

УДК 536.8

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ПОРОШКА В КОМПОЗИТНЫХ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ ЗАРЯДАХ НА ОСНОВЕ DNFT

F. Shen^{1,2}, J.-T. Wang¹, L.-F. Li², W.-L. Yu¹, X.-J. Wang¹

¹Rocket Force University of Engineering, Xi'an, 710025 China, shenfei02@126.com

²Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065 China, wangxj503@sina.com

Исследовалось влияние распределения алюминиевого порошка на энергию взрыва слоистых композитных зарядов термобарических взрывчатых веществ на основе расплава высокоэнергетического 3,4-динитрофурозанфуроксана (DNFT). Композиты состояли из внутреннего и внешнего цилиндрического слоев с регулируемым пространственным распределением алюминиевого порошка. Взрывные испытания проводились в закрытой взрывной камере, заполненной отдельно или азотом, или воздухом. Получены данные о квазистатическом давлении, избыточном давлении в ударной волне и об эволюции огненного шара. С помощью численного моделирования исследована диффузия алюминиевого порошка в процессе взрыва с использованием комбинированного метода дискретных элементов и конечных элементов. Результаты показывают, что концентрирование алюминиевого порошка во внешнем слое композита повышает концентрацию алюминиевого порошка в облаке, что ведет к увеличению скорости горения и выхода энергии на ранних стадиях взрыва. Наоборот, алюминиевый порошок, сконцентрированный во внутреннем слое, сжимается к центру и затем отскакивает назад, замедляя диффузию и оказывая влияние на анаэробные процессы горения.

Ключевые слова: композитный заряд взрывчатых веществ, алюминиевый порошок, 3,4-динитрофурозанфуроксан (DNFT), внутренний взрыв, энергетический выход.

DOI 10.15372/FGV2024.9440

EDN HSUWIK

ВВЕДЕНИЕ

Термобарические взрывчатые вещества (ВВ) состоят в основном из высокоэнергетических ВВ, высококалорийных металлических порошков (таких, как алюминиевый порошок), окислителей и десенсибилизаторов/связующих веществ. Эти компоненты облегчают высвобождение двух видов энергии — взрыва и горения, что ведет к более продолжительному действию давления и увеличению теплового эффекта. В закрытых или полужакрытых помещениях это способствует увеличению наносимого ущерба [1–3]. Эта тема вызывает повышенный интерес у разработчиков оружия и стремительно развивается.

Уникальная разрушительная эффективность термобарических алюминизированных ВВ обусловлена главным образом большим количеством алюминиевого порошка, характеризующегося высокой теплотворной способностью. Процесс взрыва делится на три стадии: детонация ВВ, анаэробное горение алюминиевого порошка с газообразными продуктами детонации (CO₂, CO, H₂O и т. д.), аэробное горение алюминиевого порошка после смешивания с воздухом (т. е. реакция горения свободного алюминия, С, СО и т. д. с O₂) [1]. Скорость и полнота реакции алюминиевого порошка на двух последних стадиях горения

являются важными факторами, влияющими на выделение энергии при взрыве термобарических ВВ [1, 2].

Для регулирования и оптимизации скорости и полноты реакции алюминиевого порошка в последние годы было проведено множество исследований по подбору материалов путем введения более активного металлического порошка [4–9], взрывчатых компонентов с более высокой энергией [10, 11] и т. д., и достигнуты определенные результаты. Другим направлением исследований стали пути оптимизации структуры заряда с целью увеличения его энергии. Например, комбинация слоев ВВ с различным содержанием алюминия позволяет контролировать диапазон рассеивания и распределение концентрации алюминиевого порошка в процессе взрыва, что, в свою очередь, способствует более полному его смешиванию с продуктами газовой детонации и воздухом [3, 12–15]. Был даже применен ударно-рассеивающий заряд, при котором внутренние высокоэнергетические ВВ детонируют, распыляя топливо внешнего слоя [14, 16–18]. Это приводит к быстрому диспергированию топлива и, следовательно, быстрому его смешиванию с окружающим воздухом для сжигания [19]. Однако на образование облаков алюминиевого порошка после взрыва такого слоистого композитного заряда все еще могут влиять задержка воспламенения и отсутствие условий с высокой температурой и давлением. Кроме того, трудно эффективно повысить скорость и полноту реакции алюминиевого порошка.

С появлением новых энергетических материалов были разработаны ВВ с большими скоростями реакции и более высокой энергией детонации, такие как гексанитрогексаазаизовюрцитан (CL-20) и 3,4-динитрофуразан (DNTF) [20, 21]. Включение таких ВВ в слоистые композиты может привести не только к быстрому воспламенению и расширению облаков дисперсного алюминиевого порошка, но и к созданию условий с высокими температурой и давлением, что ускоряет горение алюминиевого порошка. Такой подход более эффективен для повышения энергии термобарических зарядов.

В настоящем исследовании в качестве основы для получения литых образцов используется расплав DNTF, который обладает высокой энергией, легко воспламеняется и быстро расширяется. Путем регулирования пространственного распределения алюминиевого порошка получены различные коаксиальные составные заряды и однородные заряды. Общее содержание динитротолуола, октогена, алюминия и других компонентов оставалось неизменным во всех зарядах. Впоследствии были проведены испытания в закрытой взрывной камере с измерением избыточного давления ударной волны, температуры и квазистатического давления взрыва в среде азота и воздуха. Исследователи широко использовали этот подход для изучения взрывных свойств термобарических зарядов [22–25]. Кроме того, на основе корреляции между квазистатическим давлением и механической энергией [26] проведено количественное сравнение энергии, выделяемой различными зарядами. Анализ эволюции огненного шара при взрыве [27] позволил изучить механизмы реакции алюминиевого порошка с различными зарядами. Эти результаты могут лечь в основу разработки оптимизированной конструкции композитных термобарических зарядов.

