

УДК 534.222

ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ПОРОШКА Al/V И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ ПРИ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ

С. Сюй¹, Ю. Чень¹, С. Чень², Д. Ву¹, Д.-Б. Лю¹¹Нанкинский научно-технологический университет, 210094 Нанкин, Китай, xusen2015@163.com²Шанхайское управление по инспекции въезда-выезда и карантину, 200135 Шанхай, Китай

Методом подводного взрыва исследовали детонационные свойства металлизированных взрывчатых веществ, содержащих порошкообразные алюминий и бор. Теплоту сгорания определяли в кислородной калориметрической бомбе (калориметр Parr 6200, Parr Instrument Company, США). Установлено, что при увеличении содержания порошка бора в смеси теплота сгорания смеси возрастает, а эффективность сгорания бора уменьшается. Наибольшая теплота сгорания 38.2 МДж/кг получена при содержании бора 40 %. Все исследованные металлизированные взрывчатые составы RDX/Al/V/AP имеют более высокую энергию детонации в воде (в том числе более высокую энергию ударной волны и пузыря), чем заряд тротила. Наибольшее значение полезной энергии составило 6.82 МДж/кг при содержании бора в смеси 10 %. Это на 3.4 % выше, чем полная энергия состава RDX/Al/AP, и в 2.1 раза превышает энергию, выделяемую при взрыве тротила той же массы.

Ключевые слова: порошки алюминия, порошки бора, теплота сгорания, подводный взрыв, тротильный эквивалент.

DOI 10.15372/FGV20160314

ВВЕДЕНИЕ

Металлические порошки с большой теплотой сгорания вызывают интерес как материалы с высокой плотностью энергии. Их добавляют к метательным взрывчатым веществам (ВВ) и к порохам в качестве горючего. С начала XX в. одной из широко распространенных добавок является алюминий. Он повышает метательное действие ВВ и увеличивает энергию пузыря в подводных взрывах [1–3].

Многочисленные работы [4–9] последних лет по исследованию влияния размера частиц и содержания алюминия на эксплуатационные качества и чувствительность различных ВВ показали, что с уменьшением размера частиц порошка алюминия скорость детонации уменьшается, а теплота взрыва возрастает.

Периодическая таблица химических элементов предсказывает существование элементов [10–13], которые потенциально могут обеспечить более высокую теплоту сгорания по

сравнению с алюминием. К ним относится, например, бор. Теплота его сгорания примерно в два раза выше, чем у алюминия. За последние 30 лет возрос интерес к исследованию горения бора [14]. Несмотря на исключительные характеристики бора как топлива, он редко достигает своего потенциала в ракетных двигателях, в которых требуется полное сгорание. В работах [15–17] описан двухстадийный процесс горения порошков бора. Первый этап авторы связывают с горением его частиц, покрытых изначально существовавшим слоем оксида бора. Температуры плавления и горения оксида бора равны 450 и 2065 °С [18], а самого бора — соответственно 2076 и 3864 °С. При нагреве частицы бора выше температуры плавления оксида бора слой оксида удаляется. Удаление жидких оксидных слоев играет наиболее важную роль в сжигании бора. Второй этап процесса обусловлен полноценным сгоранием открытых порошков бора.

Исследования [15] показали, что при одних и тех же размерах частиц и в аналогичных средах порошки бора горят до четырех раз дольше, чем порошки алюминия. Это означает, что для увеличения периода пульсаций и энергии пузыря при подводном взрыве бор можно счи-

© Xu Sen¹, Chen Yuan¹, Chen Xiang², Wu Dejun¹, Liu Dabin¹, 2016.

¹School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, 210094 Nanjing, P. R. China.

²Shanghai Enter-Exit Inspection and Quarantine Bureau, 200135 Shanghai, P. R. China.

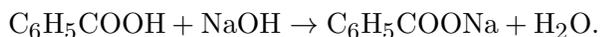
тать хорошей добавкой в металлизированные ВВ. В работах [19, 20] показано, что порошок бора увеличивает теплоту взрыва ВВ, зависимость имеет линейный характер (в диапазоне $8 \div 20$ %). В работе [21] исследовалась смесь RDX/Al/B/НТРВ состава 45/10/20/25. Авторы обнаружили, что квазистатическое давление в закрытой камере, создаваемое этим составом, в 1.3 раза выше, чем давление, создаваемое составом на основе чистого алюминия (RDX/Al/НТРВ, 45/38/17).

