

УДК 534.222.2

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ И СОСТАВА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА ДОЖИГАНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВА АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА

W. Xiao¹, K. Chen¹, M.-F. Yang¹, X.-W. Hong², H.-W. Li¹, B.-L. Wang¹

¹Школа химического машиностроения, Нанкинский научно-технологический университет, Нанкин 210094
КНР, boliangwang@163.com, iridescent_bubbles@163.com

²Школа машиностроения, Нанкинский научно-технологический университет, Нанкин 210094, КНР

Приведены результаты исследования взрывов алюминизированных взрывчатых веществ (ВВ) на основе октогена в ограниченной сферической камере. Изучалось влияние размера частиц алюминия и окружающей газовой среды на дожигание, а также на взрывные характеристики ВВ. Результаты показали, что концентрации кислорода в воздухе недостаточно для полного сгорания частиц алюминия. По оценкам степень окисления частиц алюминия составляет $87 \div 93$ % и имеет тенденцию к снижению при увеличении размера частиц. Часть частиц алюминия окисляется вместе с продуктами детонации, и реакция может длиться сотни микросекунд. Однако степень окисления крупных частиц алюминия продуктами детонации невелика. Для оценки начальной энергии детонации применяется новый метод, основанный на определении разницы во времени между началом свечения и приходом волны давления. Этот метод позволил сделать вывод, что некоторые частицы алюминия окисляются во время детонации и обеспечивают дополнительную энергию для первичной взрывной волны. Мелкие частицы алюминия микронного размера в диапазоне $48.9 \text{ нм} \div 46.7 \text{ мкм}$ увеличивают длительность существования огненного шара.

Ключевые слова: алюминизированное взрывчатое вещество, дожигание, ограниченный взрыв, частица алюминия.

DOI 10.15372/FGV20210211

ВВЕДЕНИЕ

Повреждение мишени, вызванное алюминизированным взрывчатым веществом (ВВ), зависит от давления и теплового эффекта взрыва. Начальная энергия в основном определяется реакцией детонации, а последующие высокие давление и температура определяются дополнительной энергией, генерируемой в процессе дожигания частиц алюминия [1–3]. Размер частиц алюминия влияет на реакции дожигания. Поэтому для повышения эффективности выделения энергии алюминизированным ВВ важно оптимизировать размер частиц алюминия.

В настоящее время проводится много исследований реакций дожигания алюминизированных ВВ [4]. Предыдущие исследования [5]

показали, что частицы алюминия начинают реагировать примерно через $5 \div 100$ мкс после детонации. Это явление может быть связано с существованием плотной оксидной пленки (Al_2O_3) на поверхности частиц. Высокая температура разложения оксидной пленки препятствует сгоранию частиц алюминия. При распространении детонации активированный алюминий расширяется за поверхность Чепмена — Жуге из-за быстро растущей температуры. Вследствие этого окисленная оболочка поверхности разрушается, и частицы алюминия вступают в контакт с кислородом. Однако некоторые исследования [6, 7] показали, что путь, по которому активированный алюминий прорывается через оксидную оболочку, также может быть фазовым переходом Al_2O_3 . В конечном счете выделившийся активный алюминий быстро реагирует с окружающими продуктами детонации и кислородом с образованием Al_2O_3 .

© Xiao W.¹, Chen K.¹, Yang M.-F.¹, Hong X.-W.²,
Li H.-W.¹, Wang B.-L.¹, 2021.

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

²School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, P. R. China.

При исследовании влияния частиц алюминия на взрывчатые свойства ВВ [8] обнаружено, что ранняя реакция алюминия усиливает взрыв первичного ВВ, причем эта реакция примерно наполовину является аэробной и наполовину анаэробной. Однако в диапазоне размеров частиц алюминия $3 \div 40$ мкм влияние размера на взрывчатые свойства ВВ было незначительным. Результаты показали, что кислорода в воздухе было достаточно, чтобы окислить частицы алюминия размером до 10 мкм. В проведенных ранее исследованиях [9] отмечалось, что частицы алюминия излучают свет на поздней стадии взрыва, а интенсивность и длительность свечения зависят от размера частиц. Предполагалось также, что реакция дожигания проходит несколько этапов развития огненного шара.

В [10] сделано предположение, что конвективный эффект области взрыва ослабляет зависимость скорости окисления от размера частиц алюминия. Мелкие частицы реагировали скорее за счет кинетики процесса, а не диффузионного механизма, потому что для таких частиц коэффициент диффузии достаточно велик из-за их малого размера. Поэтому для частиц алюминия всегда было достаточно окислителя, а конечным ограничителем скорости превращения была химическая кинетика [11]. Также обнаружено, что скорость горения частиц алюминия ограничена диффузией частиц в случае, когда их размер превышает 20 мкм [12]. При размере частиц менее 10 мкм скорость горения ограничена динамикой процесса. Исследования [10] показали, что частицы алюминия размером 10 мкм и меньше не сгорали в газофазном диффузионном пламени, тогда как время сгорания наноразмерных частиц существенно зависело от давления и температуры. В [2] обнаружено, что горение мелких частиц алюминия прекращается быстрее. Причиной могло быть то, что частицы алюминия не были выброшены взрывной волной в слой смеси реагентов, даже в пределах зоны взрывной волны. Крупные частицы алюминия с большей вероятностью продвигались в газовую среду с высоким содержанием кислорода, что усиливало процесс дожигания. В [13] сделано предположение, что высокая удельная площадь поверхности алюминия способствовала теплообмену и реакционной способности к окислению частиц алюминия продуктами детонации и воздухом. Кроме того, дополнительное тепло, выделяемое в ре-

акции мелких частиц алюминия с кислородом или продуктами детонации, повышало температуру ВВ и, в свою очередь, давление в камере сгорания. Данные [14] показали, что температура огненного шара, содержащего частицы большого размера, была на 200 К выше, чем температура шара с частицами малого размера. В случае составного слоевого заряда эта разница очень мала.