1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

1.1. Испытательные образцы

Количество алюминиевого порошка может существенно влиять на скорость детонации и рассеивающую способность ВВ. В коаксиальных составных зарядах алюминиевый порошок распределен неравномерно, большая его часть сосредоточена либо во внутреннем, либо во внешнем слое зарядов, и в зависимости от этого различаются их скорости детонации и способность к рассеиванию [28, 29]. Если алюминиевая пудра сконцентрирована

Таблица 1

Тип структуры образца и состав заряда

Тип заряда	ВВ	
	внешний слой	внутренний слой
Однородный заряд (НС)	DNTF/HMX/Al 40/30/30	
Композитный заряд А (ССА)	DNTF/Al 40/60	DNTF/HMX 40/60
Композитный заряд В (ССВ)	DNTF/HMX 40/60	DNTF/Al 40/60

Примечания. Массовая доля дополнительного нечувствительного агента постоянна на уровне 2 % во всех образцах. Данные в таблице представляют собой соотношение масс компонентов. Теплота взрыва зарядов DNTF/HMX/Al 40/30/30 и DNTF/HMX 40/60 соответственно 9 727 и 5 892 Дж/г (расчет по EXPLO5).

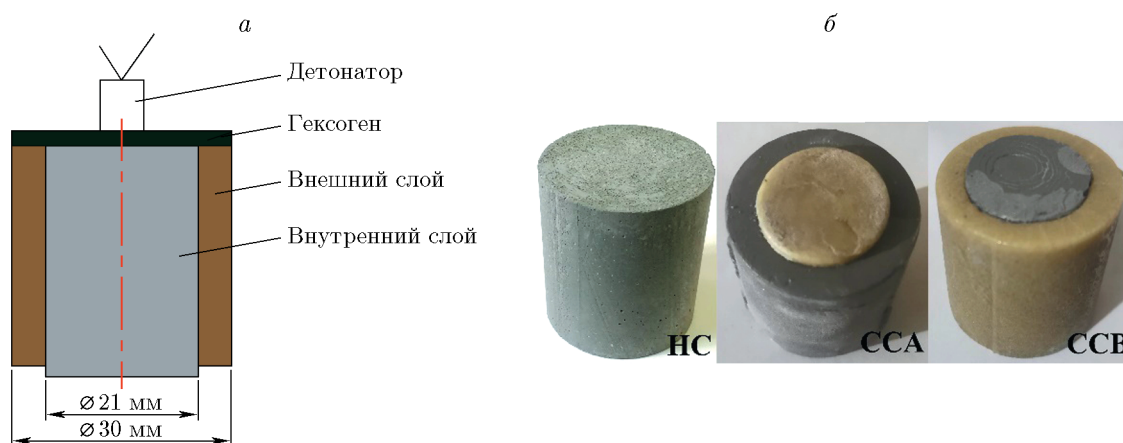


Рис. 1. Схема сборки тестовых образцов (а) и их фотографии (б)

во внешнем слое, это способствует ее диспергированию и раннему смешиванию с воздухом [17, 18]. Если алюминиевый порошок сконцентрирован во внутреннем слое, высокое давление детонации внешнего слоя ВВ будет смещаться к внутреннему слою, подвергая алюминиевый порошок более сильному воздействию [28]. Оба подхода потенциально могут повлиять на энерговыделение композитного заряда.

Для всестороннего сравнения процессов энерговыделения различными композитными термобарическими зарядами в рамках данного исследования были испытаны три образца: однородный заряд (НС), композитные заряды А и В (ССА и ССВ), составы которых приведены в табл. 1. Каждый образец получен методом литья из расплава. Масса составляет 40 г, диаметр — 30 мм, соотношение длины и диаметра приблизительно 1, а диаметр внутреннего слоя — 21 мм (рис. 1). Путем регулировки высоты внутреннего и внешнего слоев заряда достигнут приблизительный баланс масс между этими слоями. Массовое соотношение DNTF/октоген/алюминий для каждого образца составило приблизительно 40/30/30. Кроме того, в качестве контрольного образца использовался однородный заряд такой же массы. ВВ на основе гексогена размером $\text{Ø}30 \times 2$ мм (массой приблизительно 2.2 г) прикреплялось к торцевой поверхности образца для обеспечения последовательного инициирования образцов. Кроме того, оптимальные детонационные характеристики заряда достигаются при размере частиц алюминиевого порошка $3 \div 40$ мкм [30]. Поэтому

для обеспечения пригодности процесса подготовки образцов был выбран алюминиевый порошок с частицами сферической формы со средним размером 13 мкм.

