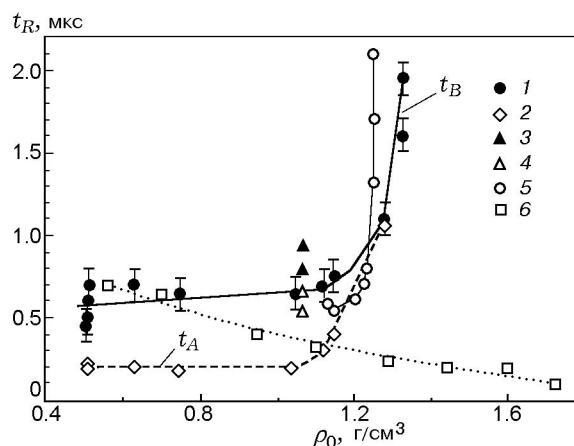


Рис. 4. Влияние плотности на время реакции для эмульсионного ВВ:

1, 2 — данные для точек В и А соответственно, 3 — лазерный интерферометр [8], 4 — протонная радиография [8], 5 — эмульсия без натриевой селитры [6], 6 — гексоген [12]

ОБСУЖДЕНИЕ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

В пределах разброса данных время реакции, оцениваемое как $t_R = t_w$, практически постоянно при $\rho_0 \leq \rho_*$ — $t_R \approx 0.6 \div 0.7$ мкс при $p_{CJ} < 6 \div 8$ ГПа, и увеличивается до $1 \div 2$ мкс при $\rho_0 \approx 1.2 \div 1.3$ г/см³ (рис. 4). На рис. 4 приведены также оценки t_R , полученные при помощи лазерной интерферометрии и протонной радиографии при $\rho_0 = 1.07$ г/см³ для ЭмВВ близкого состава [8], для которых тоже существует разброс данных, обусловленный трудностью идентификации точки перегиба. Наблюдается удовлетворительное согласие между нашими результатами и приведенными в работе [8].

На рис. 4 представлены данные [6] для эмульсии на основе только аммиачной селитры плотностью 1.35 г/см³, полученные при помощи манганинового датчика давления (точки 5). С учетом разницы в плотностях эмульсий данные настоящей работы находятся в согласии с резким увеличением времени реакции при $\rho_0 = 1.21 \div 1.23$ г/см³, зарегистрированным в [6], т. е. влияние состава эмульсии на время реакции мало: $\approx 0.1 \div 0.2$ мкс (возможно, оно и существует, но в пределах точности и метода идентификации точек перегиба достоверность этого утверждения невысока).

Малое время реакции для ЭмВВ связано с большой поверхностью контакта горючее/окислитель в высокодисперсной эмульсии.

онной матрице и объясняет небольшие значения критического диаметра ЭмВВ на основе высокодисперсной эмульсии. Еще в [17] было показано, что при уменьшении размера капель окислителя существенно уменьшается и критический диаметр эмульсионных композиций.

Отметим, что для того же ЭмВВ плотностью $0.75 \div 1.04 \text{ г/см}^3$ ранее приводились в 1.5 раза меньшие значения времени реакции: $t_R \approx 0.4 \text{ мкс}$ [7]. Это связано с иным определением положения точки Чепмена — Жуге как места пересечения касательных к передней и задней частям профиля $u(t)$. Но эта разница в значениях t_R не существенна и не влияет на основные выводы работы.

На рис. 4 приведены данные [12] по времени реакции для гексогена, полученные при диаметрах зарядов, близких к предельному. Поведение $t_R(\rho_0)$ для мономолекулярных и композиционных эмульсионных ВВ различно, что обусловлено разными механизмами детонационного превращения неоднородных (насыпных и прессованных) и эмульсионных ВВ. По-видимому, это связано и с иным — не ударным — механизмом гетерогенного нагрева взрывчатого компонента (эмульсии) до температуры, необходимой для протекания реакции взрывного превращения за время порядка и менее 1 мкс. При $\rho_0 = 0.5 \div 0.8 \text{ г/см}^3$ время реакции для ЭмВВ близко к значениям, характерным для низкоплотных тротила или гексогена, но существенно меньше времени реакции для мелкодисперсного порошка аммиачной селитры, $3 \div 5 \text{ мкс}$ [12].

