

ЗАТУХАНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ НОВОГО МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

Л. Чжоу, Чж.-Ю. Се, С.-С. Вэй

Государственная лаборатория взрывных процессов и технологий Пекинского технологического института, Пекин 100081, Китай, zhoulin@bit.edu.cn, cexxwei@bit.edu.cn

Проведена серия экспериментов по сравнению затухания подводной ударной волны от нового малочувствительного алюминийсодержащего мощного взрывчатого вещества (ВВ) типа RS и от известных взрывчатых веществ ТНТ, JH-14 и PBXN-111. Предложена новая модель с единым функциональным выражением для зависимости давления от времени. Показано, что новая модель применима как для алюминизированных, так и для идеальных ВВ. Коэффициенты корреляции для аппроксимирующих кривых, проверенные на тысячах данных для различных ВВ, достигают значений выше 0.99. Энергия подводной ударной волны от PBXN-111 и ТНТ, рассчитанная по новой модели, хорошо согласуется с опубликованными экспериментальными данными. Ударная энергия нового состава RS на 13.4 % больше, чем у PBXN-111. Установлено, что возможности состава RS по генерации подводных ударных волн выше, чем у других взрывчатых веществ (ТНТ, JH-14 и PBXN-111).

Ключевые слова: малочувствительное мощное взрывчатое вещество (ВВ), затухание ударной волны, подводный взрыв.

Существуют три основных типа взрывчатых веществ (ВВ) — идеальные, алюминийсодержащие и малочувствительные алюминизированные мощные. Хорошо известный тротил — представитель идеального ВВ, он широко использовался в годы Первой и Второй мировых войн. Позднее в тротил были добавлены алюминий и гексоген и созданы алюминийсодержащие ВВ, такие как NBX-1, NBX-3, H-6 и китайское RS211 [1, 2]. В 80-х годах прошлого столетия при использовании в качестве связующего полибутадиена с концевыми гидроксильными группами (НТРВ) были созданы малочувствительные алюминийсодержащие ВВ, такие как PBXN-111, PBXW-115 и китайское GUHL-1, которые применяются в боеприпасах [3, 4]. В начале этого столетия в Китае разработано малочувствительное мощное ВВ типа RS на основе динитроанизоля с более высокой энергией и повышенной безопасностью использования в приложениях. Возможно, оно станет популярным при проведении подводных взрывов.

Из-за вторичной реакции алюминия за фронтом детонации закон выделения энергии для алюминийсодержащих и идеальных ВВ не

один и тот же. Действительно, возможности этих составов различны при подводном взрыве [5]. Поэтому важно изучать затухание подводной ударной волны, генерируемой взрывом ВВ. Заметим, что классическая модель затухания, введенная Коулом [6] и очень часто используемая для описания затухания ударной волны при подводном взрыве, может приводить к значительной ошибке в определении давления — около 10 % при относительно больших временах [6]. Обычно используется кусочно-линейная функция для описания зависимости давления в ударной волне от времени [7]. Однако эта модель не описывает действие взрыва алюминийсодержащих ВВ.

В данной работе предложено единое выражение для соотношения между давлением в ударной волне и временем, справедливое для различных ВВ. Дополнительно проведены опыты по сравнению затухания подводной ударной волны от малочувствительного мощного ВВ типа RS и от малочувствительного мощного PBXN-111 и идеальных JH-14 и ТНТ.

Классическая модель затухания подводной ударной волны, которую будем называть моделью I, определяется выражением [6]

$$p(t) = p_{\max} \exp(-t/\theta), \quad 0 \leq t \leq \theta, \quad (1)$$

где p_{\max} — максимальное давление, МПа; θ — временная константа затухания. При малых

Lin Zhou, Zhongyuan Xie, Xuexia Wei.
State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China.

временах уравнение (1) достаточно точно описывает давление в ударной волне, но приводит к большой ошибке вне указанного диапазона времени.

В России для повышения точности модели I для описания затухания используется кусочно-линейная функция, которую в данной статье будем называть моделью II [7]:

$$p = p_{\max} \exp(-t/\theta), \quad 0 \leq t \leq \theta, \quad (2)$$

$$p = p_{\max} \frac{0.368\theta}{t}, \quad \theta < t \leq 10\theta.$$

Уравнение (2) с удовлетворительной точностью описывает затухание подводной ударной волны в более широком временном диапазоне — $0 \leq t \leq 10\theta$. Однако для получения значения p_{\max} необходима оценка временного параметра θ , что затрудняет определенность предсказаний.

