

ISSN 0430-6228

5

СЕНТЯБРЬ – ОКТЯБРЬ

2014



# ФИЗИКА ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН



НОВОСИБИРСК

УДК 534.222.2

# ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ И МЕТАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ОТ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА И СОДЕРЖАНИЯ ДОБАВКИ

В. Ю. Давыдов, А. С. Губин

Научно-исследовательский машиностроительный институт, 125212 Москва  
vitadavidov@yandex.ru, algoubin@yandex.ru

Исследованы зависимости скорости детонации и метательной способности, измеренной по методике М-40, от плотности заряда для алюминизированных взрывчатых веществ с различной массовой долей Al. Сделана оценка доли энергии сгорания Al, реализованной за время химических реакций и время ускорения метаемой пластины. Приведены регрессионные зависимости скорости детонации и метательной способности от плотности заряда. Исследовано влияние добавок дисперсных Al, Ti, Zr и W в количестве  $5 \div 30$  % на скорость детонации высокоплотных зарядов из взрывчатого состава на основе пластифицированного гексогена. Установлено, что снижение скорости детонации при введении различных металлических добавок определяется продольной скоростью звука добавки, а не ее плотностью. Получены простые формулы для расчета параметров детонации высокоплотных металлизированных взрывчатых веществ.

Ключевые слова: скорость детонации, метательная способность, взрывчатые вещества, плотность, скорость звука, дисперсный алюминий.

## ВВЕДЕНИЕ

Зависимости параметров детонации и метательной способности от плотности заряда являются фундаментальными характеристиками взрывчатых веществ (ВВ). Исследованию скорости детонационной волны посвящено значительное количество экспериментальных работ [1–16]. В высокоплотных зарядах смесей мощных ВВ как с отрицательным, так и с положительным кислородным балансом зарегистрировано снижение скорости детонации (а также давления и массовой скорости продуктов детонации) при введении дисперсных металлов. Установлено, что добавки с меньшим размером частиц приводят к большему уменьшению параметров детонации ВВ [2]. При этом инертные добавки (талк, LiF, NaCl) часто дают меньшее снижение, чем добавки Al.

Для объяснения причин снижения скорости детонации выдвигались различные гипотезы [1, 3, 17]. Анализ этих гипотез [18] показал, что физически ясными причинами снижения являются потери энергии на сжатие, прогрев и ускорение частиц добавки. В работе [19] показано, что тепловое равновесие в зоне химических реакций устанавливается для добавок

Al с размером частиц 5 мкм. Однако в [14] обнаружено, что при уменьшении размера частиц Al до 0.1 мкм параметры детонации продолжают снижаться, что не находит объяснения с позиции упомянутых потерь энергии.

С другой стороны, большинство экспериментов проведено с алюминизированными ВВ. В работе [9] исследовали влияние дисперсных металлов в широком диапазоне их физико-химических свойств на параметры детонации флегматизированного октогена, однако различная пористость полученных зарядов металлизированных смесей затрудняет трактовку результатов.

Для прогноза параметров детонации металлизированных смесей были разработаны методы, предполагающие, что добавка инертная. Некоторые из этих методов базируются на предположении об обратной пропорциональной связи скорости детонации и плотности добавки [20, 21], другие — на предположении о пропорциональности скорости детонации смеси и скорости звука в добавке [18, 22, 23]. Вместе с тем появляющиеся новые экспериментальные данные часто вступают в противоречие с результатами расчетов. В настоящей работе приведены новые данные экспериментов, которые необходимы для уточнения расчетных моделей.

## СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ

Надежной характеристикой детонации, которая может быть измерена с максимальной точностью, является ее скорость. В наших экспериментах для измерения стационарной скорости детонации использовали электроконтактный метод по ГОСТ В 3250-75. Во всех экспериментах, кроме особо оговоренных случаев, измеряли скорость детонации зарядов диаметром 20 мм на базе 100 мм с помощью ионизационных датчиков, изготовленных из двух полосок медной фольги толщиной 50 мкм, которые размещали по центру заряда с зазором 1 мм. Базу измерения контролировали с помощью микрометра. Между электродетонатором и первой парой датчиков располагали дополнительный заряд исследуемого ВВ высотой 40 мм, обеспечивающий формирование стационарной детонационной волны, а после второй пары датчиков помещали еще один заряд высотой 20 мм (рис. 1).

Время прохождения базы измерения детонационной волной регистрировали измерителем временных интервалов И2-24 с погрешностью 2 нс. В другом варианте для этого применяли частотомер ЧЗ-64, точность регистрации времени составляла 1 нс. Таким образом, аппаратурная (систематическая) погрешность измерения скорости детонации не превышала 10 м/с. Каждое полученное значение является средним из трех параллельных измерений.

### Алюминизированные прессованные составы

Зависимость скорости детонации  $D$  от плотности  $\rho$  для флегматизированного октогена (окфол-3,5), флегматизированного гексогена (А-IX-1), а также их смесей с дисперсным алюминием различных марок с массовым содержанием  $\alpha = 0 \div 20$  % определяли в сравнительно

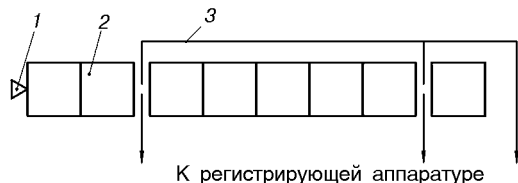


Рис. 1. Схема регистрации скорости детонации:

1 — электродетонатор, 2 — заряд ВВ, 3 — ионизационные датчики

узком диапазоне относительных плотностей зарядов  $0.88 \div 0.98$ . Выбор высокоплотных зарядов обусловлен тем, что для низкоплотных зарядов ограниченного диаметра (20 мм) возрастает вероятность реализации режимов неидеальной детонации [24].

