

УДК 534.222

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЗИРОВАННОГО ФОЛЬГОЙ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ПОДВОДНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

М.-Цз. Линь, Ма Х.-Х., Чж.-У Шень, Л. Ли

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

Предложено новое алюминизированное взрывчатое вещество (ВВ), в котором традиционно используемый алюминиевый порошок заменен алюминиевой фольгой. Цель такой замены заключается не только в улучшении механических свойств и понижении ударной чувствительности применяемых алюминизированных ВВ, но и в уменьшении загрязнения окружающей среды продуктами производства алюминиевых частиц. При подводных испытаниях измерены профили давления взрыва алюминизированного фольгой ВВ и гексогена. Из анализа этих профилей определены пиковое давление, импульс, энергия ударной волны и энергия пузыря. Результаты показывают, что пиковое давление в алюминизированном фольгой ВВ ниже, чем в гексогене, однако высокое давление сохраняется дольше. Установлено, что в последующих реакциях алюминиевой фольги с первичными продуктами детонации выделяется большее количество энергии. Увеличение энергии взрыва алюминизированного фольгой ВВ приводит главным образом к повышению энергии пузыря.

Ключевые слова: алюминизированное фольгой ВВ, неидеальное ВВ, энергия ударной волны, энергия пузыря, энергия взрыва.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминизированные ВВ применяются в подводных взрывах начиная с 1900 г., но особенно широко — в последние десятилетия. Обзор текущего состояния и тенденций развития алюминизированных ВВ дан в работе [1]. В [2] приведены результаты всестороннего исследования влияния содержания алюминия на рабочие характеристики смесевых ВВ. Вследствие вовлечения алюминия во вторичные реакции в волне разгрузки Тейлора, позади детонационной волны, классические термодинамические коды, основанные на уравнениях состояния продуктов взрыва Джона — Уилкинса — Ли (JWL) и Беккера — Кистяковского — Вильсона (BKW), не обеспечивают точного описания детонации. Прогнозирование характеристик таких неидеальных ВВ является сложной задачей. В течение последних трех десятилетий значительные усилия были затрачены на то, чтобы понять химическое, термодинамическое и гидродинамическое взаимодействие между продуктами разложения смесевых ВВ. В [3] предложен новый подход для предсказания

детонационного давления в ВВ, содержащих элементы С, Н, N, О и С, Н, N, О, Al, посредством рассмотрения их молекулярной структуры. Кроме того, было изучено воздействие на ВВ таких нагрузок, как производственный процесс, транспортировка, запуск ракеты и т. д., при различных условиях окружающей среды. Приобретающая всё большее значение проблема снижения чувствительности ВВ нашла превосходное решение в создании ВВ на основе полимерной связки (PBX). В [4] представлен обзор по применению алюминиевого порошка в ВВ на основе полимерной связки и установлены потенциальные возможности порошка в качестве агента, увеличивающего полную энергию. Результаты исследования [5] показали, что при высокоскоростном нагружении ВВ на основе полимерной связки уменьшение размера сферической частицы алюминия приводит к увеличению пика напряжения. В данной работе предложено новое неидеальное смесевое ВВ, в котором гексоген обернут алюминиевой фольгой. Механическая чувствительность ВВ уменьшилась, поскольку не используется алюминиевый порошок, и вместе с тем наличие алюминиевой фольги позволило улучшить механические свойства смесевых ВВ.

В настоящей работе приведены результа-

ты измерения зависимости давление — время в подводных испытаниях алюминизированного фольгой ВВ и гексогена. Из анализа этих зависимостей определены пиковое давление, импульс, энергия ударной волны и энергия пузыря. Исчерпывающее исследование влияния алюминиевой фольги на характеристики смесевых ВВ позволило выработать рекомендации для разработки алюминизированных ВВ.

ПОДГОТОВКА ПРЕССОВАННЫХ ЗАРЯДОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Исследование детонационных характеристик алюминизированных ВВ показало, что на эксплуатационные качества смесевых ВВ главным образом влияют тип ВВ и размер частиц Al [6]. В настоящей работе в состав смесевых ВВ входит гексоген, что позволяет сравнить энергию взрыва алюминизированного фольгой ВВ с теплотой взрыва алюминизированного порошком ВВ на основе гексогена. Толщина алюминиевой фольги составляла $8 \div 10$ мкм. Для того чтобы получить одинаковую плотность гексогена в смесевых ВВ, заряды ВВ диаметром 19.28 мм прессовали при одном и том же давлении. Полную массу смесевых ВВ поддерживали постоянной на уровне 10 г. По мнению различных исследователей, содержание алюминия $15 \div 20$ % является оптимальным для достижения максимальной мощности. Поэтому в настоящей работе в испытаниях с подводным взрывом использовали смесевые ВВ на основе гексогена с включением 20 % алюминиевой фольги. Состав смесевых ВВ приведен в табл. 1.

