

УДК 534.222.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ, СОДЕРЖАЩИХ В/АІ, ПРИ ВЗРЫВЕ В ВОЗДУХЕ

X.-L. Li, W. Cao, Q.-G. Song, D.-Y. Gao, B.-H. Zheng, X.-L. Guo, Y. Lu,
X.-A. Wang

Институт химии материалов Китайской академии инженерных наук, 621900 КНР, gaodayuan@caep.cn

Разработка и создание металлизированных взрывчатых веществ с низкой чувствительностью и высокой энергетикой относятся к числу ключевых проблем. Для изучения влияния содержания порошкообразного соединения В/АІ на энерговыделение металлизированных взрывчатых веществ, взрывааемых в воздухе, разработаны три состава на основе октогена, содержащие В/АІ. Проведены испытания их взрыва в воздухе, а также численное моделирование взрыва методом конечных элементов LS-DYNA. Результаты показали, что избыточное давление в ударной волне от взрывчатых веществ, содержащих В/АІ, выше, чем у содержащих только АІ, в тех же условиях. Отличие результатов измерения от результатов расчета по эмпирическому уравнению составляет менее 3.5 кПа, от результатов численного моделирования — менее 4.9 кПа. Несмотря на то, что порошок АІ легче реагирует с продуктами детонации и воздухом, время горения порошка В больше и при этом больше высвобождается энергии. Кроме того, при увеличении содержания порошка В/АІ время горения возрастает, работоспособность и поражающее действие усиливаются.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, содержащие В/АІ, воздушный взрыв, численное моделирование, избыточное давление ударной волны, горение, энерговыделение.

DOI 10.15372/FGV20190614

ВВЕДЕНИЕ

При окислении легковоспламеняющихся частиц металла может выделяться большое количество тепла. Добавление высокопотенциальных легковоспламеняющихся частиц металла в энергетические материалы может значительно улучшить работоспособность и мощность взрывчатого вещества (ВВ). Порошки алюминия и бора — два типа легковоспламеняющихся частиц металла с высокой теплотой сгорания [1–6]. В настоящее время ВВ, содержащие АІ, исследованы достаточно подробно [7–9]. Известно, что массовая теплота сгорания бора почти в два раза больше, чем у алюминия, это привлекает к бору пристальное внимание [10–14]. В работе [15] проведены измерения теплоты взрыва, энергии подводного взрыва и работоспособности ВВ на основе гексогена, содержащих В, и показано, что добавление порошка

В к гексогену улучшает эти характеристики. Значительное увеличение теплоты взрыва ВВ при добавлении порошка бора получено в работе [16]. Температура плавления и температура кипения В выше, чем у АІ. Кроме того, на ранней стадии горения бора образуется жидкий оксид В₂О₃, и это затрудняет реакцию окисления на границе раздела твердой и жидкой фаз, что приводит к плохим условиям воспламенения и сгорания В, и в результате получить полностью высокую теплоту сгорания трудно [17–20]. Поэтому повышение полноты сгорания ВВ, содержащего В, и улучшение характеристик энерговыделения порошка бора в процессе детонации являются актуальными направлениями в изучении металлизированных ВВ.

При добавлении к ВВ смеси порошков В и АІ сгорание порошка АІ способствует сгоранию порошка В. Энергия, выделяемая при окислении порошка АІ, повышает эффективность окисления порошка В и увеличивает общее энерговыделение реакции взрыва ВВ, содержащего В/АІ. Авторы [21] изучали влияние содержания В на энергию подводного взрыва и показали, что с увеличением содержания В

© Li X.-L., Cao W., Song Q.-G., Gao D.-Y., Zheng B.-H., Guo X.-L., Lu Y., Wang X.-A., 2019.

Institute of Chemical Materials China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621900 P. R. China.

Таблица 1

Рецептура взрывчатого вещества

Образец	Октоген	В	Al	НТРВ и остальное	W_{exp} , кг	Q_{exp} , кДж/кг
	% (по массе)					
PF-1	64	—	20	16	2.003	5 838.73
PF-2	64	6	14	16	1.944	6 565.70
PF-3	64	10	10	16	2.123	6 184.91

энергия ударной волны (УВ) уменьшалась, а энергия газового пузыря на начальном этапе увеличивалась, а затем постепенно уменьшалась. Измерение в работе [22] энергии, выделяющейся при подводном взрыве ВВ, содержащих либо В/Al, либо только Al, показали, что общая энергия увеличивается при добавлении смеси В/Al.

В данной работе исследован взрыв в воздухе крупномасштабных образцов ВВ на основе октогена, содержащих В/Al, и измерено избыточное давление УВ на разном расстоянии от зарядов.