Зависимости скорости детонации от диаметра заряда, представленные на рис. 2, показывают, что предельные диаметры для окфола-3,5 составляют  $d \approx 15$  мм и для А-IX-1  $d \approx 10$  мм. Таким образом, измерения в области максимальных плотностей зарядов проводили при диаметре обоих зарядов выше предельного диаметра детонации.

Чтобы убедиться, что и для низкоплотных зарядов скорость детонации измеряли в области стационарного режима, провели соответствующие измерения для окфола-3,5, имеющего больший предельный диаметр детонации. Использовали заряды диаметром 20 и 38 мм при минимальной плотности заряда  $\rho = 1.64$  г/см<sup>3</sup>. Совпадение полученных скоростей —  $D = 8.39$  и  $8.34$  км/с соответственно — подтверждает стационарность детонационной волны в исследованном диапазоне плотности. Зависимости  $D(\rho)$  аппроксимировали линейными уравнениями регрессии, коэффициент корреляции которых составлял  $0.991 \div 0.999$ , стандартная ошибка оценки  $D$  —  $4 \div 40$  м/с, а угла наклона  $\partial D / \partial \rho$  —  $1 \div 5$  %. Полученные результаты, а также данные работы [9] для октогена и работы [15] для бис-(2,2,2-тринитроэтил)нитрамина (БТНЭНА) и

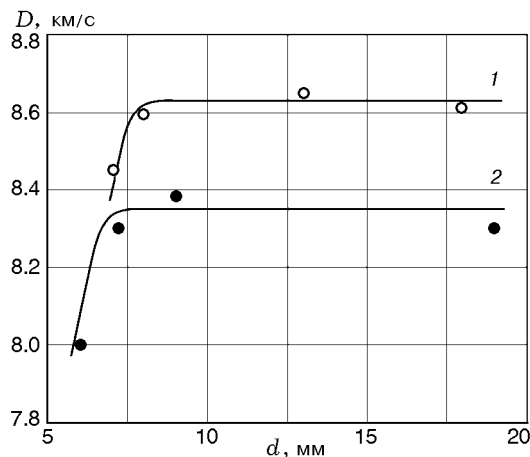


Рис. 2. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда:

1 — окфол-3,5 ( $\rho = 1.77$  г/см<sup>3</sup>), 2 — А-IX-1 ( $\rho = 1.66$  г/см<sup>3</sup>)

Таблица 1

Зависимость скорости детонации от плотности заряда

Взрывчатый состав	$D = A + B\rho$		Коэффициент корреляции	Диаметр заряда, мм
	$A, \text{ м/с}$	$B, (\text{м/с})/(\text{г/см}^3)$		
Октоген*	2 438	$3\,542 \pm 573$	0.9403	20
Окфол-3,5	1 513	$4\,081 \pm 113$	0.9984	
Окфол-5,5	-655	$5\,229 \pm 221$	0.9938	
Окфол-5,5	-1 774	$5\,994 \pm 110$	0.9988	10
Окфол-3,5 + 14 % АСД-1	-2 827	$6\,121 \pm 295$	0.9988	20
Окфол-5,5 + 10 % АСД-1	-2 722	$6\,274 \pm 305$	0.9953	
Окфол-5,5 + 15 % АСД-1	-3 378	$6\,453 \pm 225$	0.9982	
Окфол-5,5 + 20 % АСД-1	-1 580	$5\,315 \pm 481$	0.9840	
А-IX-1	1 983	$3\,750 \pm 722$	0.9820	20
Гекфол-5.5	1 854	$3\,871 \pm 49$	0.9999	
Гексоген + 30 % связки	2 182	$3\,395 \pm 46$	0.9999	
А-IX-1 + 10 % ПАП-2	-706	$5\,083 \pm 61$	0.9995	
А-IX-1 + 10 % АСД-4	-2 964	$6\,469 \pm 383$	0.9914	
А-IX-1 + 14 % АСД-1	-3 028	$6\,396 \pm 313$	0.9964	
А-IX-1 + 20 % АСД-1	-2 353	$5\,826 \pm 72$	0.9999	
БТНЭНА	4 226	$2\,178 \pm 79$	0.9987	
БТНЭНА**	1 793	$3\,592 \pm 35$	0.9999	
БТНЭНА + 10 % ПАП-2	3 213	$2\,509 \pm 22$	0.9999	
БТНЭНА + 25 % АСД-6**	-1 489	$4\,760 \pm 165$	0.9994	

\*Данные [9], диапазон относительных плотностей  $0.840 \div 0.998$ . \*\*Данные [15], диапазон относительных плотностей  $0.974 \div 0.995$ .

его смеси с 25 % Al марки АСД-6 представлены в табл. 1.

Известно, что угол наклона зависимости  $D(\rho)$  при введении инертных малосжимаемых добавок в ВВ возрастает из-за уменьшения сжимаемости смеси [25]. Можно предположить, что при увеличении (в разумных пределах) массовой доли добавки  $\alpha$  величина  $\partial D/\partial \rho$  будет монотонно возрастать. Однако, как видно из рис. 3, зависимости  $\frac{\partial D}{\partial \rho}(\alpha)$  имеют максимум при значении  $\alpha \approx 10 \div 15$  %.

Отметим, что положения максимумов на рис. 3 совпадают с максимумами по метательной способности для этих смесей, определенных при разлете стальных трубок и макетов методом рентгеноимпульсной съемки в среднем сечении оболочек [12] (рис. 4). В трубке с тол-

щиной стенки 5 мм размещался заряд размеров  $\varnothing 20 \times 120$  мм, на торец которого помещалась стальная пластина толщиной 2 мм. Макеты оболочки с толщиной 6 мм имели камеру размеров  $\varnothing 35 \times 80$  мм, толщина дна и крышки макета 10 мм.