В настоящей работе проанализированы взрывчатые составы RDX/Al/AP и RDX/Al/B/AP с различным содержанием порошков бора и алюминия и исследованы их характеристики при подводном взрыве.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

1.1. Теплота сгорания

Перед сжиганием образца в кислородной калориметрической бомбе необходимо определить теплоемкость системы. Калориметрическая бомба была откалибрована при сгорании бензойной кислоты, для которой известны масса и теплота сгорания. Остаток бензойной кислоты титровали стандартным раствором гидроксида натрия (NaOH) и фенолфталеина:



Протестировано десять образцов бензойной кислоты массой ≈ 1.0 г. Калибровочный коэффициент C для кислородной калориметрической бомбы рассчитывали по формуле

$$C = \frac{Q_m m + Q_1 m_1}{\Delta T}, \quad (1)$$

где Q_m — теплота сгорания бензойной кислоты, 26.453 МДж/кг; m — масса бензойной кислоты, г; Q_1 — теплота сгорания воспламеняющей смеси, Дж/г; m_1 — масса сгоревшей смеси, г; ΔT — повышение температуры воды в ванне.

Для определения теплоты сгорания металлических смесей применялась кислородная калориметрическая бомба Parr 6200 (Parr Instrument Company, USA). Стационарный полуавтоматический калориметр Parr 6200 с разрешением по температуре 0.0001 К заправлялся кислородом до достижения давления

200 атм, энергия сгорания определялась до значения 33 кДж (8 ккал). Образец металлического порошка массой ≈ 0.7 г помещали в стеклянную капсулу диаметром 2.5 см и высотой 1 см. Капсула была снабжена воспламеняющей проволочкой, присоединенной к двум электродам. Бомба герметизировалась, и в течение 1 мин в ней создавалось давление чистого кислорода. Затем герметичную бомбу помещали в водяную баню массой 1820 г, которая находилась внутри адиабатического контейнера. После достижения теплового равновесия системы с окружающей средой образец воспламенялся и сгорал при давлении кислорода 3.0 МПа. Теплоту сгорания образца Q_s при комнатной температуре определяли стандартным методом ASTM D240 [22] по выражению

$$Q_s = \frac{C\Delta T - Q_1 m_1}{m_s}, \quad (2)$$

где m_s — масса образца, г.

Теоретическое значение теплоты сгорания Q_t , выделяемой при полном сгорании вещества в кислороде, вычисляли как разность между теплотами образования продуктов и реагентов. Теплота сгорания элемента Q_p эквивалентна теплоте образования продуктов, потому что теплоты образования как элемента, так и кислорода равны нулю. Используемые формулы имеют вид

$$Q_p = \Delta H, \quad (3)$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^n m_i Q_{p,i}, \quad (4)$$

где ΔH — разница энтальпий продуктов и реагентов, кДж/кг; m_i — масса каждого элемента.

1.2. Подводный взрыв

В 1970-х годах для измерения энергии ВВ был применен подводный взрыв. В последние годы этот метод стал эффективным средством оценки мощности ВВ [23, 24]. При детонации заряда ВВ в воде твердый взрывчатый материал переходит в газообразные продукты реакции с чрезвычайно высоким давлением. Давление передается в окружающую воду и распространяется в виде ударной волны во всех направлениях. Вслед за ударной волной возникают и распространяются другие импульсы давления [25, 26].

В настоящей работе ВВ предполагаются гомогенными. Дополнительно предполагается, что имеет место стационарная детонация и что та часть заряда, через которую проходит детонационная волна, полностью переходит в газообразные продукты.

Полная энергия E_u определяется суммой энергии ударной волны E_s , энергии пузыря E_b и диссипированной в воде энергии E_d :

$$E_u = E_s + E_b + E_d. \quad (5)$$

Диссипирование части энергии ударной волны в воде происходит тем быстрее, чем выше давление. Диссипированная энергия не повреждает структуру, а оставшаяся часть энергии называется эффективной энергией ударной волны.