Процесс горения и выделения энергии металлических порошков во время роста огненного шара при взрыве ВВ, содержащих В/Al, фиксировался высокоскоростной видеокамерой. Для моделирования взрыва в воздухе использовалась программа расчета методом конечных элементов LS-DYNA, получены характеристики энерговыделения при взрыве этих ВВ. Результаты измерений, расчетов и моделирования были проанализированы, и показана потенциальная прикладная ценность ВВ, содержащих В/Al.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Использовались следующие материалы. Октоген: содержание 99.9 %, средний размер частиц 6.7 мкм. Порошок Al: чистый реактив, содержание 99 %, размер частиц 1 ÷ 5 мкм. Порошок В: чистый реактив, содержание 99.9 %, размер частиц 1 ÷ 5 мкм. НТРВ (полибутадиеи с концевыми гидроксильными группами): средняя молекулярная масса 2 000, гидроксильное число 0.76 ммоль/г.

После предварительных испытаний разработаны три композиции ВВ, содержащие механическую смесь В/Al, которые представлены в табл. 1. Взрывчатые суспензии приготовля-

ли путем дозирования, пластификации и замешивания. Заряд получали путем вибровакuumной заливки суспензии в металлическую форму размером $\varnothing 100 \times 105$ мм, выдерживания в ней в течение 120 ч при температуре 50 °С и охлаждения образца до комнатной температуры. Плотность образца определяли гидрометодом.

Образцы микронного металлического порошка исследовали на сканирующем электронном микроскопе Apollo300 фирмы «UK Camscan Electron Optics», увеличение составляло 500 ÷ 20 000 К.

В соответствии с военным стандартом GJB 772A-97 601.1 были измерены механическая чувствительность и вероятность взрыва от удара, а по стандарту GJB 772A-97 602.1 — вероятность взрыва от трения [23] ВВ, содержащих В/Al.

Образец размером $\varnothing 100 \times 105$ мм располагался на подставке. Центр заряда на высоте 1.5 м был определен как центр детонации. В качестве датчиков избыточного давления выбраны датчики РСВ 137В23В. Их помещали по двум лучам, расположенным под углом 45° друг к другу, на той же высоте, что и центр детонации. Расстояние между датчиками и центром детонации составляло 3, 4, 5 и 6 м. Отметим, что центр инициирования детонации находится на верхней поверхности заряда, в то время как центр детонации расположен в геометрическом центре заряда. Перед испытанием датчики были откалиброваны по результатам двух воздушных взрывов тротила. Теоретическое значение избыточного давления на разных расстояниях рассчитано по приведенному ниже уравнению (2). Форма и эволюция огненного шара в процессе взрыва регистрировались высокоскоростной камерой Fastcam SA-X2. Заряд и положение датчиков избыточного давления показаны на рис. 1.

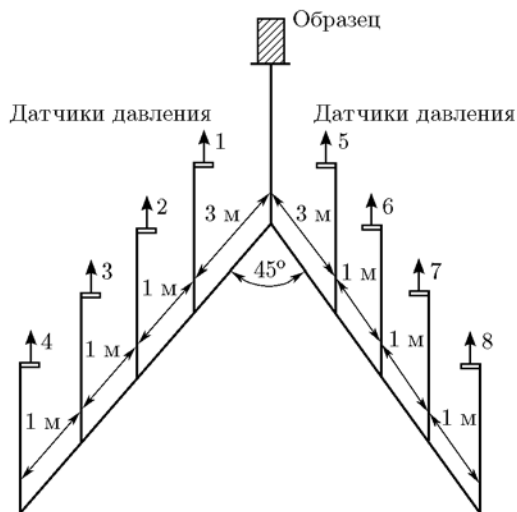


Рис. 1. Схема расположения датчиков при взрыве в воздухе

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Внешний вид порошка В/Al

SEM-изображения микроструктуры порошков Al, В и В/Al представлены на рис. 2. Видно, что порошок Al состоит из сферических частиц размером 1 ÷ 5 мкм, часть из них образует скопления. Структура порошка В представляет собой аморфные кристаллические пластинки размером 1 ÷ 5 мкм.

В составном порошке В/Al на поверхности агломерированных частиц Al диаметром 20 мкм имеется много небольших аморфных чешуек В.

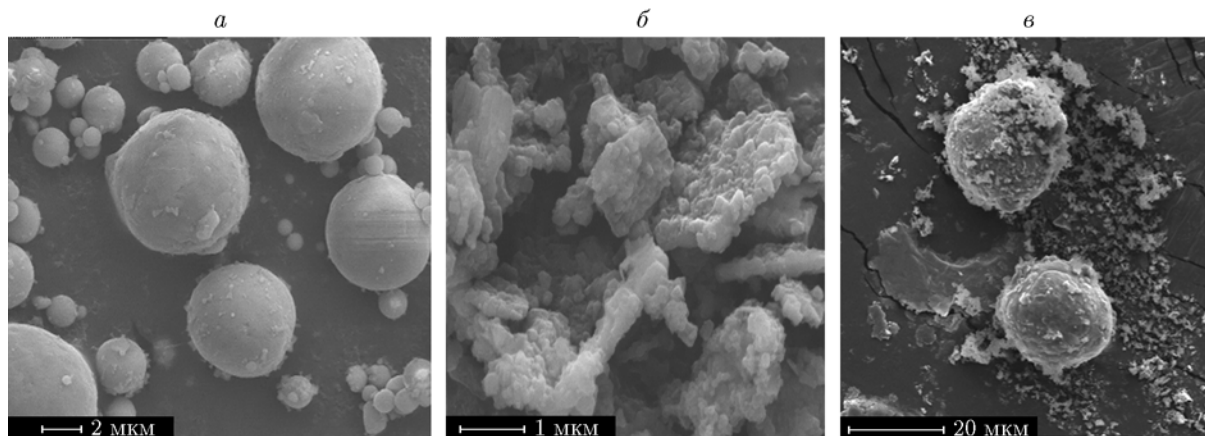


Рис. 2. SEM-изображения порошка Al (а), порошка В (б) и композиции В/Al (в)