Это обстоятельство, а также факт повышения  $\partial D/\partial \rho$  при добавлении дисперсного Al до 15 % наталкивает на мысль, что частичное окисление Al может происходить уже в зоне химических реакций мощных ВВ, т. е. за время  $10 \div 100$  нс [26]. Можно предположить, что полученный результат связан не только с повышением упругости смеси при добавлении Al, но и с участием добавки Al в физико-химических процессах, происходящих в зоне химических реакций. Среди этих процессов можно назвать потери энергии на сжатие, прогрев и ускорение

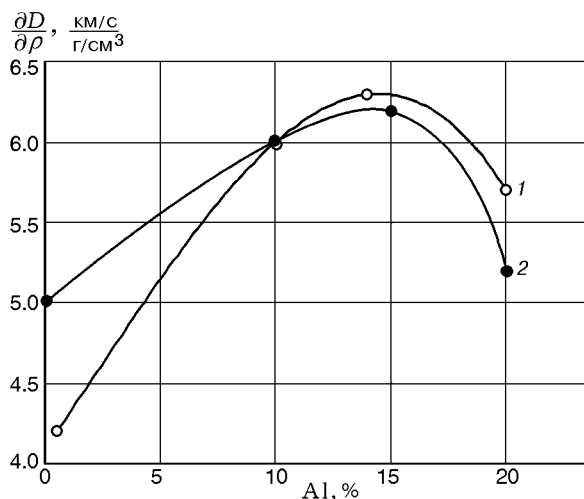


Рис. 3. Зависимость угла наклона прямых  $D(\rho)$  от массовой доли Al в смесях с А-IX-1 (1) и окфол-3,5 (2)

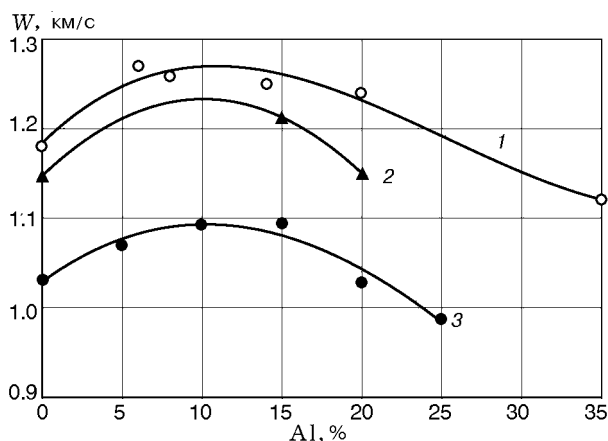


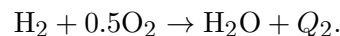
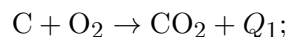
Рис. 4. Зависимость скорости разлета оболочек от массовой доли Al в ВВ:

1 — макет, А-IX-1 + ПАП-2, 2 — трубка, окфол-3,5 + АСД-1, 3 — трубка, А-IX-1 + АСД-1

добавки [19], выделение энергии в результате частичного сгорания добавки и перераспределение упругой и тепловой энергии продуктов детонации в пользу последней [27]. С увеличением  $\alpha$  возрастают упругость ВВ (продуктов детонации) и, вероятно, количество энергии, выделившейся в результате сгорания Al (особенно с повышением плотности), т. е. давления продуктов детонации. Однако увеличатся и потери энергии, в том числе связанные с ее перераспределением. Соотношение отрицательных и положительных факторов, вероятно, определяет рост и последующее снижение зависимо-

стей  $\frac{\partial D}{\partial \rho}(\alpha)$  на рис. 3.

Добавление к октогену 3.5 % флегматизатора повышает значение  $\partial D/\partial \rho$  на 15 %, а рост количества флегматизатора с 3.5 % (окфол-3,5) до 5.5 % (окфол-5,5) приводит к дополнительному увеличению угла наклона зависимостей  $D(\rho)$  на 28 % (табл. 1, рис. 5). Этот результат может быть следствием двух факторов. Во-первых, повышение количества инертной примеси может привести к увеличению предельного диаметра детонации, особенно для зарядов низкой плотности. Иными словами, точки на зависимости  $D(\rho)$  для низкоплотных зарядов окфола-5,5 могут быть занижены. Во-вторых, что более вероятно, проявляется эффект, о котором писал автор [28]. В детонационной волне возможна деструкция вводимых инертных добавок с образованием в зоне химических реакций дополнительного количества атомов С и Н. Избыточная концентрация горючего смещает вправо равновесие реакций образования оксидов:



В результате выделяется дополнительная энергия, которой тем больше, чем выше давление в продуктах детонации (т. е. чем выше плотность заряда) и выше концентрация флегматизатора в смеси. Как видно из табл. 1 и рис. 5, в ряду октоген — окфол-3,5 — окфол-5,5 значение  $\partial D/\partial \rho$  возрастает.

При уменьшении диаметра заряда до 10 мм значение  $\partial D/\partial \rho$  для окфола-5,5 увеличивается на  $\approx 15\%$  (см. табл. 1). Этот результат, вероятно, связан с возрастанием «неидеальности» детонации зарядов диаметром 10 мм по мере снижения плотности [24].

Важным является тот факт, что для смеси А-IX-1 с 10 % АСД-4 угол наклона зависимости  $D(\rho)$  на 27 % больше, чем для смеси с 10 % ПАП-2 (табл. 1, рис. 6). В работе [29] было показано, что при испытании на баллистическом маятнике эффект от добавки АСД-4 вдвое превысил эффект от добавки ПАП-2. Таким образом, зависимости  $D(\rho)$  могут служить качественной характеристикой эффективности добавок.