Структура алюминизированного фольгой ВВ такова, что гексоген и фольга соединены вдоль осевого направления. Такая структура минимизирует воздействие добавки, которая затрудняет прохождение детонационной волны. Вследствие этого скорость детонации нового ВВ лишь несколько меньше, чем скорость детонации гексогена. В экспериментах

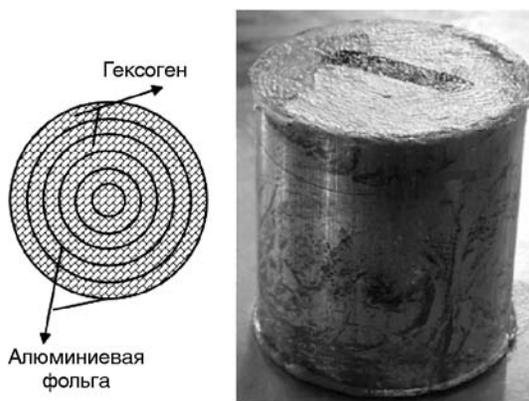


Рис. 1. Заряд алюминизированного фольгой ВВ

измеряли скорость детонации в алюминизированном фольгой ВВ (8117 м/с) и в гексогене (8382 м/с). Структура алюминизированного фольгой ВВ представлена на рис. 1.

В [7] показано, что стальной резервуар идеально подходит для изучения и демонстрации эффектов подводного взрыва. В настоящей работе использовался наполненный водой стальной резервуар диаметром и высотой 5 м. Экспериментальное оборудование включало в себя осциллограф (Agilent 5000A), источник тока (482A22, PCB) и датчик давления (ICPW138A25, PCB Piezotronics Inc., USA). Чувствительным элементом датчика давления служил турмалин диаметром 4 мм. Датчик давления калибровался в динамике при помощи копра. Чувствительность по калибровочному сертификату составляла 30.05 мВ/МПа при точности измерений не хуже 95 %. Для того чтобы удовлетворить требованиям проведения измерений при подводном взрыве, ВВ и датчики размещали на глубине 2 м от поверхности воды. В целях последующего сравнения де-

Таблица 1

Составы ВВ				
Номер состава	Гексоген, %	Воск, %	Фольга, %	Плотность, г/см ³
1	76	4	20	1.79 ÷ 1.81
2	95	5	0	1.68 ÷ 1.70

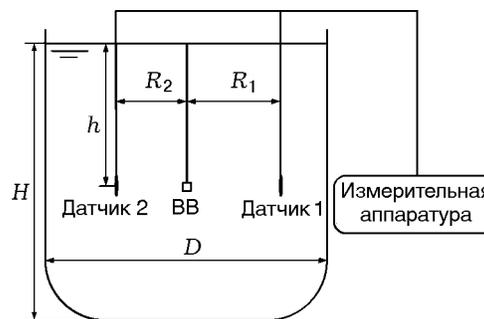


Рис. 2. Схема подводных испытаний

тонационных характеристик алюминизированного фольгой ВВ и гексогена датчики и ВВ располагали на одной глубине, а расстояние между датчиком и зарядом меняли в диапазоне 70 ÷ 150 см. В одном эксперименте профили давления записывались двумя датчиками, расположенными в различных координатах. В одинаковых условиях проводили по три опыта, в общей сложности получено 24 набора данных. Схема подводного взрыва показана на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА

Из-за размерного эффекта трудно непосредственно измерить теплоту взрыва алюминизированных ВВ. Теоретически она равна энергии взрыва, которая состоит из энергии первичной ударной волны и энергии пузыря. Энергию ударной волны и энергию пузыря можно вычислить из зависимостей давление — время. Энергию взрыва неидеальных ВВ определяли при подводных испытаниях. В экспериментах измеряли профили давления в воде для алюминизированных фольгой ВВ и для гексогена. Соответствующие профили давления, зарегистрированные датчиком, находящимся на расстоянии от заряда ВВ $R = 0.7$ м, показаны на рис. 3.

