

## О ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ОТ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ РЯДА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. В. Сильвестров

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, silver@hydro.nsc.ru

Немонотонная зависимость скорости детонации цилиндрического заряда от плотности для взрывчатых веществ 2-го типа обусловлена влиянием конечного диаметра заряда и связана с увеличением ширины зоны реакции при уменьшении пористости взрывчатых веществ.

Ключевые слова: ВВ 2-го типа, скорость детонации, плотность, эмульсионное взрывчатое вещество.

### ВВЕДЕНИЕ

Разделение вторичных взрывчатых веществ (ВВ) на две большие группы было введено в [1]. Для ВВ 1-го типа, к которым относятся в основном мощные мономолекулярные ВВ (тротил, гексоген и др.), критический диаметр стационарной детонации уменьшается с увеличением плотности ВВ. Для ВВ 2-го типа, наоборот, критический диаметр увеличивается при уменьшении пористости ВВ. Представителями этой группы являются, например, аммиачная селитра, перхлорат аммония и ряд смешанных промышленных ВВ: АСДТ, эмульсионные ВВ и др. [1–3].

Для ВВ 1-го типа скорость детонации  $D$  цилиндрического заряда диаметром  $d$  монотонно растет при увеличении плотности  $\rho_0$  взрывчатого вещества. Для ВВ 2-го типа скорость детонации сначала растет при уменьшении пористости ВВ, достигает максимума, а затем уменьшается, вплоть до прекращения детонации при так называемой критической плотности [1]. В ряде работ немонотонное поведение зависимости  $D(\rho_0)$  для смешанных ВВ связывается с затрудненной фильтрацией взрывных газов, поглощением энергии детонационной волны инертными добавками, многостадийностью взрывного превращения отдельных компонентов, неполным перемешиванием продуктов взрыва компонентов, их ударно-волновым взаимодействием и рядом других причин в рамках теории взрывного горения [3–6]. Считается, что при уменьшении пористости ВВ скорость детонации сначала

растет за счет увеличения удельной энергии взрыва  $Q$ , так как  $D \sim \sqrt{Q}$ , а затем по указанным выше причинам уменьшается. В [7] сделана попытка объяснить немонотонное поведение зависимости  $D(\rho_0)$  уменьшением удельного выделения энергии за счет неполноты взрыва при увеличении плотности эмульсионного ВВ (ЭВВ). Но в ряде работ утверждается обратное: неполнота взрыва ЭВВ уменьшается при увеличении плотности [8–10]. В [7] не учитывалось влияние диаметра цилиндрического заряда ВВ, хотя данные опыта прямо указывали: диаметр заряда существенно влияет на результаты измерений и при разных диаметрах наблюдается значительное количественное различие для кривых  $D(\rho_0, d)$ .

Существовало и иное объяснение рассматриваемого эффекта. В работе [6], по-видимому, впервые обращено внимание на то, что немонотонное поведение зависимости  $D(\rho_0)$  для ряда промышленных ВВ может быть связано с увеличением критического диаметра при увеличении плотности. В [9] немонотонное поведение скорости детонации для ЭВВ объяснялось конкуренцией двух эффектов: с одной стороны, с ростом плотности увеличиваются и удельное энерговыделение, и скорость детонации; но, с другой стороны, при уменьшении пористости увеличивается ширина зоны реакции ЭВВ, вследствие чего растет влияние боковой волны разгрузки со свободной поверхности заряда и, соответственно, скорость детонации падает. Но количественное описание эффекта отсутствовало.

По мнению автора, основная причина немонотонного поведения зависимости  $D(\rho_0)$  для ВВ 2-го типа связана с увеличением ширины зоны реакции при увеличении плотно-

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта СО РАН № 118 и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-03-32373) и фонда Президента РФ (грант НШ-8583.2006.1).

сти ВВ, а увеличение критического диаметра объясняет срыв детонации. Используемые ранее объяснения обсуждаемого эффекта [3–6], безусловно, вносят свой, но только дополнительный вклад. В данной работе предлагается простая модель для количественного объяснения зависимости  $D(\rho_0, d)$ . Приведены примеры описания экспериментальных кривых  $D = D(\rho_0, d)$  для эмульсионных и ряда других ВВ 2-го типа.

### ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для учета влияния диаметра заряда на скорость детонации  $D(d, \rho_0)$  для ВВ с плотностью  $\rho_0$  воспользуемся хорошо известным уравнением Эйринга [11]:

$$D(d, \rho_0) = D_i(\rho_0)[1 - A_R(\rho_0)/d], \quad (1)$$

где  $D_i$  — «идеальная» скорость детонации заряда бесконечного диаметра;  $A_R$  — величина, пропорциональная истинной ширине зоны реакции  $a_R$ . Это соотношение подвергалось критике (см. [12]), так как оно, во-первых, предполагает независимость величины  $A_R$  от диаметра заряда ВВ, в то время как измерения ширины зоны реакции  $a_R$  электромагнитным методом показывают, что значение  $a_R$  увеличивается с уменьшением  $d$ ; во-вторых, оно не соответствует концепции существования предельного диаметра [13]. В то же время соотношение (1) или его модификация [14] очень хорошо описывают экспериментальные данные для различных ВВ в координатах  $(D, 1/d)$ . По-видимому, существует проблема установления функциональной связи величины  $A_R$  с измеряемой шириной зоны реакции  $a_R$ . Ниже для  $A_R$  будет использоваться термин «ширина зоны реакции по Эйрингу».