Все полученные в экспериментах профили давления имеют одинаковый характер: в начале сигнала наблюдается острый пик избыточного давления, вслед за которым давление быстро уменьшается — наблюдается экспоненциальный спад до гидростатического давления, описываемый выражением [27]

$$p(t) = p_m \exp(-t/\theta), \quad (6)$$

где $p(t)$ — зависимость избыточного давления (свыше гидростатического давления) от времени; p_m — пиковое давление ударной волны; θ — постоянная времени.

Без учета диссипированной энергии энергии ударной волны может быть задана выражением [27]

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{w\rho_0 c_0} \int_0^{6.7\theta} p^2(t) dt, \quad (7)$$

где R — расстояние от заряда до датчика; w — масса заряда; ρ_0 — плотность воды, обычно принимается равной 1000 кг/м^3 ; c_0 — скорость звука в воде, как правило, $c_0 = 1525 \text{ м/с}$.

Энергия пузыря является функцией как первого периода пульсаций пузыря τ , так и массы ВВ и может быть описана [23, 27, 28] выражением

$$E_b = \frac{0.675 p_0^{5/2}}{w\rho_0^{3/2}} \tau. \quad (8)$$

Заряд и пьезорезистивный датчик (РСВ Piezotronics, Inc., диапазон — до 68950 кПа ,

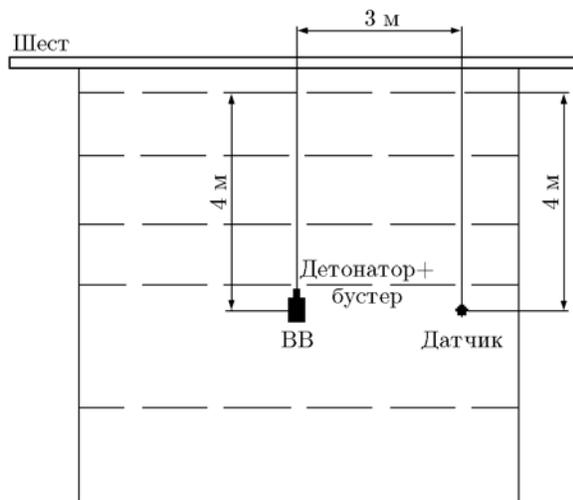


Рис. 1. Схема подводного взрыва

чувствительность 0.073 мВ/кПа ($\pm 15\%$)) помещались на глубине 4 м на расстоянии 3 м друг от друга. Датчик регистрировал сигналы избыточного давления и первый период пульсаций пузыря. Эксперименты проводили в бассейне диаметром 8 м и глубиной 8 м. Схема подводного взрыва показана на рис. 1.

1.3. Материалы

Исследовались порошки алюминия со сферическими частицами диаметром 2 мкм и аморфного бора с частицами размером 0.1 мкм . Фотографии порошков, полученные сканирующим электронным микроскопом, представлены на рис. 2.

Было подготовлено 7 композиций порошков. Их обозначения и составы даны в табл. 1.

Взрывчатая смесь состояла из гексогена (36 % RDX), перхлората аммония (20 % AP), металлических порошков (35 %), воска $(\text{CH}_2)_n$ и других добавок (9 %), включая связующее вещество НТРВ. Использовался коммерческий сорт гексогена. Средний размер частиц гексогена и перхлората аммония составлял 30 мкм .

Изготавливались прессованные цилиндрические заряды ВВ массой 400 г , диаметром 76 мм , высотой $47 \div 59 \text{ мм}$, плотность зарядов приведена в табл. 2. Для инициирования заряда ВВ применялся стандартный детонатор и бустерный заряд массой 10 г , изготовленный из флегматизированного гексогена. Энергия, выделяемая бустерным зарядом, передавалась образцу в виде инициирующей ударной волны,

