

17. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов Н. Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики.— М.: Наука, 1976.
18. Левин В. А., Свалов А. М. Асимптотические законы затухания ударных волн в неоднородных средах // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1973.— № 2.— С. 97.
19. Khasainov B. A., Ermolaev B. S., Borisov A. A. Effect of exothermic reactions downstream of the C—J plane on detonation stability // Acta Astronautica.— 1979.— № 6.— P. 557.
20. Tyl J., Włodarczyk E. Theoretical and experimental investigation into problems of convergent detonation waves. Survey of literature date // J. of Tech. Phys.— 1987.— 28, № 2.— P. 199.

г. Москва

Поступила в редакцию 26/III 1992

УДК 662.215

В. Ю. Давыдов, А. М. Гришкин, Е. Ю. Мурышев

ВЛИЯНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СТЕПЕНЬ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ ВТОРИЧНЫХ РЕАКЦИЙ В МЕТАТЕЛЬНОЕ ДЕЙСТВИЕ ВВ

Исследовано метательное действие смесей ВВ с алюминием. Показано, что газодинамические условия совершения работы торцевого метания влияют на степень реализации энергии вторичных реакций протекающих в ПД. Сформулированы основные особенности процесса реализации энергии алюминизированных ВВ.

Ранее проведенными исследованиями показано, что газодинамические условия совершения работы метания могут оказывать существенное влияние на степень реализации энергии сгорания алюминия [1]. При радиальном осесимметричном метании, когда происходит разрушение оболочки, в продуктах детонации (ПД) возникает волна разгрузки. В этом случае за равные времена совершения работы удастся реализовать в метательное действие значительно большую часть энергии сгорания алюминия, чем при торцевом метании. Увеличение метательной способности (МС) при введении 10 % алюминия во флегматизированный гексоген достигает 15 %, в то время как при торцевом метании эффект не превышает нескольких процентов. Данный результат в работе [1] достаточно полного объяснения не получил.

В этой связи представляет интерес более подробно изучить влияние газодинамических условий совершения работы торцевого метания пластин на степень реализации энергии вторичных реакций, протекающих в ПД.

Постановка эксперимента

Для исследований использовали методику, в которой цилиндрический заряд диаметром и высотой 40 мм метает стальную пластину толщиной 4 мм (рис. 1, а). Скорость полета пластины регистрировалась восемью электроконтактными датчиками, которые располагались на разном расстоянии от пластины. Заряд и блок датчиков помещались в толстостенную оболочку (25 мм) так, что на всем пути разгона пластины, составляющем ~40 мм, боковые волны разгрузки не оказывали существенного влияния на полет пластины. Задний торец заряда во всех экспериментах, кроме оговоренных особо, был открыт. Иницирование осуществляли электродетонатором через промежуточный детонатор диаметром и высотой 10 мм из флегматизированного октогена. Временные интервалы регистрировали с погрешностью 15 нс. В каждом опыте получали семь значений скорости пластины w на семи различных расстояниях от заряда x . Полученные по 3—5 опытам зависимости $w(x)$ аппроксимировали с помощью метода наименьших квадратов полиномами второй и третьей

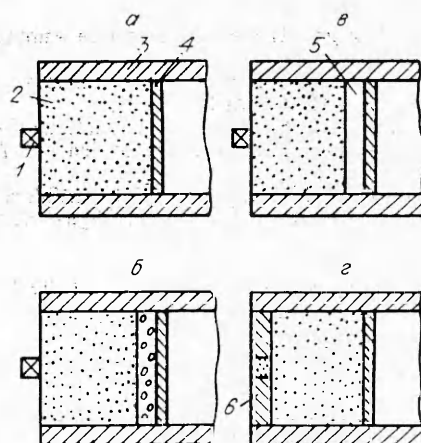


Рис. 1. Схема опытов.

а — заряд из однородного ВВ;
б — комбинированный заряд; в —
метание через зазор; г — метание
с подпором; 1 — промежуточный
детонатор; 2 — ВВ; 3 — оболоч-
ка; 4 — метаемая пластина; 5 —
воздушный зазор; 6 — стальная
пластина.