1.2. Методы тестирования

Испытания проводились во взрывной камере (рис. 2) с внутренними размерами $\varnothing 600 \times 1000$ мм, объемом приблизительно 0.283 м^3 , с возможностью откачивать и накачивать газ внутрь камеры. На левой и правой сторонах корпуса камеры установлено по одному датчику для измерения давления ударной волны и по одному квазистатическому датчику давления. На верхнем торце корпуса камеры размещены две термопары. Центральная точка на верхнем торце камеры предназначена для подвешивания колонны заряда. Заряд располагался в центре камеры, а точка инициирования — на верхнем торце заряда. Для наблюдения за эволюцией огненного шара при взрыве в торцевую поверхность взрывной камеры было встроено смотровое окно, через которое велись наблюдения с использованием высокоскоростной камеры.

В датчик давления ударной волны был встроен пьезотронный датчик РСВ 113В22 с временем нарастания менее 1 мкс и максимальным диапазоном действия приблизительно 34.5 МПа. Чтобы обеспечить точность определения пикового значения квазистатического давления, особое внимание при измерении уделялось помехам, создаваемым высокочастотными ударными волнами. Как правило, для ослабления высокочастотных ударных волн используется механическая фильтрующая конструкция. Фильтрующая структура со спиральным каналом была расположена на переднем конце датчика, как показано на рис. 3. В качестве квазистатического датчика давления использовался пьезорезистивный датчик давления CYG 1402 с точностью измерения 0.5 %, максимальным давлением около 4 МПа и временем нарастания менее 1 мкс. Длина стержня с резьбой составляла 30 мм, а размер сечения канала — 2×0.7 мм. Калибровка с использованием ударной трубки показала, что время повышения давления в тестируемом устройстве составило 0.15 мс. В качестве датчика температуры использовалась оголенная термопара WRe5/26 с диаметром провода термопары 0.2 мм. Время отклика менее 2 мс при максимальной измеренной температуре 2500 °С. При температуре выше 400 °С ошибка измерения составляла менее 2 %.

Испытания ВВ проводились в воздухе и в азоте. В воздушной среде термобарический заряд проходит три стадии: детонацию, анаэробное горение и аэробный режим горения. В азоте таких стадий две: детонация и анаэробное горение. Сравнивая результаты измерения избыточного давления ударной волны, квазистатического давления и температуры

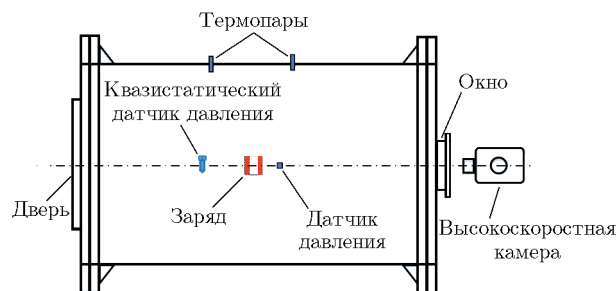


Рис. 2

Рис. 2. Схема экспериментальной установки

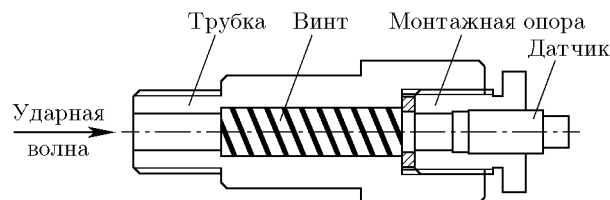


Рис. 3

Рис. 3. Измерительное устройство для определения квазистатического давления

в этих двух условиях, можно получить представление о выделении энергии на стадии аэробного горения и его влиянии на взрывные характеристики. При проведении испытаний на взрыв в азоте давление газа во взрывной камере сначала было снижено до уровня менее 10 кПа с помощью вакуумного насоса. Затем азот медленно вводился до тех пор, пока давление газа в камере не возвращалось к нормальному уровню.

Скорость записи сигнала давления ударной волны была 1 млн выборок в секунду, в то время как сигналы квазистатического давления и температуры записывались со скоростью 100 тыс. выборок в секунду. Движение огненного шара внутри взрывной камеры регистрировалось сверхскоростной камерой Kira 05M со скоростью записи 10^6 кадр/с.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Результаты измерения основных физических параметров

Конфигурация и размеры корпуса взрывной камеры существенно влияют на ключевые параметры, такие как избыточное давление ударной волны, квазистатическое давление и температура. В результате кривые измерений, отображающие одни и те же физические величины для различных образцов в корпусе взрывной камеры, выглядят похоже. На примере заряда НС в качестве иллюстрации проанализированы различные характеристики каждой кривой, полученной при измерении физических величин внутри камеры. Кроме того, из-за небольших колебаний амплитуды величин в газе, находящемся внутри измерительного устройства, сохранялись некоторые едва заметные неровности, в просторечии называемые «заусенцами». Чтобы повысить точность определения истинного пикового значения квазистатического давления, был использован многоточечный метод осреднения шума [31] для тщательной обработки каждой точки данных на кривой.