На рис. 5 приведены результаты оценок ширины зоны реакции по выражению $a_R < (D - u_{CJ})t_R$. Ширина зоны реакции монотонно увеличивается от 1 до 9 мм, в основном за счет множителя $(D - u_{CJ})$, т. е. роста скорости звука в продуктах взрыва при изменении плотности ВВ в диапазоне $0.50 \div 1.33 \text{ г/см}^3$. Данные [6] с учетом отмеченной выше разницы в составе и плотности эмульсии также хорошо коррелируют с данными этой работы: при $\rho_0 \approx 1.33 \text{ г/см}^3$ наблюдается резкое увеличение a_R , связанное с уменьшением скорости взрывного превращения.

Плоскость рис. 5 можно разбить на две области — при $\rho_0 \leq \rho_*$ и $\rho_0 > \rho_*$. При $\rho_0 \approx \rho_*$ хорошо выполняется соотношение Харитона $d_{cr}/2 = R_{cr} \approx a_R$. Поведение зависимостей $a_R = f_1(\rho_0)$ и $R_{cr} = f_2(\rho_0)$ при изменении плотности в исследуемых диапазонах $\rho_0 < \rho_*$ и

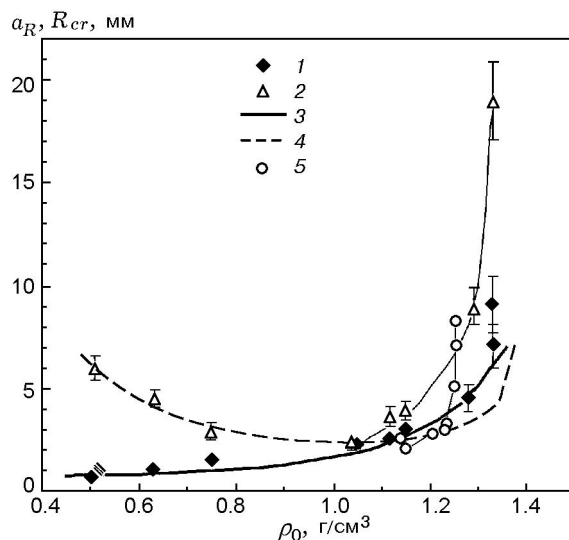


Рис. 5. Влияние плотности эмульсионного ВВ на критический диаметр и ширину зоны реакции:

1 — ширина зоны реакции, 2 — критический радиус, 3 — расчет $a_R(\rho_0) = l \exp[b(\rho_0/\rho_*)^{2m+1}]$, 4 — расчет $R_{cr} = f_2(\rho_0)$ по [18], 5 — данные [6]

$\rho_0 > \rho_*$ прямо противоположно, причем на границах диапазонов по плотности критический радиус R_{cr} существенно больше ширины зоны реакции. Если количественное несоответствие соотношения (1) экспериментальным данным при высоких плотностях ВВ отмечалось неоднократно [12, 13], то качественное несоответствие (1) экспериментальным данным при низкой плотности $\rho_0 < \rho_*$ отмечено впервые.

Для описания U-образной зависимости критического диаметра от плотности для ЭмВВ в [18] предложен простой подход, основанный на моделях взрывного горения или «горячих точек», который для ЭмВВ имеет право на существование, по-видимому, только при достаточно большом содержании сенсibilизатора. На рис. 5 приведена кривая (4), рассчитанная по формуле (10) из [18]. Видно, что этот подход описывает результаты эксперимента при $\rho_0 \lesssim 1.1 \text{ г/см}^3$, но при более высоких плотностях не работает, предсказывая значения до 3 раз меньше экспериментальных. По-видимому, это связано с тем, что при повышении плотности число «горячих точек» уменьшается (в пределе для чистой эмульсии оно равно нулю) и процесс детонационного превращения для ЭмВВ приближается к нормальному тепловому взрыву, для которого основную роль

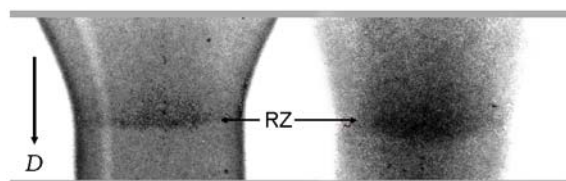


Рис. 6. Рентгенограммы детонирующего заряда эмульсионного ВВ в трубке из полиэтилена размером $\varnothing 21/23$ мм:

