

УДК 534.222.2

О РЕАКЦИИ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ОКРУЖАЮЩИМ ВОЗДУХОМ

В. Ю. Давыдов, А. С. Губин, Ф. С. Загрядцкий, И. В. Потапов

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

Исследованы метательная способность и скорость расширения продуктов детонации взрывчатых веществ на основе гексогена и октогена, а также их смесей с дисперсным Al. Измерения проводили как в воздухе при атмосферном давлении, так и в разреженной атмосфере. Сравнение полученных результатов показало, что продукты детонации взрывчатых веществ, в том числе без добавок Al, реагируют с окружающим воздухом. Полнота реакции возрастает с увеличением скорости движения продуктов детонации в воздухе.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, продукты детонации, дисперсный алюминий, взрыв в воздухе, метательная способность.

В публикациях [1, 2] было показано не только количественное, но и качественное различие эффектов от добавки Al в составы на основе флегматизированных гексогена (А-IX-1) и октогена (окфол-3,5) в случаях, когда продукты детонации (ПД) контактируют с атмосферным воздухом и когда такого контакта нет.

Было установлено, что в воздухе скорость метания стальных оболочек при уменьшении их толщины с 10 до 2 мм возрастает с 11 до 17 % при добавлении 10 ÷ 15 % алюминия к А-IX-1 [1]. В то же время добавка Al дает незначительный (до 2 %) прирост [3, 4] или снижение [5] скорости метания в случаях, когда ПД и воздух разделены медной трубкой (цилиндр-тест, Т-20).

Как видно из данных табл. 1 и 2, добавка алюминия к А-IX-1 приводит к повышению скорости ПД как в осевом (23 %), так и радиальном направлении (17 %) при разлете в воздух, в то время как при разлете в разреженную воздушную среду скорость значительно снижается. Полученный эффект оказался больше, чем при метании стальных оболочек и особенно пластин, и связан с ускоренным реагированием Al при контакте ПД, расширяющихся с высокой скоростью, с кислородом воздуха. Ускорение горения Al связано с турбулизацией потока на границе раздела ПД — воздух, возникающей вследствие образования множественных микрокумулятивных струй [2] на поверхности

Таблица 1
Параметры, характеризующие расширение
продуктов детонации в торцевом направлении

Взрывчатый состав	Среда	u , км/с	u_{vac}/u_{air}
А-IX-1	Разреженный воздух	12.72	1.35
А-IX-1	Воздух	9.43	—
А-IX-1 + 10 % Al	Воздух	11.64	—
А-IX-1 + 10 % Al	Разреженный воздух	10.78	0.93

зарядов.

Для подтверждения влияния указанного фактора были выполнены измерения скорости метания стальных оболочек и пластин в разреженном воздухе. Взрывную камеру вакуумировали до остаточного давления воздуха 10 кПа. Оболочки и пластины толщиной 2 мм металлы зарядами ВВ диаметром 20 мм и длиной 120 мм. Проводилась рентгеноимпульсная съемка [6, 7] процесса. Схема экспериментальной сборки показана на рис. 1, рентгенограмма, полученная в одном из экспериментов, — на рис. 2.

Было установлено, что при метании пластин добавка Al приводила к снижению скорости приблизительно на 7 %, т. е. в два раза большому, чем при метании в воздухе (3 ÷ 4 %). Скорость метания стальных оболо-

Таблица 2

Параметры, характеризующие расширение продуктов детонации в радиальном направлении

Взрывчатый состав	ρ , г/см ³	D , км/с	u , км/с		u_{vac}/u_{air}
			разреженный воздух	воздух	
A-IX-1	1.66	8.37	9.14	6.15	1.49
A-IX-1 + 10 % Al	1.72	8.15	8.65	—	—
A-IX-1 + 20 % Al	1.76	7.92	—	7.10	—

Примечание. ρ — плотность заряда, D — скорость детонации.