Таблица 2
Механическая чувствительность ВВ, содержащих В/Al

Образец	<i>I</i> , %	<i>F</i> , %
PF-1	4	10
PF-2	12	20
PF-3	24	32

Примечание. *I* — чувствительность к удару, *F* — к трению, определенные методом вероятности взрыва.

2.2. Механическая чувствительность

Результаты испытаний механической чувствительности трех ВВ, содержащих В/Al, представлены в табл. 2. Как следует из этих результатов, чем больше добавка В, тем больше вероятность взрыва. Возможная причина состоит в том, что на поверхности частиц порошка В/Al есть много выступов и впадин, которые могут быть концентраторами напряжений при воздействии внешней механической нагрузки. В результате в этих местах образуются горячие точки, что приводит к воспламенению активной составляющей, и чувствительность к удару и трению, очевидно, увеличивается.

2.3. Избыточное давление в ударной волне

После детонации ВВ, содержащего В/Al, в воздухе продукты детонации с чрезвычайно высоким давлением быстро расширяются в атмосферу, сжимают окружающий воздух, и

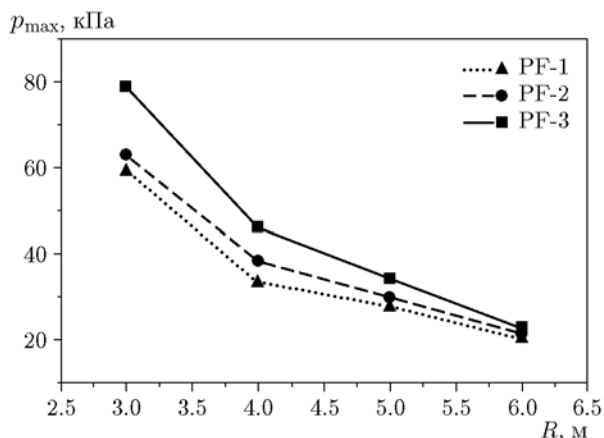


Рис. 3. Зависимости пикового избыточного давления от расстояния для образцов разного состава

затем формируется УВ. Из-за догорания смеси порошков В/АI избыточное давление может поддерживаться длительное время после достижения пикового давления. Кривые затухания избыточного давления при взрыве различных образцов показаны на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что на расстоянии 3 ÷ 6 м от центра детонации избыточное давление от зарядов PF-2 и PF-3 выше, чем от PF-1. Это означает, что ВВ, содержащее В/АI, при воздушном взрыве высвобождает больше энергии, чем ВВ с добавлением только АI. Причина заключается в том, что высокая температура сгорания АI может приводить к быстрой реакции порошка В, в результате которой высвобождается больше энергии, и, как следствие, возрастает избыточное давление. Избыточное давление заряда PF-3 является самым высоким: 78.72 кПа на расстоянии 3 м от центра детонации, что на 15.84 и 19.69 кПа выше, чем у PF-2 и PF-1 соответственно; 45.78 кПа на удалении 4 м, что на 7.73 и 12.73 кПа выше, чем у PF-2 и PF-1 соответственно; 34.13 кПа на расстоянии 5 м, что на 4.44 и 6.44 кПа выше, чем у PF-2 и PF-1. Избыточные давления в УВ от трех образцов на расстоянии 6 м примерно равны. С ростом содержания порошка В увеличивается количество высвобождаемой энергии.

Экспериментальные результаты [24] показали, что пиковое значение избыточного давления УВ можно описать уравнением

$$p_{\max} = \frac{a}{\bar{R}} + \frac{b}{\bar{R}^2} + \frac{c}{\bar{R}^3} \quad (1 < \bar{R} < 10 \div 15), \quad (1)$$

где p_{\max} — пиковое избыточное давление,

МПа; a, b, c — константы; \bar{R} — приведенное расстояние, м/кг^{1/3}; $\bar{R} = R/\sqrt[3]{W}$, R — расстояние от центра заряда; W — масса ВВ в тротиловом эквиваленте, кг. Значение W можно рассчитать по уравнению $W = W_{\text{exp}}Q_{\text{exp}}/Q_{\text{ТНТ}}$, где W_{exp} — масса ВВ, кг; Q_{exp} — измеренное значение теплоты детонации, кДж/кг; $Q_{\text{ТНТ}}$ — теплота детонации тротила, 4070 кДж/кг. Параметры W_{exp} и Q_{exp} представлены в табл. 1. Существует много уравнений для избыточного давления УВ p_{\max} при воздушном взрыве, мы воспользуемся уравнением из работы [25]:

$$p_{\max} = \frac{0.0649}{\bar{R}} + \frac{0.3973}{\bar{R}^2} + \frac{0.3226}{\bar{R}^3} \quad (1 \leq \bar{R} \leq 10). \quad (2)$$

