

УДК 534.222

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ, СОДЕРЖАНИЯ ТВЕРДОГО ВЕЩЕСТВА И СООТНОШЕНИЯ Al/O НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА АЛЮМОСОДЕРЖАЩИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

F. Xiao, W. Gao, J. Li, R. Yang

Пекинский технологический институт, Пекин 100081, Китай, yrj@bit.edu.cn

Измерен ряд характеристик подводного взрыва алюмосодержащих взрывчатых веществ (ВВ), включая удельную энергию газового пузыря и удельную энергию ударной волны. Составы ВВ характеризовались отношением Al/O, размером частиц алюминия и суммарным содержанием всех твердых компонентов, в том числе перхлората аммония, алюминия и гексогена. Результаты показывают, что отношение Al/O оказывает большое влияние на удельную энергию ударной волны и удельную энергию пузыря продуктов взрыва. Полная удельная энергия ВВ достигает максимального значения при Al/O = 0.44. Примечательно, что рост суммарного содержания твердых веществ (перхлората аммония, алюминия и гексогена) в составе ВВ может эффективно увеличивать полную удельную энергию ВВ. Так, при повышении суммарного содержания на 2 % (мас.) полная энергия ВВ может быть увеличена примерно на 0.1 тротилового эквивалента. Размер частиц алюминиевого порошка также значительно влияет на энергию ВВ: чем меньше размер частиц, тем больше энергии выделяется алюминием и больше становится полная энергия взрыва.

Ключевые слова: алюминизированные ВВ, подводный взрыв, отношение алюминий/кислород, удельная энергия ударной волны, удельная энергия пузыря.

DOI 10.15372/FGV20200509

ВВЕДЕНИЕ

Алюминизированные взрывчатые вещества (ВВ) широко используются в различных видах вооружения в силу высокой плотности энергии, интенсивного тепловыделения и длительного времени детонации [1–3]. Исследования показали, что энергия взрыва алюминизированных ВВ под водой намного выше, чем у таких традиционных ВВ, как гексоген, октоген и CL-20 (гексанитрогексаазаизовюрцитан). Это связано с тем, что порошок алюминия способен значительно увеличить энергию пузыря в процессе взрыва [4–6]. Большое количество исследований было сосредоточено на взрывных свойствах ВВ с добавками различных металлов, таких как порошки бора, кремния, и гидридов металлов [7–10]. В некоторых высокоэнергетических ВВ в качестве связующего использовался воск. К недостаткам таких ВВ следует отнести плохие механические свойства, повышенную чувствительность и высокие рис-

ки в процессе приготовления.

Литое алюминизированное ВВ готовят из связующего вещества и пластификатора, алюминиевого порошка, перхлората аммония (AP) и гексогена в качестве твердого наполнителя [11, 12]. Преимущество изготовления литого ВВ заключается в его безопасности. В качестве связующего в смесевых твердых ракетных топливах и в композитных ВВ широко используется полибутадиен с концевыми гидроксильными группами (НТРВ). Он образует сшивающую сеть посредством реакции гидроксильной группы с изоцианатной группой толуилендиизоцианата. По сравнению с другими связующими, НТРВ обладает хорошей текучестью, низкой ценой, простыми условиями отверждения, хорошей совместимостью с твердыми наполнителями, низкой чувствительностью и хорошими механическими свойствами [13–16]. Поэтому очень важно изучить свойства алюминизированных ВВ на основе НТРВ для высокоэнергетических и низкочувствительных боеприпасов.

Соотношение компонентов в составе алю-

минимизированного ВВ определяет полный выход энергии при взрыве. В последние годы во многих литературных источниках сообщалось о влиянии отношения алюминия к кислороду (Al/O) в алюминизированных ВВ на выход энергии при подводном взрыве [17–19]. В [20] для алюминизированных ВВ на основе октогена обнаружено, что при увеличении отношения Al/O сначала возрастало пиковое давление ударной волны, при Al/O = 0.366 энергия ударной волны достигала максимального значения; при Al/O = 0.997 теплота детонации возрастала, а период колебаний и радиус пузыря достигали максимума, 318.3 и 2.27 м соответственно. Размер частиц алюминиевого порошка определяет степень протекания реакции алюминия при детонации и оказывает существенное влияние на выход энергии алюминиевого порошка. Недавно в [21] проведено исследование влияния размера частиц TiH₂ на характеристики ВВ на основе гексогена при подводном взрыве и обнаружено, что уменьшение размера частиц порошка улучшало характеристики ВВ. Известно, что на полную энергию взрыва оказывает большое влияние содержание твердых компонентов (гексоген, AP и Al) в ВВ, поскольку эффективная энергия, выделяемая композитным ВВ, зависит главным образом от твердых компонентов. Однако в настоящее время нет сообщений о влиянии суммарного содержания гексогена, AP и Al на энергетические характеристики ВВ.