На рис. 4 показаны характерные результаты измерения физических величин для заряда НС. Представленные на рис. 4, а кривые избыточного давления ударной волны (Δp) в воздухе и азоте, хотя и демонстрируют схожую общую тенденцию и близость пиков давления, все же имеют расхождения. Примечательно, что отражение от стенок взрывной камеры значительно уменьшило второе и третье пиковые значения в азоте. Кроме того, периоды колебаний в азоте увеличены по сравнению с периодами колебаний в воздушной среде. Это означает более быстрое снижение давления и скорости распространения

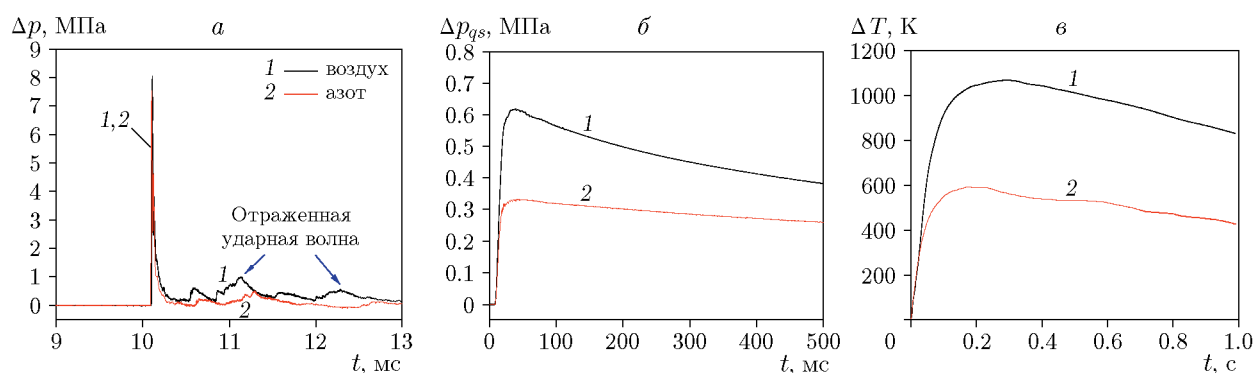


Рис. 4. Типичные результаты измерения физических величин во взрывной камере для однородного заряда:

а — избыточное давление ударной волны, б — квазистатическое давление, в — повышение температуры

ударной волны в азоте, что объясняется отсутствием аэробных реакций горения, влияющих на энергию ударной волны. На рис. 4,б представлена кривая квазистатического давления (Δp_{qs}) как в воздухе, так и в азоте. Примечательно, что в воздушной среде наблюдался значительно больший пик квазистатического давления, хотя и с более быстрым снижением, чем в азотной среде. Это снижение в основном объясняется поглощением энергии взрыва корпусом взрывной камеры, что вызывает его нагрев. При анализе кривых, имеющих сходные пиковые значения, можно видеть согласованные тренды, что подчеркивает важность пиков давления при оценке различных образцов. На рис. 4,в показаны изменения в повышении температуры (ΔT) как в воздушной, так и в азотной среде. Хотя кривые в целом демонстрируют сходные тенденции, наблюдаются заметные различия в пиках. Для других образцов особое внимание следует уделять различиям в температурных пиках.

2.2. Сравнение результатов измерения для композиционных зарядов

В табл. 2 представлены максимальные значения одних и тех же физических величин для трех зарядов, взрывающихся в воздушной и азотной средах. Результаты получены с помощью одинаковых датчиков в двух параллельных экспериментах и представляют собой средние значения. Выявлена заметная тенденция: поведение составных зарядов в воздухе и в азоте очень похоже на поведение заряда НС. Для зарядов одинакового состава поведение избыточного давления Δp_m в обеих средах сходное, в то время как величины $(\Delta p_{qs})_m$ и ΔT_m ведут себя по-разному. Эти расхождения имеют решающее значение для анализа реакции алюминиевого порошка. Для упрощения сравнения различных зарядов была построена диаграмма (рис. 5) параметров композитных зарядов. Значения представлены вместе с данными измерений заряда НС в воздушной среде, принятыми в качестве эталона.

Как показано на рис. 5,а, в воздушной среде различие значений $(\Delta p_{qs})_m$ между тремя зарядами невелико, при этом самое высокое квазистатическое давление характерно для заряда ССА, а самое низкое — для заряда ССВ. В азоте алюминиевый порошок может подвергаться только анаэробному сгоранию с образованием продуктов детонации. Значение $(\Delta p_{qs})_m$ для НС и ССА снизились на 46 и 42 % соответственно, в то время как для ССВ оно уменьшилось примерно на 60 %. Это указывает на то, что алюминиевый порошок в заряде ССВ проявляет ограниченную реакционную способность на этапе анаэробного горения и в основном участвует в аэробном горении с воздухом на последующих этапах. Самую высокую реакционную способность на этапе анаэробного горения проявляет алюминиевый порошок в заряде ССА. Как видно на рис. 5,б, значения ΔT_m для ССА и ССВ выше, чем у заряда НС в воздушной среде. Однако в среде азота значения ΔT_m для

Таблица 2

Пиковые значения различных физических величин
при взрыве в воздухе и азоте

Заряд	Δp_m , МПа		$(\Delta p_{qs})_m$, МПа		ΔT_m , К	
	воздух	азот	воздух	азот	воздух	азот
НС	8.01	7.54	0.613	0.329	1 067	592
ССА	7.13	6.86	0.638	0.370	1 293	720
ССВ	8.85	8.44	0.597	0.243	1 224	421