Результаты расчетов по эмпирическому уравнению (2) в сопоставлении с экспериментальными данными приведены на рис. 4. Видно, что измеренные пиковые избыточные давления при взрыве в воздухе трех ВВ, содержащих В/АI, близки к полученным по эмпирическому уравнению (2) без каких-либо ограничений. Расчетные значения по уравнению (2) выше, чем измеренные на расстоянии 3 и 4 м, и ниже, чем измеренные на расстоянии 5 и 6 м. На расстоянии 4 м максимальное различие между результатами расчетов и измерений достигнуто при взрыве заряда PF-1, но оно не превышает 3.5 кПа.

Для моделирования распространения УВ при воздушном взрыве ВВ, содержащего В/АI,

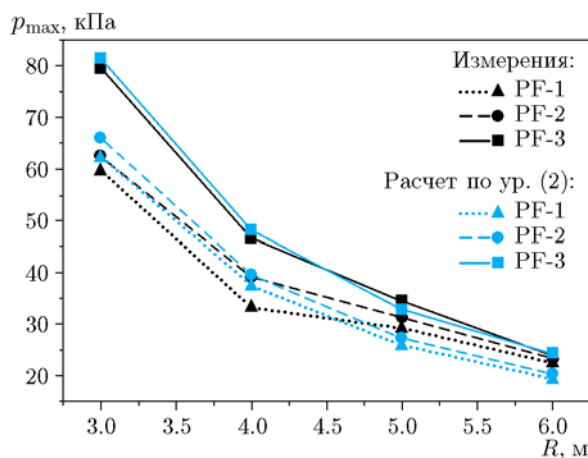


Рис. 4. Зависимости измеренных и рассчитанных по уравнению (2) значений избыточного давления УВ от расстояния для образцов разного состава

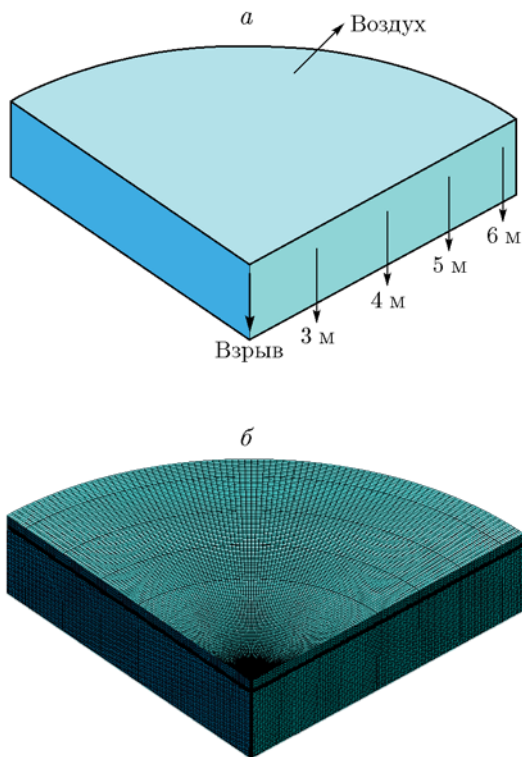


Рис. 5. Расчетная модель воздушного взрыва:
а — геометрия, б — сетка

использовалась программа расчета методом конечных элементов LS-DYNA. Условия модели соответствовали условиям эксперимента. Заряд представляет собой цилиндр размером $\varnothing 100 \times 105$ мм, воздушная зона — это цилиндр радиусом 6.5 м. Исходя из симметрии воздушного взрыва берется четверть модели воздуха и заряда. Расчетная модель воздушного взрыва показана на рис. 5, заряд находится в центре воздушной зоны.

В воздушной зоне точки измерения находятся на расстоянии 3, 4, 5 и 6 м от центра взрыва. При моделировании заряда и воздуха использовалась эйлерова сетка, для расчета — лагранжево-эйлеров алгоритм. Для ВВ использовались модель высокоэнергетического материала *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN и уравнение состояния *EOS_JWL. К границе воздушной зоны применялось условие свободного истечения. Параметры модели высокоэнергетического материала приведены в табл. 3, параметры уравнения JWЛ — в табл. 4. Плотность ВВ измерена гидрометодом (абсолютная погрешность ± 0.001 г/см⁻³), скорость и давление детонации — мето-

Таблица 3
Детонационные свойства ВВ, содержащих В/АI

Образец	ρ_s , г/см ³	D , км/с	p , ГПа
PF-1	1.693	7.833	23.69
PF-2	1.693	7.959	23.61
PF-3	1.694	8.018	23.89

Таблица 4
Параметры уравнения JWЛ

Образец	A , ГПа	B , ГПа	R_1	R_2	ω	E_0 , кДж/см
PF-1	334.77	9.5009	6.71	1.26	0.21	9.396
PF-2	361.55	27.4200	4.81	1.89	0.32	10.674
PF-3	709.60	20.2740	5.37	1.90	0.34	12.438

дом пружинных электрических щупов (относительная погрешность ± 2.5 %) и методом свинцовых отверстий (относительная погрешность ± 5.1 %) соответственно [26]. Модель материала *MAT_NULL и уравнение состояния *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL применяются к модели воздуха [27, 28] в форме $p = (\gamma - 1)\rho E/\rho_0$, где ρ — текущая плотность воздуха, γ — показатель адиабаты, начальная плотность воздуха равна $\rho_0 = 1.29 \cdot 10^{-3}$ г/см³, начальная удельная энергия $E = 0.25$ МПа.

