

УДК 662.215

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИНИЦИИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МИКРОДЕТОНАТОРА

А.-Цз. Хэ<sup>1,2</sup>, Н. Янь<sup>1</sup>, В.-Цз. Гэн<sup>1</sup>, Т. Чень<sup>2</sup>, Цз.-Ф. Ма<sup>2</sup><sup>1</sup>Пекинский технологический институт, 100081 Пекин, КНР, heaijun2008@163.com<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт промышленной группы Norinco, 100053 Пекин, КНР

Исследована инициирующая способность микродетонатора диаметром 0.9 мм и высотой 3 мм. Установлено, что критическая высота навески азида свинца равна 1.8 мм. Определено оптимальное соотношение высот навесок первичного и вторичного взрывчатых веществ в микродетонаторе, которое составляет  $0.7 \div 2.3$ . При одном и том же отношении высот зарядов первичного и вторичного ВВ выходное давление меняется от максимального к минимальному в ряду СL-20, октоген и гексоген.

Ключевые слова: микродетонатор, манганиновый датчик, выходное давление, инициирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Миниатюризация — это тенденция в конструировании современных взрывателей. Технология микроэлектромеханических систем (MEMS) позволяет уменьшить их объем на  $20 \div 50$  % [1–5], что идеально подходит для малогабаритных боеприпасов. Однако обычные системы инициирования не соответствуют требуемым размерам и структуре MEMS-взрывателей, для таких взрывателей необходимы микросистемы инициирования. Поскольку микродетонаторы являются первичным устройством инициирования в MEMS-взрывателях, исследование инициирующей способности таких микродетонаторов важно для дальнейшего конструирования всей взрывной цепи.

По мере уменьшения размера микродетонаторов разработчики сталкиваются со сложной проблемой: каким образом сконструировать микродетонатор, чтобы получить максимальный выход при ограниченном размере? Для решения этой проблемы необходимо определить количество первичного взрывчатого вещества (ВВ), выбрать вторичное ВВ и установить соотношение высот загрузки первичного и вторичного ВВ. Из этих трех вопросов

влиянию соотношения высот взрывчатых веществ на выходную мощность уделялось наибольшее внимание исследователей. В работах [6, 7] методом отпечатка (регистрация следа на пластине-свидетеле) установлено, что существует некоторое оптимальное соотношение высот зарядов первичного и вторичного ВВ. Авторы работы [8], используя методику манганинового датчика, изучали влияние соотношения высот взрывчатых веществ в детонаторе с внешним диаметром 2 и высотой 5 мм на его выходную мощность. Обнаружено, что высота навески азиды свинца ( $PbN_6$ ) должна быть не меньше 1.6 мм, а максимальное давление на выходе достигается при соотношении первичного и вторичного ВВ 1:1. В [9] при определении выходной мощности микродетонатора диаметром 1 мм установлено, что высота навески азиды серебра и вторичного взрывчатого вещества СL-20 в детонаторе должна быть не меньше 0.5 и 1.0 мм соответственно. Однако данных о выборе типа вторичного ВВ и соотношении первичного и вторичного ВВ в детонаторе в литературе недостаточно.

Для настоящих экспериментов разработан и успешно использован манганиновый микродатчик для измерения выходного давления. Образцы помещали в оболочку из нержавеющей стали следующих размеров: внутренний диаметр 0.9 мм, наружный — 1.25 мм, высота 3 мм. Для оптимизации микродетонаторов исследовали зависимости давления на выходе детонатора от высоты навески  $PbN_6$  и от отношения высот загрузки различных ВВ в нем.

© He Ai-Jun<sup>1,2</sup>, Yan Nan<sup>1</sup>, Geng Wan-Jun<sup>1</sup>, Chen Tao<sup>2</sup>, Ma Jun-Feng<sup>2</sup>, 2013.

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, 100081 Beijing, China; <sup>2</sup>Planning and Research Institute of Norinco Group, 100053 Beijing, China.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для питания электровоспламенителя и манганинового датчика использовался высоко-скоростной синхронизированный источник импульса постоянного тока. Он мог давать на датчик максимальный ток 9 А, при этом изменение амплитуды тока было меньше 1 % за 10 мкс [10]. Напряжение регистрировали осциллографом DPO7104.