В настоящее время количество исследований процесса дожигания алюминизированных ВВ на основе октогена ограничено. Качество зарядов в исследованиях взрыва в ограниченном объеме было невысоким, что не способствовало полному выделению энергии алюминизированного ВВ. В данной статье представлены результаты испытаний зарядов ВВ в сферической камере объемом 1.43 м^3 в различных средах. Реакция дожигания изучалась методом измерения длительности излучения света, интенсивности образования Al_2O_3 и продолжительности существования огненного шара. Кроме того, разница во времени между возникновением светового излучения и приходом волны давления положена в основу нового метода оценки начальной энергии взрыва. Избыточное давление и полный импульс были использованы при анализе влияния размера частиц алюминия на характеристики взрыва. Настоящая работа может служить ориентиром при разработке составов алюминизированных ВВ, которые предназначены для усиления эффектов дожигания и разрушения мишени.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В экспериментах исследовались четыре вида алюминизированных ВВ с частицами алюминия разных размеров. Все частицы алюминия были сферическими, их размер и удельная площадь поверхности измерялись с помощью высокоскоростного интеллектуального лазерного анализатора размера частиц. Содержание активного алюминия в частицах определялось методом титрования химического раствора (конверсия Fe^{3+} и Fe^{2+}) [15]. Испытуемые смеси состояли из октогена, частиц алюминия и связующего. Их составы и параметры частиц алюминия представлены в табл. 1. Удивительно, но результаты, приведенные в таблице, показали, что более 30 % алюминиевого порошка (48.9 нм) из новой упаковки было окислено. Это означает, что в данном исследовании следует рассмотреть активность

Таблица 1
Состав алюминизированных ВВ и параметры частиц алюминия

Наименование смеси	Состав, %			Частицы алюминия		
	октоген	Al	связка	средний диаметр	активный алюминий, %	удельная площадь поверхности, м ² /г
ТВХ-А1	59	33	8	48.9 нм	68.3	10.02
ТВХ-А2	59	33	8	5.4 мкм	88.1	1.74
ТВХ-А3	59	33	8	23.8 мкм	97.1	0.31
ТВХ-А4	59	33	8	46.7 мкм	98.5	0.14

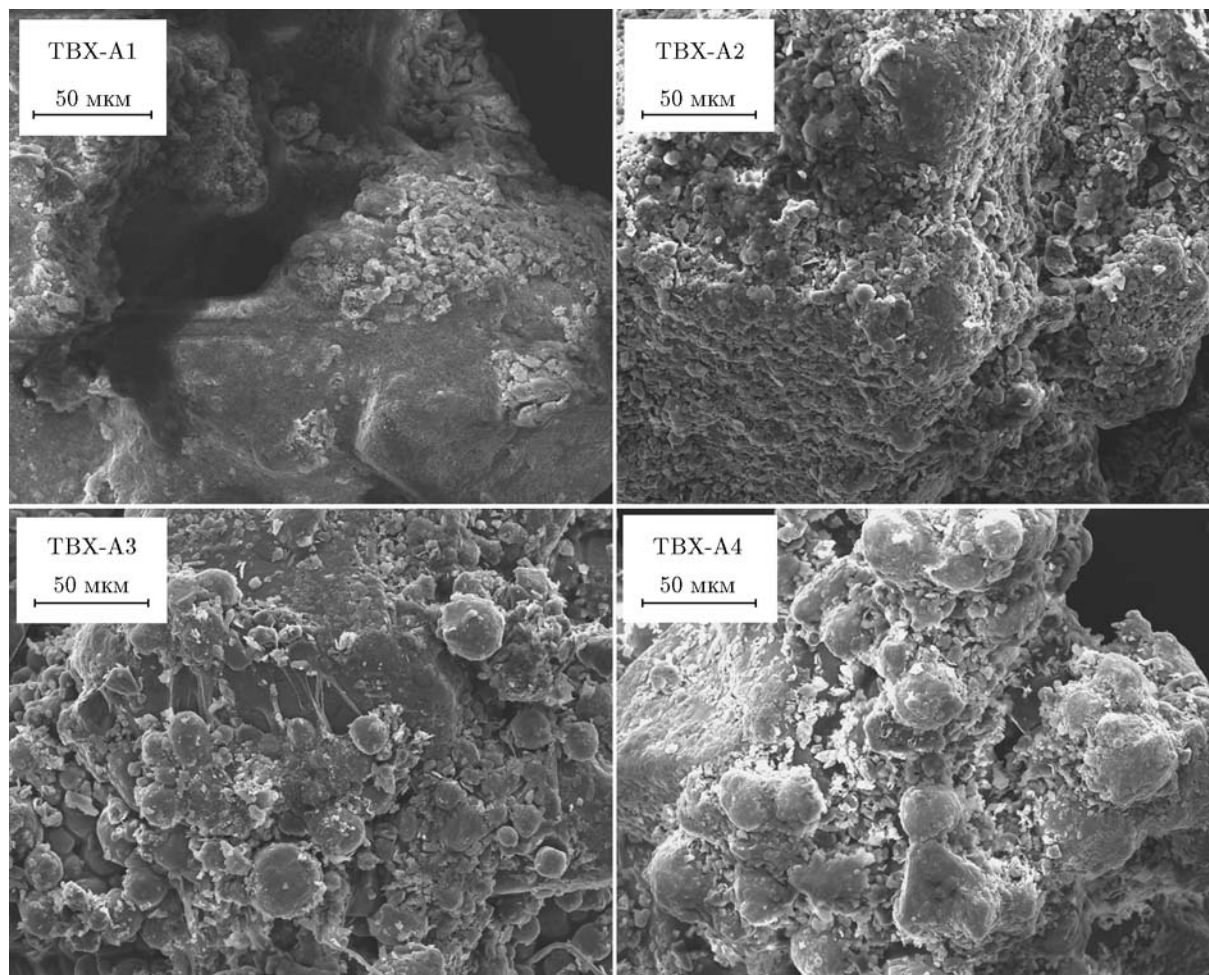


Рис. 1. СЭМ-изображения гранул алюминизированного ВВ

наноалюминия. Как и ожидалось, удельная площадь поверхности частиц увеличивалась с уменьшением их размера. Смеси изготавливались «мокрым методом» [16, 17]. Топографические особенности наблюдались с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). На рис. 1, а показаны СЭМ-изображения гранул алюминизированных ВВ.

