

УДК 6.011+533.231.4

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ СОСТАВНЫХ ЗАРЯДОВ

J.-B. Li, W.-B. Li, X.-M. Wang, B. Zou

ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China,  
13182990306@163.com

Исследуется механизм, с помощью которого реакционноспособный материал увеличивает выход энергии составного заряда, состоящего из внутреннего слоя взрывчатого вещества, промежуточного недетонирующего слоя и внешнего слоя взрывчатого вещества. Такая схема широко используется в боеприпасах с настраиваемой мощностью. Взрывные эксперименты проводились в двух режимах инициирования. Использование реакционноспособного состава Al/каучук вместо инертного состава LiF/каучук значительно ускорило рост огненного шара, скорость ударной волны и ее избыточное давление от составного заряда. При одновременном инициировании эффект был более очевидным из-за экзотермичности реакционноспособного слоя. Составной заряд с 40 % (об.) Al показал наибольшую разницу значений пикового избыточного давления при двух режимах инициирования — 41.4 %. Заряд с 60 % (об.) Al генерировал более низкую скорость ударной волны и огненного шара, а также меньшее пиковое избыточное давление, чем заряд с 40 % (об.) Al. Это свидетельствует о том, что избыточное содержание реакционноспособного Al в недетонирующем слое подавляет взрыв составного заряда.

Ключевые слова: реакционноспособный материал, составной заряд, взрыв огненного шара, ударная волна.

DOI 10.15372/FGV2022.9268  
EDN NDMUQH

## ВВЕДЕНИЕ

Конструкция в виде кольцевого вложенного составного заряда, применяемая для создания контролируемого повреждения [1–4], привлекает большое внимание исследователей. Такой заряд обычно состоит из слоев взрывчатого вещества (ВВ) с различной скоростью детонации и недетонирующих слоев, которые ослабляют или усиливают энергию детонации. Для согласования различных режимов инициирования и получения нескольких регулируемых выходов энергии используются уникальные гетерогенные заряды.

В последнее время проводились систематические исследования энерговыделения составного заряда, состоящего из внутреннего слоя бризантного ВВ, среднего слоя недетонирующего материала и внешнего слоя алюминизированного ВВ. В работах [5, 6] изучалось влияние режимов инициирования на ударно-волновое избыточное давление, создаваемое многослойным составным зарядом, определено максимальное значение пикового избыточно-

го давления при одновременном внутреннем и внешнем инициировании, а также промежуточное значение давления при внешнем инициировании и его минимальное значение при внутреннем инициировании. В [7] проведено сравнение мощности взрыва и выхода осколков составного заряда, обернутого спиральной либо гибридной оболочкой. Оказалось, что в случае гибридного корпуса скорость осколков и пиковое избыточное давление зависят от режима инициирования.

Использование в заряде инертного материала в качестве его недетонирующего слоя может существенно повлиять на взаимодействие детонационных волн, генерируемых внутренним и внешним слоями ВВ, а также на начальную взрывную волну и движение оболочки снаряда [8–10]. В то же время реакционноспособный материал может увеличить тепловыделение заряда за счет того, что продукты детонации и воздух вступают в реакцию при распространении ВВ [11, 12]. Кроме того, такой материал компенсирует потери энергии, вызванные слоем, занимающим пространство боеголовки. Результаты исследования температуры

огненного шара и рассеяния продуктов взрыва кольцевых составных зарядов [13] использовались в качестве ориентира по выбору недетонирующих материалов. Композит с каучуковой матрицей, содержащий 50 % (об.) Al, продемонстрировал лучшие результаты по взрывным характеристикам заряда. В [14] были исследованы цилиндрические заряды, обернутые алюминиевой фольгой, и экспериментально определены их термобарические эффекты. Установлено, что такие заряды характеризуются более высокими пиками избыточного давления по сравнению с зарядами с сердечником из гексогена и с зарядами из состава гексоген / алюминиевая пудра.

Изменения в протекании реакции и энерговыделении ВВ в основном отражаются на взрывном огненном шаре и ударной волне (УВ). При взрывном рассеивании составного заряда, содержащего алюминизированные ВВ, после инициирования возникает горячее и обогащенное горючим облако взрыва, включающее в себя промежуточные продукты детонации, непрореагировавшие ВВ и недетонирующие материалы [15]. Облако приводится в движение за счет сильноэкзотермической реакции и встречается с воздухом по мере продолжения реакции, сопровождающейся турбулентным перемешиванием. Сильное турбулентное перемешивание может привести к реакции дожигания с более высокой скоростью и даже к вторичному взрыву [16]. В дополнение к высокой температуре и давлению, внутри огненного шара изначально генерируется и постепенно от него отделяется другой значимый элемент поражения — ударная волна [17]. Пиковое избыточное давление, импульс и продолжительность положительного избыточного давления являются тремя важными характеристиками УВ и зависят от структуры заряда.

Понятно, что на энергетические характеристики составных зарядов, содержащих огнеупорные материалы, большое влияние оказывают свойства недетонирующего слоя. Данная работа посвящена составным зарядам с различными типами недетонирующих слоев, которые представляют собой конструкции из реакционноспособных слоев, содержащих смесь алюминий / каучук, и инертных слоев из смеси фторид лития / каучук. Экспериментально исследовались взрывные характеристики этих зарядов с целью установить механизм, с помощью которого реакционноспособные материа-

лы усиливают огненный шар и УВ от составного заряда.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

На рис. 1 представлены вид в разрезе и изображение в сборке исследуемого составного заряда: внутренний слой из взрывчатого вещества JH-2 (диаметр 35 мм, длина 80 мм), матрица из слоя резины (внутренний диаметр 35 мм, толщина 15 мм, длина 80 мм), внешний слой из алюминизированного ВВ (внутренний диаметр 65 мм, толщина 15 мм, длина 80 мм). Состав ВВ JH-2: 95 % (мас.) цикло-1,3,5-триметилен-2,4,6-тринитрамина (гексоген), 3 % (мас.)  $C_7H_6N_2O_4$  (динитротолуол, ДНТ) и 2 % (мас.) поливинилацетата (CZ), плотность заряда  $1.70 \text{ г}/\text{см}^3$ , теплота детонации  $5.579 \text{ МДж}/\text{кг}$ . Состав алюминизированного ВВ: 76 % (мас.) гексогена, 20 % (мас.) алюминиевого порошка ( $10.5 \text{ мкм}$ ) и 4 % (мас.) парафина, плотность заряда  $1.823 \text{ г}/\text{см}^3$ , теплота детонации  $6.643 \text{ МДж}/\text{кг}$ . Для исследования механизма влияния среднего слоя были применены два типа композитов с резиновой матрицей: составы, содержащие 40 % (об.) LiF, и составы, содержащие 40 и 60 % (об.) Al.