степени, по которым рассчитывали скорость пластины на требуемом расстоянии (обычно $x = 38$ мм). Аппаратурная погрешность эксперимента не превышала 1 %.

Результаты экспериментов

В первой серии экспериментов изучали зависимость w от процентного содержания алюминия марки ПП-1 или АСД-4 в смеси с ВВ, а также от плотности заряда для смесей алюминия АСД-4 с ВВ в соотношении 15/85. Выбраны ВВ, имеющие различный кислородный баланс, но близкие параметры детонации: флегматизированный октоген, вещества bis-(2,2,2-trinitroethyl)nitramine (BTNENA) и 2,2,2-trinitroethyl 4,4,4-trinitrobutyrate (TNETNB), изученные в работе [2]. Характеристики выбранных ВВ представлены в табл. 1.

Результаты по исследованию влияния плотности заряда ρ на w_{38} представлены на рис. 2. Видно, что зависимости $w_{38}(\rho)$ имеют характер, близкий к линейному. При этом введение алюминия в ВВ с отрицательным кислородным балансом слабо влияет на угол наклона линии, в то время, как кривая $w_{38}(\rho)$ для смеси алюминия с ВВ-окислителем (BTNENA) имеет существенно более крутой характер.

В табл. 2 приведены результаты по исследованию влияния процентного содержания алюминия марок ПП-1 и АСД-4 в ВВ на w . Как видно из приведенных данных, введение алюминия во флегматизированный октоген снижает скорость пластины на базе 10 мм. Снижение тем значительнее, чем выше содержание алюминия в смеси. При этом АСД-4 снижает скорость при $x = 10$ мм сильнее, чем ПП-1. При больших расстояниях у алюминизированных смесей темп набора скорости выше. Это приводит к тому, что смесь с 10 % алюминия на базе $x = 38$ мм превышает по МС флегматизированный октоген. На этой базе смеси с АСД-4 не уступают смесям с ПП-1. Алюминизированные смеси с ВВ-окислителем в настоящих экспериментах на всем пути полета пластины имели большую скорость, чем чистое ВВ.

Во второй серии экспериментов изучали возможность компенсации спада начальной скорости метания. Исследована метательная способность

Таблица 1

Характеристики ВВ				
ВВ	$\rho_{\max}$, г/см ³	D_p , м/с	Q , кДж/кг	Кислородный коэффициент
Флегматизированный октоген	1,834	8800	5230	0,56
TNETNB	1,840	8500	6110	0,93
BTNENA	1,960	8800	5270	1,40

Рис. 2. Зависимость скорости пластины w_{38} от плотности заряда.

1 — TNETNB; 2 — флегматизированный октоген; 3 — BTNENA; 4 — TNETNB + 15 % Al; 5 — флегматизированный октоген + 15 % Al; 6 — BTNENA + 15 % Al.

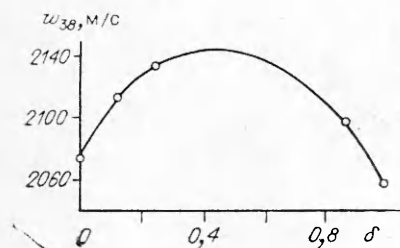
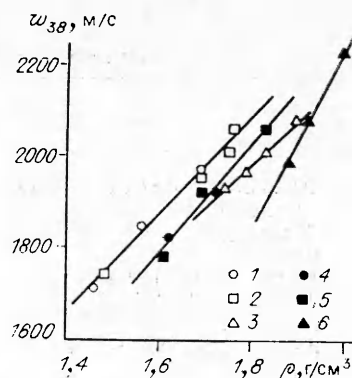
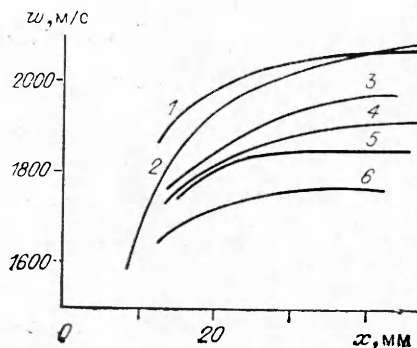


Рис. 3. Зависимость скорости пластины w_{38} комбинированных зарядов на основе флегматизированного октогена от относительной толщины алюминизированного слоя заряда.