Как видно из рис. 1, частицы алюминия прилипли к поверхности частиц октогена с угловой формой. Смеси ТВХ-А1 и ТВХ-А2 имели аккуратную и гладкую поверхность. Поверхность двух других образцов была шероховатой и изрезанной. Следует отметить, что выравнивание частиц алюминия также было проявлением их агломерации. Благодаря влиянию ван-

дер-ваальсовых и кулоновских сил [18], а также наряду с действием связующего, мелкие частицы алюминия легко объединялись. Агломерировались главным образом наноразмерные частицы алюминия, для них это явление более заметно, чем для микронных частиц. Крупные частицы алюминия микронного размера даже под действием связующего трудно было прочно связать с поверхностью частиц октогена. Это особенно заметно для образца ТВХ-А4, который выглядел так, как будто множество частиц алюминия были сложены вместе и опирались на отдельные частицы октогена. Смеси прессовали в форме цилиндрических зарядов массой 100 г, диаметр заряда 40 мм, высота 40 мм. Заряды инициировали с помощью бустера (8 г) и электрического детонатора.

Эксперименты проводились в замкнутой сферической взрывной камере объемом 1.43 м^3 , схема которой показана на рис. 2. Камера изготовлена из стали, снабжена двумя фланцами и имела хорошие уплотнение и теплоизоляцию. На фланцах установлены пуленепробиваемые стекла и некоторые измерительные приборы. Для записи развития огненного шара использовалась высокоскоростная камера с частотой дискретизации 7000 кадр/с. На другом фланце размещали два датчика давления, смонтированные на печатной плате (РСВ-датчики), и один оптоволоконный датчик. Сигналы давления и оптические сигналы во время взрыва записывались прибором сбора данных с частотой дискретизации 1 МГц.

Перед испытанием из камеры удалялся

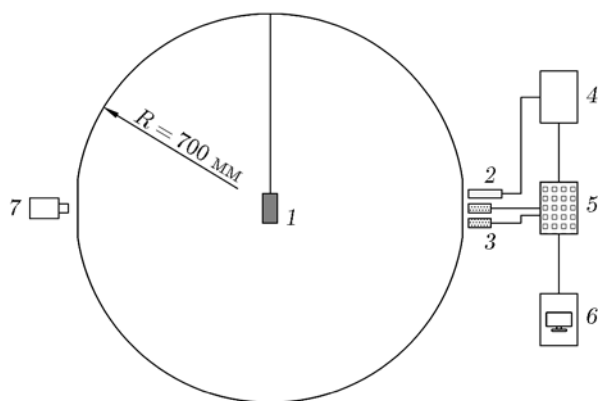


Рис. 2. Схема взрывной камеры (вид сбоку):

1 — заряд ВВ, 2 — оптоволоконный датчик, 3 — РСВ-датчики давления, 4 — фотоэлектрический преобразователь, 5 — прибор сбора данных, 6 — компьютер, 7 — высокоскоростная камера

воздух, затем вводился азот (99.99 %), сухой воздух (содержащий 21 % кислорода) и кислород (50 % кислорода + 50 % сухого воздуха). Давление в камере поддерживалось в соответствии с внешней средой (1 атм). Поскольку тестовая и вакуумная системы не были абсолютно герметичными, максимальное суммарное парциальное давление впускных газов в камере могло достигать только 90 % от атмосферного (90 кПа). Поэтому в камере присутствовало небольшое количество других газов, таких как CO_2 и H_2O . Однако их влияние на взрыв было минимальным. Заряд был подвешен в центре камеры и инициировался электрическим детонатором. С каждым составом проводилось три теста в одинаковых условиях. Принимались меры для избежания помех от окружающего света.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

При взрыве алюминизированного ВВ происходили химические реакции компонентов. Частицы алюминия в основном окислялись до Al_2O_3 [16, 19], который излучал свет в окружающую среду. В предположении непрерывного спектра излучения конденсированной фазы Al_2O_3 [20] была разработана оптико-электрическая система. Во время взрыва оптический сигнал передавался в оптико-электрическую систему через многожильное кварцевое оптоволокно. Затем оптический сигнал был разделен и отфильтрован. Длина волны фильтра установлена равной 700 нм. Оптический сигнал конвертировался в соответствующий сигнал напряжения с помощью фотомножителя и регистрировался прибором сбора данных с частотой дискретизации 1 МГц. Оптико-электрическая система подробно описана в работе [21].

Испаренные частицы алюминия вырываются из разорванной оксидной пленки во время взрыва. Под воздействием кислорода и продуктов детонации в окружающей среде частицы алюминия быстро окислялись до Al_2O_3 . Реакция окисления и основной оксид алюминия показаны на рис. 3. Кроме того, низшие оксиды (Al_2O и т. д.) также были превращены в Al_2O_3 .

Ниже анализируется сигнал напряжения, который соответствует оптическому излучению Al_2O_3 . Профиль сигнала напряжения тесно связан с интенсивностью и продолжительностью горения. Типичные зависимости напряжения U для состава ТВХ-А2 от времени t в

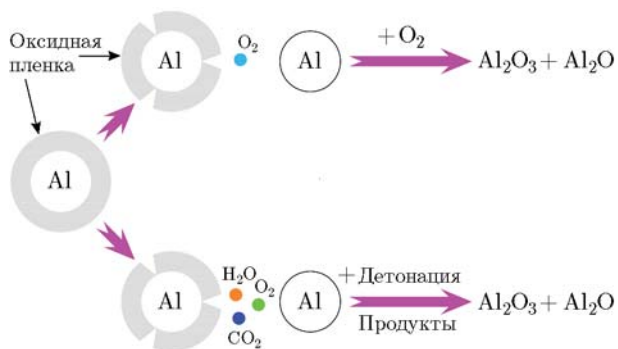


Рис. 3. Реакции горения алюминиевого порошка

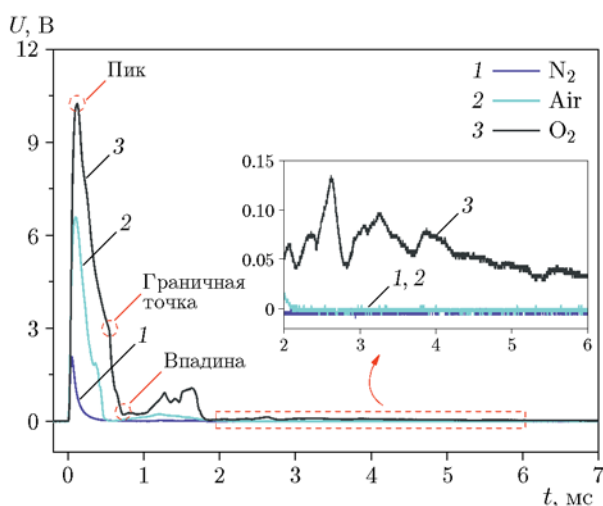


Рис. 4. Типичные профили напряжения при взрыве состава ТВХ-А2 в различных газовых средах

различных газовых средах показаны на рис. 4. Видно, что напряжение быстро возрастало со временем, затем уменьшалось и наконец возвращалось к нулю после небольшого колебания выше базовой линии. В зависимости от окружающего газа, амплитуды пиков и длительности светового излучения для состава ТВХ-А2 значительно различались. Результаты испытаний оказались соответствующими ожидаемым согласно теории реакций дожигания. Поэтому зависимость $U(t)$ была разделена на три стадии, обозначенные I, II и III, с соответствующими пиками и уровнями напряжения. Амплитуды пиков и длительности светового излучения для каждой стадии приведены в табл. 2.