Зависимость «идеальной» скорости детонации (при  $d \rightarrow \infty$ ) от плотности считается известной и задается, например, соотношением

$$D_i(\rho_0) = a + b\rho_0, \quad (2)$$

где  $a, b$  — параметры, определяемые выделением энергии в детонационном процессе. Скорость детонации  $D_i$  рассчитывается по уравнению состояния продуктов взрыва с учетом химического состава ВВ и возможных потерь при наличии инертных компонентов, или значения  $D_i$  получаются путем оценки из приближения экспериментальных данных в координатах  $(D, 1/d)$  уравнением (1).

Соотношение (1) предполагает, что ширина зоны реакции по Эйрингу зависит от плотности ВВ. Для определения искомой зависимости рассмотрим следующую модель пористого ВВ на примере эмульсионного ВВ, так как для такого ВВ 2-го типа достаточно четко определены параметры «пор» и имеется множество надежных данных, позволяющих проверить модель. Пористость  $\phi$  ЭВВ определяется выражением

$$\phi = \frac{\rho_e - \rho_0}{\rho_e - \rho_{mb}} \sim n\delta^3, \quad (3)$$

где  $\rho_e$  — плотность беспористой эмульсии (или максимально возможная плотность ВВ),  $\rho_{mb}$  — плотность пор (для пористого ВВ с «пустыми» порами  $\rho_{mb} = 0$ ),  $\delta$  — средний размер поры,  $n$  — число пор в единичном объеме. Отсюда  $n \sim \phi\delta^{-3}$ , и среднее расстояние между порами  $L \sim n^{-1/3} \sim \delta/\phi^{1/3}$ . При детонации физически неоднородного ВВ поры играют роль «горячих точек», в которых начинается реакция взрывного превращения.

Предположим, что ширина зоны реакции по Эйрингу пропорциональна расстоянию между порами, так как ВВ в промежутке между порами должно «сгореть» за время реакции. Это предположение косвенно подтверждается тем, что критический диаметр ЭВВ линейно растет при увеличении среднего расстояния между порами [9, 10], т. е.

$$A_R \sim L \sim n^{-1/3} \sim \delta/\phi^{1/3}. \quad (4)$$

Ударно-волновое взаимодействие неоднородностей, очагов реакции, приводит к появлению дополнительных «горячих точек», в результате роль размера исходной поры уменьшается, а эффективное число пор значительно увеличивается (концепция «hydrodynamic hot spot») [15]. Поэтому соотношение (4) можно записать в более общем виде как произведение двух степенных функций:

$$A_R \approx A_0(\delta/\delta_0)^\alpha \phi^{-\beta}, \quad (5)$$

где  $A_0 > 0$ ,  $1 > \alpha > 0$ ,  $\beta > 1/3$  — три параметра модели, которые должны выбираться из условия наилучшего описания экспериментальных данных. Константа обезразмеривания  $\delta_0$  выбирается произвольно, например, как средний размер пор в рассматриваемом диапазоне изменения  $\delta$ . Если зависимость от размера пор (или плотности ВВ) не рассматривается, то

Параметры модели

№ п/п	Взрывчатое вещество	$A_0$ , мм	$\beta$
1	ЭВВ: АС + НС	0.14	1.70
2	ЭВВ: АС + КС	0.24	1.86
3	ЭВВ: АС	0.48	1.2
4	ЭВВ: АС + НС	0.18	1.9
5	Порэмит	0.26	1.445
6	Шеддит	1.67	0.94
7	Аммонал 80/20	1.8	2.5
8	Перхлорат аммония	2.1	1.55
9	Игданит	4.5	2.3

Примечание. АС — аммиачная селитра, НС — натриевая селитра, КС — кальциевая селитра.

имеется только два свободных параметра —  $A_0$  и  $\beta$  (или  $A_{01}$  и  $\alpha$ ):

$$A_R \approx A_0 \phi^{-\beta} \quad (6)$$

или

$$A_R \approx A_{01} \left( \delta / \delta_0 \right)^\alpha. \quad (7)$$

Из (5) следует, что при  $\phi \rightarrow 0$  ширина зоны реакции по Эйрингу стремится к бесконечности. Это соответствует экспериментальным фактам для ВВ 2-го типа: введение понятия «критическая плотность», эмульсия без сенсибилизатора не взрывается [8], ничего не известно о возможности взрыва, например, монокристаллов аммиачной селитры или перхлората аммония. Из (5) также следует, что при уменьшении пористости ЭВВ ширина зоны реакции должна увеличиваться. Этот вывод подтверждается многочисленными оценками величины  $A_R$  [2, 8, 9] и непосредственными измерениями ширины зоны реакции  $a_R$  для ЭВВ вблизи критической плотности [16]. Из модели (1)–(3), (5)–(7) следует, что для ВВ 2-го типа должна наблюдаться немонотонная зависимость  $D(\rho_0)$  с максимумом, причем координаты максимума (значения скорости и плотности) зависят от диаметра ВВ и размера пор. Причина — конкуренция упомянутых выше двух основных эффектов [9].