В работе [11] проведены измерения  $\partial D/\partial \rho$  для БТНЭНА и его смесей с тальком и дисперсным алюминием марки ПАП-2. Выбор

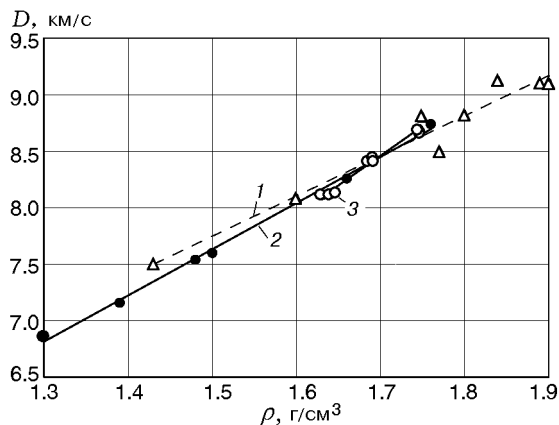


Рис. 5. Зависимость скорости детонации от плотности заряда А-IX-1 и его смесей с алюминием:

1 — октоген, 2 — окфол-3,5, 3 — окфол-5,5

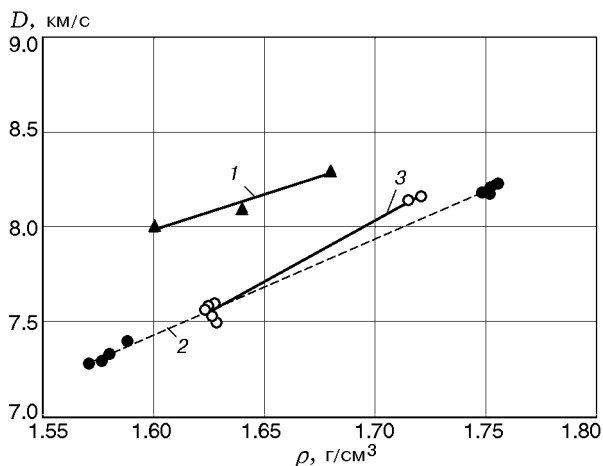


Рис. 6. Зависимость скорости детонации от плотности заряда А-IX-1 и его смесей с алюминием:

1 — А-IX-1, 2 — А-IX-1 + 10 % ПАП-2, 3 — А-IX-1 + 10 % АСД-4

БТНЭНА обусловлен тем, что для этого ВВ-окислителя теплота взрывчатого превращения не зависит от плотности заряда [30], поэтому перестроение зависимости  $D(\rho)$  в зависимости  $D$  (или  $D^2$ ) от объемной теплоты взрыва сводится к умножению значений абсциссы на константу — удельную теплоту взрыва БТНЭНА. Отметим, что построенные нами зависимости  $D(\rho)$  имеют гораздо более пологий характер, чем в работе [15], как для БТНЭНА, так и для его смеси с Al.

На основании полученных результатов была рассчитана доля энергии сгорания Al, реа-

лизированная в зоне химических реакций, которая составила  $3 \div 15\%$  в зависимости от плотности заряда. Важно подчеркнуть физический смысл таких оценок. Мы фактически оставили за пределами рассмотрения сложные процессы превращения запасенной энергии заряда в энергию, выделившуюся в конкретных газодинамических условиях (в данном случае в зоне химических реакций). Не учитываются также процессы перераспределения энергии между «упругой» и «тепловой» составляющими [27] и процессы передачи выделившейся энергии во фронт детонационной волны. При таком подходе оценивается не реальная доля сгоревшего Al, которая может быть значительно выше, а та доля энергии сгорания Al, которая воспринята той или иной функцией отклика, в данном случае скоростью детонационной волны.

#### Металлизированные составы на основе термопластичного связующего

Смеси с дисперсными металлическими добавками готовили на основе ВВ, содержащего гексоген и 30 % активного термопластичного связующего. Исследовали смеси с 5, 10, 20 и 30 % дисперсных добавок Al (марки ПАП-2), Ti, Zr, W, имевших размер частиц  $10 \div 50$  мкм. Высокое содержание связки обеспечивало достаточно высокую плотность зарядов, сформированных методом термопрессования. Скорость детонации измеряли по методике, описанной выше.

Полученные результаты представлены на рис. 7. Видно, что скорость детонации сме-

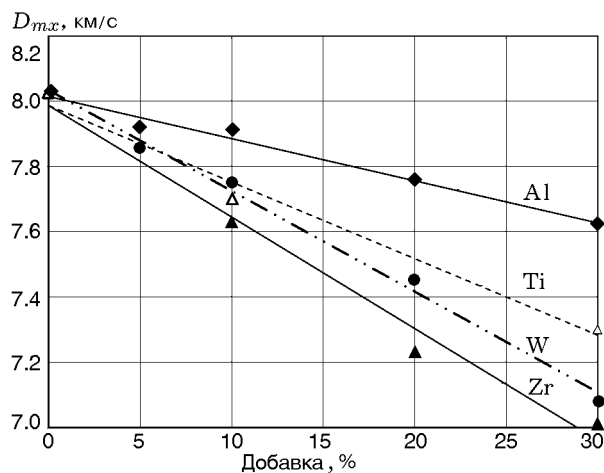


Рис. 7. Зависимость скорости детонации от массовой доли добавки в ВВ

сей  $D_{mx}$  не связана обратно пропорциональной зависимостью с плотностью металлической добавки  $\rho_m$ , как предполагали, например, в [20], поскольку вольфрам ( $\rho = 19.35$  г/см<sup>3</sup>), имеющий большую плотность, чем Zr ( $\rho = 6.51$  г/см<sup>3</sup>), снижает скорость детонации в меньшей степени. Согласно данным [9] добавка 10 % Nb ( $\rho = 8.57$  г/см<sup>3</sup>), плотность которого больше, чем у Zr, также меньше снижает скорость детонации окфола-3,5, чем добавка 10 % Zr.