На стадии I напряжение возрастало. Во время взрыва происходило быстрое перемешивание частиц алюминия с продуктами детонации. Кислород из окружающей среды вовле-

кался в область взрыва из-за эффектов турбулентности, однако захваченного кислорода было немного. Рис. 4 и табл. 2 показывают, что при приходе оптического сигнала от Al_2O_3 на датчик напряжение резко возрастает во всех трех газовых средах. Это иллюстрирует тот факт, что частицы алюминия сгорали очень быстро. Более того, интенсивное горение частиц алюминия достигало максимального значения за короткий период времени. Можно также заметить, что пик напряжения был наименьшим для N_2 — только 21 % от значения пика для O_2 . В то же время длительность переднего фронта сигнала в случае N_2 была примерно на 40 % короче, чем в двух других случаях. Это означает, что среда с низким содержанием кислорода ограничивала интенсивное горение частиц алюминия.

На стадии II напряжение снижалось. Частицы алюминия полностью смешивались с кислородом и продуктами детонации при отражении взрывной волны. В течение этого периода частицы алюминия продолжали гореть и в то же время быстро расходовались. После того как большинство частиц алюминия было окислено O_2 , оставшееся небольшое количество начало реагировать с CO_2 и H_2O . Это могло быть причиной возникновения граничной точки на кривых напряжения в случае воздуха и O_2 . В среде N_2 напряжение быстро уменьшалось из-за низкого содержания кислорода и граничная точка на профиле не наблюдалась. Согласно табл. 2 время стадии II удлинялось в опытах по мере увеличения содержания кислорода в камере. Такой характер кривых аналогичен тенденции, отмеченной для стадии I. Стадии I и II были основными периодами, когда частицы алюминия горели, и полное время горения могло достигать сотен микросекунд. При суммировании длительностей этих двух стадий обнаружено, что время горения частиц алюминия в воздухе составляло 92.5 % от времени горения в O_2 . Кроме того, кривая для O_2 показывает, что колебания напряжения были зарегистрированы после стадии II. Это означает, что масса частиц алюминия, которые были окислены в воздухе, составляла менее 92.5 % от полной массы частиц. Ранее также отмечалось, что содержание кислорода в воздухе было недостаточным для полного сгорания частиц алюминия.

Стадия III характеризуется колебаниями амплитуды сигнала. После впадины на кривой

Таблица 2

Пиковое напряжение и длительность светового излучения при взрыве состава ТВХ-А2 в различных газовых средах

Газовая среда	Время, мс				Пик напряжения, В
	стадия I	стадия II	стадия III	полное время	
N ₂	0.049	0.446	0.203	0.698	2.125
Воздух	0.104	0.565	1.413	2.082	6.631
O ₂	0.115	0.608	6.008	6.731	10.281

напряжения продолжались небольшие колебания амплитуды сигнала при взрыве в воздухе и кислороде. По-видимому, малое количество частиц алюминия на краю области взрыва продолжало гореть. Кроме того, существовала вероятность окисления частиц алюминия некоторыми промежуточными соединениями. Эта стадия могла также сопровождаться превращением небольшого количества оксидов алюминия низкого уровня (Al₂O и т. д.) в Al₂O₃. Из табл. 2 видно, что в среде, богатой кислородом, стадия III продолжалась длительное время. Однако энергия, выделяемая в течение этого периода превращения в Al₂O₃, была неэффективной с точки зрения усиления взрыва.

Интенсивное горение может увеличить количество активных частиц алюминия. Амплитуда напряжения отражает интенсивность горения частиц алюминия, а пиковое значение амплитуды соответствует максимуму выделения энергии. С позиций энерговыделения выгодно повышать температуру огненного шара и поддерживать непрерывное прохождение взрывной волны. На рис. 5 показаны пики напряжения в опытах с четырьмя составами в различных газовых средах. По мере увеличения содержания кислорода в камере пик напряжения постепенно увеличивался. Кроме того, амплитуды пиков четырех составов в среде O₂ возросли более чем на 130 % по сравнению с таковыми в воздушной среде. Из гистограммы видно, что пики напряжения в среде O₂ были одинаковыми, за исключением ТВХ-А4. Это означает, что выделение энергии может сразу же достигать максимума при достаточной концентрации кислорода, что практически сводит на нет влияние размера частиц алюминия. Однако в воздушной среде это преимущество более выражено для частиц алюминия размером 23.8 мкм. Амплитуды пиков для ТВХ-А1 и ТВХ-А2 имели более низкие значения, что так-

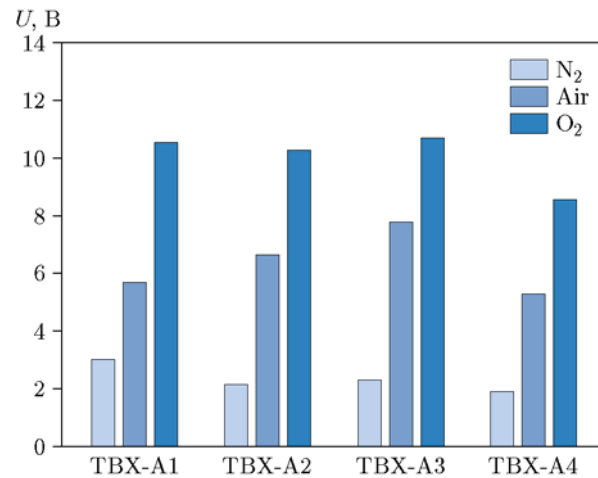


Рис. 5. Амплитуда пиков напряжения в различных газовых средах

же могло быть вызвано меньшим содержанием активного алюминия в этих составах. Кроме того, пиковое напряжение в случае ТВХ-А4 было ниже, чем у других трех составов, что указывает на ограниченное выделение энергии при сгорании крупных частиц алюминия. Это означает, что на условия горения крупных частиц алюминия наложены более жесткие условия, что могло быть связано с их меньшей удельной площадью поверхности.

