

УДК 534.2

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПВДФ-ДАТЧИКОМ

Чж.-Ц. Фань, Х.-Х. Ма, Чж.-У Шень, М.-Цз. Линь

Китайский университет науки и технологии, 230027 Хэфэй, Китай, hhma@ustc.edu.cn

Измерено давление при подводном взрыве алюминизированных взрывчатых веществ. Алюминий добавляли в гексоген в виде порошка или чешуек. Давление регистрировали специально сконструированным датчиком, чувствительным элементом которого была пленка поливинилиденфторида. Установлено, что при добавке алюминия к гексогену амплитуда ударных волн несколько снижается, причем пиковое давление от зарядов с алюминиевыми чешуйками немного ниже, чем от зарядов с алюминиевым порошком.

Ключевые слова: поливинилиденфторид, алюминиевые чешуйки, алюминизированное взрывчатое вещество, подводный взрыв.

DOI 10.15372/FGV20150315

ВВЕДЕНИЕ

Алюминизированные взрывчатые вещества (ВВ) интенсивно исследуются в последние десятилетия с целью выявить эффекты, возникающие в результате вторичных реакций алюминия и продуктов детонации. Обычно алюминий в качестве добавки используется в виде порошка. Влияние массового содержания и размера частиц на детонационные характеристики композитных ВВ изучено в [1, 2]. Результаты работы [3] показали, что добавка порошка алюминия в заряд явно увеличивает импульс ударной волны и энергию пузыря при взрыве под водой. Размер частиц алюминия в этих работах находился в диапазоне от нанометров до микрометров, добавка алюминия увеличивала ударную чувствительность ВВ. Однако механические свойства зарядов с алюминиевым порошком нестабильны из-за внутренних структурных дефектов. Поэтому в настоящей работе предложен новый тип ВВ, содержащий алюминий в виде тонких чешуек. Предварительные тесты показали, что такое неидеальное композитное ВВ увеличивает энергию взрыва и пузыря при подводных экспериментах, но как и добавка порошка, уменьшает пиковое давление ударной волны. В предыдущих работах зарегистрированы профили давления на далеких рас-

стояниях от центра взрыва, но характеристики затухания давления в ближней зоне подводного взрыва требуют дальнейшего исследования.

В настоящее время давление при подводных взрывах регистрируется в основном датчиками на основе кристалла турмалина, которые имеют ограниченный диапазон измерения из-за рассогласования импеданса с водой [4], поэтому трудно измерять ими давление в ближней зоне взрыва. Кроме того, в этой зоне увеличивается риск разрушения датчика осколками детонатора или горячими продуктами взрыва.

Поливинилиденфторид (ПВДФ) — это пьезорезистивный полимер, широко используемый при проведении измерений в ударно-волновых экспериментах [5, 6]. Ему можно придать различную сложную форму при изготовлении тонких датчиков давления с наносекундным разрешением. ПВДФ-датчик характеризуется более длинным временем записи по сравнению с манганиновым датчиком. В работе [7] он использовался для изучения детонации неидеального эмульсионного ВВ с добавкой алюминия. В работе [8] таким датчиком зарегистрирован профиль детонационного давления неидеального ВВ, состоящего из уплотненного слоя алюминиевого порошка с частицами различного размера, насыщенного чистым нитрометаном, и проанализировано влияние размера частиц на профиль ударной волны. Детальное исследование датчиков давления на основе ПВДФ показало, что диапазон возможного

измерения давления может быть расширен до 25 ГПа [9, 10]. По сравнению с датчиками на основе турмалина и пьезоэлектрическими преобразователями ПВДФ-датчики больше подходят для измерения давления при подводных взрывах, так как их импеданс ближе к импедансу воды. Кроме того, их стоимость намного меньше, чем стоимость датчиков с кристаллом турмалина. В [11, 12] разработан новый тип датчика на основе фторполимера для измерения давления под водой. Амплитуда ударной волны, зарегистрированная этим датчиком при подводном взрыве эмульсионного ВВ без добавки и с добавкой алюминия, превышала 400 МПа. Это указывает на возможность использования ПВДФ-датчиков при подводных взрывах.