Сборка для измерения выходного давления показана на рис. 1. Миниатюрный электровоспламенитель инициировал микрочаряд  $PbN_6$ . Воспламенитель состоял из нихромовой проволоочки (марка 6J20) диаметром 0.01 мм и очень малого количества стифната свинца (2,4,6-тринитрорезорцинат свинца, LTNR), который обеспечивал форс пламени на входе микродетонатора. Для точной сборки воспламенитель монтировали внутри втулки из стали 45. Под микрочарядом помещали защитную пластину полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 1 мм, прикрывавшую манганиновый датчик, а под ним — пластину ПММА толщиной 3 мм, чтобы уменьшить отражение импульса давления и избежать искажения регистрируемых результатов.

Манганиновый микродатчик имел Н-образную форму. Площадь, которую занимал

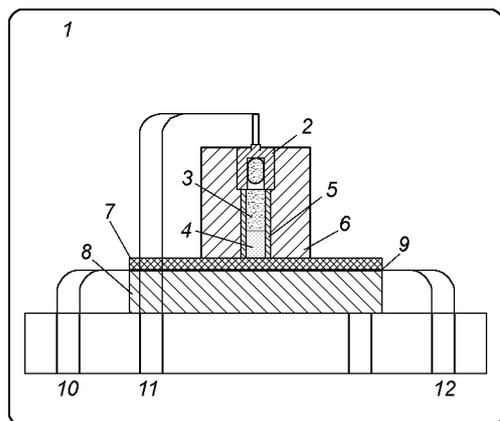


Рис. 1. Экспериментальная сборка:

1 — малогабаритная взрывная камера, 2 — трубка электровоспламенителя, 3 — первичное инициирующее ВВ, 4 — вторичное ВВ (или первичное), 5 — оболочка детонатора, 6 — фиксирующая втулка, 7 — защитная пластина из ПММА, 8 — основание из ПММА, 9 — манганиновый датчик, 10 — линия подачи постоянного тока к манганиновому датчику, 11 — линия подачи постоянного тока к электровоспламенителю, 12 — линия передачи сигнала от манганинового датчика

чувствительный элемент датчика, была прямоугольной формы и равнялась  $0.04 \text{ мм}^2$ , сопротивление датчика 0.2 Ом. Он размещался по центру микрочаряда и изолировался с двух сторон полиамидной пленкой толщиной  $30 \div 50 \text{ мкм}$ . Калибровочную кривую манганинового микродатчика определяли при помощи газовой пушки по соотношениям

$$p = 53.22(\Delta R/R_0) \quad (0 \div 5.907 \text{ ГПа}), \quad (1)$$

$$p = 1.978 + 35.28(\Delta R/R_0) \quad (> 5.907 \text{ ГПа}), \quad (2)$$

где  $p$  — давление, ГПа,  $\Delta R/R_0$  — относительное изменение сопротивления датчика.

На рис. 2 показана типичная экспериментальная осциллограмма. Так как в ходе эксперимента ток через датчик оставался постоянным, то  $(U_{\text{max}} - U_0)/U_0 = \Delta R/R_0$  и расчет давления проводился по формулам (1), (2). Поскольку перед датчиком помещена пластина ПММА толщиной 1 мм, реальное давление получали после коррекции по выражению из [11]:

$$p = p_0 \exp(-\alpha x), \quad (3)$$

$$\alpha = 0.0906 + 0.8615 \exp(-d/2.1743),$$

где  $p_0$  — реальное давление перед входом в ПММА, ГПа,  $\alpha$  — коэффициент ослабления ударной волны в ПММА,  $x$  — толщина пластины ПММА, мм,  $d$  — диаметр заряда, мм,  $p$  — давление после прохождения ПММА ударной волной, ГПа. В данных экспериментах  $d = 0.9 \text{ мм}$ ,  $x = 1 \text{ мм}$ . При подстановке этих значений в уравнения (3) получаем:

$$\alpha = 0.0906 + 0.8615 \exp(-0.9/2.1743) = 0.66, \quad (4)$$

$$p_0 = p / \exp(-0.66) = p / 0.5169.$$

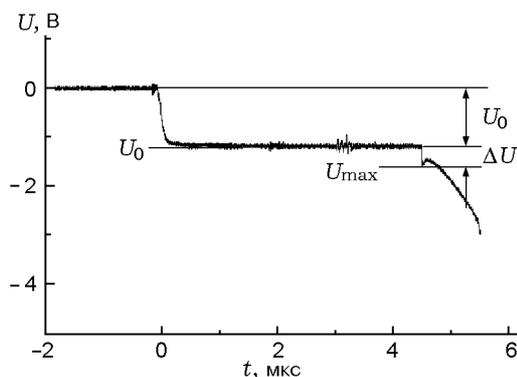


Рис. 2. Типичный сигнал, регистрируемый манганиновым датчиком

Таблица 1  
 Параметры заряда  $\text{PbN}_6$   
 при давлении прессования 125.75 МПа

№ п/п	Высота заряда, мм	Масса, мг
1	0.6	1.4
2	1.2	2.9
3	1.5	3.6
4	1.8	4.3
5	2.4	5.8
6	3.0	7.2

При исследовании развития детонации в первичном ВВ использовали микрозаряд обычного  $\text{PbN}_6$  высотой  $h$  со средним размером зерен  $\approx 100$  мкм, плотностью  $3.77 \text{ г/см}^3$  (80 % от теоретически максимальной). Давление прессования образцов составляло 125.75 МПа (табл. 1).

На рис. 3 приведены результаты обработки экспериментальных осциллограмм: разброс данных, средние значения и аппроксимирующая кривая. Наибольшее влияние на разброс данных оказывают плотность заряда и расположение датчика. Среднеквадратичное отклонение находится в пределах  $0.263 \div 0.596$  ГПа, т. е. экспериментальная погрешность меньше 10 %.

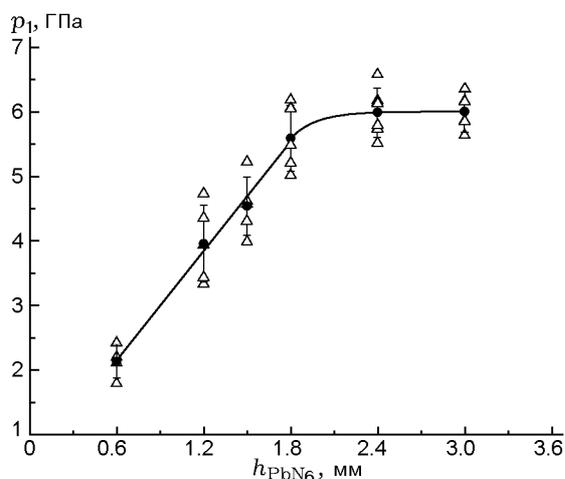


Рис. 3. Зависимость выходного давления от высоты микрозаряда  $\text{PbN}_6$ :

треугольники — разброс значений, темный кружок — среднее значение, вертикальные отрезки — среднеквадратичное отклонение

## АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из данных, представленных на рис. 3, при увеличении высоты микрозаряда  $\text{PbN}_6$  от 0.6 до 1.8 мм выходное давление быстро возрастает от 2.1 до 5.6 ГПа, при  $h_{\text{PbN}_6} > 1.8$  мм давление растет медленно, а при  $h_{\text{PbN}_6} > 2.4$  мм оно остается практически на уровне  $\approx 6.0$  ГПа. Отсюда следует, что для микрозаряда  $\text{PbN}_6$  диаметром 0.9 мм и плотностью  $\rho = 80$  % (от теоретически максимальной) критическое давление, при котором заканчивается его быстрый рост, достигается при высоте микрозаряда 1.8 мм.

Обычно после того, как детонация становится стационарной, ее скорость и давление в дальнейшем не меняются. В [12] установлено, что скорость детонации декстринизированного  $\text{PbN}_6$  ( $\rho = 2.86 \text{ г/см}^3$ ) достигается при  $h_{\text{PbN}_6} \approx 2$  мм. В работе [7] показано, что если отношение высоты заряда к диаметру меньше 2, а давление прессования меньше, чем давление прессования до максимальной плотности, то детонационный следовой отпечаток (на пластине-свидетеле) увеличивается почти линейно с ростом высоты заряда.