На рис. 6 показаны длительность излучения света и степень окисления алюминия в различных газовых средах. Поскольку сгорание частиц алюминия в основном происходило в течение стадий I и II, суммарное время этих двух стадий трактовалось как длительность реакции горения. Степень окисления частиц алюминия представляла собой отношение длительностей реакции в воздухе и в кислороде. Из рис. 6 видно, что сигнал оптического излучения Al₂O₃ в среде N₂ длился сотни микросекунд. Даже небольшое количество оставшегося в камере воздуха могло бы объяснить, почему

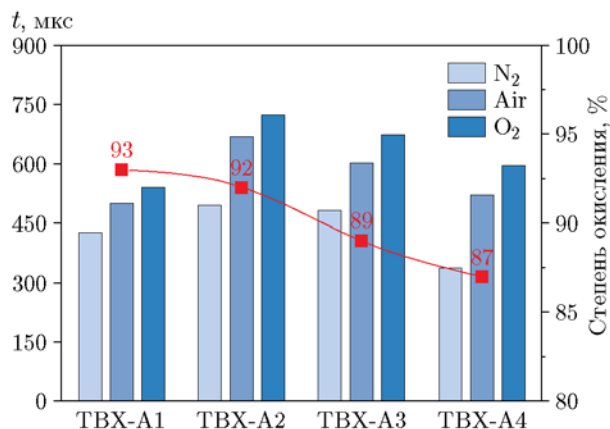


Рис. 6. Степень окисления и длительность светового излучения в различных газовых средах

некоторые частицы алюминия были окислены продуктами детонации с образованием Al_2O_3 . Кроме того, следует учитывать возможность реакции частиц алюминия с азотом. Из сравнения длительностей светового излучения в воздухе и в кислороде, можно заключить, что частицы алюминия всех четырех размеров не были полностью окислены в воздушной среде. Из приведенной на рис. 6 кривой видно, что оцененная степень окисления частиц алюминия составляла $87 \div 93$ %. Кроме того, по мере увеличения размера частиц алюминия степень окисления имела тенденцию к снижению. Это показывает, что крупные частицы алюминия не способствовали реакции дожигания. Причиной такого эффекта могла быть более толстая оксидная пленка на поверхности крупных частиц. Она удлиняла время их нагрева, что приводило к задержке воспламенения и меньшей скорости горения активного алюминия [22]. В совокупности маленькие частицы алюминия (5.4 мкм) создавали более благоприятные условия для реакции дожигания.

Дальнейшее разрушение мишени огненным шаром происходило в форме теплового воздействия алюминизированного ВВ. Поэтому длительность огненного шара является важным параметром для оценки эффективности взрыва. Для измерения длительности использовалась высокоскоростная камера, которая записывала характерные особенности и форму огненного шара. Типичный огненный шар для ТВХ-А2 в воздухе показан на рис. 7. Отличительной его особенностью является наличие светлых и темных областей. Следует отметить, что во время взрыва стекла подверглись

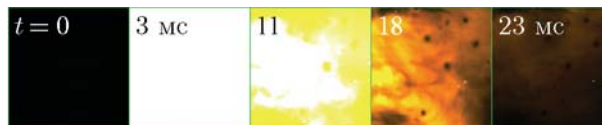


Рис. 7. Характерные особенности и форма огненного шара при взрыве ТВХ-А2 в воздухе

незначительным повреждениям, однако влиянием этих пятен на изображение можно пренебречь. При детонации октогена и интенсивном горении частиц алюминия огненные шары в видимой области спектра регистрировались как ярко-белые области. Затем по мере расхождения частиц алюминия интенсивность излучения медленно затухала: белый свет в области взрыва постепенно становился желтым, а цвет более темным. В течение этого периода небольшое количество остаточных частиц алюминия все еще окислялось, но влияние этого процесса на увеличение общей энергии излучения было очень слабым. После окончания реакции дожигания огненный шар быстро погасал. По сравнению с излучением света от Al_2O_3 длительность огненного шара была большой и достигала десятков миллисекунд. Это означает, что высокотемпературное состояние огненного шара могло поддерживаться длительное время за счет большого количества энергии, выделяемой в реакции дожигания. Тепловые потери огненного шара из-за теплопроводности были очень медленными и небольшими по отношению к полной энергии.

На рис. 8 представлены длительности огненного шара горения четырех составов в различных газовых средах. Из гистограммы видно, что длительность в среде N_2 была минимальной по сравнению с длительностью в воздухе и кислороде, особенно заметен этот эффект для состава ТВХ-А4, в котором длительность существования шара составляла всего 6 % времени его существования в случае состава ТВХ-А1. Это показывает, что реакция окисления частиц алюминия размером 46.7 мкм сильно зависела от наличия кислорода. Кроме того, степень реакции между крупными частицами алюминия и продуктами детонации была небольшой. Сравнение времен существования огненного шара в воздухе и O_2 показывает, что частицы алюминия не были полностью сожжены в воздушной среде. Для состава ТВХ-А1 длительность шара была самой короткой, что могло быть связано с более высо-

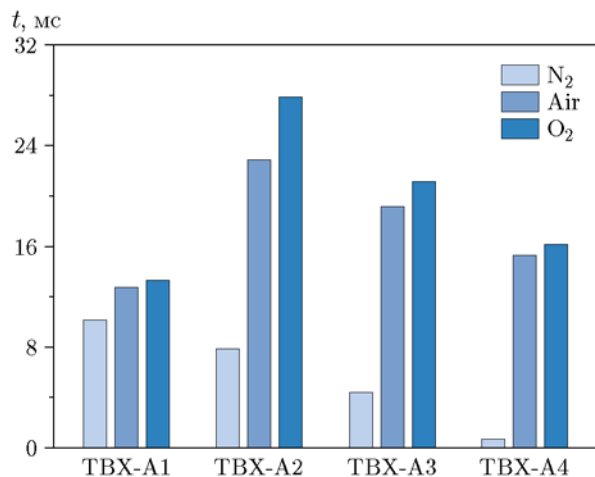


Рис. 8. Длительность существования огненного шара в различных газовых средах

кой скоростью горения наноразмерных частиц алюминия. Кроме того, низкое содержание активного алюминия в этом составе также уменьшало энергию, вносимую в огненный шар сжиганием частиц алюминия. Длительность огненного шара сначала увеличивалась, а затем уменьшалась по мере роста размера частиц. Это означает, что частицы алюминия микронного размера увеличивали длительность существования огненного шара и тем самым продлевали тепловое воздействие и разрушение мишени.