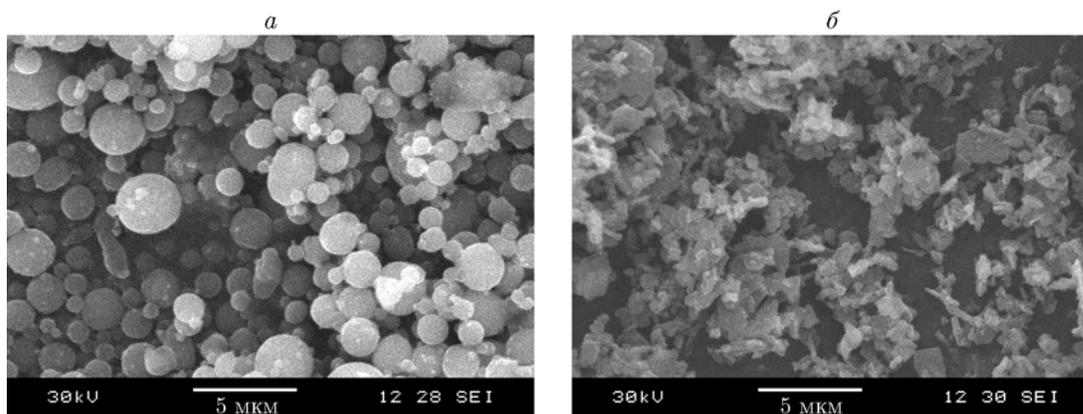


Рис. 2. Фотографии порошков алюминия (а) и бора (б), полученные сканирующим электронным микроскопом

Таблица 1
Состав металлических порошков

Обозначение	Массовое содержание, %	
	Al	B
М-1	100	0
М-2	90	10
М-3	80	20
М-4	70	30
М-5	60	40
М-6	50	50
М-7	0	100

Таблица 2
Плотность зарядов ВВ

Образец	ρ , г/см ³
М-1	1.85
М-2	1.81
М-3	1.80
М-4	1.79
М-5	1.76
М-6	1.71
TNT	1.50

амплитуда которой соответствовала теплоте взрыва этого заряда.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Теплота сгорания

В табл. 3 приведены экспериментальные (Q_e) и теоретические (Q_t) значения теплоты сгорания металлических порошков, а также эффективность сгорания (CR). Предполагалось, что эффективность сгорания алюминия — величина постоянная и может быть рассчитана по формуле

$$(CR)_{Al} = \frac{Q_{e,Al}}{Q_{t,Al}}. \quad (9)$$

В этом случае эффективность сгорания бора в металлических смесях можно определить по соотношению

Таблица 3
Теплота сгорания металлических порошков

Образец	Q_e , МДж/кг	Q_t [18], МДж/кг	Эффективность сгорания	
			Al	B
М-1	30.3 ± 0.2	31.1	97.7	—
М-2	33.0 ± 0.2	33.8	97.7	97.0
М-3	35.0 ± 0.2	36.6	97.7	91.0
М-4	36.3 ± 0.2	39.4	97.7	85.6
М-5	38.2 ± 0.3	42.2	97.7	85.0
М-6	37.4 ± 0.6	45.0	97.7	75.5
М-7	15.6 ± 0.2	58.9	—	26.5

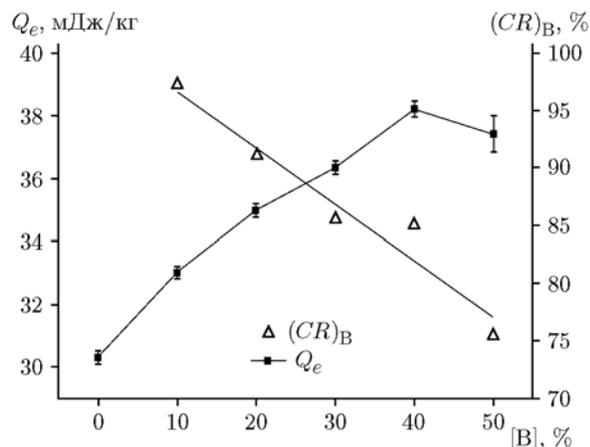


Рис. 3. Зависимости величин Q_e и $(CR)_B$ от содержания бора

$$(CR)_B = \frac{Q_e - CR_{Al}Q_{t,Al}wt_{Al}}{Q_{t,B}wt_B}, \quad (10)$$

где wt — массовая концентрация вещества.