RZ — зона реакции; слева — $\rho_0 = 0.51$ г/см³, справа — $\rho_0 = 1.27$ г/см³

Сравнение размера зоны уплотнения за фронтом детонации, определенной по рентгенограммам, с шириной зоны реакции, измеренной интерферометром VISAR

ρ_0 , г/см ³	D , км/с	$p_{СД}$, ГПа	RZ, мм	
			рентген	интерферометр
0.5	2.0	0.6	1.2	1.0
1.05	4.5	5	3.0	2.5
1.27	5.5	9.5	5.0	4.5

играет средняя температура ударного разогрева эмульсии за фронтом ударной волны, ведущей детонацию, как и для других гомогенных ВВ [12].

Для дополнительного контроля увеличения ширины зоны реакции использовано импульсное рентгенографирование с экспозицией менее 1.5 нс. На рис. 6 приведены фотографии детонирующего заряда ЭМВВ плотностью 0.51 (слева) и 1.27 г/см³ (справа). При низкой плотности ЭМВВ детонационный фронт виден как «узкая» зона почернения, при высокой плотности — в виде относительно «широкой» чечевицеобразной области. Эти зоны почернения (области повышенной плотности продуктов взрыва) можно интерпретировать как соответствующие зоне реакции. Результаты рентгеновского измерения «ширины» RZ этих зон на оси заряда согласуются с данными измерений лазерным интерферометром (см. таблицу). Это соответствие является подтверждением того, что ширина зоны реакции ЭМВВ растет при увеличении начальной плотности композиции.

Приведем оценки ряда параметров для эмульсионных композиций. В исследуемом диапазоне начальных плотностей детонационное давление $p_{СД} = \rho_0 D u_{СД}$ изменяется в 19 раз,

от 0.6 до 11.6 ГПа, и результаты описываются почти кубической степенной зависимостью (рис. 7, а, линия 4). Расчетные значения показателя n увеличиваются от 2.5 до $3.0 \div 3.3$ по мере роста плотности при среднем значении $n \approx 3$ (рис. 7, б). Массовая скорость продуктов взрыва $u_{СД}$ за фронтом детонации, вычисленная методом p - u -диаграмм, линейно растет от 0.4 до 1.4 км/с при увеличении плотности ВВ (рис. 7, в). Величина $D - u_{СД}$ является оценкой сверху скорости звука в зоне реакции и увеличивается от 1.4 до 4.5 км/с. Детонационная энергия Q , рассчитываемая из соотношения $D^2 = 2Q(n^2 - 1)$, для рассматриваемых ЭМВВ увеличивается в 5 раз, от 0.4 до 2.1 кДж/г в диапазоне плотностей $0.5 \div 1.33$ г/см³ (рис. 7, г).

Для сравнения на рис. 7 приведены аналогичные данные для широко применяемого в России промышленного ЭМВВ плотностью $\rho_0 = 1.12$ г/см³ — порэмита, близкого по составу к исследуемой композиции [3]. С точностью до разброса данных результаты близки.

Взрывной процесс. В двух опытах заряды ЭМВВ плотностью $\rho_0 = 1.33$ и 1.37 г/см³ ($\mu = 1$ и 0.5 %) были заключены в стальную оболочку диаметром 48/58 мм. В обоих случаях зарегистрирован процесс со скоростью $3.4 \div 3.6$ км/с (см. рис. 1) без «химпика»: на рис. 2, г приведен профиль $u(t)$ при $\mu = 0.5$ %. Продукты взрыва движутся со скоростью ≈ 550 м/с, давление во фронте ведущей ударной волны ≈ 2 ГПа. При этом выделяется энергия ≈ 0.2 кДж/г, около 10 % от предполагаемых 2 кДж/г (экстраполяция данных рис. 7, г). Очевидно, что диаметр заряда недостаточно велик для реализации нормальной детонации со скоростью ≈ 6 км/с.