В одинаковых координатах пиковое давление в воде, создаваемое зарядом алюминизиро-

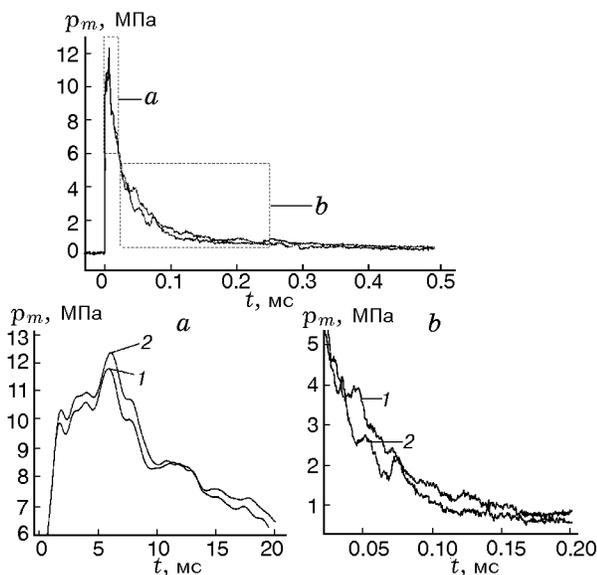


Рис. 3. Профили давления в воде при взрыве алюминизированного фольгой ВВ (1) и гексогена (2) ($R = 0.7$ м)

ванного фольгой ВВ, меньше, чем от заряда гексогена, но давление поддерживается в течение более длительного времени, что указывает на совпадение рабочих характеристик алюминизированного фольгой ВВ и традиционного ВВ, алюминизированного порошком. Большое количество энергии высвобождается при последующей реакции алюминиевой фольги с первичными продуктами детонации. Общеизвестным является тот факт, что в алюминизированном порошком ВВ реакция алюминия в плоскости Чепмена — Жуге протекает относительно медленно, поскольку алюминий покрыт пленкой Al_2O_3 с высокой температурой плавления ($2030^\circ C$), что снижает его реакционную способность. Большое количество энергии высвобождается во время последующих реакций алюминия с первичными продуктами детонации высокоэнергетических ВВ, что обеспечивает более длительное сохранение высокого давления [8]. В алюминизированном фольгой ВВ фольга покрыта Al_2O_3 и не реагирует в плоскости Чепмена — Жуге до тех пор, пока не оказывается разрушенной продуктами детонации. Так же как и в случае алюминиевого порошка, реакция алюминиевой фольги позади зоны реакции является экзотермической, что приводит к незатухающему высокому давлению в течение более длительного времени.

На рис. 4 показана разница пиковых давлений в зависимости от координаты. Видно, что пиковое давление в алюминизированном фоль-

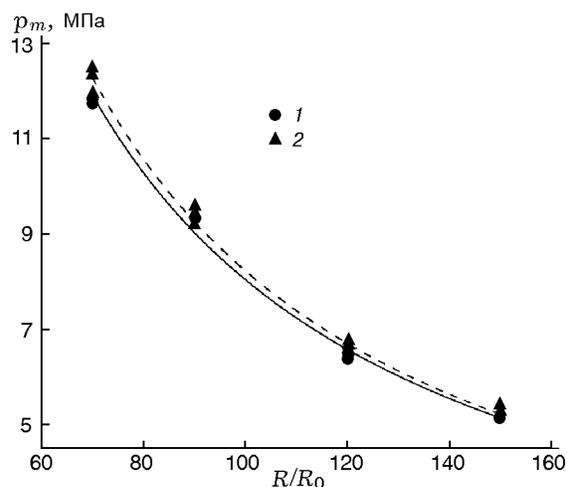


Рис. 4. Зависимость пикового давления в воде от координаты R/R_0 для алюминизированного фольгой ВВ (1) и гексогена (2) (сплошная и штриховая линии — аппроксимация)

гой ВВ меньше, чем в гексогене. Это объясняется возможными вторичными реакциями алюминиевой фольги с продуктами детонации.