### РАСЧЕТ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ВВ

Взаимное расположение зависимостей  $D_{mx}(\alpha)$  на рис. 7 в большей степени определяется продольной скоростью звука в добавке ( $c_m$ ) [18]. Действительно, металл является в общем случае упругопластической средой, в которой распространяется ударная волна с двухволновой конфигурацией [31]. При этом скорость распространения упругого предвестника с высокой точностью может быть оценена величиной  $c_m$ . В то же время в [18] не обоснована формула для расчета скорости детонации металлизированных ВВ, на основе которой рассчитывали другие параметры детонации:

$$D_{mx} = D_{ex}(1 - \alpha) + c_m\alpha, \quad (1)$$

где  $D_{ex}$  — скорость детонации ВВ при номинальной плотности  $\rho_{ex}$ , которая может быть рассчитана по известным зависимостям вида  $D = A + B\rho$ , экспериментально установленным для многих ВВ. Номинальная плотность ВВ в заряде определяется по уравнению  $\rho_{ex} = (1 - \alpha)/(1/\rho_{mx} - \alpha/\rho_m)$ , где  $\rho_{mx}$  — плотность смеси,  $\rho_m$  — начальная плотность металлической добавки.

Связь между  $D_{mx}$  и  $c_m$  можно установить с помощью известной формулы для скорости детонации, полученной из законов сохранения массы и импульса. Для смеси ВВ с металлом в предположении, что давления в ВВ и добавке равны, а начальное давление не учитывается, эта формула имеет вид

$$D_{mx} = V_{0mx} \left( \frac{p}{V_{0mx} - V_{mx}} \right)^{1/2},$$

где  $V_{0mx}$  — начальный удельный объем смеси,  $V_{mx}$  — удельный объем ударно-сжатой смеси,  $p$  — давление на фронте детонационной волны.

Выражая удельный объем смеси через удельные объемы ВВ ( $V_{ex}$ ) и металла ( $V_m$ )

$$V_{mx} = (1 - \alpha)V_{ex} + \alpha V_m,$$

получаем

$$D_{mx} = [(1 - \alpha)V_{0ex} + \alpha V_{0m}] \left( \frac{p}{1 - \alpha} \Delta V_{ex} \right)^{1/2} \times \left( 1 + \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{\Delta V_m}{\Delta V_{ex}} \right)^{-1/2}, \quad (2)$$

где  $\Delta V_m$  и  $\Delta V_{ex}$  — разность удельных объемов перед фронтом и на фронте детонационной волны для металла и ВВ соответственно.

Заменим в (2) отношение сжимаемостей ВВ и добавки отношением их волновых импедансов  $(\rho_{ex} D_{ex} / \rho_m c_m)^2$  и перепишем формулу в виде

$$D_{mx} = D_{ex}(1 - \alpha)^{1/2} \left( 1 + \frac{\alpha \rho_{ex}}{1 - \alpha} \rho_m \right) \times \left[ 1 + \frac{\alpha}{1 - \alpha} \left( \frac{\rho_{ex} D_{ex}}{\rho_m c_m} \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (3)$$

Сравнение расчета с экспериментом (78 значений) показывает, что формула (3) только на 0.1 % (среднеквадратичная погрешность  $\approx 3$  %) точнее ранее предложенной формулы (1). В табл. 2 приведены результаты расчета в сравнении с данными наших экспериментов.

Формулы (1) и (3), вместе с выражением из [18] для показателя политропы смесей  $n_{mx} = n_{ex} + 2.5\alpha$ , позволяют рассчитать другие параметры детонации смесей. Точность оценки давления детонации (60 экспериментальных значений) составила  $\approx 7$  %.

Для физического обоснования формулы (1) разложим выражение (2) в ряд по параметру  $\alpha/(1 - \alpha)(\Delta V_m/\Delta V_{ex})$ , который существенно меньше 1 для всех исследованных смесей (кроме смесей с Mg), и отбросим члены, порядок которых выше 1. Тогда

$$D_{mx} = [(1 - \alpha)V_{0ex} + \alpha V_{0m}] \times \left( \frac{p}{1 - \alpha} \Delta V_{ex} \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{\Delta V_m}{\Delta V_{ex}} \right).$$

Выделяя члены при  $D_{ex}$  и  $c_m$ , получаем

$$D_{mx} = D_{ex} \left[ (1 - \alpha)^{1/2} - \frac{\alpha}{2} (1 - \alpha)^{1/2} \frac{\Delta V_m}{\Delta V_{ex}} \right] +$$

Таблица 2

Скорость детонации пластифицированного гексогена с металлическими добавками

Взрывчатое вещество	Добавка	$c_m$ , м/с	$\alpha$ , %	$\rho_{mx}$ , г/см <sup>3</sup>	Скорость детонации, м/с		
					эксперимент	расчет	
						формула (1)	формула (3)
Гексоген с 30 % активного связующего	—	—	0	1.720	8 020	—	—
	Al (ПАП-2)	6 400	5	1.741	7 920	7 905	7 912
			10	1.774	7 910	7 825	7 839
			20	1.841	7 760	7 657	7 683
			30	1.917	7 620	7 500	7 534
	W	5 320	5	1.796	7 860	7 867	7 831
			10	1.890	7 750	7 743	7 669
			20	2.097	7 450	7 466	7 301
			30	2.346	7 080	7 173	6 894
	Zr	4 360	5	1.737	7 650	7 688	7 725
			10	1.828	7 630	7 573	7 646
			20	1.965	7 230	7 164	7 295
			30	2.050	7 085	6 609	6 756
	Ti	6 163	5	1.711	7 785	7 734	7 721
			10	1.780	7 700	7 690	7 665
			30	1.999	7 300	7 249	7 142

$$+ c_m \left[ \frac{\alpha}{(1-\alpha)^{1/2}} \left( \frac{\Delta V_m}{\Delta V_{ex}} \right)^{1/2} - \frac{\alpha^2}{2} (1-\alpha)^{3/2} \left( \frac{\Delta V_m}{\Delta V_{ex}} \right)^{3/2} \right].$$

Оценки показывают, что при  $\alpha \leq 0.3$  численные значения выражений в квадратных скобках при  $D_{ex}$  и  $c_m$  практически совпадают с коэффициентами  $1 - \alpha$  и  $\alpha$  в формуле (1). Естественные ограничения расчетной схемы вытекают из требования  $\alpha/(1-\alpha)(\Delta V_m/\Delta V_{ex}) < 1$ :  $\alpha < 0.5$  и  $\rho_m c_m > \rho_{ex} D_{ex}$ . Требование меньшей сжимаемости добавки по сравнению с ВВ ( $\rho_m c_m > \rho_{ex} D_{ex}$ ) не выполняется для Mg. Отметим также, что согласно физико-химической модели детонации металлизированных ВВ [27, 32], подтвержденной экспериментальными результатами [28] и численными расчетами [33], принято  $c_m < D_{ex}$ , что не выполняется для добавок Be и кристаллического бора.