Из приведенных результатов можно сделать общий вывод о влиянии состава на теплоту сгорания. При увеличении содержания порошка бора теплота сгорания металлических смесей увеличивается. Наибольшее ее значение 38.2 МДж/кг получено при содержании бора 40 %, при дальнейшем его повышении теплота сгорания уменьшается.

Приведенная в табл. 3 теплота сгорания чистого бора составляет всего лишь 15.6 МДж/кг, а эффективность сгорания равна 26.5 %. Это означает, что порошок бора ведет себя как инертное вещество в этом процессе горения. Даже в кислородосодержащей среде теплота и эффективность сгорания бора остаются низкими. Зависимость теплоты и эффективности сгорания бора от его содержания показана на рис. 3. При добавлении в смесь алюминиевого порошка эффективность сгорания бора возрастает. С увеличением содержания бора в смеси эффективность его сгорания уменьшается. В смеси состава 10 % бора и 90 % алюминия эффективность сгорания бора достигает 97.0 % — значение, почти равное коэффициенту полного сгорания бора.

2.2. Энергия ударной волны

На рис. 4 приведены типичные зависимости избыточного давления от времени для различных взрывчатых составов. Профили удар-

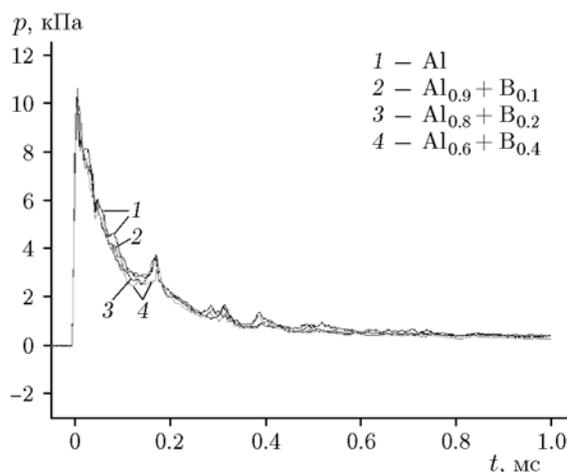


Рис. 4. Зависимость избыточного давления от времени для различных взрывчатых составов

Таблица 4

Избыточное давление и энергия ударной волны в различных составах ВВ

Образец	p_m , МПа	E_s , МДж/кг
М-1	10.42 ± 0.20	1.05 ± 0.01
М-2	10.16 ± 0.04	1.01 ± 0.02
М-3	10.31 ± 0.16	0.98 ± 0.03
М-4	9.76 ± 0.05	1.00 ± 0.02
М-5	9.85 ± 0.25	0.96 ± 0.03
М-6	9.92 ± 0.14	0.80 ± 0.01
TNT	9.41 ± 0.31	0.88 ± 0.02

ных волн показывают, что чем больше содержание бора в смеси, тем быстрее спадает избыточное давление. Энергия ударной волны рассчитывалась по уравнению (8), результаты представлены в табл. 4. Видно, что избыточное давление металлизированных ВВ выше, чем давление от взрыва заряда тротила той же массы и на том же расстоянии. При содержании бора менее 20 % значения избыточного давления различных составов ВВ в основном равны. При содержании бора выше 20 % избыточное давление относительно низкое. Энергии ударных волн во всех металлизированных ВВ примерно равны: ≈ 1.000 МДж/кг, за исключением состава М-6. Похоже, что с увеличением массовой доли бора энергия ударной волны постепенно уменьшается (рис. 5).