В данной работе разработан и прокалиброван специальный датчик на основе ПВДФ для регистрации давления при подводных взрывах. Им измерено давление при взрывах ВВ с добавкой алюминиевых чешуек, и выполнено сопоставление с результатами взрыва зарядов ВВ с добавкой алюминиевого порошка и зарядов гексогена.

СХЕМА ПВДФ-ДАТЧИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ОТ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА

На рис. 1, *а* показано устройство датчика давления на основе ПВДФ, на рис. 1, *б* — эскиз чувствительного элемента. Толщина фторполимерной пленки 50 мкм, площадь чувствительного элемента 6×3 мм. Выводами служат две полоски алюминиевой фольги толщиной 10 мкм и шириной 1.5 мм, что позволяет минимизировать влияние индуктивности [6]. Пьезоэлектрическая пленка и выводы размещены между двумя полиэфирными пленками толщиной по 50 мкм. В качестве связующего использовали эпоксидный клей. Собранный датчик давления помещали в полиэтиленовую трубку внутреннего диаметра 9 мм с толщиной стенки 1.5 мм. Трубку заполняли силиконовым маслом, у которого хорошие изоляционные свойства, а импеданс почти равен акустическому импедансу воды. С обоих концов трубка была закрыта нейлоновыми пробками. Внутренние выводы были присоединены к коаксиальному кабелю, проходившему через верхнюю заглушку, и герметизированы эпоксидной смолой. Для того чтобы датчик находился в вертикальном положении при проведении подводных взрывов, его крепили к прямой полоске с присоединенным грузом (≈ 1 кг). Чувствительный элемент и заряд размещали на одном горизонтальном уровне.

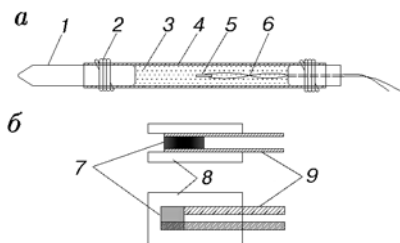


Рис. 1. Датчик для регистрации давления при подводных взрывах:

а — общий вид, *б* — конструкция чувствительного элемента из ПВДФ; 1 — вставка, 2 — стяжка, 3 — силиконовое масло, 4 — полиэтиленовая трубка, 5 — чувствительный элемент, 6 — коаксиальный кабель, 7 — площадь напыленной зоны в чувствительном элементе 6×3 мм, 8 — полиэфирная пленка, 9 — алюминиевая фольга

зоэлектрическая пленка и выводы размещены между двумя полиэфирными пленками толщиной по 50 мкм. В качестве связующего использовали эпоксидный клей. Собранный датчик давления помещали в полиэтиленовую трубку внутреннего диаметра 9 мм с толщиной стенки 1.5 мм. Трубку заполняли силиконовым маслом, у которого хорошие изоляционные свойства, а импеданс почти равен акустическому импедансу воды. С обоих концов трубка была закрыта нейлоновыми пробками. Внутренние выводы были присоединены к коаксиальному кабелю, проходившему через верхнюю заглушку, и герметизированы эпоксидной смолой. Для того чтобы датчик находился в вертикальном положении при проведении подводных взрывов, его крепили к прямой полоске с присоединенным грузом (≈ 1 кг). Чувствительный элемент и заряд размещали на одном горизонтальном уровне.

КАЛИБРОВКА ДАТЧИКА

На рис. 2 показано экспериментальное оборудование и резервуар для проведения опытов. Диаметр и высота резервуара по 5 м. Глубина воды в резервуаре в среднем $H = 4.5$ м. Чтобы выполнить условие, при котором взрыв считается подводным, заряд и датчик размещали на расстоянии $h = 2$ м от поверхности воды. В качестве стандартного заряда выбран гексоген, масса заряда 10 г, диаметр и высота по 20 мм. Заряд плотностью $\rho \approx 1.62$ г/см³ инициировали неэлектрическим детонатором. Согласно рекомендациям [4] датчик давления работал в токовом режиме, а резистор с сопротивлением 1 кОм был подключен параллельно чувствительному элементу на конце датчика. Профили давления получали интегрированием зарегистрированных сигналов. В ходе экспериментов датчики давления размещали на различ-