На основе анализа кривых затухания подводных ударных волн предложена новая модель:

$$p(t) =$$

$$= p_{\max} \left[\frac{0.368 \exp(\theta/\omega) - 1}{\exp(\theta/\omega) - \exp(\theta/\varphi)} \exp\left(-\frac{t-\theta}{\varphi}\right) - \frac{0.368 \exp(\theta/\varphi) - 1}{\exp(\theta/\omega) - \exp(\theta/\varphi)} \exp\left(-\frac{t-\theta}{\omega}\right) \right], \quad (3)$$

где параметры p_{\max} и θ аналогичны по смыслу параметрам в соотношении (2). Параметры φ и ω используются для описания скорости при $t > \theta$ и определяются из эксперимента. В частности, параметр φ прямо связан со скоростью затухания ударной волны (рис. 1): давление в ударной волне падает медленнее при больших значениях φ , например при $\varphi = 0.0012$, и затухает быстрее при малых значениях, например при $\varphi = 0.0004$. Параметр ω связан с производной ударного давления в точке $(\theta, p_{\max}/e)$ (рис. 2).

В отличие от моделей I и II, в новой модели используется единая для различных ВВ формула, описывающая затухание ударной волны. Новая модель устраняет ошибки модели I при $t > \theta$ и улучшает определенность модели II.

Энергия, запасаемая за фронтом ударной волны при подводном взрыве, называемая ниже ударной энергией, определяется выражением [6, 8]

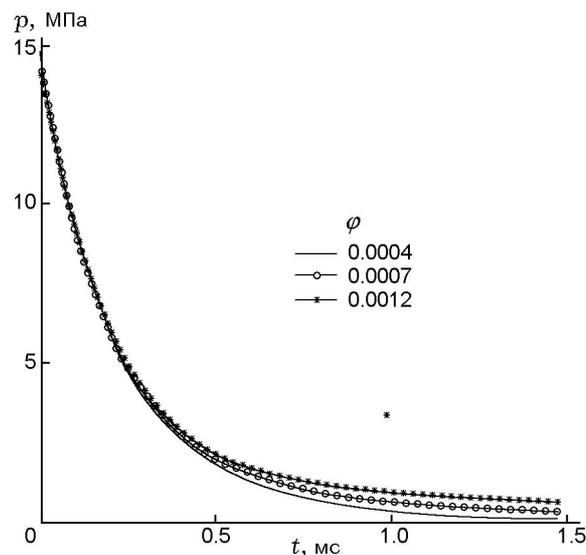


Рис. 1. Влияние параметра φ на затухание ударной волны при $t > \theta$ ($p_{\max} = 14.7$ МПа, $\theta = 0.22$ мс, $\omega = 0.00018$)

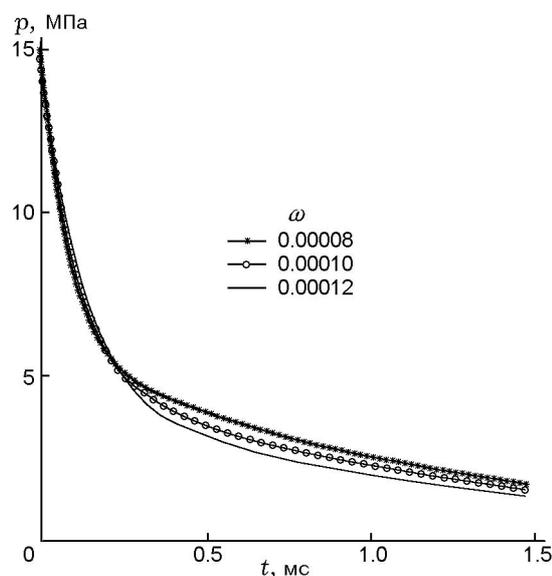


Рис. 2. Влияние параметра ω на затухание ударной волны ($p_{\max} = 14.7$ МПа, $\theta = 0.22$ мс, $\varphi = 0.0012$)

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{M\rho c_w} \int_0^{6.7\theta} p^2(t) dt \quad [\text{Дж/кг}]. \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4), получаем

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{M\rho c_w} \int_0^{6.7\theta} p_{\max}^2 \left[\frac{0.368 \exp(\theta/\omega) - 1}{\exp(\theta/\omega) - \exp(\theta/\varphi)} \times \exp\left(-\frac{t-\theta}{\varphi}\right) - \right.$$