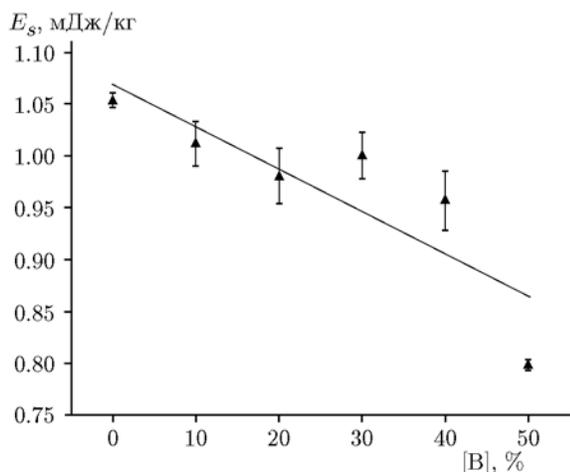


Рис. 5. Зависимость энергии ударной волны от содержания бора

2.3. Энергия пузыря

Типичные профили избыточного давления в первом периоде пульсаций пузыря при взрыве различных составов ВВ показаны на рис. 6. Приведенные в табл. 5 данные свидетельствуют о зависимости между первым периодом пульсаций пузыря (энергией пузыря) и концентрацией бора. При содержании порошка бора во взрывчатой смеси до 10 % (в этой точке эффективность сгорания бора достигает максимума) наблюдаются максимальная длительность периода пульсации пузыря и наибольшая энергия пузыря (рис. 7). Это означает, что умень-

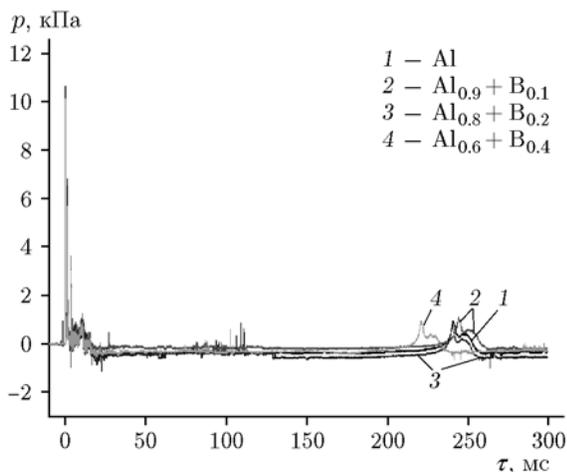


Рис. 6. Профили избыточного давления в первом периоде пульсации пузыря при взрыве различных составов ВВ в воде на расстоянии 3 м от заряда

Таблица 5
Длительность первого периода пульсаций и энергия пузыря для различных составов ВВ

Образец	t , мс	E_b , МДж/кг
М-1	242.8 ± 1.3	5.65 ± 0.090
М-2	245.0 ± 0.3	5.81 ± 0.02
М-3	240.2 ± 0.5	5.47 ± 0.03
М-4	236.2 ± 0.2	5.21 ± 0.01
М-5	219.1 ± 2.4	4.15 ± 0.14
М-6	217.6 ± 0.2	4.07 ± 0.01
TNT	180.9 ± 0.3	2.34 ± 0.01

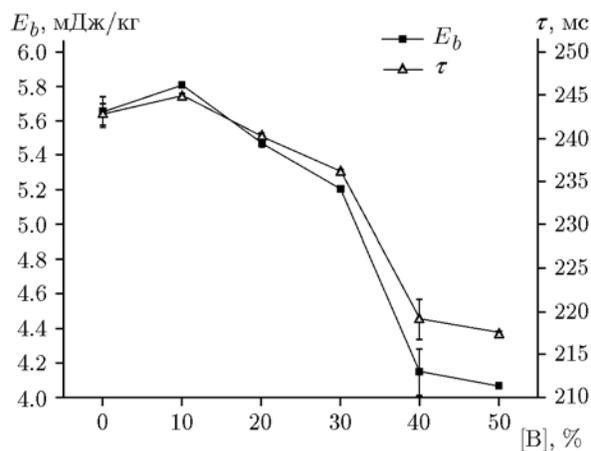


Рис. 7. Зависимость энергии и длительности первого периода пульсации пузыря от содержания бора

ренный прирост содержания бора в алюминизированном ВВ может увеличить энергию пузыря.

Из-за медленной скорости окисления бора в металлических смесях эта реакция требует высокой температуры окружающей среды, которая может возникнуть в результате реакции окисления алюминия. При взрыве заряда ВВ в воде происходит выброс непрореагировавших металлов. Ударная волна распространяется вне пульсирующего пузыря. В отличие от быстрой детонации гексогена, металлы реагируют гораздо медленнее. При расширении пульсирующего пузыря непрореагировавшие металлы продолжают участвовать в реакции. Более высокая энергия пузыря при взрыве состава М-2 означает, что у этого состава коэффициент утилизации на единицу массы выше, чем у алюминия в металлизированных ВВ.