Хорошо известно, что увеличение ширины зоны реакции сопровождается соответствующим

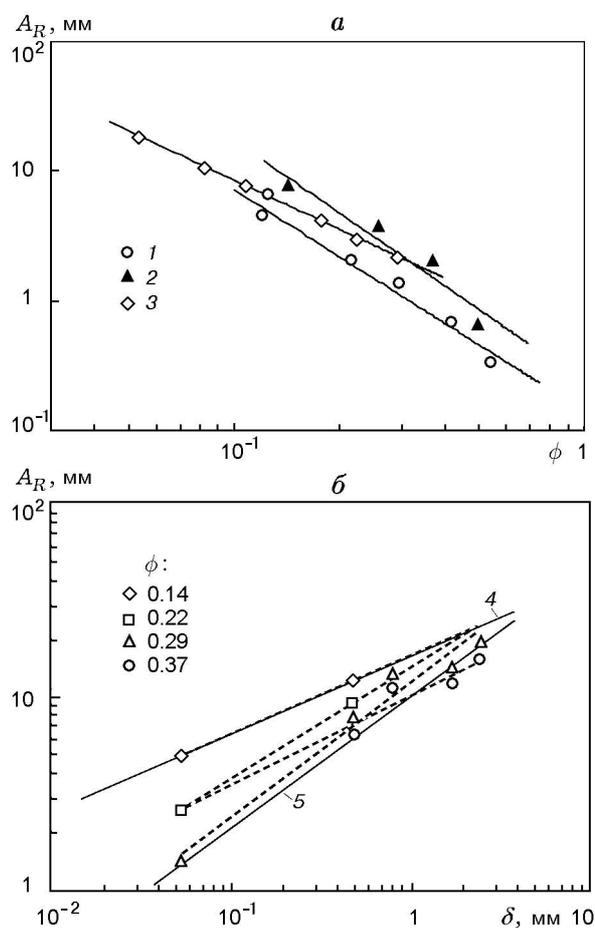


Рис. 1. Зависимость величины  $A_R$  от пористости (а) и размера «пор» (б):

а: 1 — аммиачная и натриевая селитры, 2 — аммиачная и кальциевая селитры, 3 — аммиачная селитра; б — данные работы [10], сплошные линии — аппроксимация функциями (6) и (7) при  $\alpha = 0.35$  (4) и  $\alpha = 0.7$  (5)

увеличением критического диаметра стационарной детонации:  $d_f \sim a_R$  (принцип Харитона), т. е. в рамках модели для ВВ 2-го типа критический диаметр является возрастающей функцией плотности. Например, в [8] для ЭВВ наблюдалось увеличение  $d_f$  примерно в 7 раз при изменении плотности ВВ всего на 7 %, от 1.23 до 1.32 г/см<sup>3</sup>. Но при определении зависимости  $D(\rho_0)$  диаметр заряда ВВ остается постоянным. Поэтому при увеличении плотности ВВ всегда при некотором значении  $\rho_0 = \rho_{cr}$  выполняется условие  $d_f(\rho > \rho_{cr}) > d = \text{const}$ , и стационарная детонация прекращается. Значение плотности при срыве детонации и является критической плотностью  $\rho_{cr}(d)$  для данного диаметра заряда ВВ. Ясно, что значение кри-