Таблица 1

Характеристики подводной ударной волны для четырех типов ВВ, рассчитанные по трем моделям

Тип ВВ	p_{\max} , МПа	θ , мс	E_s , МДж/кг	p_{\max} , МПа	θ , мс	E_s , МДж/кг	p_{\max} , МПа	θ , мс	E_s , МДж/кг
	Модель I			Модель II			Новая модель		
ТНТ	13.5	0.14	0.90	13.5	0.14	0.99	13.8	0.14	1.01
ЖН-14	8.3	0.10	1.10	8.3	0.10	1.21	8.4	0.10	1.22
РВХН-111	14.8	0.20	1.38	14.8	0.20	1.52	14.9	0.21	1.58
RS	15.0	0.21	1.50	15.0	0.21	1.66	15.3	0.22	1.79

$$- \frac{0.368 \exp(\theta/\varphi) - 1}{\exp(\theta/\omega) - \exp(\theta/\varphi)} \exp\left(-\frac{t-\theta}{\omega}\right)^2 dt. \quad (5)$$

Здесь R — расстояние от центра детонации, м; M — масса ВВ, кг; ρ — плотность воды, кг/м³; c_w — скорость звука в воде, м/с.

На рис. 3 показана схема опытов с подводной ударной волной. Диаметр и глубина бассейна с водой 85 и 15 м соответственно, так что эффектами отражения ударной волны от стенок бассейна можно пренебречь. Взрывчатое вещество массой M размещалось в центре бассейна на глубине 5 м от поверхности воды, что позволяло исключить влияние как поверхности воды, так и дна бассейна [6]. Датчики давления были расположены на одной глубине в трех метрах от ВВ, так что кривая затухания ударной волны записывалась до того, как волна достигала свободной поверхности воды. Датчики давления РСВ138М131 соединялись с цифровым осциллографом Tektronix TDS3054В малочувствительными (от воздействия ударной волны в воде) кабелями. При взрыве ВВ в воде генерировалась сильная ударная волна, и при помощи датчиков давления регистрировалась



Рис. 3. Схема постановки экспериментов

кривая затухания подводной ударной волны.

Тестировались образцы различных ВВ: новое малочувствительное мощное ВВ типа RS и известные ТНТ, ЖН-14, РВХН-111. Основные компоненты состава RS: динитроанизол, перхлорат аммония, гексоген и алюминий; отношение Al/O равно 0.3732, скорость детонации 4672 м/с. Состав ЖН-14 — идеальное мощное ВВ, его основной компонент — гексоген. Композиция РВХН-111 — малочувствительное алюминизированное ВВ с отношением Al/O, равным 0.4589, и скоростью детонации 5760 м/с [3]. Опыты ставились с зарядами ВВ без оболочки, инициирующий заряд изготовлен из состава РВХ с 95.5 % гексогена.

Из формулы (5) следует, что точность расчета ударной энергии тесно связана с точностью приближения профилей давление — время. Было использовано более 1500 наборов экспериментальных данных для приближения кривых затухания волн от различных ВВ в интервале времени $0 \div 6.7\theta$, и достигнуты значения коэффициента корреляции выше 0.99 (рис. 4). Таким образом, новая модель, использующая только уравнение (5), обеспечивает достоверное описание кривых затухания давления в ударной волне. В табл. 1 приведены энергии ударной волны, вычисленные по моделям I, II и новой модели. Очевидно, что модель I приводит к большой ошибке для алюминизированных ВВ. Результаты расчета по модели II лучше, чем по модели I, особенно для идеальных ВВ, таких как ТНТ. Ударная энергия, рассчитываемая по модели II, почти такая же, как в экспериментах, но наблюдается относительно большая ошибка для алюминий-содержащих ВВ, таких как РВХН-111. Новая модель предсказывает энергию ударной волны от ТНТ и РВХН-111 соответственно 1.01 и 1.58 МДж/кг, т. е. те же значения, что получены в экспериментах [3].