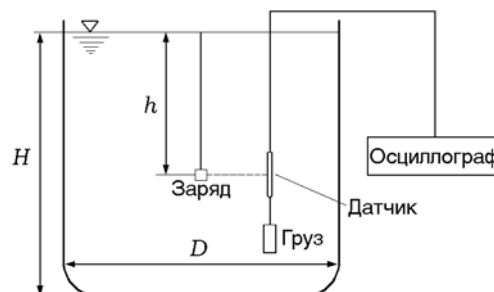


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

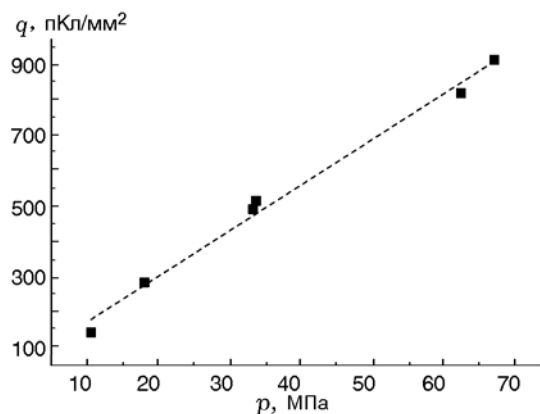


Рис. 3. Калибровочная кривая датчика давления с чувствительным элементом на основе ПВДФ

ном расстоянии от заряда. Амплитуду ударной волны p_m рассчитывали по выражению [13]

$$p_m = \frac{35.5}{\bar{R}} + \frac{11.5}{\bar{R}^2} - \frac{0.244}{\bar{R}^3}, \quad 0.05 \leq \bar{R} \leq 10. \quad (1)$$

Здесь $\bar{R} = R/W^{1/3}$ — приведенное расстояние, м/кг^{1/3}, R — расстояние между зарядом и датчиком, W — масса тротилового эквивалента заряда. На рис. 3 показана экспериментальная зависимость плотности электрического заряда чувствительного элемента от пика давления в ударной волне, рассчитанного по (1). Линейная аппроксимация этих данных дает значение коэффициента чувствительности датчика давления $K = 13.84$ пКл/Н, при этом коэффициент корреляции равен 0.989.

На рис. 4 показаны профили давления, зарегистрированные ПВДФ и турмалиновым датчиками на различных расстояниях от заряда. Чувствительным элементом турмалинового датчика (ICP W138A25, PCB) был кристалл диаметром 4 мм. Как видно на рис. 4, разница в пиках давления, измеренных двумя типами датчиков, не превышает 7%. Формы зарегистрированных профилей также хорошо соответствуют друг другу. Ударное давление резко нарастает до максимума за сопоставимое для обоих датчиков время.

Профили, зарегистрированные турмалиновым датчиком, в конце действия ударной волны расположены несколько выше, чем профили, зарегистрированные ПВДФ-датчиком. Отметим, что задние фронты последних профилей не такие гладкие, как при регистрации

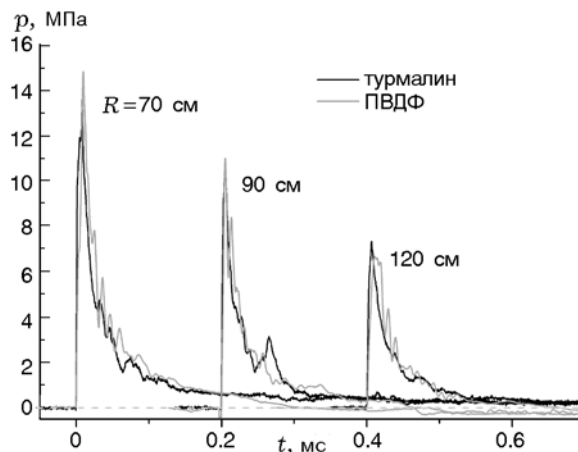


Рис. 4. Профили давления при различных расстояниях между зарядом ($W = 10$ г) и датчиками на основе ПВДФ и турмалина

турмалиновым датчиком: на профилях наблюдается «звон» в виде отдельных затухающих выбросов. Согласно результатам [14] это может быть связано с индуктивностью пьезоэлектрической пленки. Кроме того, анализ показывает, что нестабильность заднего фронта может быть вызвана рассогласованием между импедансами гибкой полиэтиленовой трубки, находящейся снаружи датчика, и силикона. Однако это не влияет на измерение пикового давления при подводном взрыве.