Первичное давление взрывной волны в основном связано с начальной энергией взрыва, т. е. энергией детонации и анаэробного сгорания алюминизированного ВВ. Во время детонации скорость первичной взрывной волны выше, чем у огненного шара, поэтому первичная взрывная волна отделялась от огненного шара. После отделения энергия, высвобождаемая в реакции дожигания, не увеличивала начальную энергию. Хорошо известно, что очень трудно измерить начальную энергию взрыва. В этой статье предпринята попытка использовать разницу во времени между моментом регистрации первоначального излучения и приходом волны давления на датчик в качестве нового метода для описания начальной энергии. В опыте эта разница измерялась с помощью фотомножителя и датчика давления.

При детонации заряда в центре камеры образовалась расширяющаяся взрывная волна. В течение этого процесса частицы алюминия окислялись до Al_2O_3 и излучали свет. В камере

радиусом 700 мм временем прохождения оптического сигнала от центра к оптоволоконному датчику можно пренебречь. По сравнению со светом, время распространения взрывной волны в газовой смеси велико. Поэтому в момент прихода оптического сигнала на оптоволоконный датчик первичная взрывная волна все еще распространялась в камере. Разница во времени между оптическим сигналом и приходом взрывной волны могла бы аппроксимироваться временем распространения первичной взрывной волны по области взрыва. Однако наблюдаемая разница во времени была небольшой и обратно пропорциональной начальной энергии.

Положение датчиков во время теста не менялось. Кроме того, не учитывалось изменение среды в области взрыва. Световые сигналы и сигналы давления для каждого состава в воздухе показаны на рис. 9. Видно, что разница во времени достигала сотен микросекунд. Рис. 10 иллюстрирует разницу во времени в различных газовых средах, которая имеет тенденцию уменьшаться с увеличением содержания кислорода в среде. В данной работе предполагалось, что реакция дожигания запаздывает. Если предположить, что только детонация обеспечивает волну энергией, то разница во времени для каждого состава в различных газовых средах должна быть примерно одинаковой. Однако это не соответствует результатам опытов, приведенным на рис. 10. Результаты указывают на то, что некоторые частицы алюминия окислялись во время детонации и обеспечивали первичную взрывную волну дополнительной энергией. Изменение скорости первичной взрывной волны в среде влияло на разницу во времени. Разница во времени сначала уменьшалась, а затем увеличивалась по мере роста размера частиц алюминия.

Из профилей на рис. 9 видно, что разница во времени для состава TBX-A2 в воздухе была наименьшей (432 мкс), а для TBX-A1 наибольшей (524 мкс). Таким образом, увеличение наблюдаемого времени составляло 121 %. Энергия, согласно закону сохранения, линейно зависит от квадрата скорости. Отсюда можно оценить, что начальная энергия состава TBX-A2 была на 11 % выше, чем у TBX-A1. Достоверность этой оценки требует дальнейшей проверки, поскольку трудно определить количество частиц алюминия, участвующих в реакции окисления во время детонации. Однако из результатов измерения разницы во вре-

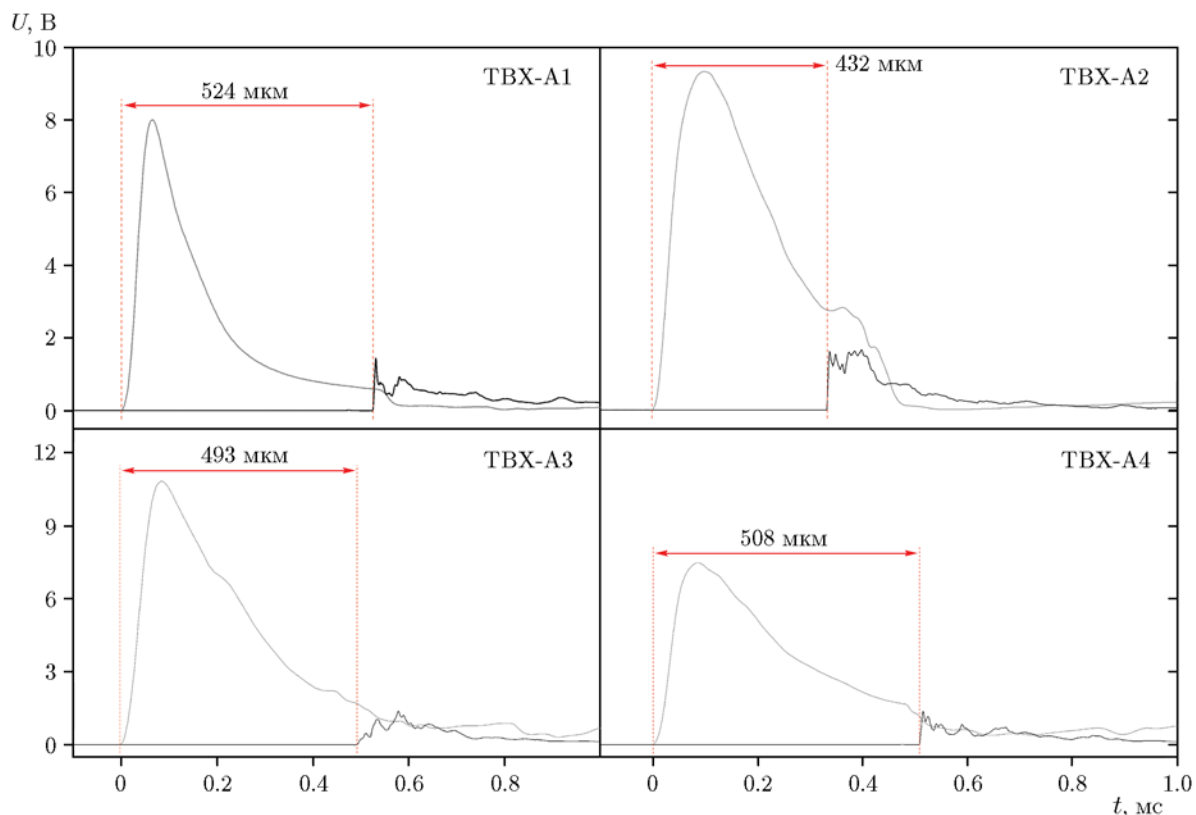


Рис. 9. Световые сигналы и сигналы давления при взрыве исследуемых составов в воздухе