2.4. Полная энергия

Если пренебречь диссипированной энергией E_d , то полную энергию E_u , называемую также полезной полной энергией [25], можно рассчитать по формуле

$$E_u = E_s + E_b. \quad (5')$$

Результаты расчета, приведенные в табл. 6, показывают, что полная энергия металлизированных ВВ вначале возрастает, а затем уменьшается с увеличением содержания бора (рис. 8). Состав М-2 с концентрацией бора 10 % дает самую высокую полную энергию (6.82 МДж/кг) при подводном взрыве. Это примерно на 3.4 % больше, чем у состава М-1 (чистый алюминий), и на 40 % больше, чем у состава М-6 (50 % алюминия и 50 % бора). Это означает, что полезная энергия состава М-2 выше энергии, выделяемой при взрыве тротила той же массы, в 2.1 раза.

Таблица 6
Полная энергия различных составов ВВ

Образец	E_u , МДж/кг
М-1	6.60 ± 0.03
М-2	6.82 ± 0.04
М-3	6.46 ± 0.06
М-4	6.20 ± 0.07
М-5	5.11 ± 0.09
М-6	4.87 ± 0.02
TNT	3.21 ± 0.06

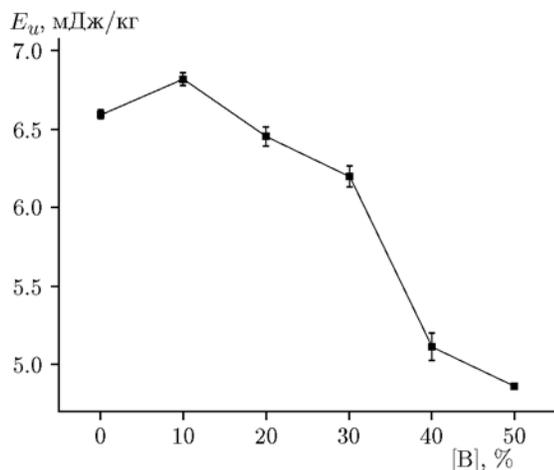


Рис. 8. Зависимость полной энергии от содержания бора

Увеличение полезной энергии состава М-2 связано с более высокой теплотой сгорания порошка бора по сравнению с алюминиевым порошком. Однако бор имеет более высокие температуры плавления и воспламенения, и его энтальпию окисления трудно извлечь полностью. При взрыве первым реагирует гексоген, затем вступает в реакцию алюминий и наконец бор. Полная энергия увеличивается за счет окисления бора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты подводных взрывов взрывчатых композиций, в состав которых входили разработанные металлические смеси (порошки бора и алюминия), показали следующее.

Теплота сгорания всех исследованных металлических смесей оказалась выше, чем теплота сгорания алюминизированного ВВ (состав М-1). С увеличением добавки бора в смесях теплота сгорания растет и достигает максимума при содержании бора 40 % (состав М-5), а при дальнейшем повышении его содержания снова падает. Эффективность сгорания бора в смесях с алюминием выше, чем у состава, содержащего только порошок бора (состав М-7); причем чем ниже содержание бора, тем выше эффективность сгорания.

Для всех металлизированных ВВ энергия взрыва в воде (включая энергию ударной волны и пузыря) выше энергии взрыва тротила. Содержание бора в металлических смесях слабо влияет на избыточное давление и на энергию ударной волны. Увеличение полной энергии в подводном взрыве происходит главным образом за счет энергии пузыря, на которую оказывает влияние эффективность сгорания металлических смесей. Среди исследованных выделяется состав М-2, имеющий наибольшую энергию пузыря и самую высокую полную полезную энергию. Последняя превышает энергию, выделяемую при взрыве тротила той же массы, в 2.1 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wildegger-Gaissmaier A. E.** Aspects of therobaric weaponry // *Mili. Tech.* — 2004. — V. 28, N 6. — P. 125–126.
2. **Yen N. H., Wang L. Y.** Reactive metals in explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2012. — V. 37, N 2. — P. 143–155.