Точка детонации находится сверху по центру заряда, после инициирования ВВ образуются продукты детонации с высокими температурой и давлением. Поскольку давление продуктов детонации намного выше давления воздуха, продукты детонации быстро распространяются и резко сжимают окружающий воздух, что приводит к формированию УВ. На рис. 6 показано распространение УВ от образца PF-3, полученное в различные моменты времени в соответствии с расчетной моделью. Аналогично проведено моделирование для трех ВВ, содержащих порошок В/АI. Сравнение измеренных в четырех точках и полученных по модели значений избыточного давления иллюстрирует рис. 7. В основном эти значения согласуются между собой, однако для дальних расстояний, таких как 5 и 6 м, измеренные значения проходят выше, чем значения моделирования. На расстоянии 5 м отклонение между моделированием и измерением для образца PF-2 составляет максимум 4.9 кПа. Причина заключается в том, что только часть порошка АI ре-

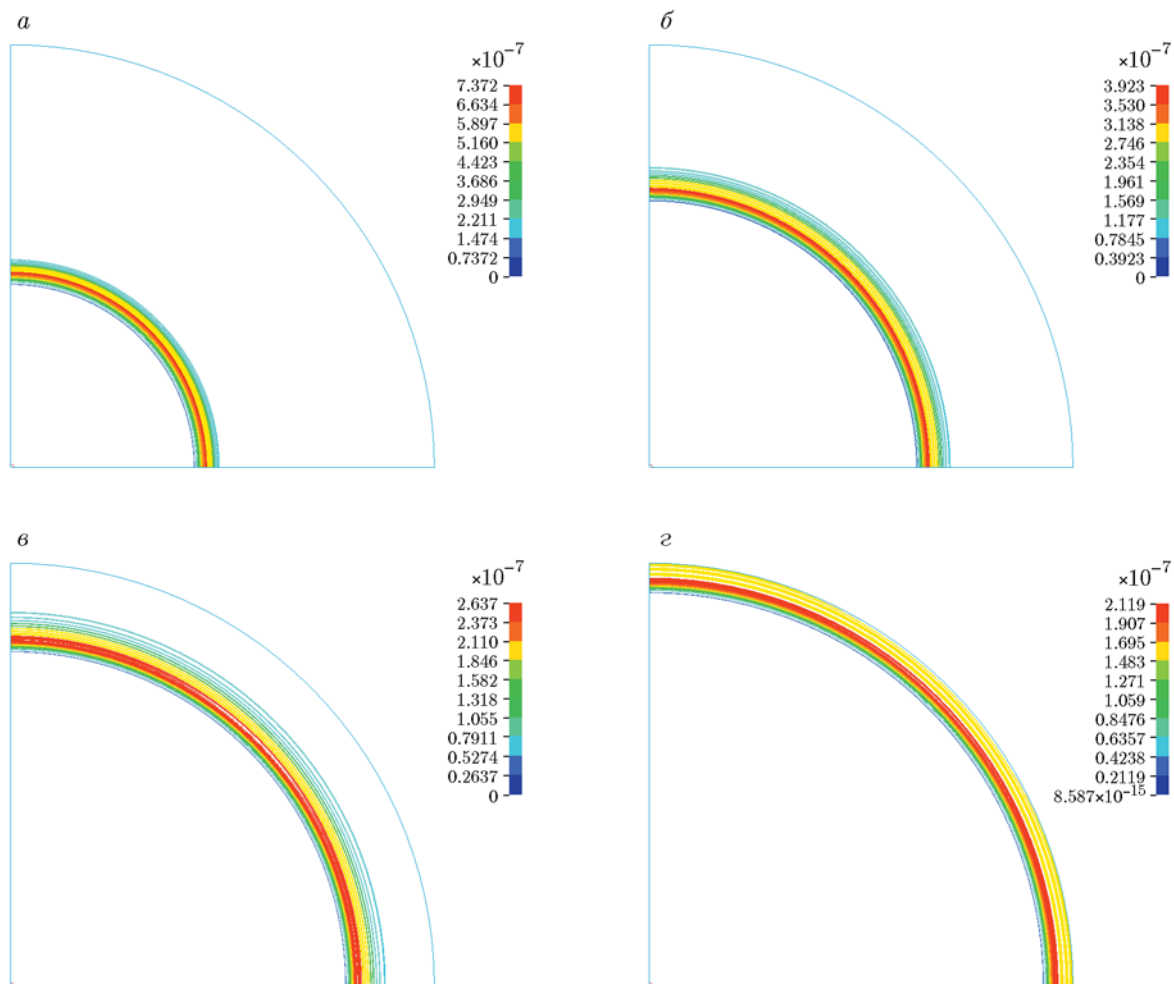


Рис. 6. Поле избыточного давления УВ при взрыве в воздухе образца PF-3 в моменты времени 5 мс (а), 10 мс (б), 15 мс (в) и 20 мс (г)