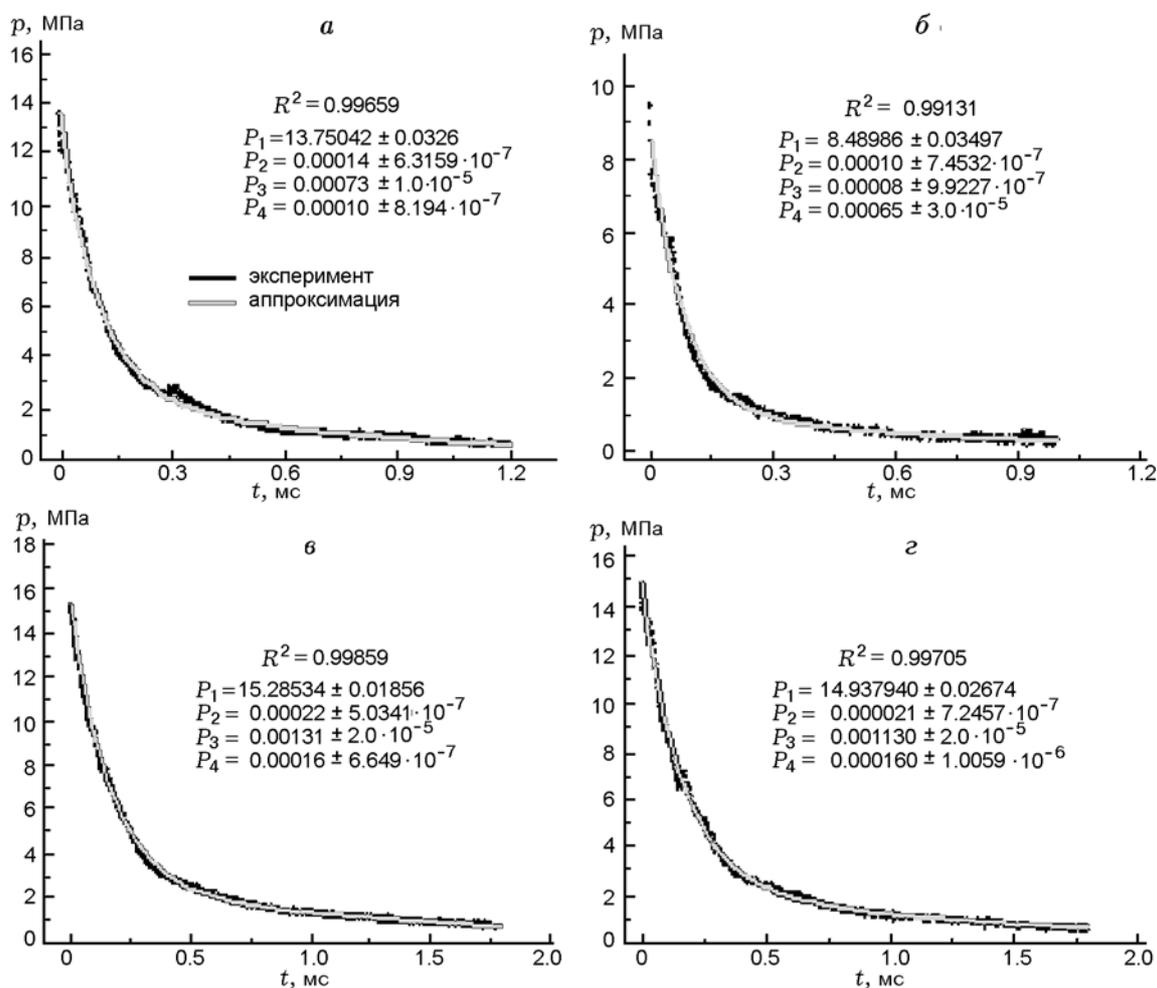


Рис. 4. Давление в ударной волне и аппроксимация на основе новой модели для ТНТ (а), JH-14 (б), RS (в), PBXN-111 (г):

P_1 – P_4 — коэффициенты для аппроксимирующей кривой, R — коэффициент корреляции

Для проверки влияния вторичной реакции порошка алюминия за фронтом детонации на генерируемые ударные волны экспериментально определялось затухание ударной волны от ВВ с различным содержанием порошка алюминия. Исследовались ТНТ и JH-14 не содержащие алюминия; состав PBXN-111 с большим содержанием алюминия ($Al/O = 0.4589$); состав RS с умеренным содержанием алюминия ($Al/O = 0.3732$). Ударные волны, генерируемые ТНТ и JH-14, затухают быстрее, чем при использовании PBXN-111 и RS; короче и время затухания (рис. 5). Отметим, что для состава RS давление в ударной волне во временном интервале от 0 до θ почти такое же, как в случае PBXN-111, однако при $t > \theta$ оно выше, чем для PBXN-111. Энергия, выделяемая

при вторичной реакции алюминиевого порошка, усиливает амплитуду генерируемых ударных волн и уменьшает скорость затухания. По видимому, существует оптимальное содержание алюминия в ВВ для генерации максимального ударного давления при подводном взрыве.