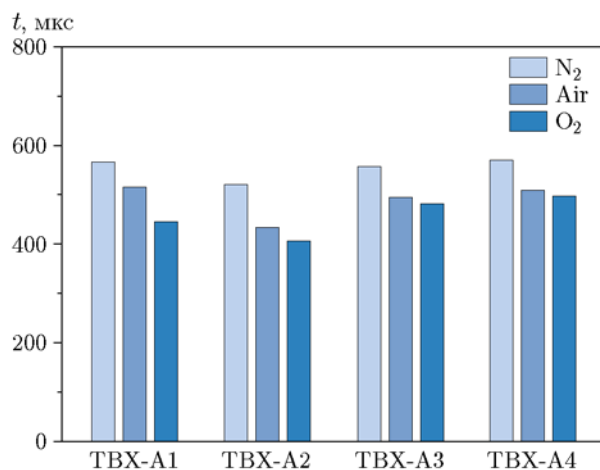


Рис. 10. Разница во времени между появлением светового сигнала и приходом волны давления в различных газовых средах

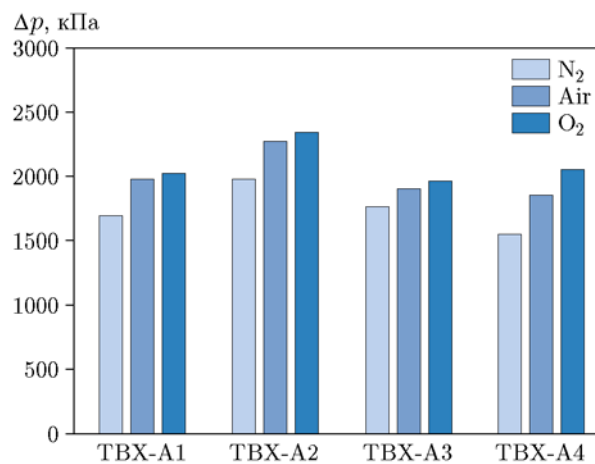


Рис. 11. Амплитуды пиков избыточного давления при взрыве исследуемых составов в различных газовых средах

мени можно заметить тенденцию увеличения начальной энергии для частиц алюминия микронного размера.

Влияние взрывной волны на разрушение мишени очевидно, а пик избыточного давления является важным параметром, отражаю-

щим характеристики взрыва. Амплитуды пиков избыточного давления при взрыве четырех составов зарядов в различных газовых средах показаны на рис. 11. Несмотря на отклонения при измерении давления, некоторую информацию из профилей давления можно из-

влекать. Так, пиковые амплитуды избыточного давления в воздухе были значительно больше, чем в среде азота. Это показывает, что частицы алюминия вносили вклад в увеличение первичного давления. По мере роста содержания кислорода в камере пики избыточного давления демонстрировали тенденцию к увеличению. Однако, за исключением состава ТВХ-А4, такая тенденция не была очевидной. Вероятно, это связано с тем, что реакция окисления частиц алюминия близка к насыщению. Заряд ТВХ-А4 с крупными частицами алюминия оказался более нуждающимся в кислороде. В целом пики избыточного давления при взрыве составов ТВХ-А1, ТВХ-А3 и ТВХ-А4 были одинаковыми по амплитуде, но ниже, чем у состава ТВХ-А2. Преимущество наноалюминия уменьшилось из-за низкого содержания активного алюминия. Это означает, что частицы алюминия размером 5.4 мкм имели преимущество в увеличении первичного давления.

В данной работе полная энергия взрыва определяется по суммарному импульсу взрывной волны за определенный период. Затухание полной энергии в первую очередь связано с химической реакцией и теплообменом. Предполагается, что при использовании одной и той же камеры теплопередача и другие тепловые потери для зарядов одинаковой массы во время взрыва одинаковы. Таким образом, анализ механизма ослабления полной энергии можно упростить, связав его только с реакцией дожига.

Полный импульс I_{total} для четырех видов зарядов в различных газовых средах показан на рис. 12. Видно, что полный импульс в среде азота ниже, чем в других средах. Это указывает на то, что энергия, выделяемая в реакции продуктов детонации с частицами алюминия в бедной кислородом среде, была небольшой. В случае, когда содержание кислорода в области взрыва было достаточным, реакция дожига высвобождала максимально возможное количество энергии для поддержания непрерывного распространения взрывной волны. Результаты определения полного импульса в воздухе и в кислороде показали, что импульс сначала увеличивался, а затем уменьшался при увеличении размера частиц. По сравнению с наноалюминием, частицы алюминия микронного размера с более высоким содержанием активного алюминия оказывали существенное влияние на увеличение их полного импульса. Реакция до-

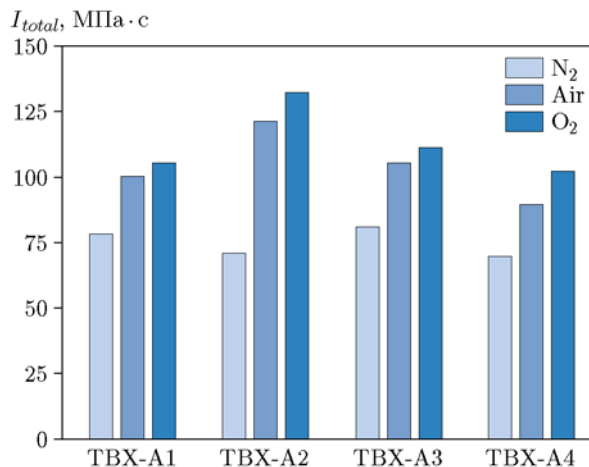


Рис. 12. Полный импульс в различных газовых средах

горания обеспечила увеличение дополнительной энергии взрыва. Это означает, что мелкие частицы алюминия микронного размера легче выходили из оксидной пленки и окислялись или что частицы алюминия с большей вероятностью попадали в богатую кислородом среду, тем самым увеличивая скорость горения. Проведенные исследования показали, что при разработке алюминизированных ВВ комплексный подход с учетом размера частиц и содержания активного алюминия может повысить энергию составов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование взрыва алюминизированных ВВ в сферической камере показало, что размер частиц алюминия и содержание кислорода в окружающей среде играют важную роль в реакции дожига и определяют характеристики взрыва. Анализ результатов позволил сформулировать ряд выводов.