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

В данной работе в качестве основы композитных ВВ выбран гексоген. Алюминиевые чешуйки размером $\approx 6 \times 2$ мм готовились прокаткой, их толщина варьировалась от 8 до 10 мкм. Массовое содержание чешуек в композитном ВВ (AlF-RDX) 20%. Для сравнения при тех же условиях выполняли эксперименты с композитным ВВ с добавлением алюминиевого порошка (AlP-RDX). Массовое содержание порошка составляло также 20%, а размер частиц был на уровне нанометров. Все типы ВВ прессовались при одном и том же давлении, состав приведен в таблице.

До начала подводных взрывов проводили тесты по квазистатическому сжатию исследуемых типов композитных ВВ с использованием универсальной испытательной машины (MTS 810). На рис. 5 представлены зависимости предела прочности σ_B и модуля упругости E композитных ВВ от содержания алюминия,

Состав использованных ВВ

Тип заряда	Массовое содержание компонентов, %				Плотность, г/см ³
	гексоген	парафин	алюминий		
			чешуйки	порошок	
Гексоген	95	5	0	0	1.60 ÷ 1.61
AlF-RDX	76	4	20	0	1.72 ÷ 1.74
AlP-RDX	76	4	0	20	1.70 ÷ 1.72

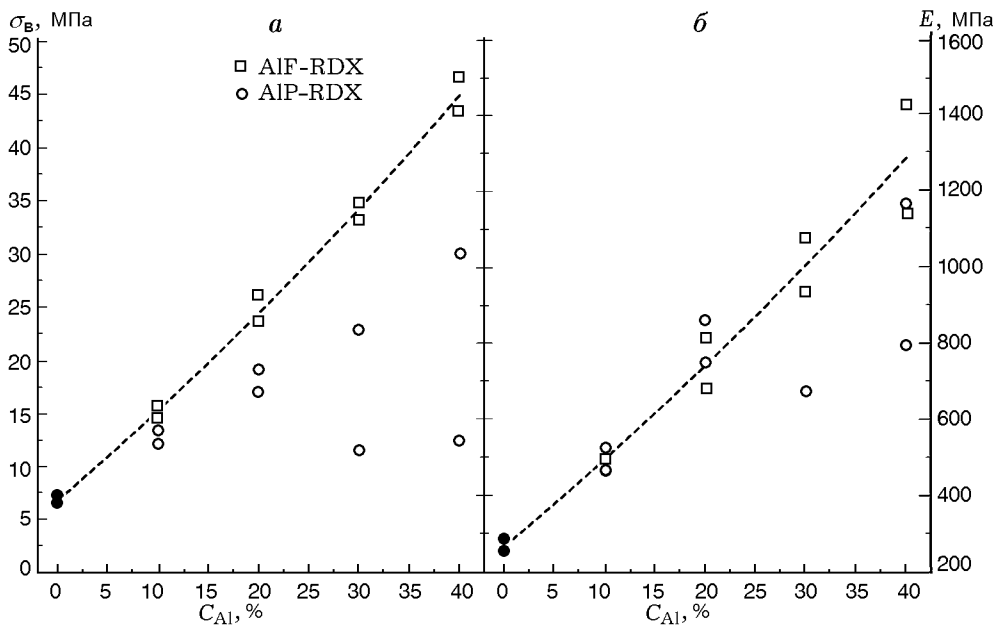


Рис. 5. Зависимости предела прочности (а) и модуля упругости (б) композитных ВВ от содержания алюминия