Поэтому были поставлены опыты с увеличенным диаметром заряда при $\rho_0 = 1.33$ г/см³. В первом опыте ($d = 115$ мм, $L = 200$ мм, оболочка — 3-миллиметровая труба из дюралюминия) профиль давления на границе ЭМВВ / эпоксидная смола регистрировался при помощи манганинового датчика. Получено $t_R \approx 1.6$ мкс. Во втором опыте ($d = 90$ мм, оболочка — 3-миллиметровая труба из полипропилена) длина заряда была увеличена до $L = 400$ мм. По результатам измерений при помощи интерферометра получено $t_R \approx 2.0$ мкс (см. рис. 2, г). В обоих случаях диаметр заряда в 2–3 раза превышал критический диаметр и регистрировался детонационный процесс со

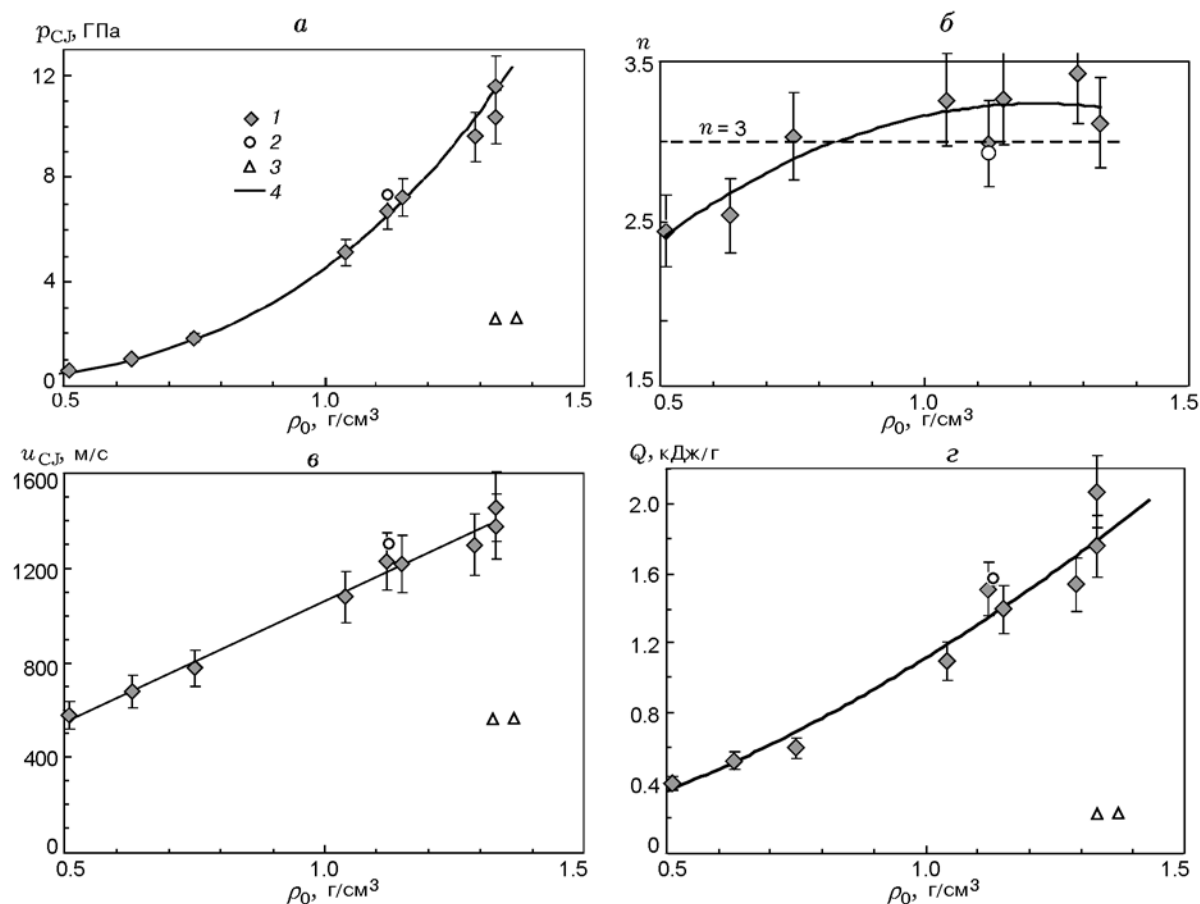


Рис. 7. Зависимость давления детонации (а), показателя политропы продуктов взрыва (б), массовой скорости (в) и энергии детонации (г) от плотности эмульсионного ВВ:

1 — детонация, 2 — порэмит [3], 3 — взрывной процесс, 4 — расчет по формуле (3)

скоростью $6.0 \div 6.1$ км/с с нечетко выраженной точкой перегиба.