В [9] предложено простое соотношение, которое подходит для многих типов ВВ:

$$p_m = A(R/R_0)^\alpha, \quad (1)$$

где p_m — пиковое давление первичной ударной волны, МПа; R_0 — радиус заряда, м; R — расстояние от заряда ВВ до датчика; A и α — коэффициенты, полученные при подгонке кривой к экспериментальным данным. По этой формуле построены зависимости, показанные на рис. 4. Использовались следующие подгоночные константы: для алюминизированного фольгой ВВ $A = 1.29$ ГПа, $\alpha = -1.10$, для гексогена $A = 1.45$ ГПа, $\alpha = -1.12$. Выражение вида (1) позволяет оценить пиковое давление в исследуемом ВВ и гексогене в промежуточных координатах.

Ударно-волновой импульс

Ударно-волновой импульс i определялся как интеграл от давления по времени:

$$i = \int_0^{6.7\theta} \Delta p(t) dt, \quad (2)$$

где $\Delta p(t)$ — зависимость давления от времени во фронте ударной волны и при последующем спаде давления в воде, МПа; θ — характерное время в первичной ударной волне (время, за которое давление в ударной волне падает от p_m до $p_m/2.71$), с. Ударно-волновые импульсы для алюминизированного пленкой ВВ и гексогена показаны на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что полученные экспериментальные данные обладают хорошей повторяемостью. Алюминий реагирует с кислородом по реакции $2Al + 3O \rightarrow Al_2O_3$ с образованием твердого тела. Количество молей газа уменьшается в результате этой реакции, однако объем газа увеличивается в связи с ростом температуры газа из-за экзотермической реакции алюминиевой фольги с продуктами детонации. Ударно-волновые импульсы для алюминизированного фольгой ВВ превышают импульсы для гексогена при $t > \theta$. К сожалению, в ущерб простоте интерпретации, форма профиля ударной волны такова, что интеграл $i(\theta)$ не сходится быстро к предельному значению с ростом

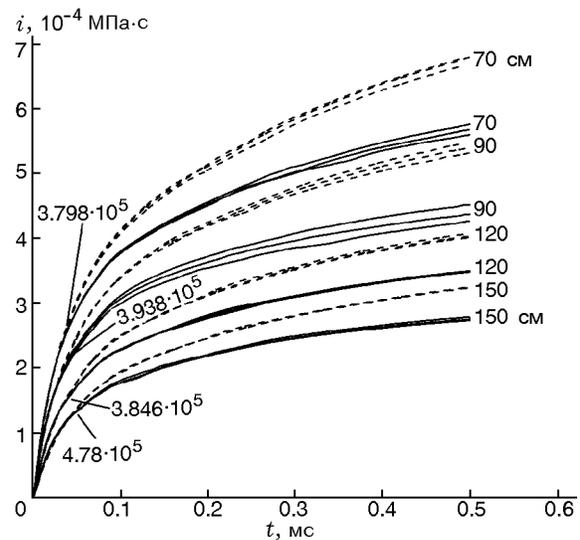


Рис. 5. Зависимость импульса от времени для алюминизированного фольгой ВВ (штриховые линии) и гексогена (сплошные линии)

θ , и потому практически невозможно определить верхний предел интегрирования по времени, для которого можно получить конечный импульс. Эта трудность возникает из-за «хвоста» в профиле ударной волны, в течение которого давление слабо затухает, поэтому вклад в интеграл, определяемый выражением (2) и показанный на рис. 5, непрерывно увеличивается с ростом верхнего предела интегрирования. Один из способов определения верхнего предела интегрирования заключается в том, чтобы выразить его некоторой величиной, равной, например, пяти- или десятикратному увеличенному значению θ . В настоящей работе верхний предел интегрирования задан равным 500 мкс.

Соотношение между ударно-волновым импульсом и параметром R/R_0 имеет вид

$$i = e(R/R_0)^g, \quad (3)$$

где e и g — коэффициенты, полученные согласованием зависимости (3) с экспериментальными данными. Зависимости ударно-волновых импульсов от координаты для алюминизированного фольгой ВВ и гексогена показаны на рис. 6. Видно, что приближение экспериментальных точек кривой вида (3) достаточно хорошее. Ударно-волновые импульсы для алюминизированного фольгой ВВ и гексогена уменьшаются с ростом R/R_0 . Ударно-волновые импульсы исследуемого ВВ превышают импульсы гексогена из-за потенциально возможной