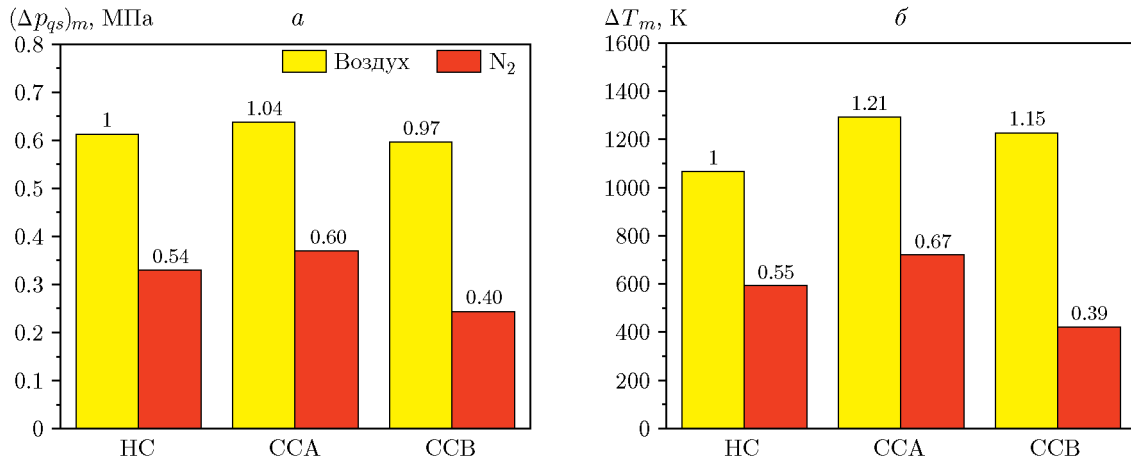


Рис. 5. Сравнение пиковых значений квазистатического давления (а) и температуры (б) в экспериментах в воздухе и в азоте

всех трех зарядов значительно снижаются: для зарядов CCA и HC — примерно на 45 %, для заряда CCB — на 66 %.

2.3. Механическая энергия, выделяемая при взрыве

Среди ранее упомянутых измеренных физических величин наибольшее значение имеет пиковое квазистатическое давление. Оно определяется кумулятивным влиянием как кинетической, так и потенциальной энергии после непрерывного воздействия ударной волны в ограниченном пространстве, которое определяет плотность энергии газа [1, 3]. Преобладает корреляция между пиком квазистатического давления и энергией взрыва, выраженная следующим образом [26]:

$$(\Delta p_{qs})_m \approx \frac{m}{V} (\gamma - 1) Q, \quad (1)$$

где m — масса заряда, V — объем взрывной камеры, Q — полная энергия, выделяемая зарядом единичной массы, γ — показатель адиабаты газа в камере после взрыва. В соответствии с формулой (1) может быть получено соотношение

$$E = (\Delta p_{qs})_m \frac{V}{m} \approx (\gamma - 1) Q. \quad (2)$$

Величина E представляет собой механическую энергию, возникающую в результате преобразования заряда единичной массы вследствие воздействия ударной волны и теплового расширения. Эта энергия соответствует механической энергии, генерируемой взрывом. Показатель адиабаты γ отражает эффективную скорость преобразования энергии взрыва в механическую энергию, но ее конкретное значение обычно трудно получить напрямую. Механическая энергия, выделяемая при взрыве, может быть рассчитана по формуле (2). Суммарный выход механической энергии E_{tot} может быть рассчитан как сумма энергий на трех стадиях: детонации E_1 , анаэробного горения E_2 и аэробного горения E_3 :

$$E_{tot} = E_1 + E_2 + E_3. \quad (3)$$

Стадия аэробного горения показала самое длительное время реакции и самую низкую мощность выброса. Энергия E_3 генерируется в результате квазистатического расширения в ограниченном пространстве, в то время как E_1 и E_2 в основном обусловлены ударными волнами [1].

Таблица 3
Выход механической энергии на разных стадиях реакции

Заряд	E_{tot}	$E_1 + E_2$	E_3	$E_3/E_{tot}, \%$
	кДж/г			
НС	4.111	2.206	1.905	46.3
ССА	4.279	2.481	1.797	42.0
ССВ	4.004	1.630	2.374	59.3

В ходе измерений зачастую сложно провести различие между стадией детонации и стадией анаэробного горения. Поэтому используется общая механическая энергия, получаемая на этих двух стадиях ($E_1 + E_2$). Основываясь на предположении $E_3 \approx 0$ в азотной среде, энергию $E_1 + E_2$ можно получить путем сравнения общей энергии в азотной и воздушной средах. На основе пиковых значений квазистатического давления, приведенных в табл. 2, механическая энергия различных стадий реакции может быть рассчитана с использованием формул (2), (3), результаты представлены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что небольшие различия в E_{tot} наблюдаются для всех зарядов. Тем не менее, энергия E_3 заряда ССВ значительно выше, чем у других зарядов, и E_3/E_{tot} приближается к 60 %. Наблюдаемая разница указывает на то, что полнота реакции алюминиевого порошка в заряде ССВ является самой низкой на стадии анаэробного горения. Поскольку соотношение компонентов во всех зарядах одинаковое, это различие может быть вызвано различиями в структуре заряда, что приводит к различным уровням смешивания продуктов детонации и алюминиевого порошка. Высокоскоростная фотосъемка и моделирование процесса диспергирования алюминиевого порошка могут дать ценную информацию для обоснования этого анализа.

3. ДИФФУЗИЯ И РЕАКЦИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ПОРОШКА

3.1. Эволюция огненного шара взрыва

На рис. 6 показано развитие огненного шара при взрыве, снятом сверхскоростной камерой Kiraana 05M. Через 100 мкс после воспламенения огненный шар еще не соприкасался со стенками взрывной камеры.