Цель работы состояла в изучении влияния размера частиц алюминия, суммарного содержания твердых компонентов (гексоген, AP и Al) и отношения Al/O на взрывные характеристики алюминизированных ВВ при подводном взрыве.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

1.1. Технология приготовления композитного ВВ

Взрывчатые вещества готовили следующим образом. Связующее (НТРВ), AP, гексоген и алюминиевый порошок смешивали в течение 30 мин, затем смешанную взрывчатую суспензию заливали в форму под вакуумом и отверждали в течение 7 дней при 50 °С. Масса заряда ВВ составляла примерно 50 г, а отношение длины к диаметру заряда было около 1 (рис. 1). Состав ВВ приведен в табл. 1. Отношение Al/O в таблице рассчитывалось с учетом атомных масс алюминия и кислорода.



Рис. 1. Фотография заряда ВВ

AP, НТРВ и гексоген были поставлены компанией HuiAn Chemical Industry Co., Ltd., алюминиевый порошок — Yuanyang Aluminium Industry Co., Ltd. Для исследования влияния размера частиц Al на свойства ВВ использовались алюминиевые порошки Al-1, Al-2, Al-3, различающиеся размером частиц. Изображения порошков Al, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), и распределение частиц по размерам показаны на рис. 2. Средний размер частиц порошков Al-1, Al-2 и Al-3 составлял $D_{50} = 2.5, 5$ и 40 мкм соответственно.

1.2. Экспериментальная схема подводного взрыва

Подводные взрывы проводились в цилиндрическом водном бассейне диаметром 4 м и глубиной 5 м. Давление взрыва регистрировалось датчиком PCB-138A (PCB Piezotronics, Inc.), а данные записывались с помощью анализатора давления NUBOX-9102 / 2CH (Tuoru Measurement and Control Technology Co., Ltd). ВВ и датчики были размещены на глубине 2 м, расстояние от заряда до датчика составляло 1 м (рис. 3). После каждого эксперимента уровень воды в бассейне корректировался до стандартного значения. Детонатор был вставлен в патрон-боевик, который, в свою очередь, находился в контакте с ВВ и инициировал его. Для сравнения исследуемых ВВ с тротилом в тех

Таблица 1

Образец	Состав ВВ				Суммарное содержание твёрдого вещества, % (мас.)	Al/O
	НТРВ	АР	Al	Гексоген		
% (по массе)						
H-1	14	48	18 (5 мкм)	20	86	0.30
H-2	14	46	20 (5 мкм)	20	86	0.34
H-3	14	44	22 (5 мкм)	20	86	0.39
H-4	14	42	24 (5 мкм)	20	86	0.44
H-5	14	40	26 (5 мкм)	20	86	0.49
H-6	14	38	28 (5 мкм)	20	86	0.56
H-7	14	36	30 (5 мкм)	20	86	0.61
H-8	14	34	32 (5 мкм)	20	86	0.67
H-9	12	44	24 (5 мкм)	20	88	—
H-10	10	45	25 (5 мкм)	20	90	—
H-11	8	46	26 (5 мкм)	20	92	—
H-12	14	42	24 (2.5 мкм)	20	86	—
H-13	14	42	24 (40 мкм)	20	86	—