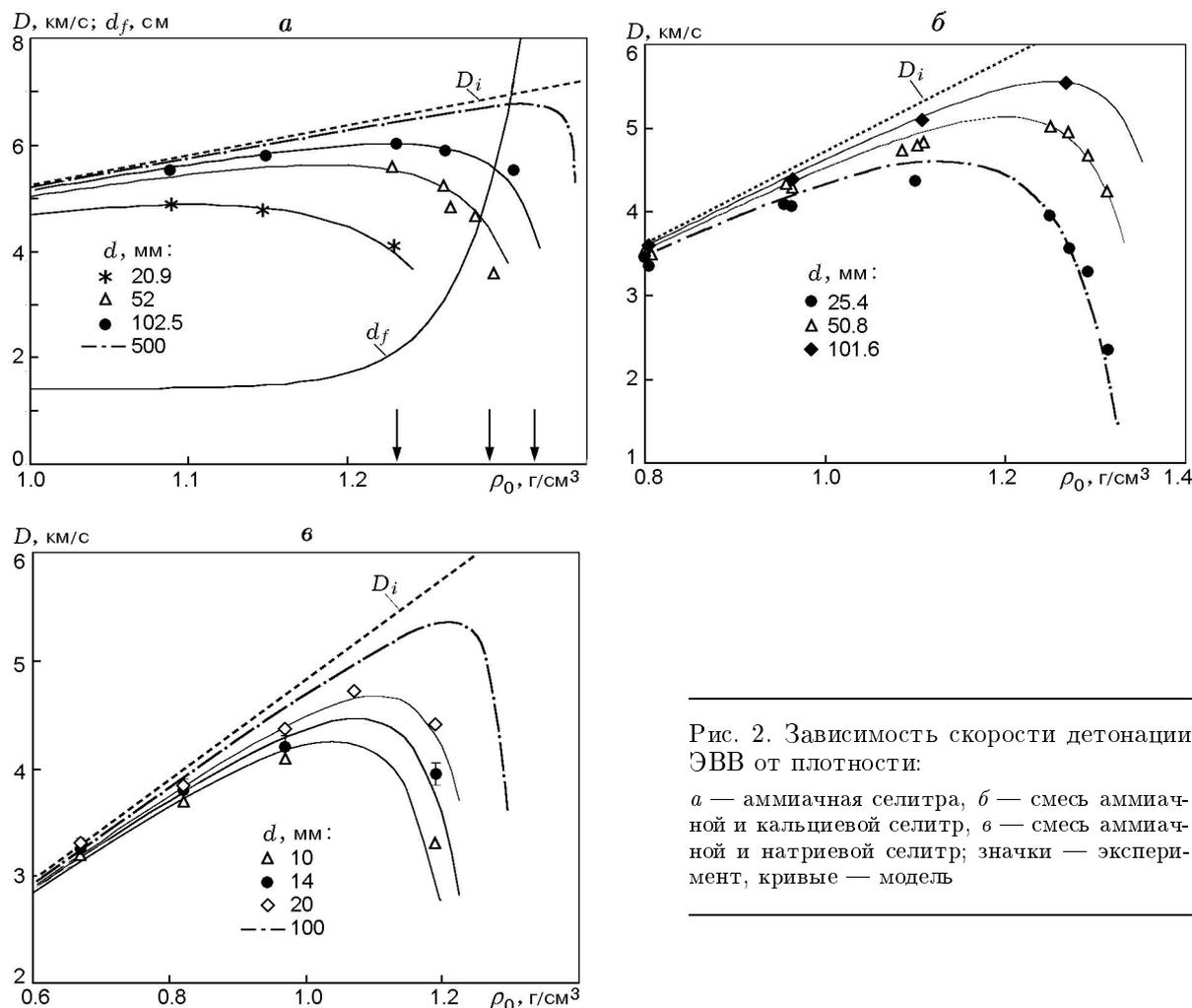


Рис. 2. Зависимость скорости детонации ЭВВ от плотности:

*a* — аммиачная селитра, *б* — смесь аммиачной и кальциевой селитры, *в* — смесь аммиачной и натриевой селитры; значки — эксперимент, кривые — модель

тической плотности тем больше, чем больше диаметр испытываемого ВВ. И если скорость роста  $d_f(\rho_0)$  велика, то скорость роста  $\rho_{cr}(d)$  при увеличении  $d$  будет значительно уменьшаться, что и наблюдается для ЭВВ с газогенерирующей добавкой [17].

### СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Рассмотрим возможности модели, задаваемой уравнениями (1)–(3), (5)–(7), для количественного описания экспериментальных зависимостей  $D = D(\rho_0, d, \delta)$  для эмульсионных и ряда других ВВ 2-го типа. Сопоставление модели с экспериментом проведено прежде всего для эмульсионных ВВ, так как именно для них имеются наиболее полные данные: зависимости  $D = D(\rho_0, \delta, d)$ ,  $d_f(\rho_0)$  и оценки для  $D_i = f(\rho_0)$ . Оценку значений параметров  $A_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  дает приближение соотношениями (6) и

(7) данных по ширине зоны реакции по Эйрингу для ЭВВ, сенсibilизированных микробаллонами из стекла, в зависимости от пористости (рис. 1, *a*) и от размера «пор» из полимерных микробаллонов при  $\phi = 0.14 \div 0.37$  (рис. 1, *б*). Наблюдается вполне адекватное описание результатов простыми степенными функциями. Результаты оценки параметров приведены в таблице и на рис. 1 для ЭВВ на основе аммиачной и натриевой селитры [2] (прямые 1, 4, 5), аммиачной и кальциевой селитры [9] (прямая 2), аммиачной селитры [8] (прямая 3). Значения параметров из таблицы использованы ниже при описании серии кривых  $D = D(\rho_0, \delta, d)$  для конкретных ЭВВ.

Величина параметра  $A_0 \approx 0.1 \div 0.5$  мм характеризует конкретную эмульсию и коррелирует с чувствительностью ВВ к инициированию: ЭВВ с  $A_0 \approx 0.1$  мм инициируется детонатором № 8 и для этого ЭВВ  $d_f < 6$  мм; для ини-

цирования ЭВВ с  $A_0 \approx 0.5$  мм необходим более мощный боевик и для него  $d_f \approx 17$  мм. Корреляция параметра  $\beta$  с другими характеристиками ВВ не замечена: для рассмотренных здесь и ниже взрывчатых материалов  $\beta \approx 0.9 \div 2.5$ , что в 3 ÷ 7 раз превышает значение, следующее из элементарной оценки (4). Параметр  $\alpha \approx 0.35 \div 0.7$  (см. рис. 1, б) в 1.5 ÷ 3 раза меньше оценки (4) и, по-видимому, зависит от пористости ВВ, но ниже эта зависимость во внимание не принималась.

### Влияние плотности ЭВВ

На рис. 2 приведены данные по зависимости скорости детонации от плотности для ЭВВ на основе аммиачной селитры (рис. 2, а) [9], смеси аммиачной и кальциевой селитры (рис. 2, б) [10] и смеси аммиачной и натриевой селитры (рис. 2, в) [2] при изменении диаметра заряда от 10 до 100 мм; в качестве сенсibilизатора использовались нерассеянные микробаллоны из стекла с  $\rho_{mb} = 0.09 \div 0.15$  г/см<sup>3</sup> и средним размером  $\delta_0 \approx 70$  мкм. Данные для «идеальной» скорости детонации  $D_i(\rho_0)$  взяты из цитируемых работ. На рис. 2 представлены результаты расчета по модели, задаваемой уравнениями (1)–(3), (6), с параметрами из первых трех строк таблицы. Видно, что модель описывает все особенности экспериментальных данных:

- правильно передается немонотонное изменение скорости детонации при увеличении плотности и изменении диаметра заряда в широких пределах (в уравнении (1) диаметр рассматривается как задаваемый параметр);
- координаты максимума (скорость детонации и плотность) на зависимости  $D(\rho_0)$  растут при увеличении диаметра заряда ЭВВ;
- в том случае, когда зависимость  $d_f(\rho_0)$  известна, условие срыва детонации правильно предсказывает значения критических плотностей (отмечены стрелками на рис. 2, а и ниже на рис. 4, в);
- критическая плотность увеличивается при увеличении диаметра заряда.