Огненный шар от заряда ССА отличался сильной яркостью, что указывает на значительно большую скорость реакции алюминиевого порошка в этом заряде по сравнению с зарядом НС. Анализ показал, что после рассеивания алюминиевого порошка во внешнем слое заряда ССА могло образоваться облако алюминиевого порошка с высокой концентрацией. Продукты детонации из внутреннего слоя заряда, скорее всего, более тщательно перемешиваются с этим облаком и сгорают быстрее. Возникающая высокая температура, вероятно, способствует аэробному сгоранию внешней поверхности облака алюминиевой пудры с воздухом, что значительно повышает яркость поверхности огненного шара. В совокупности эти факторы способствуют увеличению скорости выделения энергии зарядом ССА.

Огненный шар от заряда ССВ начинает быстро затухать через 40 мкс (см. рис. 6), что свидетельствует об отсутствии интенсивного анаэробного горения алюминиевого порошка и продуктов детонации. Снижению полноты реакции заряда ССВ на стадии анаэробного

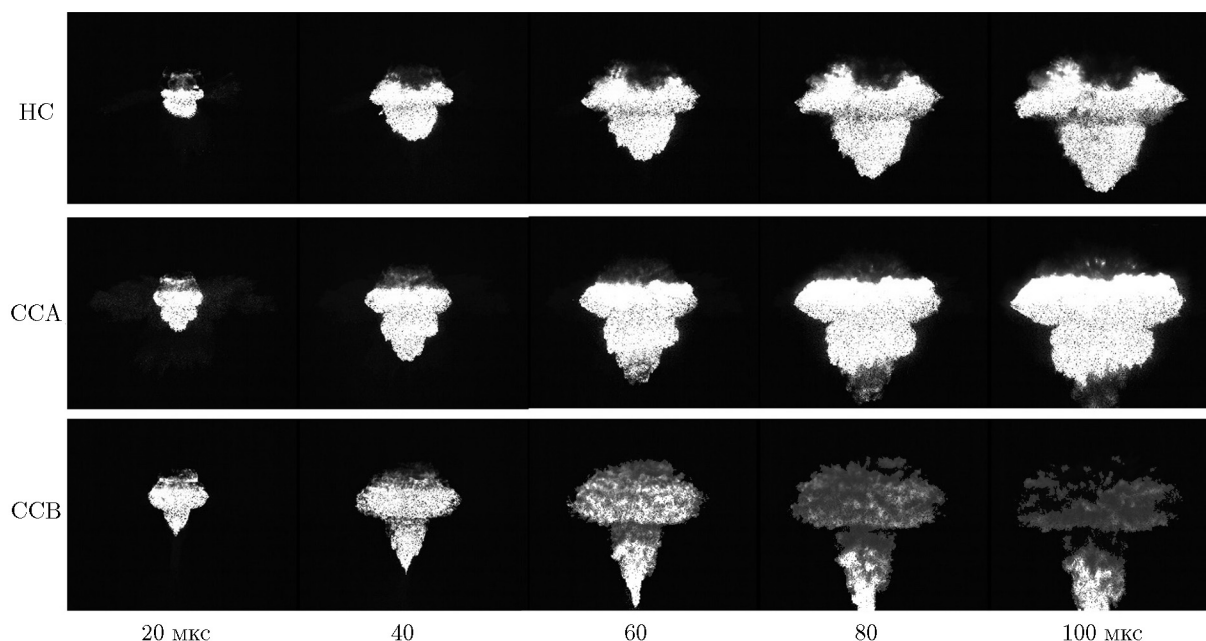


Рис. 6. Эволюция огненного шара при взрыве различных зарядов

сжигания способствуют два основных фактора. Первый из них заключается в том, что продукты детонации быстро рассеиваются наружу, вместо того чтобы тщательно смешиваться с алюминиевой пудрой во внутреннем слое после детонации внешнего слоя ВВ. В то же время диффузия продуктов детонации приводит к быстрому снижению температуры и давления, что препятствует воспламенению и сгоранию алюминиевого порошка. Вторым аспектом может быть более низкая скорость диффузии алюминиевого порошка, что будет проанализировано в следующем параграфе.

3.2. Диффузия алюминиевого порошка

Концентрация алюминиевого порошка является решающим фактором, влияющим на скорость реакции. Однако получение точной информации об алюминиевом порошке в огненном шаре при взрыве является трудной задачей. Кроме того, сложно измерить изменение концентрации алюминиевого порошка непосредственно во время взрыва. Поэтому в данном исследовании используются методы численного моделирования, в которых реакция алюминиевого порошка не учитывается. Традиционные методы конечных элементов или конечно-разностные методы сталкиваются с трудностями при построении численных моделей взрывов с использованием частиц алюминиевого порошка. В данном исследовании подход к моделированию сочетает в себе метод дискретных элементов и метод конечных элементов. Алюминиевый порошок рассматривается как инертные микрочастицы, внедренные во взрывчатый материал. Движение алюминиевого порошка описывается методом дискретных элементов, в то время как движение продуктов детонации взрывоопасных газов моделируется с использованием конечно-элементных эйлеровых алгоритмов. Этот подход позволяет численно моделировать начальный процесс диффузии алюминиевого порошка во время взрыва:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum f_{ji}^c + f_i, \quad (4)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum r_i \cdot f_{ji}^c + M_i. \quad (5)$$