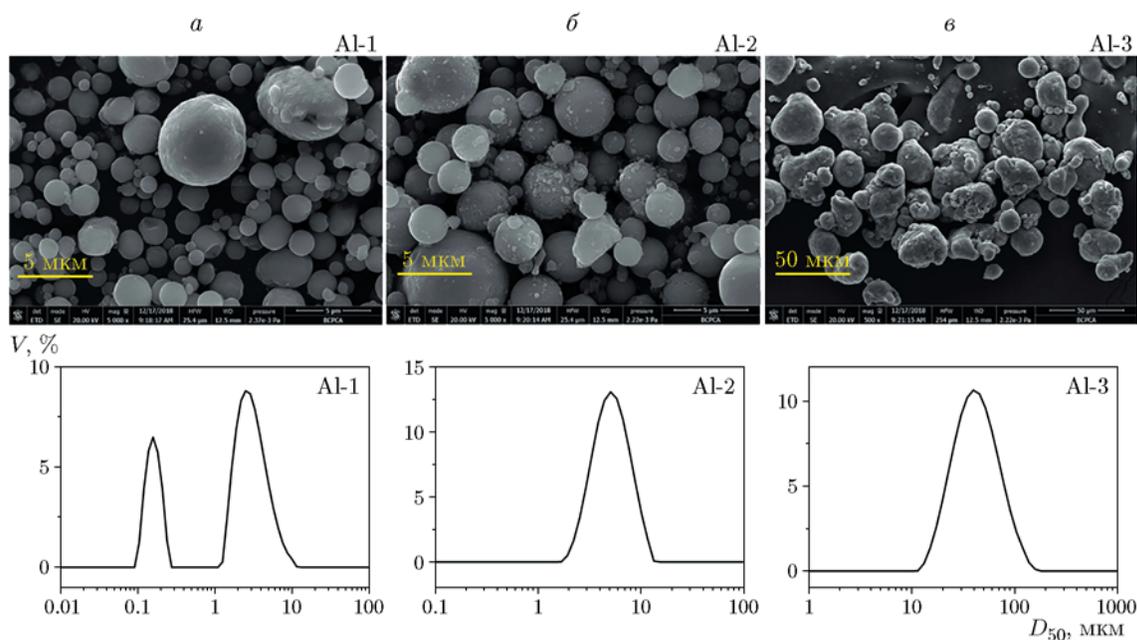


Рис. 2. СЭМ-изображения и распределение по размерам частиц в различных порошках алюминия

же условиях была измерена энергия взрыва 50 г тротила.

1.3. Расчет энергии подводного взрыва

На рис. 4 показан типичный профиль давления $p(t)$, определенный в серии подводных

испытаний ВВ. На профиле можно выделить два пика. По первому пику избыточного давления рассчитывалась удельная энергия ударной волны, по второму — удельная энергия пузыря продуктов взрыва. Для расчета использовались уравнения, приведенные в [22].