Применялись два режима возбуждения детонации заряда — инициирование внутреннего заряда в центре одного торца и одновременное инициирование зарядов внутреннего и внешне-

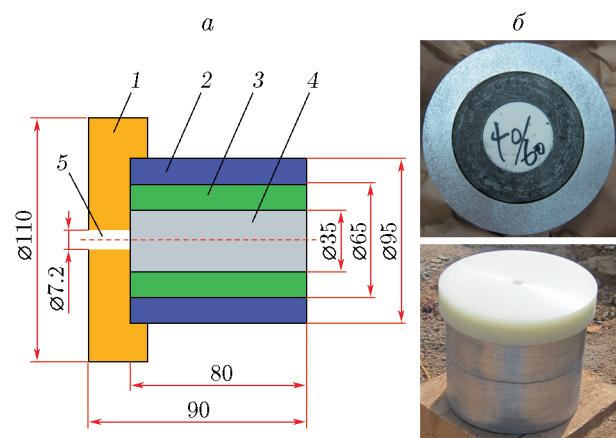


Рис. 1. Схема составного заряда, содержащего огнеупорный материал: вид в разрезе (а) и тестируемый заряд (б):

1 — держатель заряда, 2 — внешний слой ВВ, 3 — недетонирующий слой, 4 — внутренний слой ВВ, 5 — отверстие для детонатора

Таблица 1

Параметры составных зарядов

Номер опыта	Внутренний слой ВВ	Внешний слой ВВ	Недетонирующий слой, %	Способ инициирования
1	JH-2	Алюминизированное ВВ	LiF/резина, 40/60	Внутренний
2			LiF/резина, 40/60	Одновременный
3			Al/резина, 40/60	Внутренний
4			Al/резина, 40/60	Одновременный
5			Al/резина, 60/40	Внутренний
6			Al/резина, 60/40	Одновременный

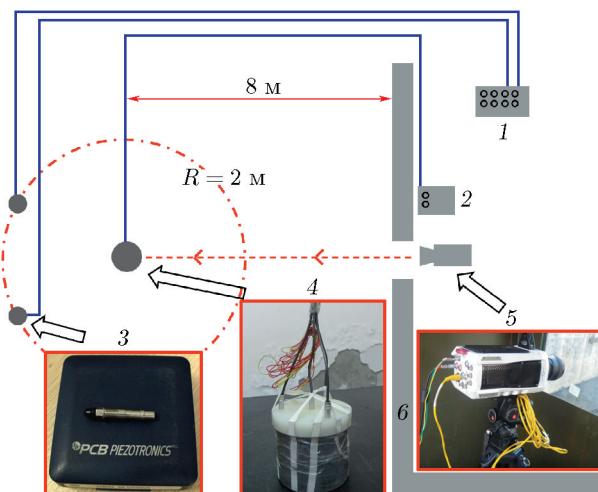


Рис. 2. Схема эксперимента:

1 — устройство сбора данных, 2 — детонатор, 3 — пьезоэлектрический датчик, 4 — испытуемый заряд, 5 — высокоскоростная камера, 6 — защитное ограждение

го слоев на одном торце. В дальнейшем будем их называть соответственно внутренним и одновременным инициированием. Внутреннее инициирование осуществлялось электродетонатором, а одновременное — с помощью магниточечной сетки инициирования.

Параметры исследованных составов и способ инициирования представлены в табл. 1.

Заряд располагался вертикально на деревянной опоре высотой 1 м, как показано на рис. 2. Два пьезоэлектрических датчика давления 113B21 (PCB Piezotronics, США) находились на расстоянии 2 м от оси заряда. Рабочий диапазон датчика составлял 3 МПа, чувствительность —  $50 \div 100 \text{ мВ}/(\text{фунт} \cdot \text{дюйм}^{-2})$ , частота дискретизации — 1 МГц. Расшире-

ние взрывных огненных шаров фиксировалось высокоскоростной камерой (FastCAM Ultima APX, Japan Photron Corporation) с частотой дискретизации 4000 кадр/с и максимальным разрешением 640 (высота)  $\times$  480 (ширина).

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Эволюция огненного шара

#### 2.1.1. Определение формы огненного шара

Время экспозиции высокоскоростной камеры устанавливалось в диапазоне 50  $\div$  240 мкс для того, чтобы предотвратить перенасыщение и создать изображения в градациях серого с лучшим контрастом. На рис. 3 представлены типичные изображения составных зарядов до и после взрыва ( $t = 0$  — момент времени, предшествующий расширению продуктов взрыва). Форма огненного шара очень четкая.

Радиус взрывного облака  $R_f$  определялся по границе огненного шара путем обработки изображений в программе AutoCAD. Сравнение последовательных фотографий показало, что наблюдение под углом 30° по отношению к поверхности земли может обеспечить оптимальный контраст кадра и в то же время позволяет избежать влияния взаимодействия падающих и отраженных от земли волн. Таким образом, это направление использовалось для определения радиуса взрывного облака в различные моменты времени.

#### 2.1.2. Радиус и скорость огненного шара

На рис. 4 представлена покадровая съемка огненного шара, полученная высокоскоростной камерой. Первоначально грибовидная форма огненного шара постепенно превратилась

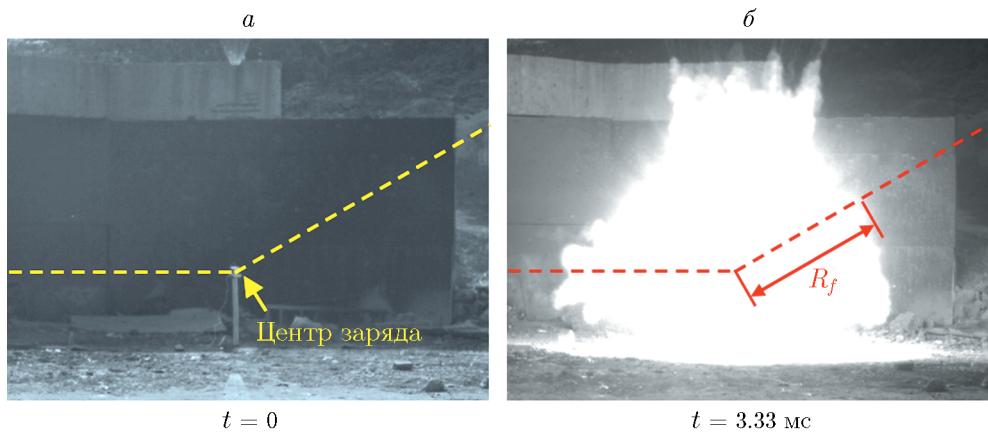


Рис. 3. Типичные изображения огненного шара, генерируемого взрывом составного заряда с наполнением недетонирующего слоя 40 % Al, до (а) и после (б) взрыва