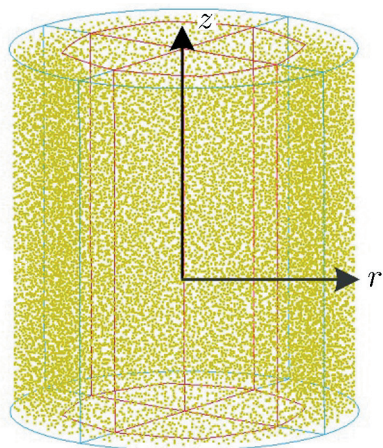


Рис. 7

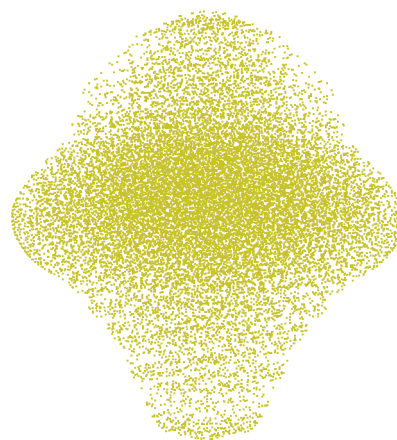


Рис. 8

Рис. 7. Модель конечных элементов для заряда с частицами алюминиевого порошка

Рис. 8. Морфология диффузии алюминиевого порошка для заряда НС

Таблица 4

Параметры уравнения состояния JWL для ВВ

ВВ	ρ , г/см ³	D , мм/мкс	A , ГПа	B , ГПа	R_1	R_2	ω	E_0 , ГПа
DNTF/HMX 40/60	1.774	8.649	816	19.64	4.8	1.15	0.28	10.2
НС	1.938	8.147	510	7.9	4.37	1.28	0.32	10.3
DNTF/Al 40/60	2.135	6.952	422	5.3	4.4	1.03	0.33	6.2

Здесь m_i и I_i — соответственно масса и момент инерции частиц алюминиевого порошка; v_i и ω_i — соответственно скорость и угловая скорость частиц алюминиевого порошка; f_i и M_i — соответственно внешние силы и крутящие моменты, действующие на частицы алюминиевого порошка; f_{ji}^c — сила, действующая со стороны j -й частицы алюминиевого порошка на i -ю частицу порошка; r_i — вектор, направленный от центра i -й частицы алюминиевого порошка к точке контакта.

Размеры модели и общая масса алюминиевого порошка идентичны фактическим зарядам. Алюминиевый порошок равномерно распределяется в указанной области зарядов, а воздушная область имеет размеры $\varnothing 600 \times 800$ мм. Чтобы сократить время расчета, масса отдельной частицы алюминиевого порошка взята равной 0.6 мг, на каждый заряд приходится примерно 20 000 частиц алюминиевого порошка. Модель конечных элементов с частицами алюминиевого порошка приведена на рис. 7. В этой модели радиальное направление обозначено r , а осевое направление — z . Узлы сеток в различных средах совпадают на границах раздела. Точка инициирования столба ВВ расположена в верхней центральной точке, а внешняя поверхность воздуха рассматривается как неотражающая граница. Для описания ВВ используется уравнение состояния JWL, параметры которого приведены в табл. 4.

На рис. 8 показана морфология диффузии алюминиевого порошка для заряда НС. Видно, что общий внешний вид вполне соответствует рис. 6.

После получения координат всех частиц алюминиевого порошка в разные моменты времени стало возможным построить график пространственного распределения алюминии-

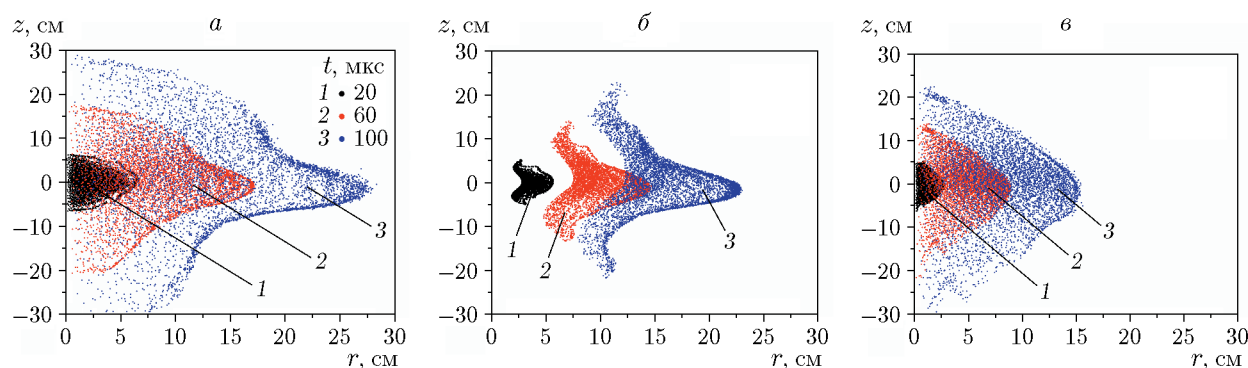


Рис. 9. Пространственное распределение алюминиевого порошка в различные моменты времени в зарядах HC (а), CCA (б), CCB (в)