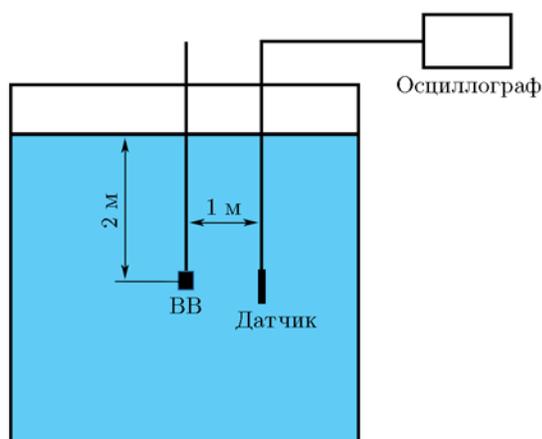


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для подводного взрыва

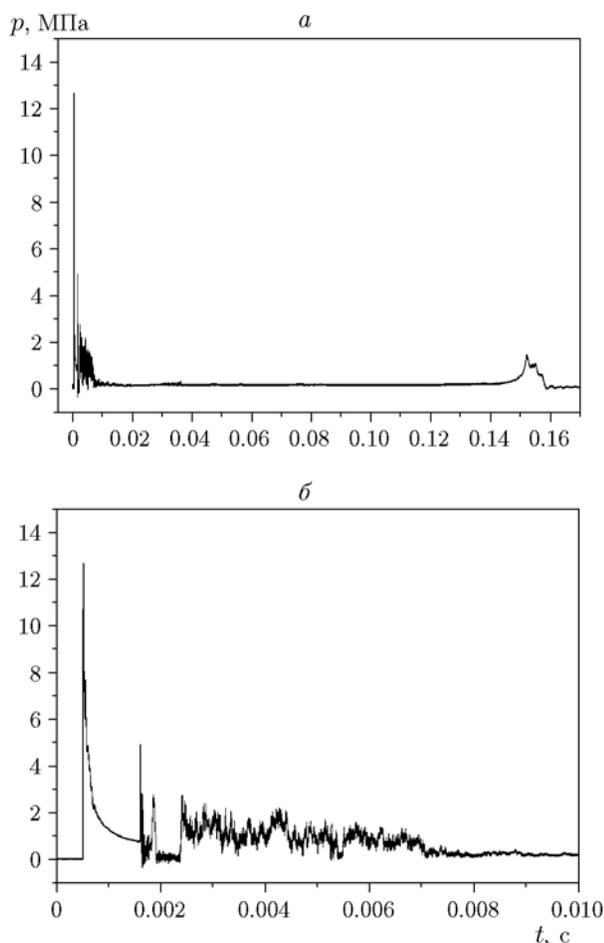


Рис. 4. Типичный профиль давления при подводном взрыве заряда ВВ в различных временных масштабах

Удельная энергия ударной волны вычислялась по формуле [22]

$$E_s = \frac{4\pi L^2}{\rho_w c_w m} \int_{t_a}^{t_a+6.7\theta} p^2(t) dt \text{ [МДж/кг]}, \quad (1)$$

где L — расстояние от заряда до датчиков, м; ρ_w — плотность воды, 1000 кг/м^3 ; c_w — скорость звука в воде, м/с; m — масса заряда ВВ, кг; t_a — время прихода ударной волны, с; θ — постоянная времени, с, рассчитываемая по времени, необходимому для снижения давления ударной волны от пикового значения p_m до p_m/e ; $p(t)$ — регистрируемое датчиком давление, МПа.

Удельная энергия пузыря рассчитывалась по соотношению [22]

$$E_b = (0.684 p_h^{5/2} \rho_w^{-3/2} t^3) / m \text{ [МДж/кг]}, \quad (2)$$

где t — первый период колебаний пузыря, с; ρ_w — плотность воды, 1000 кг/м^3 ; p_h — суммарное гидростатическое давление на глубине расположения заряда (включая атмосферное давление), Па.

Удельная полная энергия определялась в виде [22]

$$E_t = E_s + E_b + E_d \text{ [МДж/кг]}, \quad (3)$$

где диссипированной энергией E_d можно пренебречь. Энергия детонатора и заряда-боевика вычитается при расчете удельной энергии ударной волны, пузыря и удельной полной энергии. Тротильный эквивалент ВВ W рассчитывается как отношение удельной полной энергии ВВ к удельной полной энергии тротила. Обе энергии определялись в экспериментах по подводному взрыву (табл. 2).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Влияние отношения Al/O на подводный взрыв

Добавление алюминиевого порошка в ВВ может эффективно увеличить общую энергию ВВ в силу высокой плотности энергии порошка. Исследования показали, что энергия пузыря подводного взрыва алюминизированных ВВ в основном определяется реакцией с участием Al. Однако порошок алюминия представляет собой неидеальный компонент ВВ, поэтому степень протекания реакции с участием алюминия во

Таблица 2
 Параметры подводных взрывов ВВ с различным отношением Al/O

Образец	Al/O	E_s , МДж/кг	t , с	E_b , МДж/кг	E_t , МДж/кг	W
ТНТ	—	1.00	0.096	1.99	2.99	1.00
H-1	0.30	1.01	0.124	3.95	4.96	1.66
H-2	0.34	1.07	0.125	4.06	5.13	1.72
H-3	0.39	1.02	0.128	4.22	5.24	1.75
H-4	0.44	0.83	0.129	4.63	5.46	1.82
H-5	0.49	0.84	0.127	4.24	5.08	1.70
H-6	0.56	0.86	0.114	3.61	4.47	1.49
H-7	0.61	0.56	0.093	1.45	2.01	0.67
H-8	0.67	0.44	0.090	1.26	1.70	0.57

время взрыва зависит от содержания кислорода в ВВ. В идеале алюминиевый порошок может быть полностью окислен до оксида алюминия. В случае недостаточного содержания кислорода в ВВ такого полного окисления не происходит, что приводит к уменьшению энергии пузыря. Поэтому соотношение алюминия и кислорода в ВВ оказывает большое влияние на свойства ВВ при взрыве под водой.