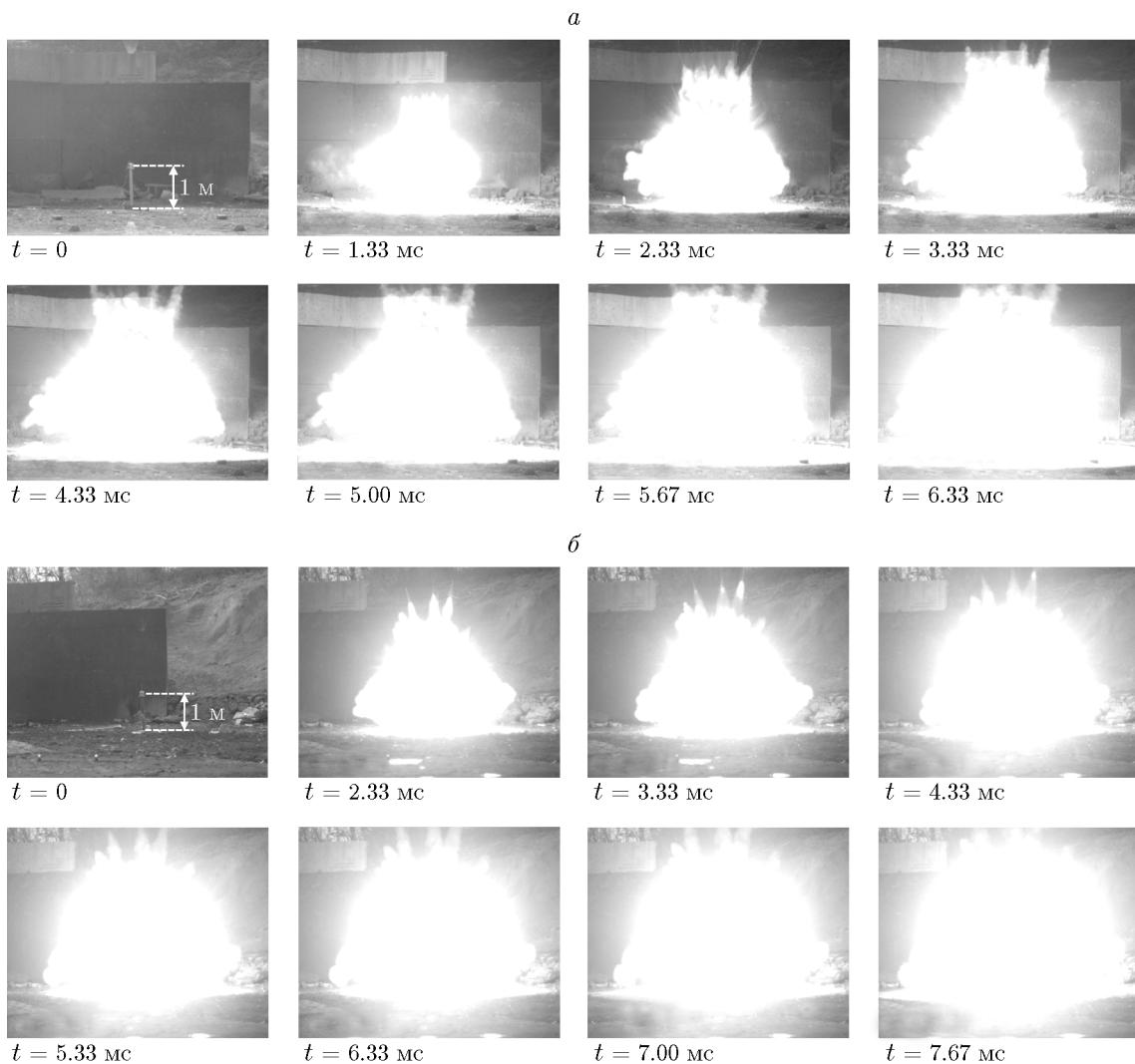


Рис. 4. Эволюция огненного шара, генерируемого составным зарядом с наполнением недетонирующего слоя 40 % Al:

а — внутреннее инициирование, б — одновременное инициирование

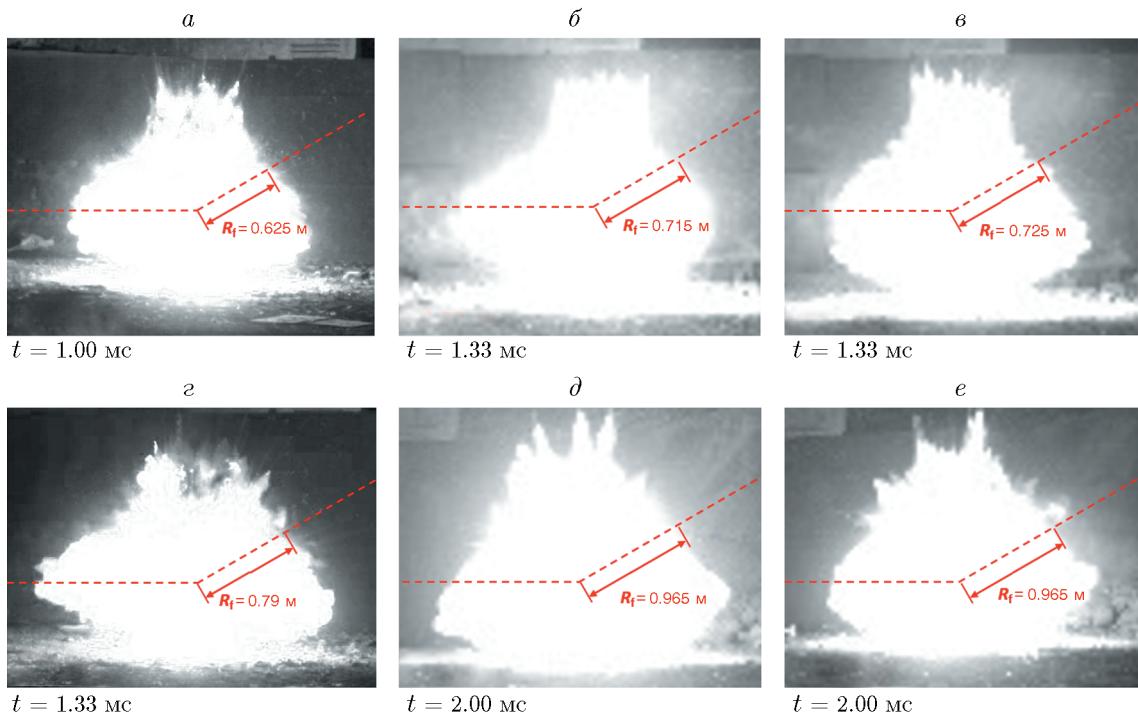


Рис. 5. Начальные размеры огненных шаров, генерируемых составными зарядами с разными недетонирующими слоями:  
внутреннее инициирование: *а* — LiF/резина, *б* — 40 % Al/резина, *в* — 60 % Al/резина; одновременное инициирование: *г* — LiF/резина, *д* — 40 % Al/резина, *е* — 60 % Al/резина