взятого как в форме чешуек, так и в виде порошка. Тесты показали, что в обоих случаях добавка алюминия в гексоген увеличивает предел прочности и модуль упругости ВВ. Однако для ВВ с добавкой порошка наблюдается заметный разброс данных (см. рис. 5), особенно для образцов с содержанием алюминия больше 20 %. Введение же алюминия в виде чешуек обеспечивает лучшие механические свойства образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты проведены с тремя типами ВВ при изменении расстояния между зарядом и датчиком в диапазоне 0.3 ÷ 0.7 м, следовательно, в интервале $R/W^{1/3} = 1.292 \div 3.015$ м/кг^{1/3}. Результаты измерения пикового давления в ударной волне в зависимости от относительного расстояния

R/r_0 (r_0 — радиус заряда) при взрыве различных ВВ и аппроксимирующие кривые представлены на рис. 6. Видно, что пиковое давление от зарядов из гексогена с добавкой алюминиевого порошка немного меньше по сравнению с зарядами только из гексогена, а при добавке алюминия в виде чешуек — еще меньше. Характер затухания давления для зарядов гексогена хорошо совпадает с теоретическими расчетами [13]. На рис. 7 представлены профили давления от различных ВВ, зарегистрированные на одном и том же расстоянии от заряда. Как видно, на задних фронтах ударных волн профили от ВВ, содержащих алюминий, расположены несколько выше профиля от чистого гексогена, что также наблюдалось в работе [12]. Это показывает, что добавка алюминия в виде чешуек, так же как и в виде порошка, создает

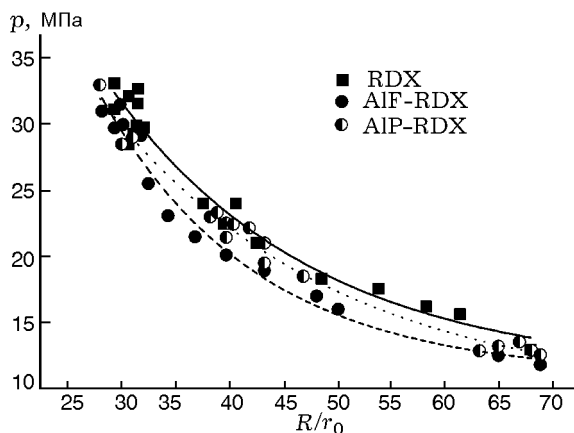


Рис. 6. Зависимость пикового давления в ударной волне от относительного расстояния при взрыве различных ВВ под водой

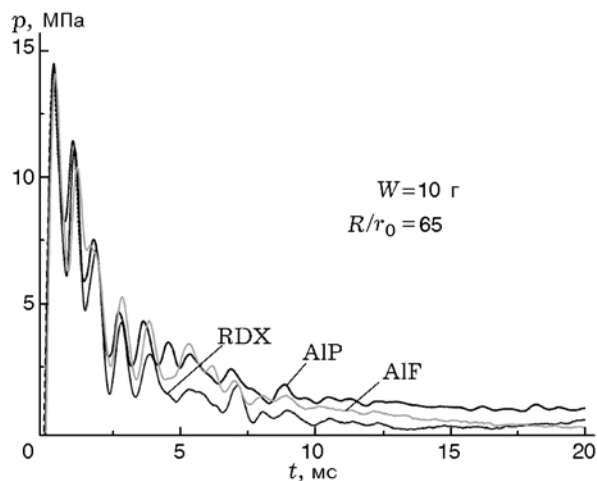


Рис. 7. Профили давления при взрыве различных ВВ

дополнительный эффект, который должен быть соотнесен со вторичными реакциями алюминия и продуктов детонации.

Наличие «звона» и нестабильность задних фронтов профилей, зарегистрированных ПВДФ-датчиком, затрудняют детальное выяснение формы ударной волны. Поэтому расчет ее импульса и энергии взрыва путем интегрирования кривых давление — время оказалось невозможным. Кроме того, необходимо экспериментально проверить, как малая длительность ударной волны от подводного взрыва соотносится с коротким временем разряда чувствительного элемента из ПВДФ. Тем не менее, из анализа результатов калибровки и экспериментов следует, что датчик на основе ПВДФ