Как видно из табл. 2, для ТНТ и JH-14 энергия ударной волны равна 0.99 и 1.22 МДж/кг соответственно, что меньше, чем для алюминийсодержащих составов PBXN-111 и RS. Однако скорости детонации для составов JH-14, PBXN-111 и RS равны 8 296, 5 760 и 4 672 м/с соответственно. Это означает, что чем выше скорость детонации, тем быстрее затухает давление в ударной волне и тем меньше ударная энергия. Возможная причина состоит в том, что высокое значение скорости детона-

Таблица 2
Экспериментальные данные и результаты расчета по новой модели для ТНТ, ЖН-14, РВХН-111 и RS

Номер опыта	Тип ВВ	M , кг	m_{ini} , кг	p_{max} , МПа	θ , мс	$\varphi \cdot 10^3$	$\omega \cdot 10^3$	E_s , МДж/кг	E_s , МДж/кг (среднее)
1	ТНТ	0.996	0.050	13.8	0.14	0.73	0.10	1.01	0.99
2	ТНТ	0.989	0.050	14.0	0.13	0.72	0.10	0.96	
3	ЖН-14	0.235	0	8.4	0.10	0.08	0.65	1.22	1.22
4	РВХН-111	1.019	0.234	14.8	0.22	1.10	0.18	1.56	1.58
5	РВХН-111	1.003	0.234	14.9	0.21	1.13	0.16	1.58	
6	РВХН-111	1.023	0.234	14.5	0.23	2.14	0.19	1.60	
7	RS	1.002	0.077	14.0	0.22	1.92	0.16	1.71	1.68
8	RS	1.000	0.077	14.8	0.2	0.87	0.14	1.67	
9	RS	1.005	0.077	14.3	0.22	0.72	0.14	1.67	
10	RS	1.006	0.214	15.2	0.22	1.42	0.17	1.76	1.79
11	RS	1.015	0.214	15.4	0.22	1.13	0.16	1.82	
12	RS	1.005	0.214	15.2	0.22	1.36	0.16	1.80	
13	RS	1.006	0.234	15.3	0.22	1.31	0.16	1.79	1.79
14	RS	1.004	0.234	15.1	0.22	1.84	0.17	1.76	
15	RS	1.005	0.368	16.3	0.21	1.65	0.16	1.82	
16	RS	1.975	0.095	17.8	0.27	1.37	0.18	1.71	1.70
17	RS	2.017	0.095	18.7	0.25	1.34	0.18	1.69	

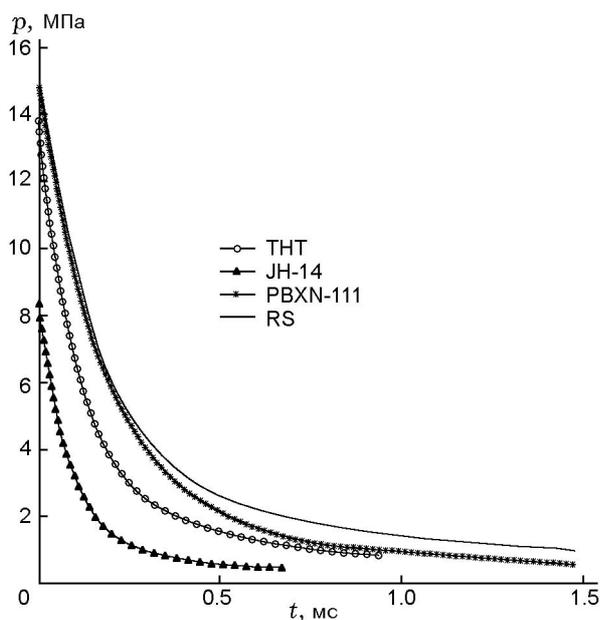


Рис. 5. Кривые затухания ударной волны для ТНТ, ЖН-14, РВХН-111 и RS

ции соответствует меньшему количеству алюминия в зоне реакции, что приводит к уменьшению как отношения Al/O для ВВ, так и ударной энергии.