На рис. 2, а, в, 4, в и 5, б приведены расчетные (штрихпунктирные) кривые  $D(\rho_0)$  для зарядов с  $d = 500, 100, 200$  и  $250$  мм соответственно. В рамках обсуждаемой модели немонотонное изменение скорости детонации сохраняется и при больших диаметрах ЭВВ. Но зафиксировать максимум скорости на зависимости  $D(\rho_0)$  не просто, так как модель предсказывает достаточно резкий обрыв детонации при малом увеличении плотности ВВ вблизи максимума. Следует отметить, что данный прогноз не соответствует концепции существования предельного диаметра для промышленных ВВ [13]. Постановка экспериментов при указанных выше диаметрах представляется вполне реальной, и их результаты позволили бы ответить на вопрос, целесообразно ли говорить о «предельном диаметре» для ЭВВ или перхлората аммония (взрывчатых веществ с относительно небольшими значениями  $d_f$ ) и соответствуют ли результаты эксперимента прогнозу по предлагаемой модели.

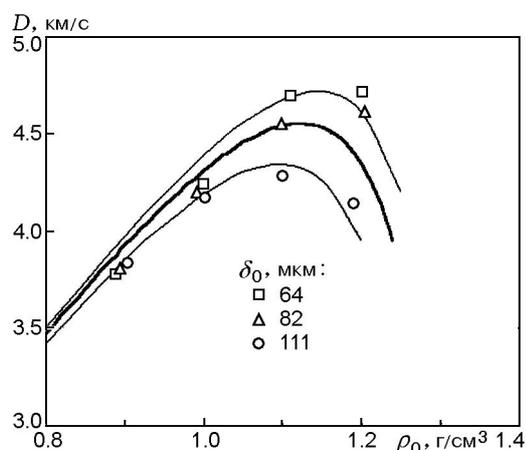


Рис. 3. Влияние размера микробаллонов из стекла на зависимость скорости детонации ЭВВ на основе аммиачной и кальциевой селитры от плотности:

значки — эксперимент, кривые — модель

нотонное изменение скорости детонации сохраняется и при больших диаметрах ЭВВ. Но зафиксировать максимум скорости на зависимости  $D(\rho_0)$  не просто, так как модель предсказывает достаточно резкий обрыв детонации при малом увеличении плотности ВВ вблизи максимума. Следует отметить, что данный прогноз не соответствует концепции существования предельного диаметра для промышленных ВВ [13]. Постановка экспериментов при указанных выше диаметрах представляется вполне реальной, и их результаты позволили бы ответить на вопрос, целесообразно ли говорить о «предельном диаметре» для ЭВВ или перхлората аммония (взрывчатых веществ с относительно небольшими значениями  $d_f$ ) и соответствуют ли результаты эксперимента прогнозу по предлагаемой модели.

### Влияние размера микробаллонов

На рис. 3 показана зависимость скорости детонации ЭВВ на основе смеси аммиачной и кальциевой селитры от плотности ВВ для заряда диаметром 23.6 мм, сенсibilизированного рассеянными полыми микробаллонами из стекла с  $\rho_{mb} = 0.17 \div 0.24$  г/см<sup>3</sup> и  $\delta_0 = 64 \div 111$  мкм [9]. Данные удовлетворительно описываются моделью (четвертая строка таблицы) с  $\alpha = 0.5$ ,  $\delta_0 = 90$  мкм в (7). При увеличении размера микробаллонов значения скорости детонации и плотности, соответствующие максимуму скорости, уменьшаются, так как увеличивает-