В табл. 2 и на рис. 5 приведены результаты подводных испытаний ВВ, перечисленных в табл. 1. Результаты показывают, что удельная общая энергия ВВ E_t постепенно возрастает с увеличением содержания алюминия с 18 до 24 % (мас.). Это связано с высокой плотностью энергии алюминия и достаточным содержанием кислорода в ВВ. Степень протекания реакции алюминия в этом случае высока, поэтому энергия постепенно возрастает с увеличением содержания алюминия. В случае, когда Al/O = 0.44, период колебаний пузыря продуктов взрыва достигает наибольшего значения $t = 0.129$ с, его удельная энергия достигает своего максимума $E_b = 4.63$ МДж/кг, что в 2.31 раза больше удельной энергии пузыря для ТНТ. При увеличении содержания алюминия до 26 % период колебаний и удельная энергия пузыря начинают уменьшаться.

Избыток алюминия теоретически может увеличить удельную энергию пузыря продуктов взрыва, однако уменьшение количества кислорода в ВВ снижает степень превращения алюминия. Поскольку содержание алюминия продолжает расти, удельная энергия пузыря E_b резко падает.

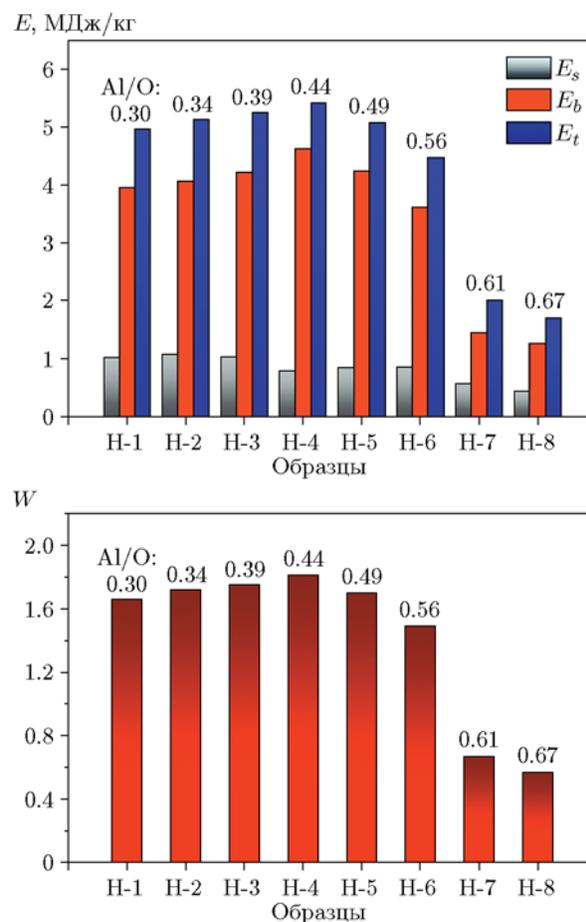


Рис. 5. Удельная энергия ударной волны, пузыря и полная для различных ВВ и их тротиловые эквиваленты

Таблица 3

Параметры подводных взрывов ВВ с различным суммарным содержанием твердых веществ

Образец	C_{solid} , %	E_s , МДж/кг	t , с	E_b , МДж/кг	E_t , МДж/кг	W
ТНТ	—	1.00	0.096	1.99	2.99	1.00
Н-4	86	0.83	0.129	4.63	5.46	1.82
Н-9	88	1.00	0.131	4.70	5.70	1.91
Н-10	90	1.30	0.131	4.69	5.99	2.00
Н-11	92	1.36	0.132	4.92	6.28	2.10

Удельная энергия ударной волны E_s уменьшается с увеличением содержания алюминия. Это связано с тем, что, в то время как гексоген является идеальным компонентом ВВ, алюминий таковым не является, и вторичная реакция алюминия вносит небольшой вклад в удельную энергию ударной волны. Поэтому при увеличении содержания порошка алюминия удельная энергия ударной волны уменьшается. Из приведенных выше результатов видно, что при $Al/O = 0.44$ удельная полная энергия ВВ достигает максимального значения $E_t = 5.46$ МДж/кг, что соответствует тротилловому эквиваленту $W = 1.82$.