Возможная интерпретация. Эмульсионная матрица — однородная система, способная к экзотермическому превращению. И если матрица способна взрываться, то это должно происходить по механизму нормального теплового взрыва с периодом индукции, определяемым энергией активации и средней температурой композиции \bar{T} . Однако в ЭмВВ в 1 см^3 эмульсии содержится порядка $1 \div 10$ млн микробаллонов размером ≈ 60 мкм ($\mu = 1 \div 50 \%$). После взаимодействия ударной волны с порой формируется «горячая точка», температура которой $1000 \div 3500$ К гораздо выше температуры ударно-сжатой эмульсии $300 \div 600$ К, окружающей поры, что показывают расчеты [9, 15, 17]. Но этой температуры недостаточно для взрывного превращения эмульсии за время порядка 1 мкс. Дополнительный подогрев эмульсии

до $\bar{T} \approx 1500 \div 2000$ К [9, 15] происходит за счет образования кумулятивных микроскопических струй и внутреннего вязкого трения вещества эмульсии при коллапсе микробаллонов. При увеличении ρ_0 число локальных источников тепла сокращается и средняя температура эмульсии может уменьшаться. В результате скорость взрывного горения может оставаться почти постоянной: увеличивается за счет роста давления, но уменьшается за счет понижения средней температуры. Возможно, для ЭмВВ влияние температуры за детонационным фронтом на скорость реакции гораздо существеннее, чем влияние давления, особенно для низкоплотных ВВ с низким детонационным давлением. Поэтому ЭмВВ с низкоплотным сенсibilizатором относятся к неоднородным композициям, в которых реализуется вырожденный тепловой взрыв гетерогенно нагретой среды, без четко выраженного периода индукции.

Увеличение ширины зоны реакции с ростом плотности ЭмВВ качественно может быть объяснено в рамках диффузионной модели, согласно которой в композитных ВВ типа окислитель/горючее скорость реакции за фронтом детонации контролируют диффузионные процессы. Эта идея, по-видимому, впервые была высказана в [19] при объяснении особенностей детонации ВВ с большим содержанием аммиачной селитры и реализована в модели [20], согласно которой скорость детонации, детонационное давление, ширина зоны реакции в зареде достаточно большого диаметра при увеличении ρ_0 изменяются следующим образом:

$$D(\rho_0)/D_* = (\rho_0/\rho_*)^m, \quad (2)$$

$$p_{CJ}(\rho_0) = p_0(\rho_0/\rho_*)^{2m+1}, \quad (3)$$

$$a_R(\rho_0) = l \exp[b(\rho_0/\rho_*)^{2m+1}]. \quad (4)$$

Нижним индексом * отмечены нормирующие величины, соответствующие значению плотности ρ_* , а параметры l , b имеют вполне определенный физический смысл в рамках диффузионной модели и слабо зависят от плотности ВВ [20]. Из (3), (4) следует, что ширина зоны реакции экспоненциально растет при увеличении начальной плотности ЭмВВ:

$$a_R(\rho_0) = l \exp[b(p_{CJ}/p_0)]. \quad (5)$$

Обработка данных рис. 1 в соответствии с уравнением (2) дает значение $m = 1.12$ при $\rho_* = 1.09$ г/см³ и $D_* = 4.81$ км/с (кривая 2 на рис. 1). Кривая 4 на рис. 7,а построена по (3) при $p_0 = 4.53$ ГПа. Кривая 3 на рис. 5 построена по уравнению (4) при $l = 0.7$ мм, $b = 1.12$ (для ANFO $b = 2.2 \div 3.0$ [20]). На рис. 8 в полулогарифмических координатах представлены результаты по зависимости ширины зоны реакции от детонационного давления, для сравнения приведены данные для гексогена из [12]. Экспериментальные данные для ЭмВВ удовлетворительно описываются уравнением (5): $a_R(\rho_0) \approx 0.86 \exp(0.19p_{CJ})$. Видна качественная разница в поведении зависимости $a_R(\rho_0)$ для композитного и мономолекулярного ВВ, а также отрицательная роль давления для скорости реакции в ЭмВВ. Очевидно, разные факторы контролируют скорость взрывного превращения для композитного и мономолекулярного ВВ.