в полусферическую. При одновременном инициировании область пространства, занимаемая огненным шаром, значительно больше, чем в случае внутреннего инициирования, что свидетельствует о большей дисперсии скорости продуктов детонации, вызванной пересжатой детонацией при более высокой энергии инициирования. Примечательно, что при одновременном инициировании продукты детонации вблизи торца (верхняя половина изображения) расширяются быстрее, а форма огненного шара раньше становится полусферической, чем при внутреннем инициировании. В целом энерговыделение составного заряда можно разделить на три стадии: начальная анаэробная реакция детонации, анаэробная реакция горения при расширении продуктов детонации и аэробная реакция горения на поздней стадии расширения. При внутреннем инициировании недетонирующий слой может ослабить детонационную волну и задержать инициирование внешнего слоя ВВ, что приводит к уменьшению начального радиуса огненного шара. При одновременном инициировании заряд демонстрирует сильный метательный эффект на ранней стадии, кото-

рый сопровождается значительным увеличением радиуса огненного шара.

В большинстве случаев светоизлучающая зона сразу после инициирования может быстро увеличиваться, а затем расширение мгновенно прекращается. Видимый взрывной огненный шар наблюдается при начальном радиусе расширения  $R_{f0}$ , равном 60  $\div$  70 % от максимального радиуса огненного шара  $R_{f,max}$ . Величина  $R_{f0}$  отражает начальный взрыв, а  $R_{f,max}$  определяет максимальный энергетический выход заряда. Далее будут рассмотрены значения  $R_{f0}$ ,  $R_{f,max}$  и  $R_{f0}/R_{f,max}$  для зарядов с разными недетонирующими слоями.

На рис. 5 представлены изображения взрыва зарядов с матрицей из резины, наполненной 40 % LiF, 40 % Al и 60 % Al. Значения  $R_{f0}$  находятся в диапазоне 0.625  $\div$  0.965 м. Кроме того, при одновременном инициировании они на 26.5  $\div$  34.6 % выше, чем при внутреннем инициировании заряда с тем же недетонирующим слоем. По сравнению с составом с 40 % LiF состав с 40 % Al увеличивает радиус огненного шара при внутреннем и одновременном инициировании на 14.7 и 22.0 % соответственно.

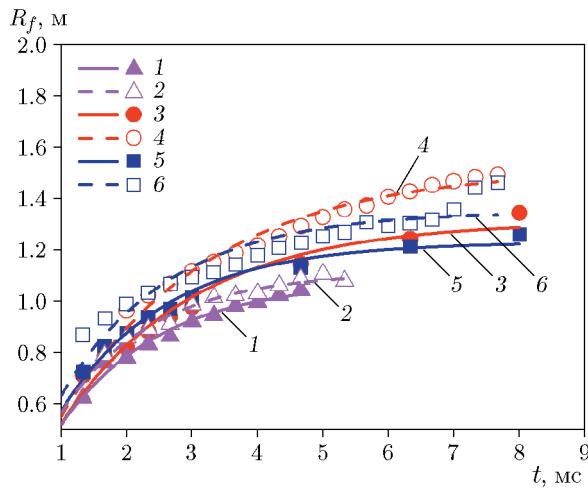


Рис. 6. Зависимость радиуса огненного шара от времени:

линии — аппроксимация: 1 — LiF, внутреннее инициирование,  $R^2 = 0.995$ ; 2 — LiF, одновременное инициирование,  $R^2 = 0.996$ ; 3 — 40 % Al, внутреннее инициирование,  $R^2 = 0.985$ ; 4 — 40 % Al, одновременное инициирование,  $R^2 = 0.991$ ; 5 — 60 % Al, внутреннее инициирование,  $R^2 = 0.993$ ; 6 — 60 % Al, одновременное инициирование,  $R^2 = 0.960$ ; точки — эксперимент: 1 — 40 % LiF, внутреннее инициирование; 2 — 40 % LiF, одновременное инициирование; 3 — 40 % Al, внутреннее инициирование; 4 — 40 % Al, одновременное инициирование; 5 — 60 % Al, внутреннее инициирование; 6 — 60 % Al, одновременное инициирование

но. Следовательно, при одновременном инициировании реакционноспособный материал улучшает взрывные характеристики. Следует отметить, что значение  $R_{f0}$  при использовании заряда с повышенным содержанием алюминия в наполнителе (60 % (об.)) практически не увеличивается по сравнению с  $R_{f0}$  в случае заряда с наполнителем 40 % Al, что может быть

связано с подавлением взрывного рассеивания, вызванного более высоким волновым импедансом состава с 60 % Al.

Представленные на рис. 6 данные ( $R_f, t$ ) аппроксимировались экспоненциальной функцией [18]

$$R_f(t) = R_{max}(1 - a \exp(-kt)), \quad (1)$$

где  $R_{max}$  — максимальный радиус огненного шара, м;  $a$  и  $k$  — коэффициенты, связанные с сопротивлением воздуха;  $t$  — длительность разлета продуктов взрыва, мс.

Из аппроксимационных кривых зависимости радиуса огненного шара от времени (см. рис. 6) видно, что значения  $R_{f,max}$  находятся в пределах 1.08  $\div$  1.52 м, причем заряд с наполнителем 40 % Al имеет наибольший радиус расширения. Разница в радиусах  $R_{f,max}$  между двумя режимами инициирования составляет 3.2  $\div$  15.6 %, что меньше, чем у радиусов  $R_{f0}$ . Считается, что значение  $R_{f,max}$  связано с тротиловым эквивалентом заряда  $W_{TNT}$  [19], в то время как начальный радиус огненного шара в основном зависит от режима инициирования. Для исследуемого составного заряда в данной работе

$$W_{TNT} = \frac{Q_{v1}W_1 + Q_{v2}W_2}{Q_{vTNT}}, \quad (2)$$

где  $Q_{v1}$ ,  $Q_{v2}$ ,  $Q_{vTNT}$  — теплота детонации внутреннего ВВ, внешнего ВВ и тротила соответственно;  $W_1$ ,  $W_2$  — массы внутреннего и внешнего слоев ВВ соответственно, рассчитанные по плотности и размеру слоев ВВ.

В табл. 2 приведены значения  $R_{f0}/R_{f,max}$ , рассчитанные по аппроксимационным кривым.