3. **Cook M. A., Filler A. S., Keyes R. T.** Aluminized explosives // *J. Phys. Chem.* — 1957. — V. 61, N 2. — P. 189–196.
4. **Brousseau P., Dorsett H. E., Cliff M. D., et al.** Detonation properties of explosives containing nanometric aluminum powder // 12th Intern. Detonation Symp., 2002.
5. **Lefrancois A., Baudin G., Gallic C. L.** Coupling, nanometric aluminum powder influence on the detonation efficiency of explosives // 12th Intern. Detonation Symp., 2002.
6. **Gogulya M. F., Dolgoborodov A. Y., Makhov M. N., et al.** Detonation performance of aluminized compositions based on BTNEN // 12th Intern. Detonation Symp., 2002.
7. **Brousseau P., Cliff M.** The effect of ultrafine aluminium powder on the detonation properties of various explosives // 32th Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, 2001.
8. **Trzciński W. A., Cudziło S., Szymańczyk L.** Studies of detonation characteristics of aluminum enriched RDX compositions // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2007. — V. 32, N 5. — P. 392–400.
9. **Trzciński W. A., Cudziło S., Paszula J.** Studies of free field and confined explosions of aluminum enriched RDX compositions // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2007. — V. 32, N 5. — P. 502–508.
10. **Schaefer R., Nicolich S. M.** Development and evaluation of new high blast explosives // 36th Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, 2005.
11. **Fischer S. H., Grubelich M. C.** The Use of Combustible Metals in Explosive Incendiary Devices. — Sandia National Lab., 1996.
12. **Fischer S. H., Grubelich M. C.** Explosive dispersal and ignition of combustible metals and thermite formulations // 46th Annu. Bomb & Warhead Tech. Symp., 1996.
13. **Anderson P. E., Cook P., Davis A., et al.** Silicon fuel in high performance explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2014. — V. 39, N 1. — P. 74–78.
14. **Kuo K. K. Editors, Pein R.** Combustion of Boron-based Solid Propellants and Solid Fuels. — Begell House, 1993.
15. **Maček A., Semple J. M.** Combustion of boron particles at elevated pressure // 13th Symp. (Intern.) *Combust.: Proc.* — 1971. — P. 859–868.
16. **Maček A., Semple J. M.** Combustion of boron particles at atmospheric pressure // *Combust. Sci. Technol.* — 1969. — V. 1, N 3. — P. 181–191.
17. **Maček A.** Combustion of boron particles: experiment and theory // *Symp. Combust. Proc.* — 1973. — P. 1401–1411.
18. **Speight J. G.** *Lange's Handbook of Chemistry.* — N. Y.: McGraw-Hill, 2005.
19. **Koch E. C., Klapötke T. M.** Boron-based high explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2012. — V. 37, N 3. — P. 335–344.
20. **Makhov M.** Explosion heat of boron-containing explosive composition // 35th Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, 2004.
21. **Lee K., Lee K., Kim J.** Relationship between combustion heat and blast performance of aluminized explosives // 36th Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, 2005.
22. **ASTM D240-02.** Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter. — 2007.
23. **Katsume T.** Precisely measure explosive energy using explosive underwater method // *Kogyo Kayaku.* — 1981. — V. 4, N 4. — P. 239–245.
24. **Bjarnholt G., Holmberg R.** Explosive expansion works in underwater detonations // *Proc. 6th Symp. on Detonation*, 1976.
25. **Arons A. B., Yennie D. R.** Energy partition in underwater explosion phenomena // *Rev. Mod. Phys.* — 1948. — V. 20, N 3. — P. 519–535.
26. **Swisdak M. M., Jr.** *Explosion Effects and Properties. Pt II: Explosion Effects in Water.* — DTIC Document, 1978.
27. **Cole R. H.** *Underwater Explosions.* — Princeton, N. J.: Princeton Univ. Press, 1948.
28. **John M. B.** Numerical modelling of shock wave and pressure pulse generation by underwater explosions // *Tech. Rep. DSTO-TR-0677.* — Australian, 1998.

*Поступила в редакцию 10/III 2015 г.,
в окончательном варианте — 7/V 2015 г.*