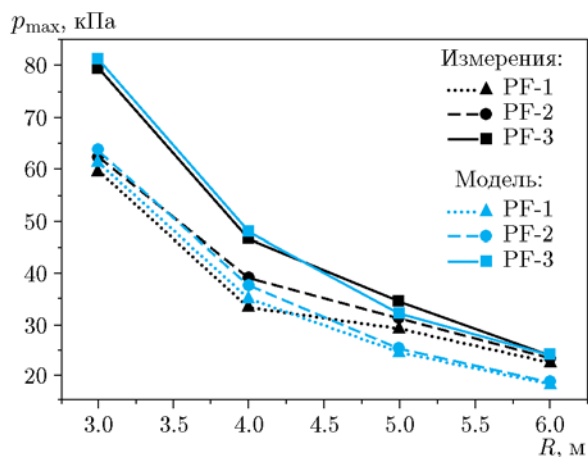


Рис. 7. Сравнение измеренных и расчетных значений избыточного давления начальной УВ

гирует на начальной стадии после взрыва ВВ, что несколько способствует избыточному давлению, в то время как порошок В реагирует после того, как УВ распространяется на определенное расстояние и усиливает горение вместе с алюминием и, соответственно, усиливает давление УВ. Поэтому измеренные на дальних расстояниях значения избыточного давления выше, чем полученные при моделировании.

2.4. Горение и энерговыделение

Форма и рост огненного шара в процессе взрыва ВВ, содержащих В/Al, регистрировались высокоскоростными камерами. На рис. 8 приведены изображения взрыва трех исследуемых видов ВВ в разные моменты.

Образец ВВ взрывается за очень короткое время, после чего образуется огненный шар.

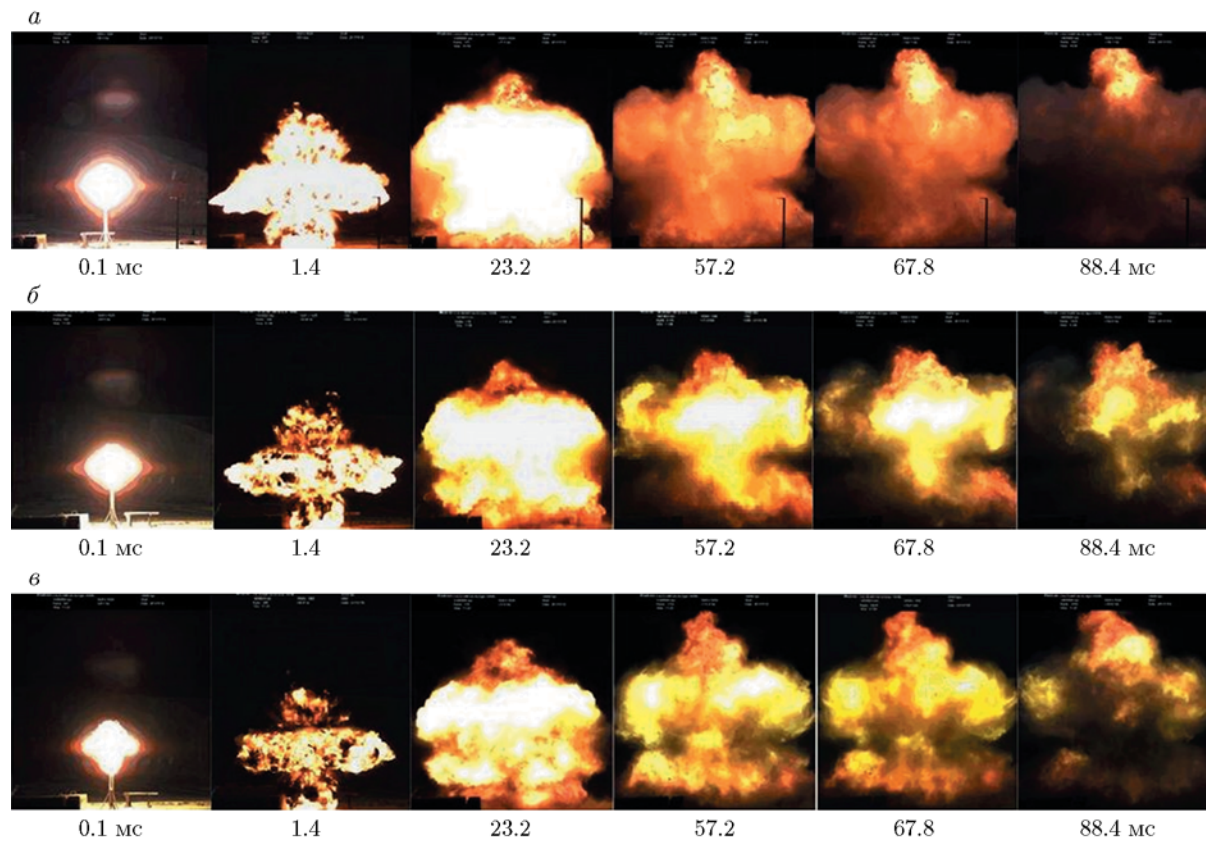


Рис. 8. Кадры высокоскоростной съемки взрыва в воздухе образцов PF-1 (а), PF-2 (б), PF-3 (в)