$\delta = 0$ — флегматизированный октоген; $\delta = 1$ — флегматизированный октоген + 20 % Al.

Рис. 4. Зависимость скорости пластины w от пройденного пути x .

1 — флегматизированный октоген; 2 — флегматизированный октоген + 15 % Al; 3 — флегматизированный октоген + 15 % Al (метание с подпором); 4 — флегматизированный октоген (метание с подпором); 5 — метание через зазор 5 мм (флегматизированный октоген, флегматизированный октоген + 15 % Al); 6 — метание через зазор 8 мм (флегматизированный октоген, флегматизированный октоген + 15 % Al).



комбинированных зарядов, состоящих из слоя алюминизированного ВВ, примыкающего к метаемой пластине, и слоя ВВ, не содержащего металлической добавки и обладающего более высокими начальными параметрами детонационной волны (ДВ). Суммарная толщина комбинированных зарядов составляла 40 мм (рис. 1, б). Результаты исследований комбинированных зарядов, состоящих из слоев флегматизированного октогена и его смеси с 20 % алюминия марки АСД-4, представлены на рис. 3.

Видно, что комбинированные заряды обладают повышенной МС по сравнению с однородными зарядами. При этом максимальное значение достигается в области относительных толщин алюминизированного слоя $\delta = H_{Al}/H_{общ} = 0,3 \div 0,6$. В то же время комбинированные заряды, состоящие из слоев BTNENA и его смеси с алюминием, имеют пониженные значения МС по сравнению с однородными алюминизированными зарядами (табл. 3).

В третьей серии экспериментов проводили метание через зазор, а высоту заряда уменьшали на величину зазора (рис. 1, в). Эксперимент показал, что по мере увеличения зазора снижается абсолютное значение МС как флегматизированного октогена, так и его смеси с 15 % алюминия марки АСД-4, но их отношения при этом не меняются (рис. 4). Метательная способность для двух ВВ практически совпадает, как и при контактном метании.

Таблица 2

Влияние содержания алюминия в ВВ на МС

ВВ	ρ , г/см ³	w_x (м/с) при x (мм)		
		10	20	38
Флегматизированный октоген (чистый)	1,78	1800	1960	2070
То же с добавкой 10% ПП-1	1,80	1770	1980	2110
То же + 20% ПП-1	1,87	1720	1900	2060
То же + 20% АСД-4	1,87	1670	1910	2070
BTNENA	1,90	1680	2000	2080
BTNENA-20 (BTNENA + 20% АСД-4)	2,03	1730	2070	2210

Таблица 3

МС зарядов на основе BTNENA

ВВ	ρ , г/см ³	w_{ss} , м/с
----	----------------------------	----------------

Однородные заряды

BTNENA	1,90	2080
BTNENA-10	1,98	2190
(BTNENA + 10% АСД-4)		
BTNENA-15	2,00	2250
(BTNENA + 15% АСД-4)		
BTNENA-20	2,03	2210
(BTNENA + 20% АСД-4)		

Комбинированные заряды
(соотношение толщин слоев 30/10 мм)