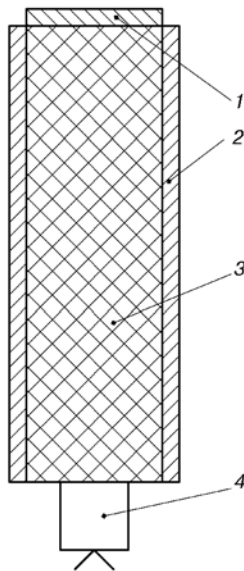


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки:

1 — стальная пластина, 2 — стальная оболочка, 3 — ВВ, 4 — электродетонатор

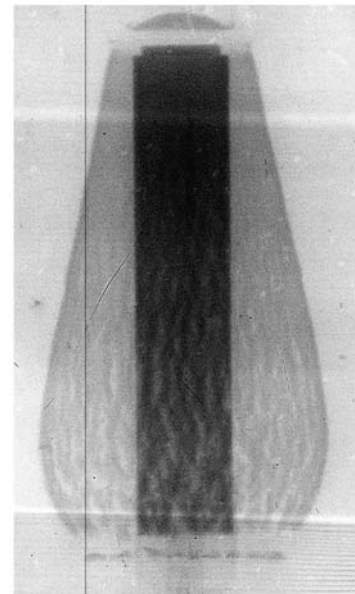


Рис. 2. Рентгенограмма процесса расширения оболочки и метания пластины при одностроннем инициировании

чек в разреженной атмосфере для смеси А-IX-1 с 10 % Al превысила (в среднем по различным сечениям) скорость метания оболочек зарядами А-IX-1 лишь на 3 % (рис. 3, кривые 4). В то же время при метании оболочек той же толщины в воздухе [1] с добавлением 10 % Al прирост скорости метания составил 17 %.

Таким образом, эффект от добавки Al в опытах в разреженном воздухе при метании оболочек снижается более чем в 5 раз. При этом наличие контакта ПД алюминизированных ВВ с воздухом является главным фактором, определяющим степень трансформации энергии сгорания Al в работу метания (расширения ПД). Предложенная в [7] модель процессов, происходящих на контактной границе ПД — воздух (модель «пробки»), позволяет

объяснить ряд экспериментальных результатов, полученных для алюминизированных ВВ, ранее казавшихся неожиданными.

Учитывая, что многие ВВ, не содержащие Al, также обладают избытком горючих элементов, можно ожидать, что догорание ПД в воздухе будет проявляться и для них. Действительно, кислородный коэффициент гексогена и октогена равен 0.67, т. е. для полного окисления горючих элементов этих ВВ не хватает трети кислорода. Следовательно, эффект от догорания ПД должен быть весьма заметным в экспериментах. Наиболее удобно это проследить, сравнивая результаты экспериментов в воздухе и разреженной среде.

При анализе результатов следует учитывать влияние конкурирующих факторов. Ско-

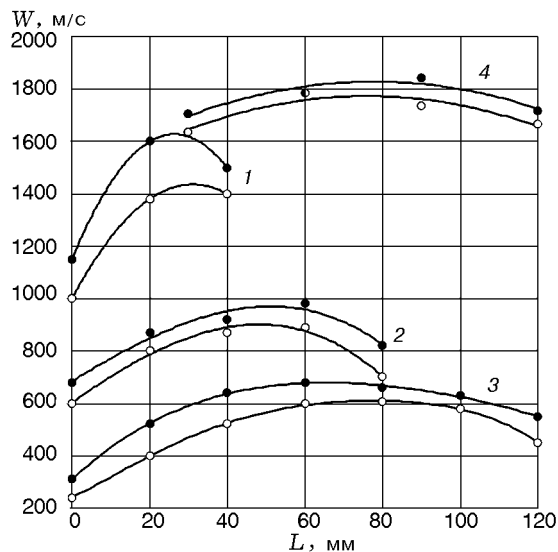


Рис. 3. Изменение скорости разлета стальных оболочек разной толщины по длине при детонации зарядов:

○ — А-IX-1, ● — А-IX-1 + 10 % Al; толщина оболочек: 1 — 2 мм, 2 — 5 мм, 3 — 10 мм, 4 — 2 мм

рость метания тел и скорость расширения ПД без их догорания должны быть выше в разреженном воздухе, вследствие ее меньшей плотности, чем в воздухе при атмосферном давлении. При наличии догорания с увеличением давления воздуха и скорости движения ПД относительно воздуха различие скоростей (метания тел, расширения ПД) должно снижаться в результате выделения дополнительной энергии в реакции ПД с воздухом. С увеличением времени спада параметров ПД (давления и температуры) различие указанных скоростей в воздухе и разреженной атмосфере также должно снижаться.

Обратимся к данным табл. 1 и 2. Скорость радиального расширения ПД А-IX-1 в разреженной атмосфере u_{vac} на 49 % выше, чем в воздухе u_{air} (см. табл. 2). При торцевом разлете скорость движения ПД этого ВВ возрастает с 6.15 до 9.43 км/с и разность между u_{vac} и u_{air} снижается до 35 % (см. табл. 1). Отметим, что для алюминизированного ВВ при торцевом расширении (см. табл. 1) разница скоростей в разреженном воздухе и при атмосферном давлении имеет противоположный знак. Скорость расширения ПД в воздухе на 8 % выше, чем в разреженной атмосфере, что свидетельствует об интенсивной реакции ПД алюминизированных ВВ с воздухом.

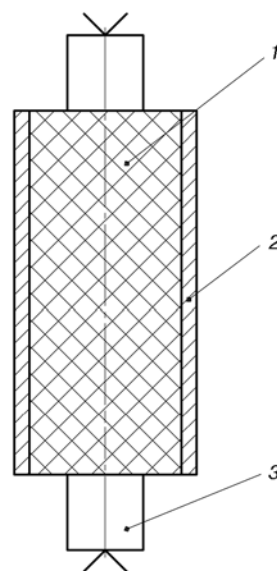


Рис. 4. Схема экспериментальной сборки:

1 — ВВ, 2 — стальная оболочка, 3 — электродетонатор

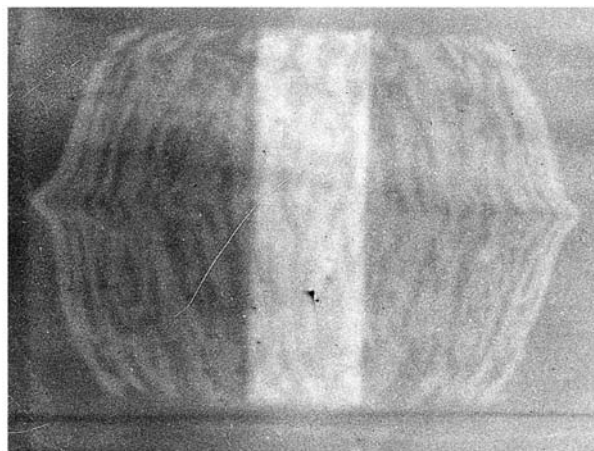


Рис. 5. Рентгенограмма процесса расширения оболочки при двухстороннем инициировании

При помещении заряда А-IX-1 того же диаметра (20 мм) в стальную оболочку толщиной 2 мм различие скоростей метания в разреженном воздухе и при атмосферном давлении снизилось и составило 24 % (см. рис. 3). При двухстороннем инициировании зарядов окфла-3,5 диаметром 20 мм и длиной 80 мм (см. схему эксперимента на рис. 4), помещенных в стальную оболочку толщиной 2 мм, когда скорость метания оболочки и скорость истечения ПД при взаимодействии встречных детонаци-

Таблица 3

Скорость разлета стальных трубок с толщиной стенки 2 мм при двухстороннем инициировании зарядов окфола

Среда	ρ , г/см ³	v , м/с	Относительная скорость, %
Разреженный воздух	1.76	2 112 ± 22	100
Воздух	1.76	2 041 ± 25	97

Примечание. v — скорость расширения трубки в среднем сечении.