Из проведенного анализа и расположения точек на рис. 3 следует, что высота заряда 1.8 мм является точкой, разделяющей участки с разной скоростью нарастания давления (критическая высота), поэтому их можно аппроксимировать различными кривыми: при  $h_{\text{PbN}_6} < 1.8$  мм для средних значений  $\bar{p}_0$  можно использовать линейную аппроксимацию:

$$\bar{p}_0 = 0.139 + 3.048h_{\text{PbN}_6}, \quad R = 0.997,$$

при  $h_{\text{PbN}_6} > 1.8$  мм — экспоненциальную:

$$\bar{p}_0 = 6.010 - 9667.820 \exp(-h_{\text{PbN}_6}/0.179), \quad R = 1.$$

Значения коэффициента корреляции  $R$  подтверждают хорошее соответствие аппроксимирующей кривой экспериментальным данным. Для того чтобы гарантировать высокое давление на выходе микродетонатора, целесообразно увеличить высоту заряда свыше 1.8 мм. В настоящем исследовании впервые по выходному давлению определена критическая высота заряда  $\text{PbN}_6$ .

### ВЛИЯНИЕ ОТНОШЕНИЯ ВЫСОТ ЗАГРУЗКИ ПЕРВИЧНОГО И ВТОРИЧНОГО ВВ НА ВЫХОДНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Для экспериментов в качестве первичного ВВ выбран  $PbN_6$ , в качестве вторичного — октоген (НМХ). В микродетонатор сначала запрессовывали вторичное ВВ, а затем первичное. Давление прессования  $PbN_6$  — 125.75 МПа, октогена — 189 МПа. Соотношение высот загрузки взрывчатых веществ и результаты экспериментов представлены в табл. 2. Для того чтобы получить зависимость выходного давления от отношения высот зарядов  $PbN_6$  и НМХ и зависимость выходного давления от высоты заряда  $PbN_6$ , данные из табл. 2 обработаны методом наименьших квадратов. Результаты представлены на рис. 4 и 5. Аппроксимирующие зависимости следующие:

Таблица 2

Соотношение высот загрузки  $PbN_6$  и октогена в детонаторе и результаты экспериментов

Образец	$h_{PbN_6}$ , мм	$h_{НМХ}$ , мм	$h_{PbN_6}/h_{НМХ}$	$\bar{p}_1$ , ГПа	$\bar{p}_0$ , ГПа
1	0.6	2.4	1/4	3.9	7.5
2	1.2	1.8	2/3	5.2	10.1
3	1.5	1.5	1/1	5.3	10.2
4	1.8	1.2	3/2	5.4	10.4
5	2.4	0.6	4/1	4.4	8.6
6	3.0	0	$PbN_6$	3.1	6.0

Примечание.  $h_{PbN_6}$  — высота  $PbN_6$ ,  $h_{НМХ}$  — высота октогена,  $\bar{p}_1$  — давление после выхода из ПММА,  $\bar{p}_0$  — действительное давление.

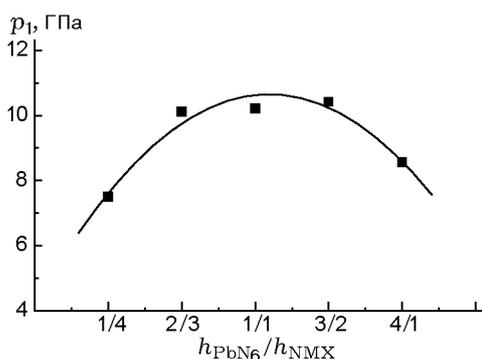


Рис. 4. Зависимость выходного давления от соотношения высот зарядов  $PbN_6$  и октоген