Начиная с 0.1 мс размер огненного шара постепенно увеличивается. Порошок Al с большей вероятностью реагирует с продуктами детонации октогена и кислородом в воздухе, чем порошок В. Интенсивность реакции у PF-1 самая высокая, но тепловыделение в результате экзотермической реакции не является самым большим. Горящее пламя порошка Al желтое, а горящее пламя порошка В сине-зеленое.

При взрыве образцов PF-2 и PF-3 по истечении 23.2 мс наблюдается слабое сине-зеленое пламя вокруг взрывного огненного шара. Это связано с тем, что небольшое количество порошка В в образце начинает реагировать. Затем сине-зеленое пламя распространяется от края по всей поверхности огненного шара, вокруг огненного шара оно становится более ярко выраженным, что указывает на то, что порошок В горит интенсивнее в сравнении с порошком Al. Примерно через 88.4 мс реакция экзотермического горения PF-1 заканчивается и желтое пламя начинает исчезать. В то же время ВВ, содержащие В/Al, все еще горят и все еще существуют большие сине-зеленые об-

ласти свечения. В частности, для PF-3 сине-зеленое пламя, образующееся при сгорании порошка В, по-прежнему влияет на поверхность всего огненного шара. Это указывает на то, что на более поздней стадии реакция Al в порошке В/Al практически завершена, тогда как В все еще продолжает участвовать в реакции. Как результат, время реакции соединения В/Al больше, чем у порошка Al. Более того, время реакции увеличивается с ростом содержания В. Сгорание порошка В высвобождает много энергии, продлевая высокотемпературную реакцию догорания продуктов детонации с участием воздуха, что в конечном итоге повышает работоспособность и поражающее действие.

ВЫВОДЫ

На поверхности порошка В/Al имеются некоторые выступы и впадины. Под действием внешней механической нагрузки в ВВ на основе октогена, содержащих В/Al, легче образуются концентраторы напряжений, что приводит к увеличению чувствительности к удару и

трению. Поэтому необходимо учитывать противоречие между безопасностью и энерговыделением.

Давление в воздушной УВ при взрыве в воздухе ВВ, содержащих В/Al, выше, чем в ВВ, содержащем только Al. Это показывает, что горение порошка В протекает интенсивнее, и в результате большая энергия выделяется и при сгорании порошка Al. Результаты исследований эмпирических зависимостей и численного моделирования показывают, что результаты измерения избыточного давления являются достоверными и точными и согласуются с законом затухающей УВ. Различия между расчетными и измеренными значениями избыточного давления УВ не превышают 3.5 кПа, а между смоделированными и измеренными значениями — не более 4.9 кПа. Избыточные давления, измеренные на большом расстоянии, например 5 и 6 м, выше расчетных значений, полученных по эмпирической формуле и в результате численного моделирования.