2.2. Влияние суммарного содержания твердых компонентов в ВВ на подводный взрыв

Из рис. 6 и табл. 3 следует, что полная удельная энергия ВВ E_t значительно возрастает при увеличении содержания твердых компонентов (гексогена, AP и Al) в ВВ. При содержании твердого вещества $C_{solid} = 90\%$ удельная полная энергия состава Н-10 достигает $E_t = 5.99$ МДж/кг, что соответствует тротилловому эквиваленту $W = 2.0$, а для образца Н-11 при $C_{solid} = 92\%$ удельная полная энергия составляет $E_t = 6.28$ МДж/кг, что соответствует $W = 2.1$. Практически, при увеличении суммарного содержания твердых веществ в составе ВВ на 2% (мас.) общая энергия ВВ может быть увеличена примерно на 0.1 в тротилловом эквиваленте.

2.3. Влияние размера частиц Al на свойства ВВ при подводных испытаниях

Размер частиц металлического порошка оказывает существенное влияние на взрывные характеристики ВВ. Алюминиевые порошки

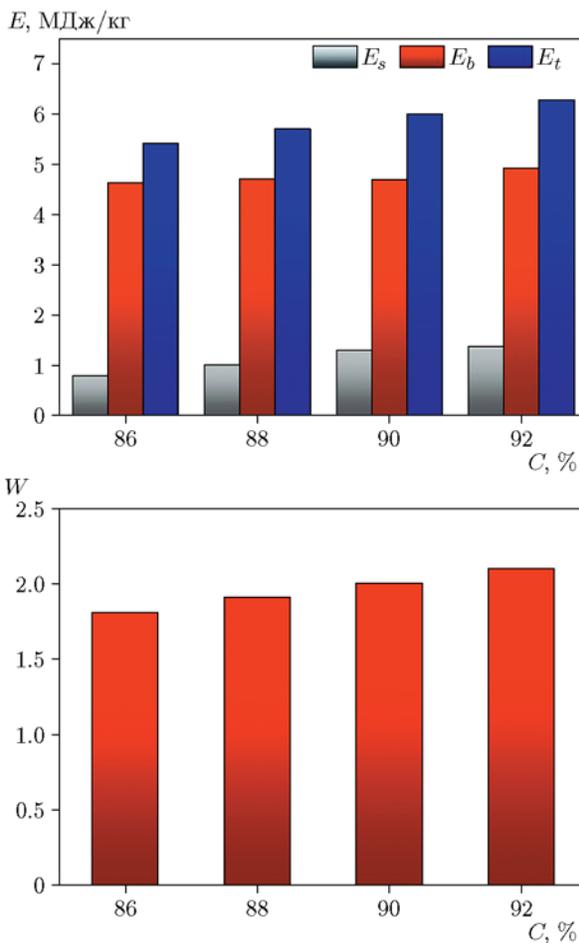


Рис. 6. Влияние суммарного содержания твердого вещества в ВВ на характеристики подводного взрыва

после детонации обычно вступают во вторичную реакцию, причем она может продолжаться от нескольких микросекунд до нескольких сотен микросекунд. Поскольку образующийся в реакции оксид алюминия покрывает поверхность частиц алюминия, дальнейшая реакция внутри частиц может быть затруднена, причем

сильнее, чем больше размер частиц, что приводит к уменьшению удельной энергии пузыря. Частицы алюминия меньшего размера имеют более высокую реакционную способность. Впрочем, если размер частиц алюминия слишком мал, эффективное содержание алюминия в порошке уменьшается.

В табл. 4 и на рис. 7 приведены данные

Таблица 4
Параметры подводных взрывов ВВ
с различными размерами частиц алюминия

Образец	D_{50} , мкм	E_s , МДж/кг	t , с	E_b , МДж/кг	E_t , МДж/кг	W
ТНТ	—	1.00	0.096	1.99	2.99	1.00
Н-12	2	0.90	0.131	4.67	5.57	1.86
Н-4	5	0.83	0.129	4.63	5.46	1.82
Н-13	40	1.00	0.117	3.27	4.27	1.43