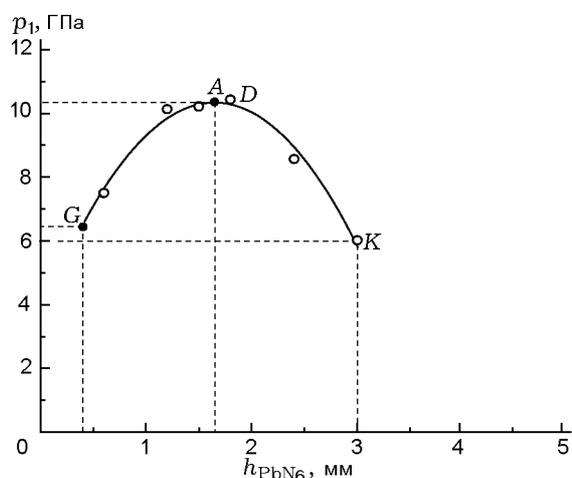


Рис. 5. Зависимость выходного давления от высоты заряда  $PbN_6$  в составном заряде

$$p = 4.194 + 4.048\delta - 0.634\delta^2, R = 0.946,$$

$$p = 3.649 + 8.118h_{PbN_6} - 1.463h_{PbN_6}^2, R = 0.981,$$

где  $p$  — выходное давление микродетонатора, ГПа,  $\delta$  — отношение высот первичного и вторичного ВВ.

В точке  $D$  на рис. 5, где высота заряда  $PbN_6$  составляет 1.8 мм, а октогена — 1.2 мм, выходное давление максимально (10.4 ГПа). В точке  $A$ , где высота заряда  $PbN_6$  равна 1.65, а октогена — 1.35 мм, расчетное выходное давление также близко к максимальному — 10.3 ГПа. Это несколько отличается от экспериментального результата, но аппроксимирующая кривая правильно отражает характер зависимости. Поскольку высоту загрузки различных ВВ в микродетонаторе очень трудно контролировать, то для того, чтобы выходное давление отличалось от максимального не больше чем на 5 %, отношение высот первичного и вторичного ВВ должно находиться в диапазоне  $0.7 \div 2.3$ .

### ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНОГО ДАВЛЕНИЯ ОТ ВЫБОРА ВТОРИЧНОГО ВВ

Выходная мощность микродетонатора может быть оптимизирована также за счет соответствующего выбора вторичного ВВ. В данных экспериментах в качестве первичного ВВ использован  $PbN_6$ , в качестве вторичного — октоген, гексоген и CL-20. Условия загрузки зарядов в микродетонатор такие же, как указано выше. Соотношение между высотами об-

Таблица 3  
Соотношение высот загрузки  
азида свинца и различных вторичных ВВ  
в детонаторе и результаты экспериментов

Вторичное ВВ	$h_{\text{PbN}_6}/h_{\text{ВВ}}$	$\bar{p}_1$	$\bar{p}_0$
PbN <sub>6</sub>	—	3.1	6.0
	2/3	5.2	9.9
PbN <sub>6</sub> и октоген	1/1	5.3	10.0
	3/2	5.4	10.2
	2/3	4.4	8.4
PbN <sub>6</sub> и гексоген	1/1	4.8	9.1
	3/2	5.0	9.5
	2/3	5.5	10.3
PbN <sub>6</sub> и CL-20	1/1	5.5	10.4
	3/2	5.8	11.0

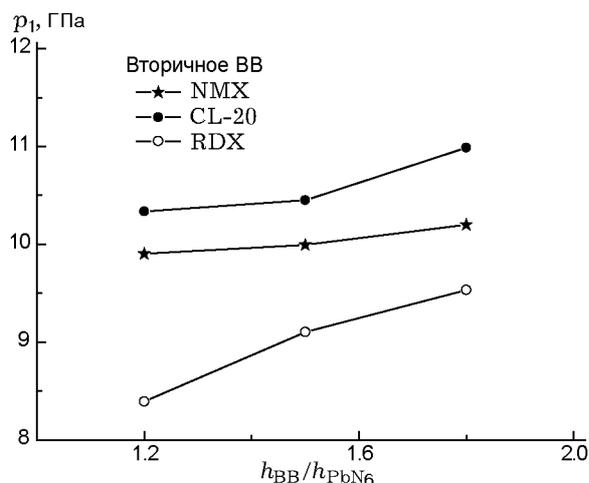


Рис. 6. Зависимость выходного давления от соотношения высот загрузки вторичного и первичного ВВ для различных вторичных ВВ