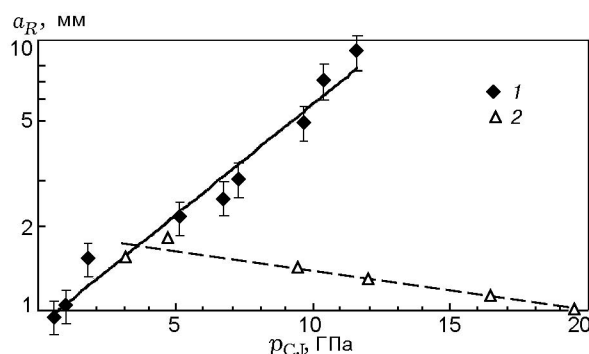


Рис. 8. Влияние давления детонации на ширину зоны реакции:

1 — ЭмВВ, указана 15%-я погрешность; 2 — гексоген, $a_R(\rho_0) \approx 1.88 \exp(-0.03p_{CJ})$

Таким образом, диффузионная модель удовлетворительно объясняет не только увеличение ширины зоны реакции для эмульсионного ВВ, но и немонотонное поведение скорости детонации при увеличении плотности композитного ВВ, если для зависимости $D(d)$ использовать известное уравнение Эйринга и выражение (4) для ширины зоны реакции.

Несколько слов о возможных механизмах диффузии во фронте детонации. Это либо перенос активных свободных атомов кислорода [20] и натрия (при использовании натриевой селитры), образующихся при разложении окислителя и необходимых для «сгорания» горючего, либо турбулентный прогрев элементов эмульсии, стимулированный микроструями из «горячих точек», до температуры взрывчатого превращения. Турбулентный тепло- и массоперенос может значительно ускорить взрывное превращение.

Без объяснения остается другой результат: различное поведение критического диаметра и ширины зоны реакции, измеряемой на оси цилиндрического заряда, при уменьшении плотности ЭмВВ до 0.5 г/см³. Возможно, при большом содержании инертного сенсбилизатора — стеклянные микробаллоны от 10 до 50 % (по массе) — этот факт связан с большими потерями детонационной энергии на нагрев и разгон материала физического сенсбилизатора до величин, характерных для детонации, но эти потери в модели [20] не учитываются.

Интересно отметить, что при заключении заряда ЭмВВ плотностью 0.5 г/см³ в стальную оболочку критический диаметр уменьшается почти в 8 раз, с 13 до 1.7 мм, как и для

вторичных мономолекулярных ВВ [21]. Параметры в точке Чепмена — Жуге практически не изменяются (см. рис. 2, а, профиль 2). Стальная оболочка сводит к минимуму, практически к нулю, потери детонационной энергии за счет боковой разгрузки. Но выделяющейся энергии в зоне реакции порядка 0.4 Дж/г хватает на поддержание детонационного процесса в низкоплотном ЭмВВ. По-видимому, в этом случае реализуется предельный режим детонации эмульсионного ВВ с минимальными значениями ширины зоны реакции, критического диаметра, детонационного давления и скорости детонации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены экспериментальные данные по времени и ширине зоны реакции, измеряемым на оси цилиндрического заряда, и по критическому диаметру детонации при изменении начальной плотности эмульсионного ВВ в диапазоне $0.5 \div 1.33$ г/см³. Показано, что ширина зоны реакции монотонно растет при увеличении плотности эмульсионного ВВ, а для критического диаметра характерна U-образная зависимость критического диаметра от плотности. Качественная корреляция между этими двумя важнейшими характеристиками эмульсионного ВВ, следующая из соотношения Харитона, в общем случае отсутствует. Существуют основания считать, что детонационное превращение для эмульсионных ВВ контролируют диффузионные процессы и температурный фактор в отличие от индивидуальных мономолекулярных ВВ, для которых основным фактором, контролирующим скорость взрывного превращения, является давление за фронтом ведущей ударной волны.