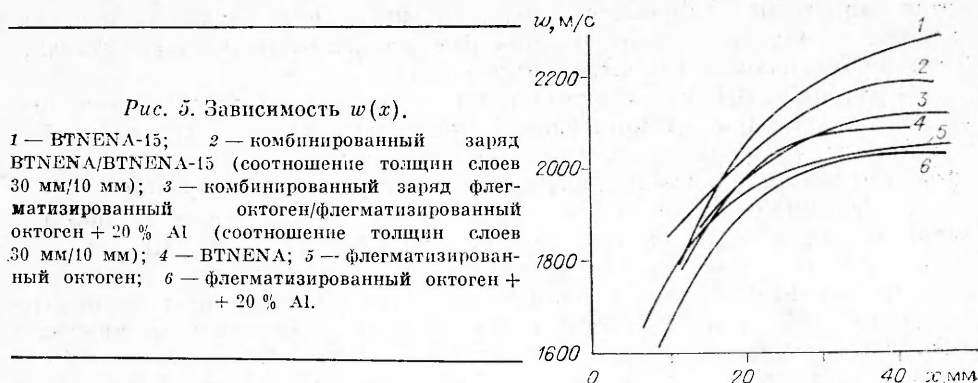
BTNENA/BTNENA-10	1,91/2,00	2160
BTNENA/BTNENA-15	1,91/2,01	2190
BTNENA/BTNENA-20	1,90/2,03	2150

В сравнительных экспериментах (рис. 4) задний торец зарядов высотой 32 мм был закрыт стальной пластиной высотой 8 мм (подпор). Иницирование осуществляли через отверстие диаметром 5 мм в подпорной пластине, которое заполняли эластичным ВВ (рис. 1, з). В этом случае МС алюминизированной смеси стала выше, чем флегматизированного октогена.

Обсуждение результатов

Уменьшение начальной скорости метания при введении в ВВ добавок алюминия, связанное со снижением параметров на фронте детонационной волны, как правило, объясняют инертностью или неполнотой сгорания добавки. Результаты термодинамических расчетов [3] свидетельствуют, что в смесях с ВВ с отрицательным кислородным балансом в случае сгорания алюминия происходит большее снижение параметров на фронте ДВ, чем в случае инертности алюминия. Это объяснение соответствует нашим результатам. Согласно им, введение в ВВ сферического алюминиевого порошка АСД-4, содержащего большее количество неокисленного алюминия и имеющего увеличенную (по сравнению с пудрой ПП-1) скорость окисления, приводит к сильному понижению начальной скорости метания.

Снижение параметров на фронте ДВ можно компенсировать созданием пересжатой ДВ. Если повышение начальных параметров способствует ускорению процесса окисления алюминия, то наблюдалось бы более интенсивное ускорение пластины. Однако разгонные кривые (рис. 5)



для комбинированного заряда и смеси флегматизированного октогена с 20 % Al практически конгруэнтны. В случае комбинированного заряда на основе BTNENA метательная способность уменьшается (см. рис. 5).

На первый взгляд эти результаты противоречат данным рис. 2, где зависимость $w_{38}(\rho)$ для смеси BTNENA-15 имеет наиболее крутой характер. Большой угол наклона кривых, вероятно, связан с повышенным энергозапасом смеси BTNENA-15, т. е. при равном увеличении плотности сильнее повышается энергозапас заряда. Это подтверждает незначительное изменение угла наклона прямых для флегматизированного октогена и TNETNB и их алюминизированных смесей, которые имеют близкие значения метательной способности при равных пористостях заряда.

Действительно, если бы увеличение плотности повышало скорость сгорания алюминия, то угол наклона кривых $w_{38}(\rho)$ для алюминизированных смесей должен возрастать с ростом плотности по сравнению с исходными ВВ. Этого не наблюдается. Снижение метательной способности на базе 38 мм при использовании комбинированного заряда на основе BTNENA объясняется газодинамическими причинами — пониженным значением метательной способности BTNENA по сравнению с BTNENA-15 и замедлением темпа разгона пластины. На начальной стадии разгона (10 мм и меньше) получена более высокая скорость метания по сравнению с однородным зарядом из BTNENA-15, что, вероятно, связано с пересжатием. По этой причине наиболее удачные объекты исследования — это пары ВВ с близкими значениями метательной способности, например, флегматизированный октоген и его смесь с 20 % алюминия.

Не удастся повлиять на степень реализации энергии сгорания Al в торцевое метание, снижая давление в ПД, т. е. повышая степень расширения ПД в конце разгонного участка. Об этом косвенно свидетельствует линейность зависимости $w_{38}(\rho)$ и впрямую — результаты по метанию через зазор (см. рис. 4).