В целом возможности состава RS выше, чем композиции РВХН-111, как по пиковому давлению в ударной волне, так и по ударной энергии (см. табл. 2). Последняя достигает 1.79 МДж/кг, что в 1.134 раза больше, чем для РВХН-111. Обычно ударная энергия алюминизированных ВВ имеет максимальное значение при отношении Al/O, стремящемся к 0.38 [9–11]. Для составов RS и РВХН-111 отношение Al/O равно 0.3732 и 0.4589 соответственно, поэтому ударная энергия RS выше.

Отметим, что для инициирования состава RS необходим боевик минимальной массы. Отчетливо прослеживается влияние массы инициирующего заряда m_{ini} на ударную энергию (см. табл. 2): ударная энергия состава RS возрастает при увеличении массы инициирующего заряда и достигает максимального значения при $m_{ini} \geq 0.214$ кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

• Предложена новая модель для описания зависимости давления в ударной волне от времени в более широком временном интервале. Основным достоинством модели является ее применимость для ВВ различных типов.

• Точность новой модели проверена более чем на 1500 наборах экспериментальных данных, полученные коэффициенты корреляции превышают значение 0.99. Экспериментальные результаты по затуханию ударной волны в воде и оценки ударной энергии для ТНТ и PBXN-111 согласуются с данными [3].

• Проведены серии опытов для сравнения затухания подводных ударных волн от нового малочувствительного алюминийсодержащего мощного ВВ типа RS и от стандартных ВВ — ТНТ, JH-14 и PBXN-111. Показано, что для алюминизированных ВВ энергия ударной волны выше, чем для ВВ без порошка алюминия, а энергия, выделяемая при вторичной реакции порошка алюминия, может уменьшать затухание ударной волны.

• При одних и тех же массах заряда и условиях инициирования ударная энергия состава RS (1.79 МДж/кг) на 13.4 % больше, чем у PBXN-111 (1.58 МДж/кг). В определенных условиях состав RS может представлять больший интерес для подводных взрывов по сравнению со стандартными ВВ — ТНТ, JH-14 и PBXN-111.

Работа поддержана Государственной лабораторией взрывных процессов и технологий Пекинского технологического института Китая (грант ZDKT10-02a).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mader C. L.** Numerical Modeling of Detonations. — California: University of California Press, 1979.
2. **Гришкин А. М., Дубнов Л. В., Давыдов В. Ю., Левшина Ю. А., Михайлова Т. Н.** Влияние добавок порошкового алюминия на параметры детонации мощных ВВ // Физика горения и взрыва. — 1993. — Т. 29, № 2. — С. 115–117.
3. **Bocksteiner G.** Evaluation of underwater explosive performance of PBXW-115 // Defense Science and Technology Organization of Australia, DSTO-TR-0297. — 1996. — ADA315885.
4. **Вадхе П. П., Павар Р. Б., Синха Р. К., Астана С. Н., Субхананда Рао А.** Алюминизированные литьевые взрывчатые вещества (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 98–115.
5. **Давыдов В. Ю., Гришкин А. М., Мурыш Е. Ю.** Влияние газодинамических условий на степень реализации энергии вторичных реакций в метательное действие ВВ // Физика горения и взрыва. — 1993. — Т. 29, № 2. — С. 109–115.
6. **Cole R. H.** Underwater Explosions. — Princeton, NJ: Princeton University Press, 1961.
7. **Физика взрыва** / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 1. — С. 613–628.
8. **Vjarnholt G.** Explosive expansion works in underwater detonations // Proc. of the 6th Intern. Detonation Symp., San Diego, California, USA, Office of Naval Research, 1976. — P. 540–550.
9. **Zhou L.** The effect of Al/O ratio on underwater explosion shock wave of aluminium-containing explosives // Acta Armamentarii. — 2008. — V. 29, N 8. — P. 916–919. (На китайском).
10. **Swisdak M. M.** Explosion effects and properties, Part II: Explosion in water // NSWC/WOL/TR-76-116, Naval Surface Weapons Center. — Silver Spring, Maryland, USA, 1978.
11. **Stromsoe E., Eriksen S. W.** Performance of high explosive in underwater applications. Part 2: Aluminized explosives // Propellant, Explosive, Pyrotechnics. — 1990. — V. 15. — P. 52–53.

Поступила в редакцию 14/IX 2010 г.