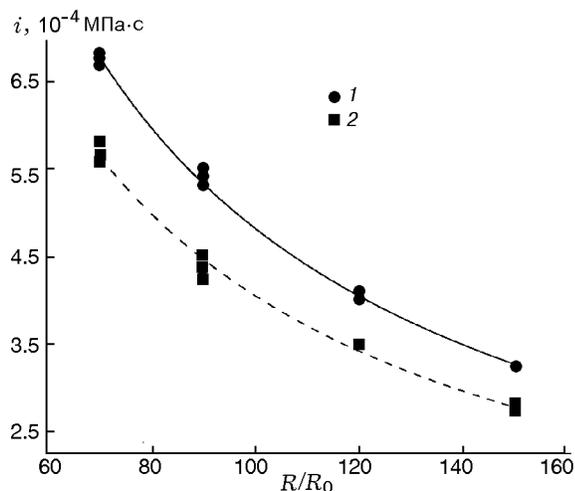


Рис. 6. Зависимость импульса от координаты R/R_0 для алюминизированного фольгой ВВ (1) и гексогена (2) (сплошная и штриховая линии — аппроксимация)

вторичной реакции алюминиевой фольги с продуктами детонации. По сравнению с гексогеном импульс исследуемого ВВ увеличен на $15 \div 25$ %. Разница между импульсами исследуемого ВВ и гексогена слегка уменьшается с ростом R/R_0 . Подгоночные константы для алюминизированного фольгой ВВ $e = 0.0403$ МПа·с, $g = -0.96$; для гексогена — $e = 0.0299$ МПа·с, $g = -0.93$. Кривые вида (3) позволяют оценить импульс для исследуемых ВВ в промежуточных координатах.

Энергия ударной волны

Энергию ударной волны находили по выражению [10]

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{W\rho_w c_w} \int_0^{6.7\theta} \Delta p^2(t) dt, \quad (4)$$

где W — масса заряда ВВ, кг; ρ_w — плотность воды, кг/м³; c_w — скорость звука в воде, м/с; θ — постоянная времени для зарегистрированной ударной волны, с.

Энергия пузыря

Энергию пузыря определяли по уравнению [10]

$$E_b = \frac{(\sqrt{1 + 4Ct_b} - 1)^3}{8C^3 k_1^3 W}, \quad (5)$$

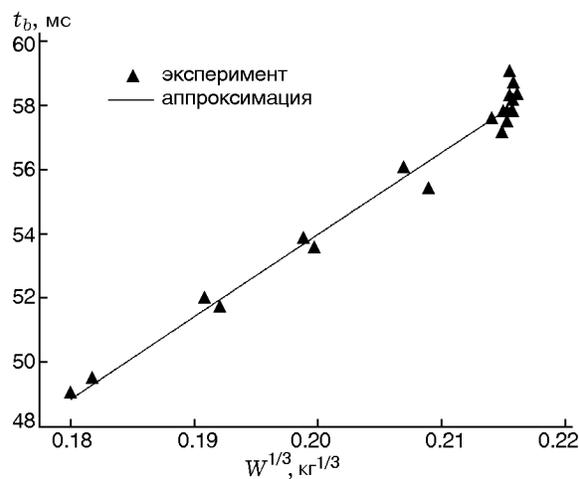


Рис. 7. Аппроксимирующая прямая $t_b - W^{1/3}$

где

$$k_1 = \frac{1.135\rho_w^{1/2}}{p_h^{5/6}}, \quad (6)$$

p_h — полное гидростатическое давление на глубине размещения заряда (включая атмосферное давление), Па,

$$t_b = aW^{1/3} + bW^{2/3} \quad (7)$$

— период первой пульсации, с,

$$C = b/a^2. \quad (8)$$

Константы a и b учитывают влияние границ на период колебаний пузыря, в частности учитывают тип используемого бассейна и гидростатическое давление. Эти константы определяются методом наименьших квадратов по данным $(t_b, W^{1/3})$. Для определения C проводили испытания с зарядами гексогена разной массы ($6 \div 10$ г) при одинаковых условиях, а экспериментальные данные аппроксимировали уравнением (7). Результаты аппроксимации показаны на рис. 7. Подгоночные параметры $a = 0.285$, $b = -0.0746$, $C = -0.919$ с⁻¹.