Поскольку изменение параметров в ПД не влияет на относительную (к исходному ВВ) метательную способность алюминизированных смесей, можно сделать вывод о том, что алюминий сгорает очень быстро за фронтом ДВ и завершается за несколько микросекунд (база полета пластины менее 10 мм). В то же время, организуя отраженную ударную волну, удастся повысить относительную метательную способность смеси флегматизированного октогена с алюминием.

Полученные результаты находятся в полном соответствии с [1] и позволяют сформулировать основные особенности процесса реализации энергии алюминизированных ВВ.

1. Металлические добавки сгорают за фронтом ДВ вторичных ВВ за 1—10 мкс. На начальной стадии разгона введение металлических добавок приводит к уменьшению скорости метания из-за снижения параметров на фронте ДВ, которые тем сильнее, чем больше содержание добавок. Вследствие особенности термодинамики окисления Al в смесях с мощными ВВ, имеющие отрицательный кислородный баланс, более

интенсивно горящие добавки понижают начальную скорость метания сильнее, но за счет большего темпа разгона пластины на последующих базах не уступают менее активным добавкам.

В смесях с ВВ-окислителями потери в начальной скорости метания не происходит. Прирост метательной способности за счет введения добавок Al в этом случае выше, что, вероятно, связано с большим тепловым эффектом реакции окисления алюминия со свободным кислородом.

2. Вследствие градиента массовых скоростей, возникающего при течении за фронтом ДВ (металлическая добавка отстает от ПД), обеспечивается интенсивное окисление алюминия [4]. Снижение параметров ДВ и начальной скорости метания связано не столько с неполнотой сгорания добавки, сколько с термодинамическими особенностями процесса окисления при высоких давлениях. Эти особенности заключаются, в частности, в том, что «упругая» составляющая энергии ПД при окислении Al снижается, но повышается «тепловая» составляющая, для реализации которой в работу требуются высокие степени расширения ПД [4].

3. При торцевом метании не удается достичь значительной степени реализации энергии сгорания Al, особенно в смесях с ВВ, имеющих отрицательный кислородный баланс. Это связано с отставанием зоны интенсивного окисления Al от пластины вследствие возникающего за фронтом ДВ градиента массовых скоростей между ПД и добавкой. Иными словами, на границе с пластиной находятся газообразные ПД, образовавшиеся с переднего торца заряда и «оторвавшиеся» от соседних, еще не прореагировавших частиц Al. Этим и объясняется тот факт, что повышая степень расширения ПД (метание через зазор), не удастся повысить метательную способность алюминизированной смеси. При метании с подпором, наоборот, эта способность увеличивается; это связано с тем, что отраженная от подпорной пластины ударная волна успевает «донести» энергию окисления алюминия к метаемой пластине.

4. При радиальном метании отставание зоны горения алюминия от фронта ДВ не имеет существенного значения, так как она скользит вдоль оболочки и таким образом передает ей энергию. При разрушении оболочки и истечении ПД через образующиеся трещины обеспечивается степень расширения ПД, позволяющая реализовать «тепловую» составляющую энергии сгорания алюминия. При этом также возникают градиенты температуры и давления, направленные от оси заряда к фрагментам оболочки и способствующие передаче энергии от центральных слоев ПД к периферии. В этом случае удается получить значительный прирост метательной способности (15 %) за времена менее 5 мкс [1].

Таким образом, основной причиной неполноты реализации энергии сгорания металлических добавок в метание выступают не химические и кинетические затруднения, а газодинамические, связанные с особенностями термодинамики реагирования при высоких давлениях и характером течения ПД в конкретном случае.

Говоря о возможных газодинамических путях повышения метательной способности алюминизированных ВВ при торцевом метании, можно предположить, что наиболее выгодными могут быть схемы, в которых перед метаемой пластиной в тонком слое возникает короткая радиальная волна разгрузки, «убирающая» граничный слой. Вероятно, повышенная эффективность алюминизированных смесей будет наблюдаться при торцевом метании тел с отверстиями (типа решето).