Возможно, для низкоэнергетических детонационных процессов, которые характерны для низкоплотных эмульсионных ВВ с большим количеством физического сенсibilизатора, значение критического диаметра прямо не связано с шириной зоны реакции на оси заряда. По-видимому, необходим иной подход к анализу такой связи в случае ВВ с большими потерями энергии на нагрев и ускорение материала физического сенсibilизатора до параметров, соответствующих детонационной волне. Реализованный пример иллюстрирует сложную природу критического диаметра композитных ВВ, которые содержат и реагирующий компонент,

и большое количество химически инертного компонента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee J., Persson P. A. Detonation behavior of emulsion explosives // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. — 1990. — N 15. — P. 208–216.
2. Сильвестров В. В. О зависимости скорости детонации от плотности для ряда взрывчатых веществ // *Физика горения и взрыва*. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 116–124.
3. Соснин В. А., Колганов Е. В. Исследование процесса детонации в эмульсионных промышленных взрывчатых веществах // V Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. — С. 288–297.
4. Шведов К. К., Лавров В. В. Параметры детонации эмульсионных ВВ // *Проблемы взрывного дела: сб. ст. и докл.* — М.: Изд-во МГГУ, 2002. — № 1. — С. 90–99.
5. Hirotsaki Y., Murata K., et al. Detonation characteristics of emulsion explosive as function of void size and volume // *Proc. 12th Intern. Detonation Symp., San Diego, California, 2002*.
6. Сильвестров В. В., Пластинин А. В. и др. Влияние плотности эмульсионного ВВ на ширину зоны реакции // VII Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: ВНИИЭФ, 2005. — С. 132–137.
7. Silvestrov V. V., Plastinin A. V., et al. Investigation of low detonation velocity emulsion explosives and application to explosive welding // *Proc. 14th Intern. Detonation Symp., April 11–16, 2010, Coeur d'Alene, Idaho*. — P. 507–517.
8. Колесников С. А., Лавров В. В. и др. Экспериментальное исследование структуры детонационных волн в эмульсионных ВВ // VII междунар. конф. «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике»: тез. докл. — Новосибирск, 2010. — С. 216–217.
9. Yoshida M., Iida M., et al. Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // *Proc. 8th Intern. Symp. on Detonation, Albuquerque, 1985*. — P. 171–177.
10. Сильвестров В. В., Пластинин А. В. Исследование низкоскоростных эмульсионных взрывчатых веществ // *Физика горения и взрыва*. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 124–133.
11. Харитон Ю. Б. О детонационной способности взрывчатых веществ // *Вопросы теории взрывчатых веществ. Книга первая*. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. — С. 7–29.
12. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
13. Кравцов В. В., Сильвестров В. В. Влияние низкой температуры на параметры детонации литого тротила // *Физика горения и взрыва*. — 1979. — Т. 15, № 3. — С. 119–124.

14. **Dolan D. H.** Foundations of VISAR analysis // Sandia Report SAND2006-1950. — 2006.
15. **Lee J., Sandstrom F. W., et al.** Detonation and shock initiation properties of emulsion explosives // Proc. 9th Intern. Detonation Symp., Portland, Oregon, 1989. — P. 263–271.
16. **Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф. и др.** Экспериментальные данные по ударно-волновому и адиабатическому расширению конденсированных веществ. — 2-е изд. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
17. **Cooper J., Leiper A. G., Neilson W. G.** Molecular and microscopic structural effects in the detonation of fluid explosives // Proc. 12th Intern. Detonation Symp., San Diego, California, 2002.
18. **Кобылкин И. И.** Критический диаметр детонации зарядов промышленных взрывчатых веществ. Влияние оболочки // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 1. — С. 108–114.
19. **Cook M. A.** The Science of High Explosives. — N. Y.: Reynolds Publ., 1958. — P. 141.
20. **Gordon W. E.** Detonation limits in composite explosives // 10th Symp. (Intern.) on Combustion, August 17–21, 1964. — P. 833–838.
21. **Пластинин А. В., Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Сильвестров В. В.** Критический диаметр низкоскоростного эмульсионного взрывчатого вещества в оболочке // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 6. — С. 107–110.

Поступила в редакцию 9/IX 2011 г.