Таблица 2

Значения  $R_{f0}$ ,  $R_{f,max}$ ,  $R_{f0}/R_{f,max}$ , полученные из экспериментов, и результаты аппроксимации данных

Номер опыта	$R_{f0}$ , м	$R_{f,max}$ , м	$A$	$k$ , м/с	$R_{f0}/R_{f,max}$ , %
1	0.63	1.08	2.15	0.65	57.9
2	0.79	1.12	2.23	0.71	70.9
3	0.72	1.32	2.58	0.49	54.4
4	0.97	1.52	2.99	0.44	63.5
5	0.73	1.24	2.44	0.62	58.7
6	0.97	1.35	2.61	0.60	71.5

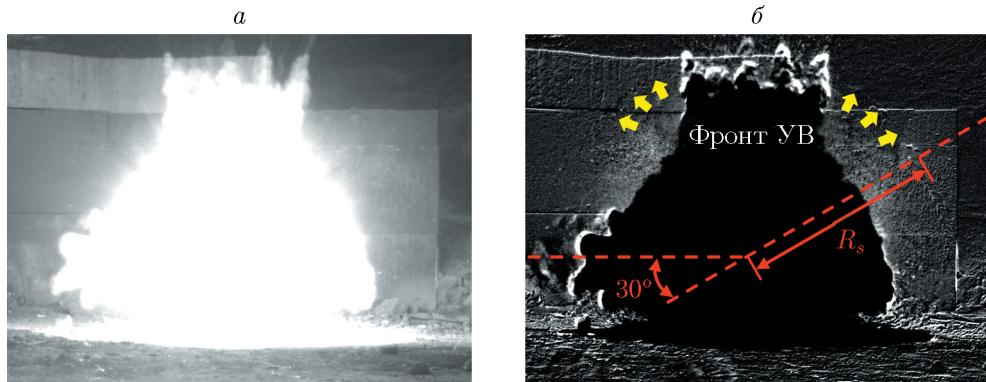


Рис. 7. Типичные изображения фронта УВ, полученных от составного заряда с наполнением 40 % Al, до обработки (а) и после обработки (б)

Эти данные находятся в диапазоне 54.7  $\div$  58.7 % для внутреннего инициирования и 63.5  $\div$  71.5 % для одновременного инициирования. Считается, что недетонирующий слой не вносит значительного вклада в увеличение радиуса огненного шара на поздней стадии взрыва. Следовательно,  $R_{f0}/R_{f,max}$  связано с режимом инициирования, а не с типом недетонирующего материала.

## 2.2. Распространение ударной волны

### 2.2.1. Определение волнового фронта

Как правило, распространение УВ может вызывать увеличение плотности воздуха и показателя преломления, что приводит к визуальному искажению фонового изображения, полученного при высокоскоростной фотосъемке. Генерация, развитие и распространение УВ хорошо видны после обработки изображения. На рис. 7 показано типичное изображение фронта УВ, полученное путем сравнения с исходным фоном взрыва, а также радиус фронта УВ под углом 30° к горизонту.

### 2.2.2. Радиус и скорость волнового фронта

На начальном этапе разлета продуктов детонации внутри облака взрыва генерировалась первичная УВ, которую нельзя было наблюдать из-за интенсивного свечения. При уменьшении скорости расширения огненного шара фронт УВ на некотором расстоянии отделялся от шара, а затем продолжал распространяться с определенной скоростью. На рис. 8 подробно показана эволюция фронта УВ, генерируемой зарядом с наполнением 40 % Al. Мгновенное

положение фронта указано стрелками. Наблюдаемый радиус волнового фронта различается в зависимости от режима инициирования. Начальная скорость УВ при одновременном инициировании на 26.5  $\div$  34.6 % выше, чем при внутреннем инициировании. Кроме того, форма волнового фронта при одновременном инициировании ближе к сферической, что свидетельствует о более сильном энерговыделении заряда при таком способе инициирования по сравнению с внутренним инициированием.

Линейная зависимость радиуса УВ от времени на рис. 9 означает постоянство скорости волнового фронта. Непрерывная реакция алюминиевого порошка во внешнем заряде увеличивает энерговыделение за фронтом УВ и в некоторой степени противодействует влиянию сопротивления воздуха. С учетом характеристик распространения УВ радиус волнового фронта  $R_s$  описывается выражением

$$R_s = A + ut, \quad (3)$$

где  $A$ ,  $u$  — подгоночные коэффициенты. Параметры линейной аппроксимации точек ( $R_s$ ,  $t$ ) приведены в табл. 3. Скорость волнового фронта заряда с наполнением 40 % LiF почти не зависит от режимов инициирования и даже меньше, чем скорость в воздухе. Это связано с ошибкой линейной аппроксимации. По сравнению с зарядом с наполнением 40 % LiF начальная скорость фронта волны в заряде с наполнением 40 % Al увеличивается на 24.7 и 43.4 % соответственно при внутреннем и одновременном инициировании. Это свидетельствует о том, что реакционноспособный недетонирующий слой значительно усиливает интенсивность взрыва при более высоких энергиях ини-