Авторы выражают благодарность Ю. А. Левшиной, Т. Н. Михайловой и В. В. Козмерчуку за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов В. Ю., Козмерчук В. В., Мурышев Е. Ю. и др. Влияние добавок порошкообразного алюминия на энергию ВВ, передаваемую в осевом и радиальном направлениях // ФГВ.— 1988.— 24, № 3.
2. Kamlet M. J. The relationship of impact sensitivity with structure of organic high explosives. I. Polynitroaliphatic explosives // Proc. 6th Symp. (Int.) on Detonation.— Coronado, Calif., 1976.

3. Пиховик Н. А., Соловьев В. С. Термодинамический расчет параметров детонации смесей ВВ с алюминием // Хим. физика процессов горения и взрыва. Детонация: Материалы IX Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— Черногоровка, 1989.
4. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации.— М.: Мир, 1985.

г. Москва

Поступила в редакцию 16/VI 1992

УДК 662.215.12 : 669.71

А. М. Гришкин, Л. В. Дубнов, В. Ю. Давыдов,
Ю. А. Левшина, Т. Н. Михайлова

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ПОРОШКООБРАЗНОГО АЛЮМИНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ МОЩНЫХ ВВ

Исследовано влияние добавок алюминия различных марок на параметры детонации мощных ВВ. Показано, что скорость детонации алюминизированных смесей зависит не только от размера частиц вводимой добавки, но и от их формы.

В целях повышения энергетического запаса ВВ в них вводят дисперсный алюминий. При этом имеется в виду, что тепло выделяется в результате вторичных реакций окисления Al кислородсодержащими продуктами первичного разложения ВВ (CO_2 , H_2O). При этом одновременно снижаются параметры детонации, так как реакции взаимодействия происходят на стадии расширения продуктов детонации, а в самой ДВ алюминий ведет себя как инертный материал [1]. Таким образом, добавки Al усиливают фугасные формы работы взрыва и снижают бризантные.

В целях установления количественных связей проведены эксперименты по определению влияния добавок Al на параметры детонации мощных ВВ, в рассматриваемом случае — флегматизированные (5,5 %) гексоген и октоген.

В экспериментах определяли скорость детонации смесей D и скорость торцевого и радиального метания элементов. Исследования проводили на зарядах диаметром 20 мм, общая длина которых составляла восемь диаметров, а база измерения — пять диаметров. В качестве ионизационного датчика использовали медную фольгу толщиной 0,05 мм. Временные интервалы измерялись цифровым осциллографом С9-8 с погрешностью 50 нс. Заряды инициировали электродетонатором.

На рис. 1 приведены зависимости скорости детонации от плотности ρ смесей флегматизированного октогена с различным содержанием алюминия марки АСД-1. Из экспериментальных данных получены уравнения вида $D = D_1 + b(\rho - 1)$, которые представлены в таблице. Как и следовало ожидать, для смесей с алюминием, как и для индивидуальных ВВ, наблюдается линейная зависимость $D(\rho)$ [2], что подтверждается высокими коэффициентами корреляции.

На основании полученных данных построены зависимости $D(\alpha)$ при разных относительных плотностях $\bar{\rho}$ (рис. 2). Расчеты показали, что зависимость скорости детонации ВВ от процентного содержания алюминия α описывается в основном двумя видами уравнений: $D = a + b\alpha_n$ и $D = 1/(a + b\alpha)$.

Аналогичный эксперимент проведен со смесями флегматизированного гексогена с различными марками Al при $\bar{\rho} = 0,9$. Результаты, приведенные на рис. 3 показывают, что марка Al влияет на скорость детонации ВВ, а зависимость $D(\alpha)$ в этом случае описывается теми же уравнениями, что и для флегматизированного октогена.

Исследование влияния Al на бризантно-фугасные формы работы взрыва (метательную способность) проводили двумя методами. Опреде-