онных волн возрастают (рис. 5), разница скоростей в воздухе и в разреженной среде сократилась до 3 % (табл. 3).

В испытаниях по методике М-20 (рис. 6) медную пластину толщиной 1.5 мм метали зарядом флегматизированного октогена диаметром 20 мм и длиной 30 мм, помещенным в стальную оболочку толщиной 10 мм. Рентгеноимпульсная съемка процесса позволила определить не только скорость пластины v_{pl} , но и скорость радиального расширения оболочки v_{rad} в сечении, удаленном от точки инициирования на расстояние 15 мм. На рис. 7 представлена рентгенограмма, полученная в одном из экспериментов. Из экспериментальных данных, приведенных в табл. 4, видно, что в этих условиях испытаний скорость метания в воздухе на

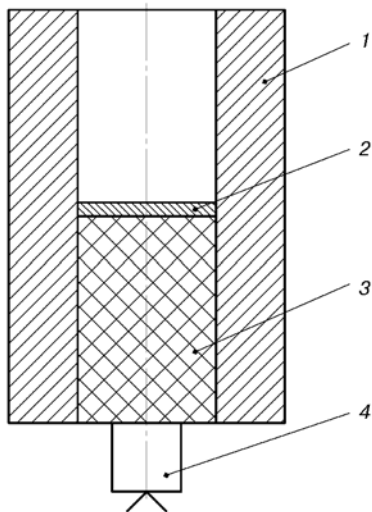


Рис. 6. Схема экспериментальной сборки в опытах по методике М-20:

1 — стальная оболочка, 2 — медная пластина, 3 — ВВ, 4 — электродетонатор

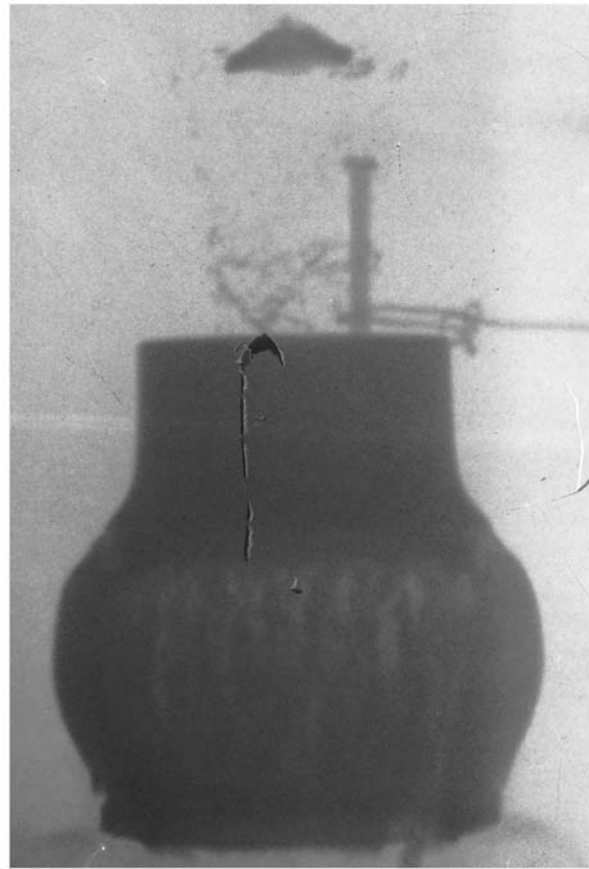


Рис. 7. Рентгенограмма процесса расширения в опытах по методике М-20

Таблица 4

Результаты измерения в опытах по методике М-20 при метании пластины флегматизированным октогеном

Среда	ρ , г/см ³	v_{pl} , м/с	v_{rad} , м/с
Разреженная атмосфера	1.764	2 614 ± 24	423 ± 11
Воздух	1.766	2 697 ± 40 (+3 %)	450 ± 10 (+6 %)

Примечание. В скобках указаны относительные скорости.