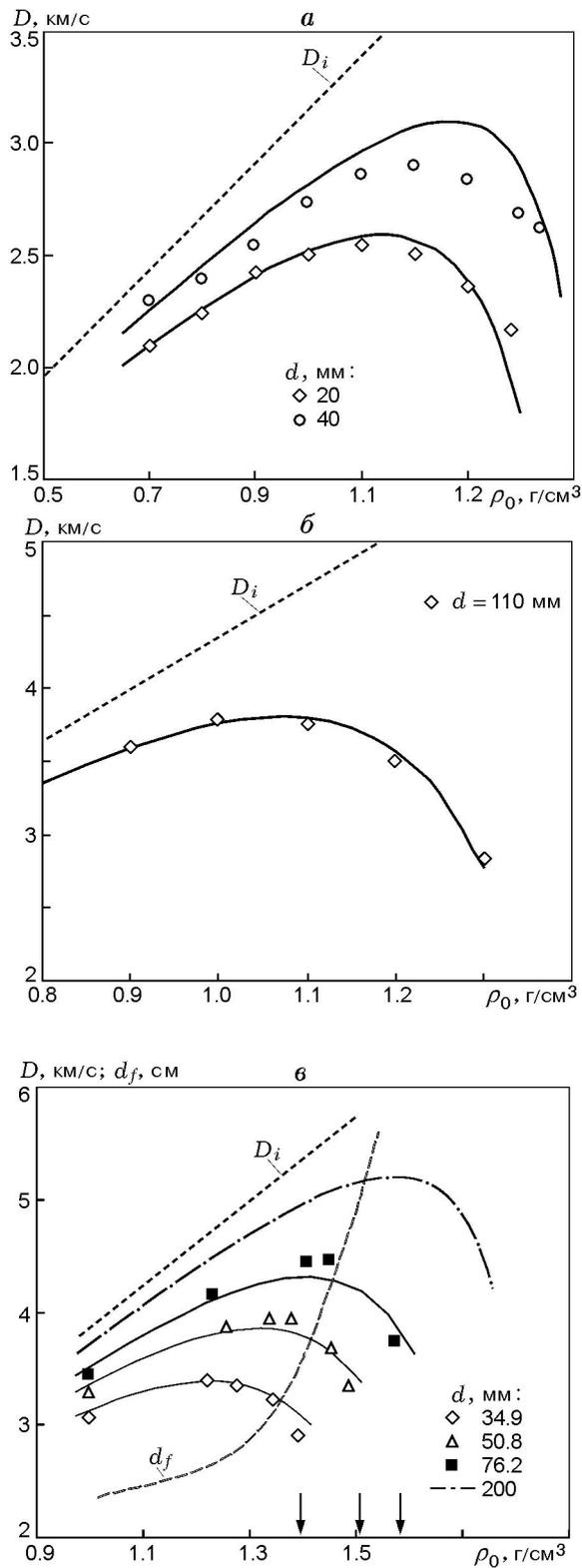


Рис. 4. Зависимость скорости детонации пористых ВВ от плотности:  
 а — шеддит, б — аммонал 80/20, в — перхлорат аммония; значки — эксперимент, кривые — модель

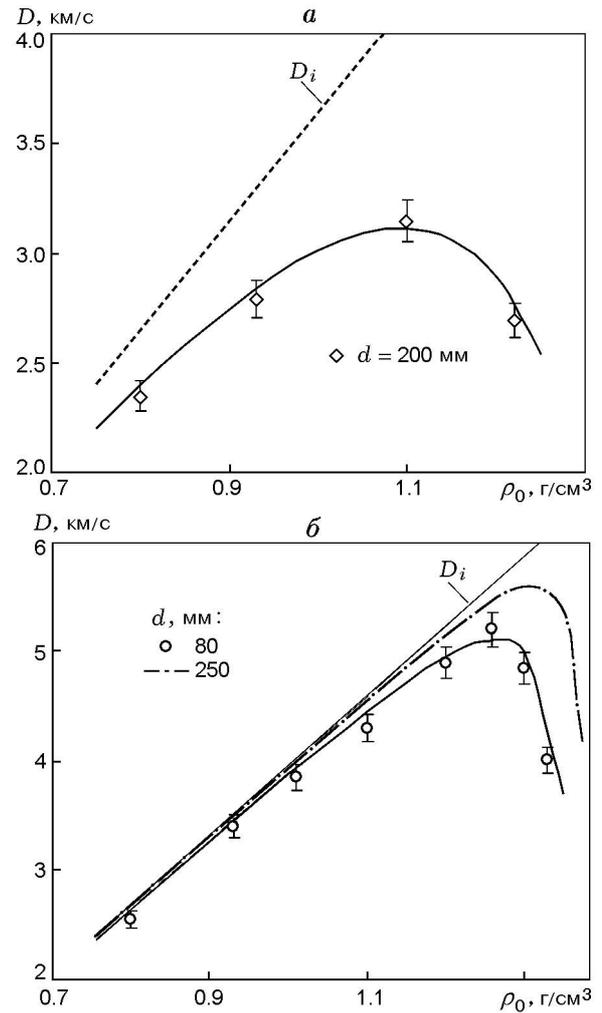


Рис. 5. Зависимость скорости детонации ВВ от плотности:  
 а — игданит, б — порэмит; значки — эксперимент, кривые — модель

ся ширина зоны реакции по Эйрингу, и роль «эффекта диаметра» возрастает. Такое поведение зависимости  $D = f(\rho_0, \delta)$  при постоянном диаметре полностью соответствует экспериментальным данным [9, 18]. Из соотношения (7) следует, что при увеличении среднего размера «пор» в 2 раза ширина зоны реакции увеличивается примерно в 1.5 раза. Качественно ширина зоны реакции увеличивается при увеличении размера микробаллонов за счет охлаждения среды, окружающей «горячую точку», волной разгрузки, генерируемой из центра микробаллона при формировании расходящегося фронта горения.

### Влияние плотности других ВВ

Хорошее качество описания экспериментальных данных достигается и при рассмотрении зависимости  $D(\rho_0)$  для пяти других пористых ВВ 2-го типа (см. рис. 4, 5 и таблицу): шеддита (80 % бертолетовой соли + 13 % монокристаллического азота + 5 % касторового масла + 2 % динитротолуола) при  $d = 20$  и 40 мм (см. рис. 4, а) [19]; аммонала 80/20 (80 % аммиачной селитры + 20 % алюминиевой пудры) при  $d = 110$  мм (см. рис. 4, б) [5]; перхлората аммония при  $d = 35 \div 76$  мм (см. рис. 4, в) [1]; смеси аммиачной селитры и дизельного топлива 94/6 при  $d = 200$  мм (см. рис. 5, а) и ЭВВ с газогенерирующей добавкой при  $d = 80$  мм (см. рис. 5, б) [17]. Ввиду отсутствия данных по зависимости  $D_i(\rho_0)$  для этих ВВ, параметры  $a$ ,  $b$  в уравнении (2) были также подобраны.