В рассмотренной схеме расчета параметров детонации, так же как и в других расчетных схемах [18–23], предполагается, что металлические добавки инертны в зоне химических реакций. В то же время в некоторых публикациях [8–11] показана возможность частичного сгорания Al в пределах зоны химических реакций. На это указывают и графики рис. 8, на котором представлены данные рис. 7 в зависимости от парциальной плотности ВВ в заряде смеси, определяемой по формуле  $\rho_{парц} = (1 - \alpha)\rho_{mx}$ . В этих координатах наглядно отражено влияние различных добавок, помещенных в воздушные поры заряда ВВ. Как видно из рис. 8, введение металлических добавок в поры ВВ может оказывать суммарно как отрицательное, так и положительное влияние на скорость детонации.

С уменьшением плотности заряда и увеличением содержания кислорода в ВВ погрешность оценки параметров детонации по предлагаемому методу существенно возрастает. Для выявления роли содержания



Таблица 3

Параметры детонации алюминизированных ВВ

Взрывчатое вещество	Добавка	$\alpha$ , %	$\rho_{mх}$ , г/см <sup>3</sup>	Эксперимент		Расчет	
				$D_{mх}$ , м/с	$p$ , кбар	$D_{mх}$ , м/с	$p$ , кбар
Окфол-3,5	АСД-4	0	1.724	8 660	294	—	—
		10	1.817	8 480	296	8 515	286
		20	1.878	8 230	292	8 269	265
		30	1.923	7 980	273	7 970	240
БТНЭЭДНДА флегматизированный	ПП-1	5	1.774	8 610	304	8 593	290
		10	1.801	8 530	298	8 466	278
		20	1.852	8 420	288	8 197	254
		27	1.889	8 300	282	8 007	239
БТНЭНА	ПП-1	0	1.920	8 800	—	—	—
		27	2.033	8 340	—	7 870	—

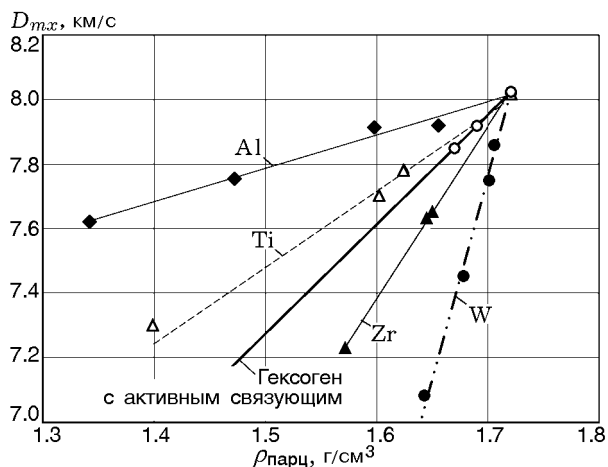


Рис. 8. Зависимость скорости детонации от парциальной плотности ВВ в заряде

кислорода в ВВ магнитоэлектрическим методом были измерены скорость и давление детонации алюминизированных смесей на основе ВВ с различным кислородным балансом (КБ). В качестве таких ВВ помимо окфола-3,5 (КБ = -22 %) исследовали N,N-бис-(2,2,2-тринитроэтил)этилендинитродиамин (БТНЭЭДНДА, КБ = 0) [34], имеющий такое же количество флегматизатора, что и окфол (3.5 %), а также БТНЭНА (КБ = +16.5 %). В смесях на основе ВВ с отрицательным КБ (гексоген, октоген), содержащих 27 ÷ 30 % Al, расчетные значения скорости детонации либо совпадали с экспериментальными, либо были

ниже на величину менее 100 м/с, в то время как в смесях на основе ВВ с нулевым КБ занижение расчетных данных над экспериментальными возросло до 300 м/с, а для смесей с положительным КБ — до 450 м/с (табл. 3). Этот результат также является косвенным свидетельством частичного сгорания Al в зоне химических реакций мощных ВВ. Другие свидетельства возможности частичного сгорания дисперсных металлических добавок до плоскости Жуге можно получить, исследуя зависимость скорости детонации от плотности заряда [11].

В то же время анализ причин снижения параметров детонации при добавлении дисперсных металлов, проведенный в работах [18, 35], показал, что эффект в значительной степени связан со снижением «упругой» энергии и увеличением «тепловой» в процессе образования многоатомных молекул оксидов, особенно пятиатомного оксида Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Вывод подтвержден результатами расчета изменения коволюмов молекул, составляющих продукты детонации в результате сгорания Al [35], а также экспериментами, показавшими, что добавка Al приводит к снижению давления и повышению температуры детонации [14].