является перспективным для измерения давления при подводных взрывах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов показали, что ПВДФ-датчик обладает стабильной чувствительностью и может использоваться для измерения давления при подводных взрывах. Пиковое давление в ударной волне от взрыва композитного ВВ на основе гексогена, содержащего алюминиевые чешуйки, несколько меньше, чем от ВВ, содержащего алюминиевый порошок, при изменении относительного расстояния от 30 до 70. В то же время пиковое давление от ВВ с добавкой алюминиевого порошка ближе к давлению, возникающему при взрыве зарядов чистого гексогена, на одном и том же фиксированном расстоянии от заряда. Квазистатические тесты на сжатие зарядов гексогена и двух типов алюминизированных ВВ показали, что введение алюминиевых чешуек больше улучшает механические характеристики таких ВВ, чем добавка алюминиевого порошка.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (51174183, 51134012).

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang W., Jian L.-W., Guo W., Xian Z.-J. Influence of aluminum contents on the detonation pressure and detonation velocity of RDX-based aluminized explosive // *Chin. J. Explos. Propel.* — 2010. — V. 33, N 2. — P. 15–18.
2. Gogulya M. F., Dolgoborodov A. Yu., Brazhnikov M. A., Baudin G. Detonation waves in HMX/Al mixtures (pressure and temperature measurement) // *Proc. of 11th Intern. Detonation Symp.* — 1998. — P. 979–988.
3. Stromsoe E., Eriksen S. W. Performance of high explosives in underwater application. Part 2: Aluminized explosives // *Propel., Explos., Pyrotech.* — 1990. — V. 15. — P. 52–53.
4. Gustavson P., Tasker D., Forbes J. PVDF pressure transducers for shock wave and explosives research // Report NAVSWC-TR-91-506. — Naval Surface Warfare Center, Silver Spring, MD, USA, 1994.
5. Борисенок В. А., Симаков В. Г., Волгин В. А., Бельский В. М., Жерноклетов М. В. Исследование фазовых превращений в железе и церии ПВДФ-датчиком давления // *Физика горения и взрыва.* — 2007. — Т. 43, № 4. — С. 121–126.

6. **Борисенок В. А., Симаков В. Г., Брагунец В. А., Куропаткин В. Г., Кручинин В. А., Ромаев В. Н.** ПВДФ-датчик динамического давления: физическая модель и результаты экспериментов // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 5. — С. 109–115.
7. **Mendes R., Ribeiro J., Plaksin I., et al.** Non ideal detonation of emulsion explosives mixed with metal particles // AIP Conf. Proc. — 2012. — V. 1426, N 1. — P. 267–270.
8. **Murata K., Kato Y.** Application of PVDF pressure gauge for pressure measurements of non-ideal explosives // Intern. J. Soc. Mater. Eng. Resources. — 2010. — V. 17, N 2. — P. 112–114.
9. **Bauer F.** Ferroelectric PVDF polymer for high pressure and shock compression sensors // Proc. 11th Intern. Symp. on Electrets. — 2002. — P. 219–222.
10. **Bauer F.** PVDF gauge piezoelectric response under two-stage light gas gun impact loading // AIP Conf. Proc. — 2002. — V. 620. — P. 1149–1152.
11. **Murata K., Takahashi K., Kato Y.** Measurement of underwater explosion performances by pressure gauge using fluoropolymer // Proc. 12th Symp. (Intern.) on Detonation. — 2002. — P. 1–3.
12. **Murata K., Takahashi K., Kato Y.** Precise measurements of underwater explosion phenomena by pressure sensor using fluoropolymer // J. Mater. Process. Technol. — 1999. — V. 85, N 1. — P. 39–42.
13. **Henrych J.** The Dynamics of Explosion and Its Use. — Beijing: Science Press of China, 1987.
14. **Bauer F., Graham R. A., Anderson M. U., Lefebvre H., Lee L. M., Reed R. P.** Piezoelectric response of precisely poled PVDF to shock compression greater than 10 GPa // Proc. of the Inst. of Electronics and Electrical Engineers, 8th Intern. Symp. on Applications of Ferroelectrics. — 1992. — P. 273–276.

*Поступила в редакцию 23/І 2014 г.,
в окончательном варианте — 20/ІІІ 2014 г.*