Энергия взрыва

Удельную энергию взрыва рассчитывали по формуле [10]

$$E = K_f(\mu E_s + E_b), \quad (9)$$

где

Таблица 2

Выходные энергетические параметры ВВ при подводных испытаниях

ВВ	R/R_0	t_b, c	$E_s,$ МДж/кг	μ	$\mu E_s,$ МДж/кг	$E_b,$ МДж/кг	$E,$ МДж/кг	$E_b/E,$ %	$Q_v,$ МДж/кг [11]	$E/Q_v,$ %
Алюминизированное фольгой ВВ	70	65.031	1.136	2.330	2.648	3.630	6.277	57.82	6.443	97.43
	90	65.004	1.105	2.330	2.575	3.625	6.200	58.46	6.443	96.23
	120	64.825	1.085	2.330	2.527	3.580	6.108	58.62	6.443	94.79
	150	64.816	1.025	2.330	2.389	3.578	5.968	59.96	6.443	92.62
Гексоген	70	57.678	1.035	2.461	2.547	2.527	5.074	49.81	5.378	94.35
	90	57.680	1.027	2.461	2.527	2.528	5.055	50.01	5.378	93.99
	120	57.462	1.020	2.462	2.510	2.489	4.999	49.80	5.378	92.96
	150	57.442	0.979	2.462	2.411	2.487	4.897	50.77	5.378	91.07

Примечание. Экспериментальные данные осреднены.

$$\mu = 1 + 1.3328 \cdot 10^{-1} p_{CJ} - 6.5775 \cdot 10^{-3} p_{CJ}^2 + 1.2594 \cdot 10^{-4} p_{CJ}^3 \quad (10)$$

— фактор потерь ударной волны, который, как было показано ранее, является функцией детонационного давления;

$$p_{CJ} = \rho_0 D^2 / 4 \quad (11)$$

— давление Чепмена — Жуге, измеряемое в Па в уравнении (10) и ГПа в (11), уравнение (11) подходит для вычисления p_{CJ} простого ВВ; D — скорость детонации, м/с; K_f — фактор геометрии заряда, $K_f = 1$ для заряда сферической формы, $K_f = 1.02 \div 1.10$ для заряда отличной от сферической формы. Поскольку высота зарядов алюминизированного фольгой ВВ и гексогена была близка к их диаметру, энергию взрыва рассчитывали для заряда сферической формы. Специальная структура исследуемого ВВ, алюминизированного фольгой, позволяет для определения p_{CJ} использовать выражение

$$p_{CJ} = \rho_{e,w} D^2 / 4, \quad (12)$$

где $\rho_{e,w}$ — плотность основного ВВ, кг/м³. Энергетические параметры исследуемого ВВ и гексогена представлены в табл. 2. Теплота взрыва ВВ, алюминизированного фольгой, совпадает с теплотой взрыва ВВ, алюминизированного порошком, поскольку в этих ВВ одинаковое содержание алюминия. Поэтому для теплоты взрыва исследуемого ВВ использовались

данные, полученные ранее для ВВ, алюминизированного порошком [11].

Из табл. 2 видно, что введение алюминиевой фольги в гексоген ведет к увеличению длительности импульса, что означает повышение энергии пузыря для исследуемого ВВ. Для алюминизированного фольгой ВВ и гексогена отношение энергии взрыва к теплоте взрыва (Q_v) близко к теоретическому значению 100 %. Последнее означает, что степень завершенности реакции для алюминиевой фольги близка к степени реакции для алюминиевого порошка. Алюминиевая фольга, так же как и порошок, покрыта Al_2O_3 , имеющим высокую температуру плавления (2030 °С). Алюминиевая фольга разрушается продуктами детонации, и чистый Al, температура плавления которого 660 °С, также подвергается воздействию продуктов детонации. Ранее обсуждалось, что реакция алюминиевой фольги в более поздней стадии предпочтительнее. Как видно из табл. 2, отношение E/Q_v близко к 100 % при $R/R_0 = 70$, потому что выражение для μ получено при $R/R_0 = 60$ [10]. Это доказывает правдоподобность оценки теплоты взрыва в подводных испытаниях. Энергия ударной волны в алюминизированных фольгой ВВ и в гексогене слегка уменьшается с увеличением R/R_0 . По сравнению с гексогеном энергия ударной волны E_s в алюминизированном фольгой ВВ увеличивается на 4.7 ÷ 9.6 %, а энергия пузыря E_b возрастает на 21.87 ÷ 23.71 %. Отношение E_b/E_s для исследуемого ВВ составляет 57.82 ÷ 29.96 % и превышает аналогичное отношение для гексогена,