Если включить в статистическую обработку все данные работы [9], в том числе и для низкоплотных зарядов, а также данные табл. 3 для ВВ с нулевым и положительным кислородным балансом, то погрешности расчетных оценок заметно возрастут и составят ≈ 5 % по ско-

Таблица 4

Зависимость скорости метания пластины от плотности заряда

Взрывчатый состав	$W_{40} = A + B\rho$		Коэффициент корреляции	Число точек на зависимости $W_{40}(\rho)$
	A, м/с	B, (м/с)/(г/см <sup>3</sup> )		
Окфол	128.7	1086.4 ± 43	0.997	4
Окфол + 15 % АСД-4	-334.3	1307.2 ± 155	0.975	4
ТНЭТНБ	123.7	1096.9 ± 2.4	0.999	3
ТНЭТНБ + 15 % АСД-4	33.5	1101.1 ± 0	1	2
БТНЭНА	212.6	985.3 ± 55	0.994	4
БТНЭНА + 15 % АСД-4	-1673.7	1967.3 ± 203	0.990	3

рости и  $\approx 8\%$  по давлению детонации.

### МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ

Результаты исследования зависимостей метательной способности, определенной по методике М-40 [36], от плотности заряда для окфола-3,5, 2',2',2'-тринитроэтил-4,4,4-тринитробутирата (ТНЭТНБ) [34], БТНЭНА и их смесей с 15 % Al представлены в табл. 4. Время ускорения пластины в методике М-40 составляет  $\approx 20$  мкс, что существенно больше времени химических реакций. Видно, что при метании пластин добавка Al также повышает крутизну зависимостей  $W_{40}(\rho)$  для всех исследованных ВВ. При этом эффект наиболее ярко выражен для смеси БТНЭНА с Al, что, очевидно, связано с более высоким тепловым эффектом реакции Al со свободным кислородом и с большей скоростью ее протекания.

Анализируя полученные зависимости для ВВ, не содержащих Al, нельзя не отметить заметно меньший угол наклона зависимости  $W_{40}(\rho)$  у БТНЭНА, чем у окфола и ТНЭТНБ, зависимости которых практически совпадают. Возможно, это связано с наличием свободного кислорода в составе продуктов детонации БТНЭНА и отсутствием у БТНЭНА зависимости теплоты взрыва от плотности [30]. По принципу Ле-Шателье с увеличением плотности заряда, т. е. давления, в продуктах должны ускоренно протекать реакции, приводящие к уменьшению объема, в частности эндотермические реакции образования оксидов азота.

Перестроив зависимости  $W_{40}(\rho)$  в координатах  $W^2 - \rho Q$  для БТНЭНА и его смеси с 15 % Al и используя подход, изложенный в [11, 32], можно показать, что доля энергии сгорания Al, реализованная в энергию пластины, для

смеси БТНЭНА с Al марки АСД-4 в этих условиях составляет  $20 \div 40\%$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для октогена значение  $\partial D / \partial \rho$  возрастает при добавлении 3.5 и 5.5 % флегматизатора, а также при добавлении до 15 % дисперсного алюминия различных марок.

2. Зависимости  $\partial D / \partial \rho$  от массовой доли добавки Al марки АСД в окфоле-3,5 и А-IX-1 имеют максимум при  $\alpha = 10 \div 15\%$ . При этом положение этих максимумов совпадает с положением максимумов на зависимостях метательной способности от массовой доли добавки в этих смесях.

3. Добавка 10 % Al марки АСД-4 в А-IX-1 приводит к большему на 27 % повышению значения  $\partial D / \partial \rho$ , чем добавка 10 % Al марки ПАП-2. Об этом свидетельствуют результаты измерения в испытаниях на баллистическом маятнике.

4. Согласно оценкам, проведенным на основании измеренных зависимостей  $D(\rho)$  для БТНЭНА и его смесей с 10 % Al марки ПАП-2, в зоне химических реакций может быть реализовано 3 ÷ 15 % энергии сгорания Al.

5. Измерения метательной способности по методике М-40 показали, что угол наклона зависимости скорости пластины от плотности заряда растет при добавлении Al в окфол-3,5, ТНЭТНБ и БТНЭНА, особенно заметно в смесях с БТНЭНА.

6. Оценки, выполненные с использованием измеренных зависимостей скорости пластины от плотности заряда, показали, что в случае смесей БТНЭНА с 15 % Al марки АСД-4 в газодинамических условиях методики М-40 на ме-

тание может быть затрачено  $20 \div 40$  % энергии сгорания Al.