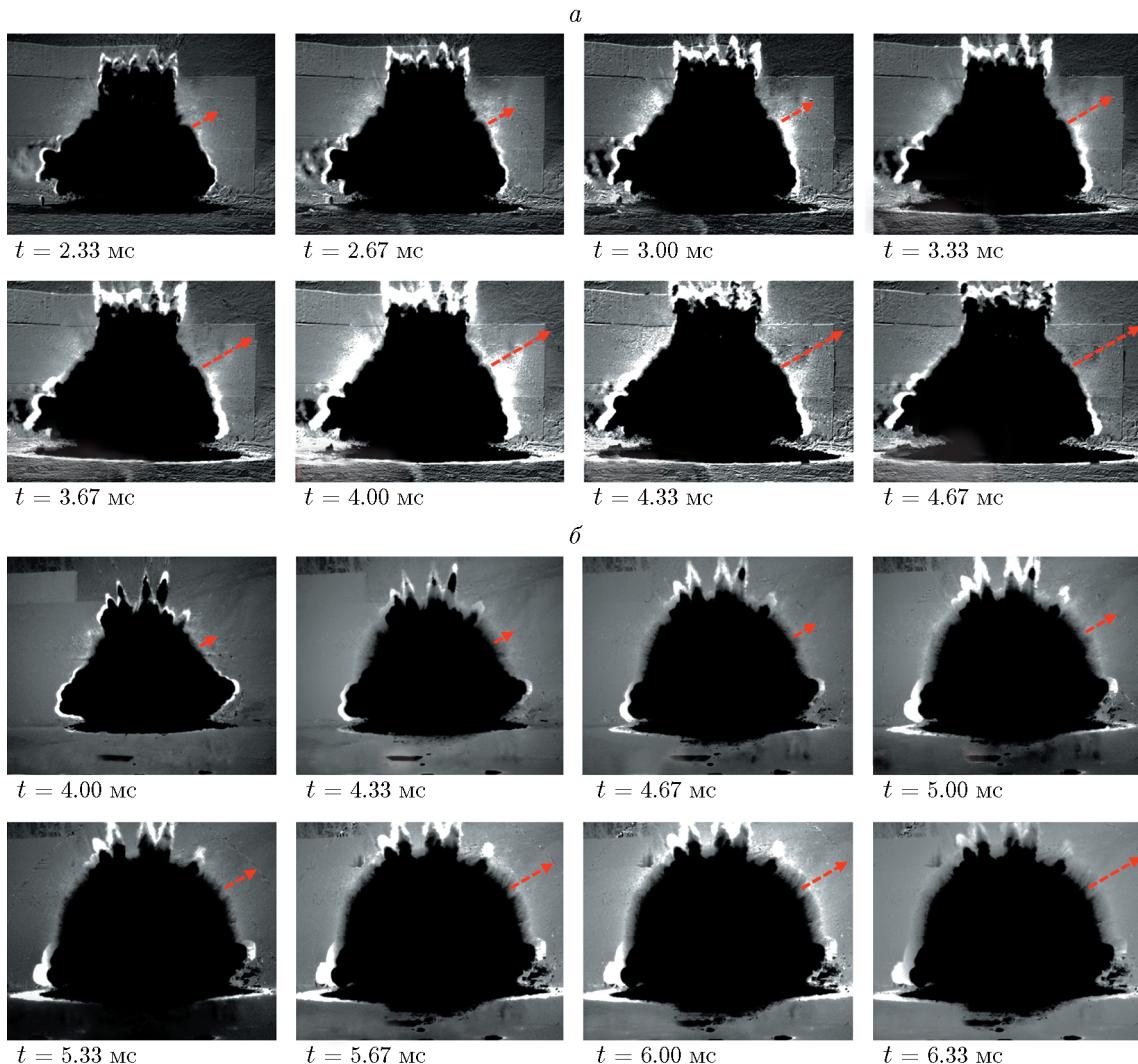


Рис. 8. Эволюция волновых фронтов, генерируемых составным зарядом с наполнением 40 % Al:  
а — внутреннее инициирование, б — одновременное инициирование

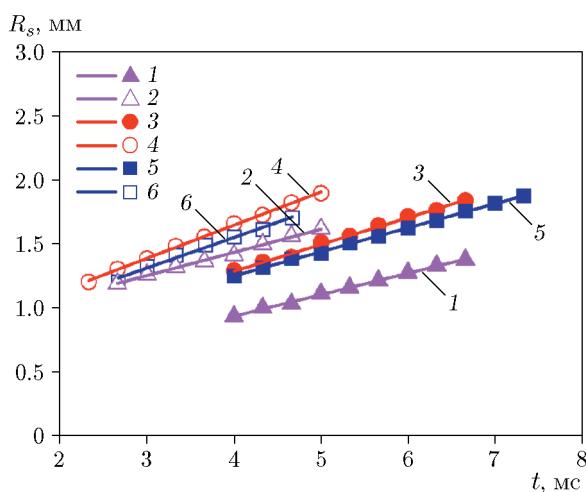


Рис. 9. Зависимость радиуса волнового фронта от времени:

линии — аппроксимация: 1 — LiF, внутреннее инициирование,  $R^2 = 0.999$ ; 2 — LiF, одновременное инициирование,  $R^2 = 0.987$ ; 3 — 40 % Al, внутреннее инициирование,  $R^2 = 0.997$ ; 4 — 40 % Al, одновременное инициирование,  $R^2 = 0.994$ ; 5 — 60 % Al, внутреннее инициирование,  $R^2 = 0.994$ ; 6 — 60 % Al, одновременное инициирование,  $R^2 = 0.999$ ;

точки — эксперимент: 1 — 40 % LiF, внутреннее инициирование; 2 — 40 % LiF, одновременное инициирование; 3 — 40 % Al, внутреннее инициирование; 4 — 40 % Al, одновременное инициирование; 5 — 60 % Al, внутреннее инициирование; 6 — 60 % Al, одновременное инициирование

Таблица 3  
Параметры в зависимости  
радиуса волнового фронта от времени

Номер опыта	$A$ , м	$u$ , м/мс	$R^2$
1	0.530	0.336	0.999
2	1.421	0.362	0.987
3	0.897	0.419	0.997
4	1.221	0.519	0.994
5	1.000	0.376	0.994
6	1.195	0.477	0.999

цирования. Другим важным фактом, следующим из табл. 3, является то, что скорость волнового фронта в заряде с наполнением 60 % Al значительно ниже, чем в заряде с 40 % Al. Это может быть связано с поглощением тепла оксидом  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , образующимся в результате реакции между продуктами взрыва и избыточным порошком алюминия.

### 2.3. Избыточное давление ударной волны

#### 2.3.1. Определение пикового избыточного давления

Пиковое избыточное давление, которое можно определить из измеренного профиля давления, является одной из важных характеристик взрывной волны. С учетом флюктуации экспериментальной кривой, пиковое избыточное давление определяется соотношением

$$\Delta p = \Delta p_{max} \exp(-\chi t) (1 - t/t_p), \quad (4)$$

где  $\Delta p_{max}$  — пиковое избыточное давление,  $\chi$  — коэффициент затухания,  $t_p$  — длительность положительного избыточного давления. Типичные профили избыточного давления от зарядов с 40 % алюминия представлены на рис. 10.

Высокоскоростные фотографии позволяют качественно характеризовать зарождение и эволюцию огненного шара и УВ. Для количественного расчета энергии, выделяемой зарядами с разными типами недетонирующих слоев, пиковое избыточное давление определялось в опытах с зарядами многослойной структуры и рассчитывалось по теоретической модели одиночного цилиндрического заряда. Исходя из

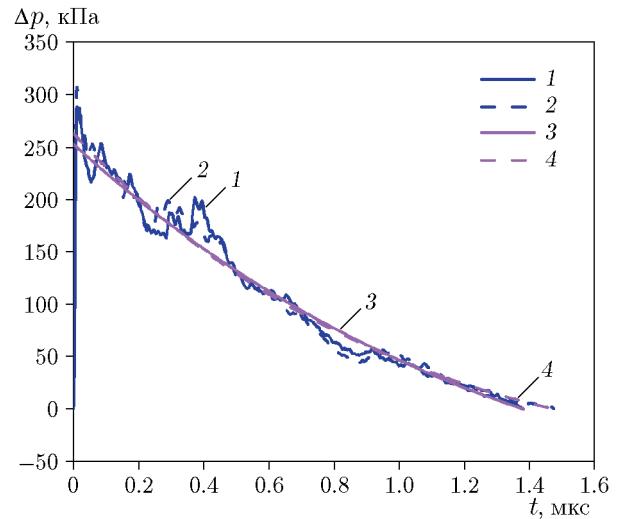


Рис. 10. Типичные профили избыточного давления, полученные при использовании заряда с наполнением 40 % Al:

1, 2 — эксперименты, 3, 4 — аппроксимация

большого количества экспериментальных данных пиковое избыточное давление, вызванное сферическим взрывом тротила в безграничной воздушной среде, может быть выражено как [20]

$$\Delta p_{max} = 0.082 \frac{1}{R} + 0.265 \frac{1}{R^2} + 0.686 \frac{1}{R^3},$$

$$1 \leq R \leq 15, \quad (5)$$

где  $\bar{R} = R/\sqrt{W}$ ,  $W$  — масса заряда,  $R$  — расстояние от центра взрыва. Пиковое избыточное давление исследуемого ВВ можно определить по его тротиловому эквиваленту, который определяется из соотношения (2).

#### 2.3.2. Пиковое избыточное давление и импульс

Профили избыточного давления, измеренные на расстоянии 2 м от центра взрыва, представлены на рис. 11. При внутреннем инициировании избыточное давление ниже, чем при одновременном инициировании, что свидетельствует о диссипации энергии взрывной волны недетонирующими слоями и о затухании УВ с расстоянием.

Пиковые избыточные давления при одновременном инициировании на 31.4, 41.4 и 44.0 % выше, чем при внутреннем инициировании для зарядов с наполнением недетониру-

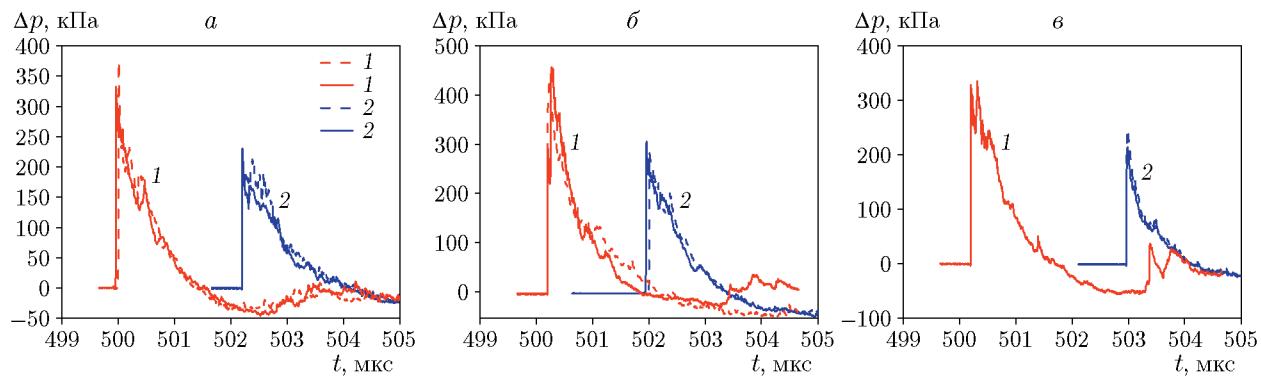


Рис. 11. Экспериментальные профили избыточного давления при использовании зарядов с наполнением недетонирующих слоев 40 % LiF (а), 40 % Al (б), 60 % Al (в):

1 — одновременное инициирование, 2 — внутреннее инициирование

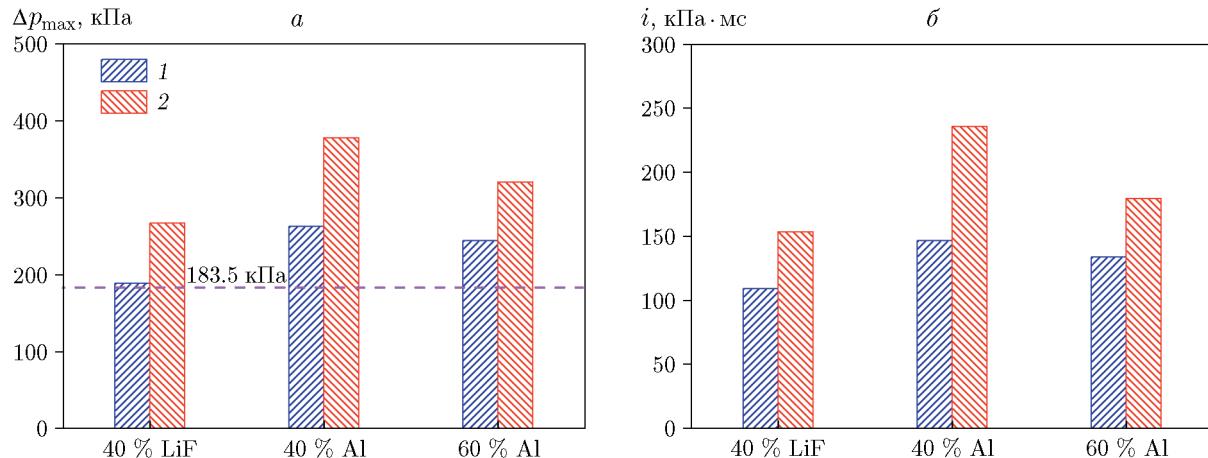


Рис. 12. Экспериментальные параметры УВ от зарядов с разными недетонирующими слоями:

а — пиковое избыточное давление, б — импульс; 1 — внутреннее инициирование, 2 — одновременное инициирование, штриховая линия — расчет по уравнениям (2), (5)

ющих слоев 40 % LiF, 40 % Al и 60 % Al соответственно. Эти результаты аналогичны результатам для УВ и огненного шара в том, что заряд с наполнением 40 % Al по сравнению с зарядом с 40 % LiF имеет самое высокое пиковое избыточное давление. Увеличение этого давления составляет 39.2 и 41.3 % для внутреннего и одновременного инициирования соответственно.

На рис. 12 представлены пиковые значения избыточного давления, полученные из экспериментов, а также результат расчета с использованием уравнений (2) и (5). Увеличение пикового давления при одновременном инициировании можно объяснить эффектом объединения энергий детонации внутреннего и внешнего слоев ВВ.