Высокоскоростная съемка показала, что во время роста огненного шара горящее пламя порошка Al желтое, а горящее пламя порошка В сине-зеленое. Примерно через 88.4 мс экзотермическая реакция горения PF-1 имеет тенденцию заканчиваться и желтое пламя начинает исчезать. В то же время ВВ, содержащие В/Al, все еще горят и наблюдаются еще более крупные сине-зеленые области свечения. Сгорание порошка В высвобождает на этой стадии много энергии. Поэтому с ростом концентрации порошка В/Al время горения увеличивается и усиливаются работоспособность и поражающее действие.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (гранты № 11572359, 11502249, 11602238, 11702265).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yen N. H., Wang L. Y.** Reactive metals in explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2012. — V. 37, N 2. — P. 143–155.
2. **Mačević A., Semple J. M. K.** Combustion of boron particles at atmospheric pressure // *Combust. Sci. Technol.* — 1969. — V. 4, N 3. — P. 181–191.
3. **Fischer S. H., Grubelich M. C.** Explosive dispersal and ignition of combustible metals and thermite formulations // *46th Annu. Bomb and Warhead Tech. Symp.* — 1996. — P. 1–13.
4. **Liang D., Liu J., Li H., Zhou Y., Zhou J.** Improving effect of boron carbide on the combustion and thermal oxidation characteristics of amorphous boron // *J. Therm. Anal. Calorim.* — 2017. — V. 128, N 3. — P. 1771–1782.
5. **Liang D., Liu J., Xiao J., Xi J., Wang Y., Zhou J.** Effect of metal additives on the composition and combustion characteristics of primary combustion products of B-based propellants // *J. Therm. Anal. Calorim.* — 2015. — V. 122, N 1. — P. 497–508.
6. **Yetter R., Rabitz H., Dryer F., Brown R., Kolb C.** Kinetics of high-temperature B/O/H/C chemistry // *Combust. Flame.* — 1991. — V. 83, N 1-2. — P. 43–62.
7. **Cook M. A., Filler A. S., Keyes R. T., Partridge W. S., Urnsbach W.** Aluminized explosives // *J. Phys. Chem.* — 1957. — V. 61, N 2. — P. 189–196.
8. **Pastine D., Cowperthwaite M., Solomon J., Enig J.** A model of nonideal detonation in aluminized explosives // *Proc. 11th Int. Detonation Symp.* — 1998. — P. 204–213.
9. **Flower P. Q., Steward P. A.** Improving the efficiency of metallized explosives // *2006 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium.* — 2006. — P. 1–11.
10. **King M. K.** Boron particle ignition in hot gas streams // *Combust. Sci. Technol.* — 1973. — V. 8, N 5-6. — P. 255–273.
11. **Ао В., Чжоу Цз.-Х., Лю Цз.-Ч., Ян В.-Цз., Ван Ю., Ли Х.-Р.** Кинетическая модель воспламенения частицы бора, основанная на механизме диффузии кислорода и $(BO)_n$ // *Физика горения и взрыва.* — 2014. — Т. 50, № 3. — С. 21–31.
12. **Schaefer R. A., Nicolich S.** Development and evaluation of new high blast explosives // *36th Int. Annu. Conf. ICT.* — 2005.
13. **Baker E., Capellos C., Stiel L.** Generalized thermodynamic equation of state for reacting aluminized explosives // *Proc. 13th Int. Detonation Symp.* — 2006. — P. 1161–1170.
14. **Hussmann B., Pfitzner M.** Extended combustion model for single boron particles — Part II: Validation // *Combust. Flame.* — 2010. — V. 157, N 4. — P. 822–833.
15. **Huang Y., Wang X., Feng X.** Detonation heat of boron-contained explosive based on RDX // *Chin. J. Energ. Mater.* — 2011. — V. 19, N 4. — P. 363–365. [in Chinese]
16. **Makhov M.** Explosion heat of boron-containing explosive compositions // *36th Int. Annu. Conf. ICT.* — 2004. — P. 55.1.
17. **Сюй С., Чень Ю., Чень С., Ву Д., Лю Д.-Б.** Теплота сгорания порошка Al/B и эффективность его применения в металлизированных взрывчатых веществах при подводном взрыве // *Физика горения и взрыва.* — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 97–104.

18. **Zhou W., Yetter R., Dryer F., Rabitz H., Brown R., Kolb C.** Multi-phase model for ignition and combustion of boron particles // Combust. Flame. — 1999. — V. 117, N 1-2. — P. 227–243.
19. **Лю Цз.-Чж., Лян Д.-Л., Сяо Цз.-У, Чэнь Б.-Х., Чжан Я. В., Чжоу Цз.-Х., Цэнь К.-Ф.** Состав и характеристики первичных продуктов горения топлив на основе бора // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 1. — С. 64–74.
20. **Liu P., Liu L., He G.** Effect of solid oxidizers on the thermal oxidation and combustion performance of amorphous boron // J. Therm. Anal. Calorim. — 2016. — V. 124, N 3. — P. 1587–1593.
21. **Chen Y., Chen X., Jiang W., Wu D., Liu D., Xu S., Pan F.** Influence of boron content on underwater explosion energy of aluminized explosive // Explos. Mater. — 2015. — V. 44, N 1-4. [in Chinese]
22. **Feng X., Zhao S., Diao X., Dai Z.** Experimental research of underwater energy of explosive containing boron/metal // Chin. J. Explos. Propell. — 2009. — V. 32, N 5. — P. 21–24. [in Chinese]
23. **GJB772A-1997.** Explosive Test Methods. Beijing, China, Commission of Science, Technology and Industry for National Defense of the PRC. — 1997. [in Chinese].
24. **Садовский М. А.** Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований // Физика взрыва. — М.: Изд-во АН СССР, 1952. — С. 20–110.
25. **Henrych J., Major R.** The Dynamics of Explosion and Its Use. — N. Y.: Elsevier Scient. Publ. Co., 1979.
26. **Li X., Liu Q., Song Q., Gao D., Zheng B., Cao W., Xiao C., Tan K.** Detonation property measurement of explosive containing B/Al by spring electric pin method // Chin. J. Explos. Propell. — 2017. — V. 40, N 6. — P. 59–65. [in Chinese].
27. **Tanaka K.** Detonation properties of high explosives calculated by revised Kihara — Hikita equation of state // Proc. 8th Symp. (Int.) on Detonation. — 1985. — P. 548–557.
28. **Mader C. L.** Numerical Modeling of Detonations. — Berkeley, C. A.: Univ. of California Press, 1979.

Поступила в редакцию 15.09.2018.

После доработки 04.03.2019.

Принята к публикации 29.05.2019.