7. Предложена схема расчета параметров детонации высокоплотных металлизированных ВВ, основанная на связи скорости детонации с продольной скоростью звука в добавке, позволяющая корректно оценивать влияние добавок в широком диапазоне их физико-химических свойств. С уменьшением плотности заряда и при повышении содержания кислорода в ВВ точность прогноза снижается.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Cook M. A.** The Science of High Explosives. — New York: Reinhold Publ. corporation, 1958.
2. **Дремин А. Н., Похил П. Ф., Арифов М. И.** Влияние алюминия на параметры детонации тротила // Докл. АН СССР. — 1960. — Т. 131, № 5. — С. 1140–1142.
3. **Беляев А. Ф.** Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. — М.: Наука, 1968.
4. **Finger M., Hornig H. C., Lee E. L., et al.** Metal acceleration by composite explosives // Proc. of the 5th Symp. (Intern.) on Detonation, Pasadena, California, 1970. — P. 55–63.
5. **Соснова Г. С.** О сгорании бора и алюминия до их высших окислов при высоких давлениях и температуре // Горение и взрыв: материалы III Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. — М.: Наука, 1972. — С. 455–458.
6. **Альтшулер Л. В., Рязанов В. Т., Сперанская М. П.** Влияние тяжелых примесей на режимы детонации конденсированных ВВ // Журн. прикл. механики и техн. физики. — 1972. — № 1. — С. 182.
7. **Vjarnholt G. W.** Effects of aluminium and lithium fluoride admixtures on metal acceleration ability of Comp B // Proc. of the 6th Symp. (Intern.) on Detonation, San Diego, California, 1976. — P. 517–526.
8. **Анискин А. И., Шведов К. К.** Влияние алюминия и магния на детонационные характеристики в смесях с гексогеном // Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. — Черногловка, 1978. — С. 26–30.
9. **Хотин В. Г., Козлов А. И., Ахачинский А. В. и др.** Об участии металлов в химическом превращении в детонационной волне // Химическая физика конденсированных взрывчатых систем / Тр. МХТИ им. Д. И. Менделеева. — М.: МХТИ, 1979. — Вып. CXI. — С. 113–122.
10. **Силин М. Н., Анискин А. И., Хотин В. Г., Козлов А. И.** Об особенностях протекания реакций окисления алюминия за фронтом детонационной волны // Докл. IV Всесоюз. совещ. по детонации. — Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1988. — Т. 1. — С. 125–128.
11. **Давыдов В. Ю., Гришкин А. М., Феодоритов И. И.** Экспериментально-теоретическое исследование окисления алюминия в детонационной волне // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28, № 5. — С. 124–128.
12. **Гришкин А. М., Дубнов Л. В., Давыдов В. Ю., Левшина Ю. А., Михайлова Т. Н.** Влияние добавок порошкообразного алюминия на параметры детонации мощных ВВ // Физика горения и взрыва. — 1993. — Т. 29, № 2. — С. 115–117.
13. **Cowperthwaite M.** Nonideal detonation in a composite CHNO explosive containing aluminium // Proc. of the 10th Symp. (Intern.) on Detonation, Boston, 1993. — P. 656–664.
14. **Гоголя М. Ф., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Архипов В. И., Щетинин В. Г.** Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 4. — С. 82–95.
15. **Гоголя М. Ф., Махов М. Н., Бражников М. А., Долгобородов А. Ю.** Скорость детонации композиции БТНЭН/Al // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 125–130.
16. **Gogulya M. F., Brazhnikov M. A.** Detonation of metallized composite explosives // Shock Wave Sci. and Technol. Ref. Library / F. Zhang (Ed.). — Berlin: Springer-Verlag, 2009. — V. 4, Pt 4. — P. 217–287.
17. **Харитон Ю. Б., Ратнер С. Б.** Исследование гетерогенных систем // Журн. физ. химии. — 1946. — Т. 20, вып. 2. — С. 221–222.
18. **Давыдов В. Ю., Дубнов Л. В., Феодоритов И. И., Хотин В. Г.** О возможности расчета параметров детонации высокоплотных металлизированных взрывчатых веществ // Вопросы теории конденсированных взрывчатых систем / Тр. МХТИ им. Д. И. Менделеева. — М.: МХТИ, 1980. — Вып. CXII. — С. 130–134.
19. **Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М.** Расчет параметров детонационной волны смесей взрывчатых веществ с инертными добавками // Физика горения и взрыва. — 1970. — Т. 6, № 2. — С. 182–186.
20. **Воскобойников И. М., Котомин А. А.** Расчет параметров детонации смесей ВВ с инертными добавками // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 5. — С. 93–97.
21. **Люттов В. Д., Воскобойников И. М. и др.** Об оценке давления детонации ВВ, содержащих инертную добавку // Взрывное дело. — 1967. — № 63/20. — С. 82.
22. **Стесик Л. Н.** Расчет параметров детонации ВВ, содержащих металлы, с использованием

- уравнения состояния идеального газа // Физика горения и взрыва. — 1971. — Т. 7, № 1. — С. 111–117.
23. **Кривченко А. Л., Кривченко Д. А.** О едином принципе и 4-х методиках расчета параметров детонации // Ударные волны в конденсированных средах: материалы конф. — СПб., 2008. — С. 22–28.
24. **Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К.** Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1972.
25. **Физика взрыва** / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Челышев, Б. И. Шехтер. — М.: Наука, 1975.
26. **Лобойко Б. Г., Любятинский С. Н.** Зоны реакции детонирующих твердых взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 45–64.
27. **Давыдов В. Ю., Гришкин А. М., Мурышев Е. Ю.** Влияние газодинамических условий на степень реализации энергии вторичных реакций в метательное действие ВВ // Физика горения и взрыва. — 1993. — Т. 29, № 2. — С. 109–115.
28. **Кривченко А. Л.** Исследование детонации наполненных взрывчатых систем: дис. ... канд. техн. наук / ОИХФ. — Черноголовка; Куйбышев, 1975.
29. **Давыдов В. Ю., Губин А. С., Симонов Д. П., Шевченко В. Г.** О скорости детонации, импульсе взрыва и работоспособности металлизированных ВВ // XI Забабахинские научные чтения. — Снежинск, 2010. — [www.vniitf.ru/Images/zst/2010/Sec2/2-26.pdf](http://www.vniitf.ru/Images/zst/2010/Sec2/2-26.pdf).
30. **Пепекин В. И., Махов М. Н., Лебедев Ю. А.** Теплоты взрывчатого разложения индивидуальных ВВ // Докл. АН СССР. — 1977. — Т. 232, № 4. — С. 852–855.
31. **Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Наука, 1966.
32. **Давыдов В. Ю., Губин А. С.** О метательной способности взрывчатых веществ и их смесей с горючими добавками. 2. Активированные и ультрадисперсные порошки алюминия // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 7. — С. 62–67.
33. **Davydov V. Y., Klimenko V. Y.** On detonation characteristics of metallized explosives // New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter. — Paris, 2010. — P. 59–60.
34. **Энергетические конденсированные системы:** краткий энциклопедический словарь / под ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 2000.
35. **Давыдов В. Ю., Губин А. С.** О метательной способности взрывчатых веществ и их смесей с горючими добавками. 3. Метание стальных оболочек и пластин // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 8. — С. 44–51.
36. **Давыдов В. Ю., Губин А. С.** О метательной способности взрывчатых веществ и их смесей с горючими добавками. 1. Метательное действие по методике М-40 // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 6. — С. 49–56.

*Поступила в редакцию 16/X 2013 г.,  
в окончательном варианте — 10/II 2014 г.*