разцов взрывчатых веществ и результаты экспериментов представлены в табл. 3 и на рис. 6. Согласно данным табл. 3 при отсутствии вторичного ВВ в детонаторе выходное давление минимально и составляет  $\approx 6$  ГПа. При наличии вторичного ВВ в детонаторе и одном и том же отношении высот зарядов первичного и вторичного ВВ выходное давление меняется от максимального к минимальному в ряду CL-20, октоген и гексоген. Поэтому при конструировании микродетонатора в качестве вторичного ВВ предпочтительнее использовать CL-20, а следующим — октоген.

Для одного и того же вторичного ВВ выходное давление меняется от максимального к минимальному при изменении отношения высот первичного и вторичного ВВ в ряду  $3:2 > 1:1 > 2:3$ . Такие вторичные ВВ, как октоген, гексоген и CL-20, в данном оптимизированном микродетонаторе инициируются. Ответить на вопрос, возможно ли в нем инициирование других вторичных ВВ, можно, лишь зная критическое давление инициирования или проводя необходимые эксперименты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При диаметре заряда 0.9 мм и плотности первичного ВВ 80 % от теоретически максимальной критическая высота заряда PbN<sub>6</sub> составляет 1.8 мм. При высоте заряда больше 2.4 мм процесс детонации приближается к стационарному, а выходное давление равно 6.0 ГПа. Поэтому при конструировании микродетонаторов высота заряда первичного ВВ должна быть близкой к 1.8 мм, но не больше 2.4 мм. При наличии вторичного ВВ в детонаторе при одном и том же отношении высот зарядов первичного и вторичного ВВ выходное давление меняется от максимального к минимальному в ряду CL-20, октоген и гексоген. Поэтому сначала предпочтительнее использовать CL-20, а затем октоген.

Работа поддержана Фондом естественных наук Китая (№ 10971012) и Государственной лабораторией взрывных технологий (№ YBKT08-08).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Robinson C. H.** MEMS safety and arming device for OICW // NDIA Small Arms Conf., 2001, August 13–16, Little Rock, AR.
2. **Robinson C. H.** Development and demonstration of a MEMS-based safety and arming device for the 20 mm OICW fuze // NDIA Joint Services Small Arms Conf., 2002, May 13–16, Atlantic City, NJ.
3. **Sanchez A. C.** MEMs based safe & arm development for the XM29 (OICW) weapon system update // Joint Services Small Arms Section Symp., 2003, May 12–15, USA.
4. **Sanchez A. C.** MEMS based S&A development for 25 mm HEAB munitions // NDIA 50th Annu. Joint Services Small Arms Symp., 2004, May 12–15, USA.
5. **Cope R. D.** Naval air warfare center weapons division // NDIA 48th Annu. Fuze Conf., 2004, April 26–28, Charlotte, N.C.

6. **Cai R. J.** Design Principle of Explosive Initiator. — Beijing: Beijing Inst. of Technology Press, 1999.
7. **Chen F. M.** Initiating Explosive Device Principle and Design. — Beijing: Enginery Industry Press, 1990.
8. **Wang K. W., Yang Z. C., Wang D., et al.** Influence of the height ratio of micro charge on the output detonation pressure // Initiators & Pyrotechn. — 2008. — V. 10M. — P. 31–33.
9. **Claridge R. P., Vine T. A., Leggett A. J.** Investigations into MEMS scale detonators // Proc. of the Intern. Pyrotechn. Seminars, Colorado, 2008. — P. 175–179.
10. **GJB772A-97** method 704.2. Detonation pressure manganin pressure sensor method. — National Defense Science and Industry Committee, 1997.
11. **Xu X. C., Jiao Q. J., Cao X., et al.** Attenuation regularity of detonation wave of small charge in PMMA // Chin. J. Energetic Mater. — 2009. — V. 17M. — P. 431–435.
12. **Scott C. L.** The propagation of reaction across a lead azide PETN interface // 6th Intern. Pyrotechn. Seminar. — 1969. — P. 4–5.

*Поступила в редакцию 5/VI 2012 г.*

---