которое равно $49.81 \div 50.77$ %. Это означает, что добавление алюминиевой фольги в гексоген приводит в основном к увеличению энергии пузыря. Полученные результаты показывают, что рабочие характеристики ВВ, алюминизированного фольгой, аналогичны характеристикам ВВ, алюминизированного порошком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено новое неидеальное смесевое ВВ путем замены алюминиевого порошка в традиционном алюминизированном ВВ на алюминиевую фольгу. Рабочие характеристики исследованного ВВ с алюминиевой фольгой близки к характеристикам ВВ с добавлением порошка Al. Пиковое давление, создаваемое алюминизированным фольгой ВВ при подводных испытаниях, меньше, чем давление, создаваемое зарядом гексогена в той же самой координате, однако поддерживается оно дольше по сравнению с давлением от заряда гексогена. Большое количество энергии, высвобождаемой на более поздней стадии реакции алюминиевой фольги с первичными продуктами детонации, приводит к тому, что ударно-волновой импульс и энергия взрыва алюминизированного фольгой ВВ превышают те же характеристики для гексогена. Этот результат показывает, что степень завершения реакции для алюминиевой фольги близка к степени реакции для алюминиевого порошка и добавление фольги в гексоген ведет в основном к увеличению энергии пузыря.

Дополнительно можно предположить, что ударная чувствительность алюминизированных ВВ при применении фольги вместо порошка уменьшается и новое ВВ имеет лучшие механические свойства за счет использования фольги, однако это необходимо подтвердить экспериментально в будущем. Алюминиевая фольга также может применяться для плавления алюминизированных ВВ, в том числе литевых ВВ на основе тротила либо полимера. Кроме того, ряд проблем, возникающих при добавлении порошка Al в традиционное ВВ, а именно: загрязнение окружающей среды, пыль при взрыве и уменьшение активности порошка Al с увеличением срока хранения, могут быть решены при использовании алюминиевой фольги в смесевых ВВ.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (гранты № 51174183, 51134012).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вадхе П. П., Павар Р. Б., Синха Р. К., Астана С. Н., Субхананда Рао А.** Алюминизированные литевые взрывчатые вещества (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 98–115.
2. **Wang-Wei, Jian Ling-Wang, Guo-Wei, Xian Zhen-Jia.** Influence of aluminum content on the detonation pressure and detonation velocity of RDX-based aluminized explosive // Chin. J. Explos. and Propellants. — 2010. — V. 33. — P. 15–18.
3. **Keshavarz M. H., Motamedoshariati H., Moghayadnia R.** A new computer code to evaluate detonation performance of high explosives and their thermochemical properties, part I // J. Hazard. Mater. — 2009. — V. 172. — P. 1218–1228.
4. **Kumar A. S., Rao V. B.** Evaluation of plastic bonded explosive (PBX) equations based on RDX, aluminum, and HTPB for underwater applications // Propellants, Explos., Pyrotech. — 2010. — V. 35. — P. 359–364.
5. **Rumchik C. G., Jordan J. L.** Effect of aluminum particle size on the high strain rate properties of pressed aluminized explosives // Shock Compression of Condensed Matter. — 2007. — P. 795–798.
6. **Stosz M. J.** Development of new explosives for the US Navy // 13th Intern. Annu. Conf. of ICT. — 1982. — P. 257–275.
7. **Barnes R. A., Hetherington J. G., Smith P. D.** The design and instrumentation of a simple system for demonstrating underwater explosive effects // Propellants, Explos., Pyrotech. — 1988. — V. 13. — P. 13–16.
8. **Stromoe E., Eriksen S. W.** Performance of high explosives in underwater application. Part 2: Aluminized explosives // Propellants, Explos., Pyrotech. — 1990. — V. 15. — P. 52–53.
9. **Физика взрыва** / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2000.
10. **Bjarnholt G.** Suggestions on standards for measurement and data evaluation in the underwater explosion test // Propellants and Explos. — 1980. — V. 5. — P. 67–74.
11. **Sun Ye-Bin, Hui Jun-Ming, Cao Xin-Mao.** Mixture Explosives for Military Purposes. — Beijing: Ordnance Industry Press, 1995.

Поступила в редакцию 7/II 2013 г.,
в окончательном варианте — 3/X 2013 г.