3 ÷ 6 % превышает скорость метания в разреженной атмосфере.

Численное моделирование в программном комплексе ANSYS AUTODYN (табл. 5) показало, что в рассмотренных схемах испытаний время спада давления в ПД возрастает с 13.5 до 40 мкс. При этом разница скоростей (метания, расширения ПД) в воздухе и в разреженной атмосфере изменяется от резко отрицательного

Таблица 5
Результаты численного моделирования

Схема испытаний	Время спада давления до 300 бар, мкс	Отношение скоростей метания в воздухе и в разреженной среде, %
Заряд без оболочки	13.5	-49 ÷ -35
Заряд в оболочке толщиной 2 мм	20.4	-24 ÷ -3
Заряд в оболочке толщиной 10 мм (методика М-20)	40.0	3 ÷ 6

(-49 %) до положительного (3 ÷ 6 %) значения.

Таким образом, приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что продукты детонации ВВ, не содержащие добавок дисперсного Al, также реагируют с воздухом. Об этом свидетельствует возрастание отношения скорости метания (расширения ПД) в воздухе к скорости метания (расширения ПД) в разреженной среде. Это означает, в частности, что результаты экспериментов, в которых отсутствует контакт ПД с воздухом (цилиндр-тест, Т-20) могут существенно отличаться от данных экспериментов, в которых такой контакт реализуется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Продукты детонации ВВ с избытком горючих компонентов догорают в воздухе, что выражается в сильной зависимости показателей эффективности ВВ, особенно алюминизированных, от газодинамических условий испытаний.

2. Эффект от догорания ПД в воздухе связан с их турбулентным перемешиванием с воздухом, что, в частности, проявляется для алюминизированных ВВ в возрастании эффекта по мере уменьшения толщины оболочки и в увеличении скорости движения ПД относительно воздуха и его давления.

3. Эффект от догорания продуктов детонации ВВ, не содержащих добавок Al, возрастает с увеличением толщины оболочки, времени спада давления в ПД и скорости движения ПД относительно воздуха.

4. Повышение давления окружающего воздуха в 10 раз приводит к уменьшению примерно в два раза отрицательного эффекта от добавки Al при метании пластин и к увеличению более чем в пять раз положительного эффекта при метании оболочек.

5. Использование в расчетах уравнений состояний, тестированных по экспериментальным методикам, в которых не учитывается контакт ПД с воздухом (цилиндр-тест, Т-20), может дать ошибочные результаты (особенно для алюминизированных ВВ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов В. Ю., Козмерчук В. В., Мурышев Е. Ю., Голавлев И. Д. Влияние добавок порошкообразного алюминия на энергию ВВ, передаваемую в осевом и радиальном направлениях // Физика горения и взрыва. — 1988. — Т. 24, № 3. — С. 96–98.
2. Давыдов В. Ю. Разлет продуктов детонации флегматизированного гексогена и его смесей с дисперсным алюминием // Хим. физика. — 2008. — Т. 27, № 8. — С. 57–60.
3. Finger M., Hornig H. C., Lee E. L., et al. Metal acceleration by composite explosives // 5th Symp. (Intern.) on Detonation, Pasadena, California, 1970. — P. 55–63.
4. Махов М. Н., Гогоуля М. Ф., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Архипов В. И., Пепекин В. И. Метательная способность и теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 4. — С. 96–105.
5. Bjarnholt G. W. Effects of aluminum and lithium fluoride admixtures on metal acceleration ability of comp B // 6th Symp. (Intern.) on Detonation, Coronado, California, 1976. — P. 517–526.
6. Давыдов В. Ю., Грязнов Е. Ф., Губин А. С. и др. Метание стальных пластин и трубок при детонации флегматизированного гексогена и его смеси с алюминием в разреженной атмосфере // Междунар. конф. «XI Харитоновские тематические научные чтения»: сб. докл. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. — С. 435–440.
7. 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.

Поступила в редакцию 16/X 2013 г.,
в окончательном варианте — 18/III 2014 г.