Данные для шеддита интересны тем, что получены 100 лет назад, и это было, по видимому, первое в истории наблюдение немонотонного поведения зависимости  $D(\rho_0)$  для смесового ВВ [19]. Анализ данных для аммонала любопытен тем, что в настоящей работе предлагается отличное от [5] объяснение немонотонной зависимости  $D(\rho_0)$ ; в [5] падение скорости детонации при  $\rho_0 > 1.1$  г/см<sup>3</sup> объяснялось поглощением энергии детонационной волны частицами алюминия. Результаты для перхлората аммония носят достаточно полный характер, имеется зависимость  $d_f(\rho_0)$ , и можно рассчитать значения критических плотностей (показаны стрелками на рис. 4, в) для трех диаметров заряда пористого мономолекулярного ВВ 2-го типа [1].

Отметим, что рассматриваемая модель не описывает поведение зависимости  $D(\rho_0)$  для веществ, представляющих смеси ВВ 1-го и 2-го типов, например, для широко распространенных смесей аммиачной селитры и тротила. Например, для аммонита ПЖВ-20 (смесь аммиачная селитра/ТНТ/NaCl) зависимость  $D(\rho_0)$  имеет немонотонный характер при диаметре ВВ менее 60 мм, но при большем диаметре скорость детонации не уменьшается при увеличении плотности ВВ [4]. Для отдельных компонентов аммонита (аммиачной селитры и тротила) зависимости  $d_f(\rho_0)$  прямо противоположные, и вопрос о влиянии «эффекта диаметра» на зависимость  $D(\rho_0)$  для аммонита ПЖВ-20 остается открытым. Безусловно, влияние обсуждаемого эффекта присутствует, так как критический диаметр смеси увеличивается

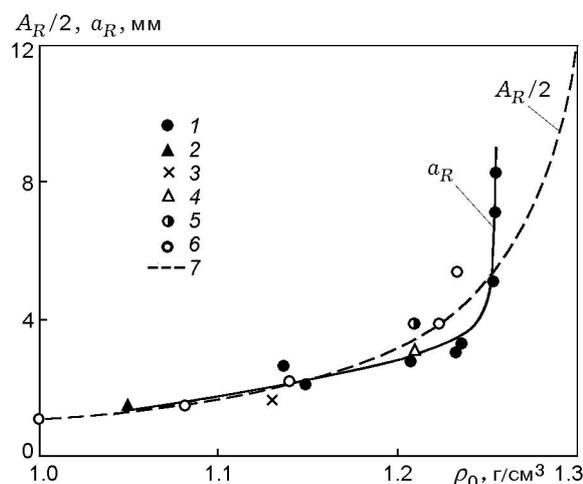


Рис. 6. Зависимость ширины зоны реакции ЭВВ от плотности:

точки — эксперимент: 1 — [16], 2 — [10], 3 — [17], 4 — [20]; 5 — [21], 6 — [8]; 7 — уравнение (6)

при возрастании плотности аммонита [3].

Таким образом, анализ применимости модели (1)–(3), (5)–(7) на девяти примерах (см. таблицу) для описания зависимости  $D(\rho_0)$  показывает: модель адекватно описывает имеющиеся экспериментальные данные, немонотонный характер изменения  $D(\rho_0)$  для ВВ 2-го типа связан в основном с влиянием диаметра заряда ВВ на скорость детонации, которое в первом приближении можно описать уравнением (1). Элементарно объясняется срыв детонации при увеличении плотности ВВ. В случае, когда имеются данные по зависимости  $d_f(\rho_0)$ , удается правильно предсказать и значения критических плотностей. Влияние размера полых микровключений на ход зависимости  $D = D(\rho_0, \delta)$  для ЭВВ также описывается моделью.

### Сравнение величины $A_R$ с шириной зоны реакции

Возникает вопрос: как соотносятся между собой в достаточно широком диапазоне плотностей, особенно вблизи критической плотности, ширина зоны реакции по Эйрингу  $A_R(\rho_0)$  и ширина зоны реакции  $a_R(\rho_0)$ , определяемая экспериментально тем или другим методом для ВВ 2-го типа. На рис. 6 такое сопоставление проведено для ЭВВ: экспериментальные данные относятся главным образом к ВВ на основе аммиачной селитры с микробаллонами из стекла в качестве сенсibilизатора [8, 16, 20]. Дополнительно использованы результаты двух

работ, в которых рецептура ЭВВ иная, но также применяются легкие сенсibilизаторы: газо-генерирующая добавка [17] и полые микробаллоны из полимера [10]. На рис. 6 точки 1–4 указывают данные прямых измерений  $a_R$ ; точки 5, 6 — расчет  $A_R$  по уравнению (1), проведенный в [21, 8]; кривая 7 — расчет  $A_R$  по уравнению (6) с  $A_0 = 0.48$  мм,  $\beta = 1.2$ . При  $\rho_0 < 1.2$  г/см<sup>3</sup> достаточно хорошо выполняется соотношение  $a_R(\rho_0) \approx A_R/2$ . При  $\rho_0 \approx \rho_{cr}$  кривые пересекаются: экспериментальные кривые  $a_R(\rho_0)$  и  $A_R(\rho_0)$  имеют вертикальные асимптоты при  $\rho_0 \rightarrow \rho_{cr}$ , а кривая 7 — при  $\rho_0 \rightarrow \rho_e - \rho_{mb} > \rho_{cr}$ . Наблюдается также явное отклонение расчетных значений  $A_R$  (точки 5, 6) при  $\rho_0 \leq \rho_{cr}$  от кривой 7. Очевидно, что вблизи критической плотности уравнение (6) не описывает экспериментальных данных; возможно, на поведении зависимости  $a_R(\rho_0)$  дополнительно сказывается известное влияние диаметра заряда, точнее, отношения  $d/d_f$  на ширину зоны реакции  $a_R$  при  $d \rightarrow d_f$  [12]. Но теоретическая обоснованная функциональная связь  $a_R|A_R = f(d)$  пока не установлена.