На рис. 12, б показаны импульсы для за-

рядов с разными типами недетонирующих слоев. Заряд с наполнением 40 % Al демонстрирует наибольшую разницу в импульсе между двумя режимами инициирования, которая достигает до 61 %. В общем случае энерговыделение слоя Al/каучук в составном заряде происходит на стадии расширения продуктов детонации и стадии дожигания. Реагент со слишком высоким содержанием алюминия не может полностью вступить в реакцию при диспергировании и даже проявляет инертные свойства, что приводит к снижению температуры в реакционном пространстве и снижению импульса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена серия взрывных экспериментов с составным зарядом, состоящим из внутреннего слоя ВВ, промежуточного недетонирующего

слоя и внешнего слоя ВВ. Был изучен механизм, с помощью которого реакционноспособный материал увеличивает выход энергии заряда. Анализ результатов позволяет сформулировать следующие выводы.

(1) Режим инициирования влияет на начальный радиус огненного шара, но мало влияет на максимальный радиус. Разница в  $R_{f0}$  при внутреннем и одновременном инициировании составляет  $26.5 \div 34.6\%$ , что выше, чем разница в  $3.2 \div 15.6\%$  для  $R_{f,max}$ .

(2) По сравнению с наполнением 40 % LiF, состав с 40 % Al дает увеличение размера огненного шара, скорости фронта УВ и избыточного давления заряда. Это увеличение более очевидно в случае одновременного инициирования из-за выделения энергии реакционноспособным составом Al/резина в течение более длительного времени.

(3) Использование в качестве наполнителя 60 % Al не привело к значительному увеличению размера огненного шара по сравнению с составом 40 % Al и даже уменьшило скорость УВ и избыточное давление. Это свидетельствует о том, что недetonирующий слой с избыточным содержанием Al тормозит энерговыделение заряда из-за его более высокого волнового импеданса и меньшей скорости реакции.

(4) Пиковое избыточное давление, рассчитанное по теории одиночного заряда, очень близко к его экспериментальному значению при внутреннем инициировании, но значительно ниже, чем пиковое давление при одновременном инициировании. Это связано с суммированием энергий детонации, генерируемых внутренним и внешним взрывчатым веществом.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке National Natural Science Foundation of China (grant N 11972018); China Postdoctoral Science Foundation (grant N 2021M701710).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang X., Huang Z., Qiao L. Detonation wave propagation in double-layer cylindrical high explosive charges // Propell., Explos., Pyrotech. — 2011. — V. 36, N 3. — P. 210–218. — DOI: 10.1002/prep.201000004.
2. Kato H., Murata K., Itoh S., Kato Y. Investigation of jet formation with overdriven detonation in high density explosive // Mater. Sci. Forum. — 2008. — V. 566. — P. 327–332. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.566.327.
3. Held M. Detonation behaviour of adjacent high explosive charges with different detonation velocities // 13th Symp. (Int.) on Detonation, 2006.
4. Zhou T., Chen S., Wang H., Shen F. Research on driving characteristic for compound charge of DNTF-based aluminized explosive // Chin. J. Explos. Propell. — 2015. — V. 38, N 5. — P. 46–50.
5. Ding G., Yuan B. H. Detonation wave characteristics of dual explosive under asymmetrical initiation // Chin. J. Explos. Propell. — 2009. — V. 32, N 1. — P. 79–82.
6. Maiz L., Trzciński W. A., Szala M., Paszula J., Karczewski K. Studies of confined explosions of composite explosives and layered charges // Centr. Eur. J. Energ. Mater. — 2016. — V. 13, N 4. — P. 957–977. — DOI: 10.22211/cejem/65075.
7. 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, N 1. — P. 40–50. — DOI: 10.1002/prep.201300011.
8. Hong X., Li W., Li W., Xu H., Wang B., Xiao W. Experimental study on explosion dispersion process of a multi-layer composite charge under different initiation modes // Defence Technol. — 2020. — V. 16, N 4. — P. 883–892. — DOI: 10.1016/j.dt.2019.11.002.
9. Li J., Li W., Hong X., Yu J., Zhu J. Blast wave characteristics of multi-layer composite charge: Theoretical analysis, numerical simulation, and experimental validation // Defence Technol. — 2023. — V. 19. — P. 91–102. — DOI: 10.1016/j.dt.2021.11.012.
10. Hong X. W., Li W. B., Cheng W., Li W. B., Xu H. Y. Numerical simulation of the blast wave of a multilayer composite charge // Defence Technol. — 2020. — V. 16, N 1. — P. 96–106. — DOI: 10.1016/j.dt.2019.04.007.
11. Li J., Li W., Yu J., Xiao W., Xu H. Blast performance of layered charges enveloped by aluminum powder/rubber composites in confined spaces // Defence Technol. — 2022. — V. 18, N 4. — P. 583–592. — DOI: 10.1016/j.dt.2021.03.014.
12. Li J. B., Li W. B., Wang X. M., Li W. B. Shock response and prediction model of equation of state for aluminum powder/rubber matrix composites // Mater. Des. — 2020. — V. 19. — 108632. — DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108632.

13. **Hong X., Li W., Wang X., Li W., Li R.** Explosion temperature and dispersion characteristics of composite charges based on different non-detonative materials // Propell., Explos., Pyrotech. — 2018. — V. 43, N 12. — P. 1251–1262. — DOI: 10.1002/prep.201800132.
14. **Yan Q.-L., Trzciński W. A., Cudziło S., Paszula J., Eugen T., Liviu M., Traian R., Gozin M.** Thermobaric effects formed by aluminum foils enveloping cylindrical charges // Combust. Flame. — 2016. — V. 166. — P. 148–157. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.01.010.
15. **Wang L., Liu H. Q., Liu M. H., Wang N. F.** Experimental observations on disruptive burning of coated aluminum particles // Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul. — 2002. — V. 5, N 1-6. — P. 407–411. — DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v5.i1-6.440.
16. **Trzciński W. A., Cudziło S., Szymacczyk L.** Studies of detonation characteristics of aluminum enriched RDX compositions // Propell., Explos., Pyrotech. — 2007. — V. 32, N 5. — P. 392–400. — DOI: 10.1002/prep.200700201.
17. **Gregoire Y.** Experimental and numerical study of the explosive dispersion and combustion of metallic particles. — ISAE-ENSMA National School of Mechanics and Aerotechnics in Poitiers, Chasseneuil-du-Poitou, 2009.
18. **Geohegan D. B.** Fast intensified-CCD photography of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  laser ablation in vacuum and ambient oxygen // Appl. Phys. Lett. — 1992. — V. 60, N 22. — P. 2732–2734. — DOI: 10.1063/1.106859.
19. **Dewey J. M.** The TNT equivalence of an optimum propane–oxygen mixture // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2005. — V. 38, N 23. — 4245. — DOI: 10.1088/0022-3727/38/23/017.
20. **Ye S. X.** Basis of Explosion. — Nanjing: Military Engineering College of PLA Univ. of Science and Technology, 2003.

Поступила в редакцию 20.11.2022.

После доработки 20.03.2023.

Принята к публикации 05.04.2023.