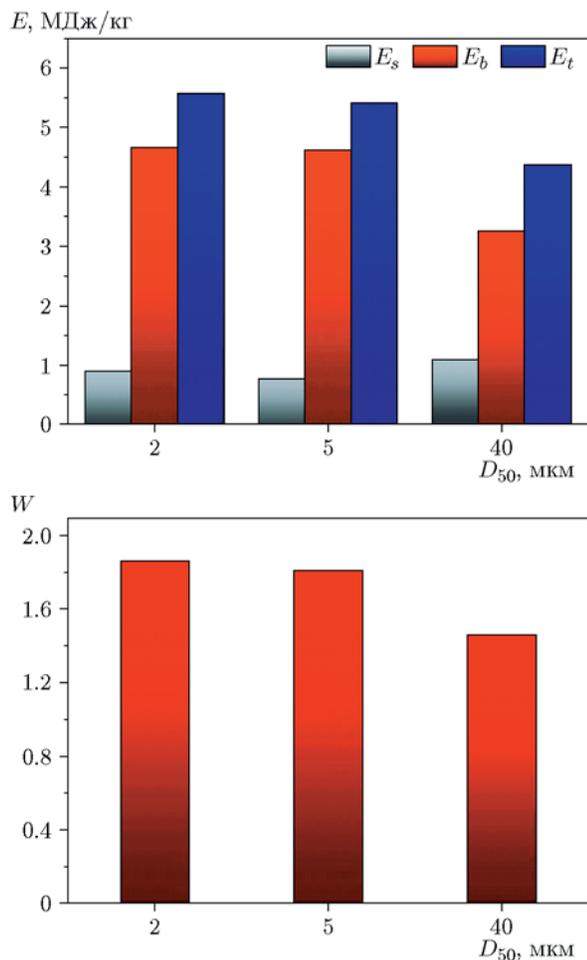


Рис. 7. Влияние размера частиц порошка Al на характеристики подводного взрыва

по влиянию размера частиц Al на характеристики подводного взрыва. Размер оказывает слабое влияние на удельную энергию ударной волны E_s , поскольку большая часть порошка не может реагировать на фронте ударной волны. Между тем, с увеличением размера частиц алюминия первый период колебаний пузыря продуктов взрыва уменьшается с 131 до 117 мс, а удельная энергия пузыря E_b уменьшается с 4.67 до 4.27 МДж/кг. Для взрывчатых веществ Н-12 и Н-4, поскольку частицы алюминиевого порошка в них похожи, удельные энергии пузыря близки. Состав Н-12 достигает максимальной удельной полной энергии 5.57 МДж/кг и тротилового эквивалента 1.86. Однако для ВВ с частицами алюминия диаметром 40 мкм снижение удельной энергии пузыря приводит к уменьшению полной удельной энергии ВВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено систематическое исследование изготовленных на основе алюминия ВВ при их подводном взрыве. Изучено влияние отношения Al/O, размера частиц алюминия и суммарного содержания твердых компонентов (гексоген, AP и Al) в ВВ на характеристики подводного взрыва. Результаты показывают, что отношение Al/O оказывает большое влияние на удельную энергию ударной волны и особенно пузыря продуктов взрыва. Полная удельная энергия ВВ сначала возрастает, а затем уменьшается с увеличением отношения Al/O. При Al/O = 0.44 удельная полная энергия достигает максимума 5.46 МДж/кг. Увеличение содержания алюминия и AP в ВВ может значительно увеличить полную энергию подводного взрыва при оптимальном соотношении алюминия и кислорода. На каждые 2 % увеличения общего содержания твердых компонентов в ВВ полная удельная энергия ВВ увеличивается примерно на 0.1 тротилового эквивалента. При общем содержании твердых компонентов в ВВ 92 % полная энергия ВВ при подводном взрыве достигает максимума 6.28 МДж/г, что соответствует 2.1 тротилового эквивалента. Размер частиц алюминиевого порошка в основном влияет на удельную энергию пузыря продуктов взрыва: уменьшение размера частиц повышает выход энергии в реакции алюминия во время взрыва и увеличивает энергию пузыря продуктов взрыва.