Формальное варьирование зависимости  $A_R(\rho_0)$ : постоянная величина, линейная, билинейная, степенная и немонотонная зависимости — показывает, что с помощью обсуждаемого влияния диаметра заряда ВВ можно объяснить многие особенности поведения зависимостей  $D(\rho_0)$ , наблюдаемые в экспериментах, в том числе и для аммонитов. В первом приближении задача сводится к построению физически обоснованной зависимости ширины зоны реакции  $A_R(\rho_0)|a_R(\rho_0)$  от плотности для заряда бесконечного диаметра, которая может быть уникальной для каждого ВВ, но для этого необходимо знание кинетики детонационного превращения для конкретного ВВ.

В работе не рассматриваются физико-химические причины, приводящие к увеличению ширины зоны реакции и, соответственно, критического диаметра детонации при уменьшении пористости ВВ 2-го типа. Интересовала основная причина немонотонного поведения скорости детонации при увеличении плотности, которое наблюдается для ряда ВВ. Такое объяснение получено, и сформулированный подход позволяет объяснить ряд сопутствующих эффектов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для взрывчатых веществ 2-го типа немонотонное изменение скорости детонации в заряде конечного диаметра при увеличении плотности ВВ обусловлено двумерным «эффектом диаметра», действующим при одновременном увеличении ширины зоны реакции. Срыв детонации связан с увеличением критического диаметра при уменьшении пористости ВВ. При построении физически обоснованных моделей детонации ВВ 2-го типа в заряде конечного диаметра необходимо учитывать конечное значение ширины зоны реакции и сопутствующее влияние «эффекта диаметра».

Автор благодарит С. М. Караханова за обсуждение результатов работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Price D. Contrasting patterns in the behavior of high explosives // Proc. 11th Symp. Intern. on Combustion. 1966. P. 693–702.
2. Yoshida H., Iida M., Tanaka K., et al. Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // Proc. 8th Symp. Intern. on Detonation, 1985. P. 171–177.
3. Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1973. Гл. 3.
4. Дремин А. Н., Шведов К. К., Веретенников В. А. Исследование детонации аммонита ПЖВ-20 и некоторых других ВВ // Взрывное дело. Сб. № 59/20. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Госгортехиздат, 1963. С. 10–25.
5. Светлов Б. Я. О некоторых особенностях взрывного превращения алюмосодержащих взрывчатых веществ // Там же. С. 57–67.
6. Дремин А. Н., Шведов К. К., Кривченко А. Л. и др. Исследование детонации промышленных ВВ. Детонационные характеристики аммонита 6ЖВ // Физ.-техн. проблемы разработки полезн. ископаемых. 1971. № 1. С. 46–51.
7. Дерibas А. А., Медведев А. Е., Решетняк А. Ю., Фомин В. М. Детонация эмульсионных взрывчатых веществ с полыми микросферами // Докл. АН. 2003. Т. 389, № 6. С. 747–748.
8. Lee J., Sandstrom F. W., Craid B. G., Persson P.-A. Detonation and shock initiation properties of emulsion explosives // Proc. 9th Symp. Intern. on Detonation, 1989. P. 263–271.
9. Lee J., Person P.-A. Detonation behavior of emulsion explosive // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1990. V. 15. P. 208–216.
10. Hirosaki Y., Murata K., et al. Detonation characteristics of emulsion explosive as function of void size and volume // Proc. 12th Symp. Intern. on Detonation, 2002.

11. Eyring H., Powell R. E., Duffey G. H., Parlin R. B. The stability of detonation // Chem. Rev. 1949. V. 45. P. 69–181.
12. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
13. Шведов К. К., Пацок В. В. Предельный диаметр и полнота детонационного превращения грубодисперсных промышленных взрывчатых веществ // Хим. физика. 1995. Т. 14, № 2–3. С. 3–14.
14. Campbell A. W., Engelke R. The diameter effect in high density heterogeneous explosives // Proc. Vth Symp. (Intern.) on Detonation, 1976. P. 642–652.
15. Mader C. L. Numerical Modeling of Detonation. Univ. of California Press, 1979.
16. Сильвестров В. В., Караханов С. М., Пластинин А. В., Дерибас А. А. Влияние плотности эмульсионного ВВ на ширину зоны реакции // Труды междунар. конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения», 14–18 марта 2005. Саров: ВНИИЭФ, 2005. С. 132–137.
17. Соснин В. А., Колганов Е. В. Исследование процесса детонации в эмульсионных промышленных взрывчатых веществах // Труды междунар. конф. «V Харитоновские тематические научные чтения», 17–21 марта 2003. Саров: ВНИИЭФ, 2003. С. 288–297.
18. Cooper J., Leiper G. A. Void size dependence of the steady detonation properties of emulsion explosives // J. Energetic Mater. 1989. N 7. P. 405–417.
19. Dautriche H. // Comptes Rendus. 1906. V. 143. P. 643. Цит. по: Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. М.: Наука, 1975. Гл. 8, рис. 8.15.
20. 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.
21. Аншиц А. Г., Аншиц Н. Н., Дерибас А. А. и др. Скорость детонации эмульсионных взрывчатых веществ с пеносферами // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 5. С. 119–128.

*Поступила в редакцию 22/VI 2005 г.*

---