1. Содержание кислорода в воздухе недостаточно, чтобы поддерживать полное окисление частиц алюминия. Оценка степени их окисления составляет $87 \div 93$ %, а результаты экспериментов фактически меньше этой оценки. По мере увеличения размера частиц алюминия степень окисления имеет тенденцию к снижению.

2. Окружающая среда с низким содержанием кислорода ограничивает интенсивное горение частиц алюминия. Некоторые частицы алюминия окисляются продуктами детонации до Al_2O_3 , и реакция длится сотни микросе-

кунд. Кроме того, степень окисления крупных частиц алюминия продуктами детонации невелика.

3. Оценка начальной энергии взрыва путем определения разницы во времени между началом излучения света и приходом волны давления на датчики предлагается как новый возможный метод исследования. Применение этого метода позволило сделать вывод, что некоторые частицы алюминия окисляются во время детонации и дают дополнительную энергию первичной взрывной волне.

4. Огненные шары делятся до десятков миллисекунд. Мелкие частицы алюминия микронного размера в диапазоне 48.9 нм ÷ 46.7 мкм увеличивают длительность огненного шара. Более того, это создает некоторый эффект, который способствует увеличению начальной энергии, амплитуды пика избыточного давления и общего импульса.

Авторы выражают признательность Sun Chen, Mingfu Yang и Hongwei Li за помощь в проведении взрывных испытаний. Дополнительная благодарность выражается Xiaowen Hong за помощь в редактировании этой статьи. Экспериментальные приборы и оборудование были описаны также в другой, предназначенной для публикации статье (внешний обзор).

ЛИТЕРАТУРА

1. Carney J. R., Lightstone J. M., McGrath II T. P., Lee R. J. Fuel-rich explosive energy release: oxidizer concentration dependence // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2009. — V. 34, N 4. — P. 331–339.
2. McNesby K. L., Homan B. E., Ritter J. J., Quine Z., Ehlers R. Z., McAndrew B. A. Afterburn ignition delay and shock augmentation in fuel rich solid explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2010. — V. 35. — P. 57–65.
3. Trzciński W. A., Paszula J. Confined explosions of high explosives // *J. Tech. Phys.* — 2000. — V. 41, N 4. — P. 453–470.
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. Haskins P. J., Cook M. D., Briggs R. I. The effect of additives on the detonation characteristics of a liquid explosive // *Proc. 12th APS Topical Group Meeting on Shock Compression of Condensed Matter, Atlanta, 2001.* — P. 890–893.
6. Trunov M. A., Schoenitz M., Zhu X. Y., Dreizin E. L. Effect of polymorphic phase transformations in Al₂O₃ film on oxidation kinetics of aluminum powders // *Combust. Flame.* — 2005. — V. 140. — P. 310–318.
7. Levitas V. I. Burn time of aluminum nanoparticles: strong effect of the heating rate and melt-dispersion mechanism // *Combust. Flame.* — 2009. — V. 156, N 2. — P. 543–546.
8. Peuker J. M., Krier H., Glumac N. Particle size and gas environment effects on blast and overpressure enhancement in aluminized explosives // *Proc. Combust. Inst.* — 2013. — V. 34. — P. 2205–2212.
9. Lewis W. K., Rumchik C. G., Broughton P. B., Lindsay C. M. Time-resolved spectroscopic studies of aluminized explosives: Chemical dynamics and apparent temperatures // *J. Appl. Phys.* — 2012. — V. 111. — 014903.
10. Tanguay V., Goroshin S., Higgins A. J., Zhang F. Aluminum particle combustion in high-speed detonation products // *Combust. Sci. Technol.* — 2009. — V. 181. — P. 670–693.
11. Bazyn T., Krier H., Glumac N. Evidence for the transition from the diffusion-limit in aluminum particle combustion // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31. — P. 2021–2028.
12. Park K., Lee D., Rai A., Mukherjee D., Zachariah M. R. Size-resolved kinetic measurements of aluminum nanoparticle oxidation with single particle mass spectrometry // *Phys. Chem. B.* — 2005. — V. 109. — P. 7290–7299.
13. Trzciński W. A., Cudziło S., Paszula J., Callaway J. Study of the effect of additive particle size on non-ideal explosive performance // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2008. — V. 33, N 3. — P. 227–235.
14. Maiz L., Trzciński W. A., Paszula J. Investigation of fireball temperatures in confined thermobaric explosions // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2017. — V. 42, N 2. — P. 142–148.
15. Chen K., Xiao W., Han Z. W., Huang W. L., Liu T., Zheng S. P., Wang B. L. Effect of aluminum particle size on the explosion parameters of HMX-based thermobaric explosives in confined space // *Chin. J. Explos. Propell.* — 2020. — (Publ. online in chinese). — DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201909018.
16. Maiz L., Trzciński W. A., Szala M., Paszula J. Studies of confined explosions of composite explosives and layered charges // *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* — 2016. — V. 13. — P. 957–977.
17. Maiz L., Trzciński W. A., Szala M. Preparation and testing of thermobaric composites // *Proc. 18th Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, Czech Republic, 2015.* — P. 705–715.
18. Rai A., Park K., Zhou L., Zachariah M. R. Understanding the mechanism of aluminum nanoparticle oxidation // *Combust. Theory Modell.* — 2006. — V. 10, N 5. — P. 843–859.
19. Trzciński W. A., Barcz K., Paszula J., Cudziło S. Investigation of blast performance and

- solid residues for layered thermobaric charges // Propell., Explos., Pyrotech. — 2014. — V. 39. — P. 40–50.
20. **Goroshin S., Mamen J., Higgins A., Bazyn T., Glumac N., Krierb H.** Emission spectroscopy of flame fronts in aluminum suspensions // Proc. Combust. Inst. — 2007. — V. 31. — P. 2011–2019.
21. **Deng J. B.** Study of the Damage Effects of Four Thermobaric Explosives. — Nanjing University of Science & Technology, 2013. — (In chinese).
22. **Yen N. H., Wang L. Y.** Reactive metals in explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 2012. — V. 37. — P. 143–155.

Поступила в редакцию 29.11.2019.

После доработки 15.05.2020.

Принята к публикации 01.06.2020.