Авторы выражают признательность Государственной ведущей лаборатории взрывной науки и технологии Пекинского технологического института.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Strømsøe E., Eriksen S. W.** Performance of high explosives in underwater application. Part 2: aluminized explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 1990. — V. 15, N 2. — P. 52–53.
2. **Keicher T., Happ A., Kretschmer A., Siringhaus U., Wild R.** Influence of aluminum/ammonium perchlorate on the performance of underwater explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 1999. — V. 24, N 3. — P. 140–143.
3. **Sun Y., Hui J., Cao X.** Military Composite Explosives. — Beijing: Weapon Industry Press, 1995. — P. 458–459.
4. **Zhou L., Xu S.-H., Xu G.-G.** Research on energy output characteristics for underwater explosion of explosives // Acta Armamentarii. — 2006. — V. 27. — P. 235–238.
5. **Lin M.-J., Ma H.-H., Shen Z.-W., Wan X.-Z.** Effect of aluminum fiber content on the underwater explosion performance of RDX-based explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 2014. — V. 39, N 2. — P. 230–235.
6. **Chen Y., Chen X., Wu D., Xu S., Liu D., Xu M.** Underwater explosion analysis of hexogen-enriched novel hydrogen storage alloy // J. Energ. Mater. — 2016. — V. 34, N 1. — P. 49–61.
7. **Trzeciński W., Cudziło S., Paszula J. M.** Studies of free field and confined explosions of aluminum enriched RDX compositions // Propell., Explos., Pyrotech. — 2007. — V. 32, N 6. — P. 502–508.
8. **Koch E.-C., Klapötke T.** Boron-based high explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 2012. — V. 37, N 3. — P. 335–344.
9. **Anderson P. E., Cook P., Davis A., Mychajlonka K., Mileham M.** Silicon fuel in high performance explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 2014. — V. 39, N 1. — P. 74–78.
10. **Cheng Y. F., Ma H. H., Liu R., Shen Z. W.** Pressure desensitization influential factors and mechanism of magnesium hydride sensitized emulsion explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 2014. — V. 39, N 2. — P. 267–274.
11. **Consaga J. P., French D. M.** Properties of hydroxyl-terminated polybutadiene-urethane systems // J. Appl. Polym. Sci. — 1971. — V. 15, N 12. — P. 2941–2956.
12. **Badgujar D. M., Talawar M. B., Asthana S. N., Mahulikar P. P.** Advances in science and technology of modern energetic materials: an overview // J. Hazard. Mater. — 2008. — V. 151, N 2-3. — P. 289–305.
13. **Assink R. A., Lang D. P., Celina M.** Condition monitoring of a thermally aged hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB)/isophorone diisocyanate (IPDI) elastomer by nuclear magnetic resonance cross-polarization recovery times // J. Appl. Polym. Sci. — 2001. — V. 81, N 2. — P. 453–459.
14. **Xiang D.-L., Rong J.-L., Li J.** Effect of Al/O ratio on the detonation performance and underwater explosion of HMX-based aluminized explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 2014. — V. 39, N 1. — P. 65–73.
15. **DeLuca L. T., Galfetti L., Maggi F., Colombo G.** Characterization of HTPB-based solid fuel formulations: Performance, mechanical properties, and pollution // Acta Astronaut. — 2013. — V. 92, N 2. — P. 150–162.
16. **Arisawa H., Brill T. B.** Flash pyrolysis of hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) I: Analysis and implications of the gaseous products // Combust. Flame. — 1996. — V. 106, N 1-2. — P. 131–143.
17. **Shankar R. M., Roy T. K., Jana T.** Terminal functionalized hydroxyl-terminated polybutadiene: An energetic binder for propellant // J. Appl. Polym. Sci. — 2009. — V. 114, N 2. — P. 732–741.
18. **Yen N. H., Wang L. Y.** Reactive metals in explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 2012. — V. 37, N 2. — P. 143–155.
19. **Komissarov P. V., Borisov A. A., Sokolov G. N., Lavrov V. V.** Experimental comparison of shock and bubble heave energies from underwater explosion of ideal HE and explosive composite mixtures highly enriched with aluminum // Phys. Procedia. — 2015. — V. 72. — P. 333–337.
20. **Zhu Y., Huang H., Ren H., Jiao Q.** Influence of aluminum particle size on thermal decomposition of RDX // J. Energ. Mater. — 2013. — V. 31, N 3. — P. 178–191.
21. **Xue B., Ma H., Shen Z., Ren L., Lin M.** Effect of TiH₂ particle size and content on the underwater explosion performance of RDX-based explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 2017. — V. 42, N 7. — P. 791–798.
22. **Xiang D., Rong J., He X., Feng Z.** Underwater explosion performance of RDX/AP-based aluminized explosives // Centr. Eur. J. Energ. Mater. — 2017. — V. 14, N 1. — P. 60–76.

Поступила в редакцию 23.08.2019.

После доработки 05.11.2019.

Принята к публикации 06.11.2019.