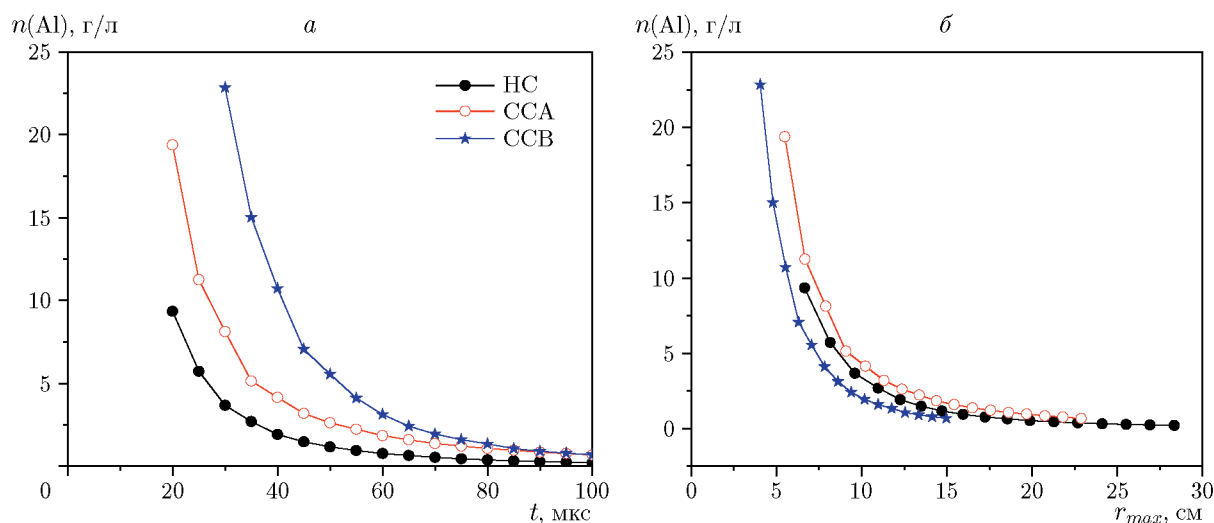


Рис. 10. Пространственное изменение концентрации алюминиевого порошка для трех зарядов в зависимости от времени (а) и максимального радиуса облака алюминиевого порошка (б)

евого порошка. На рис. 9 представлено пространственное распределение частиц в моменты времени 20, 60 и 100 мкс. Видно, что скорость диффузии алюминиевого порошка наиболее высока для заряда HC, а распределение относительно равномерное, с несколько более высокой концентрацией алюминиевого порошка по краям облака. Несмотря на то, что алюминиевый порошок постепенно рассеивался в направлениях r и z при взрыве заряда CCA, его концентрация оставалась высокой. Скорость диффузии алюминиевого порошка для заряда CCB значительно ниже, чем для других зарядов, и его распределение относительно равномерное. Это происходит потому, что алюминиевый порошок в заряде CCB находится во внутреннем слое, сначала он сжимается за счет внутреннего сцепления, а затем отскакивает и рассеивается, в результате чего его скорость отстает от скорости в случае двух других зарядов.

Исходя из объема области пространственного распределения алюминиевого порошка и общей массы порошка, можно рассчитать среднюю концентрацию алюминиевого порош-

ка $n(Al)$ для различных зарядов. Соответствующие кривые показаны на рис. 10 в зависимости от максимального радиуса облака алюминиевого порошка r_{max} .

Из-за недостаточной однородности пространственного распределения алюминиевого порошка на ранних стадиях инициирования на рис. 10 для зарядов НС и ССА показана только средняя концентрация через 20 мкс после воспламенения. Самой низкой скоростью диффузии алюминиевого порошка является у образца ССВ, для него значения концентрации даны после 30 мкс. Но при этом, как следует из рис. 10,а, в те же моменты времени концентрация порошка у образца ССВ наивысшая. Однако, поскольку скорость диффузии алюминия для него мала и отстает от продуктов газовой детонации внешнего заряда, это приводит к меньшим температуре и давлению и неблагоприятно для увеличения скорости реакции. Из рис. 10,б видно, что при одной и той же пространственной координате самая низкая концентрация алюминиевого порошка наблюдается у заряда ССВ, что и приводит к наименьшей скорости реакции при последующем аэробном горении. С другой стороны, концентрация алюминиевого порошка заряда ССА значительно выше, чем у заряда НС, и это является решающим фактором для более высоких яркости и механической энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сравнение параметров взрыва и диффузии алюминиевого порошка для однородных зарядов и двухслойных композитных зарядов с одинаковым соотношением компонентов DNTF/октоген/алюминий, но различным распределением алюминиевого порошка в ограниченном пространстве. Сделан ряд выводов.

(1) Регулирование распределения алюминиевого порошка может существенно повлиять на выработку энергии термобарическим зарядом, в частности, на скорость и степень анаэробного горения. Концентрация алюминиевого порошка во внешнем слое усиливает реакцию анаэробного горения, повышая эффективную механическую энергию и температуру. И наоборот, сконцентрированность порошка во внутреннем слое приводит к снижению степени анаэробного горения и значительным различиям в эффективном производстве механической энергии при взрыве в воздушной и азотной средах.

(2) Сконцентрированность алюминиевого порошка во внешнем слое приводит к образованию более плотных облаков алюминиевого порошка и лучшему смешиванию с продуктами газовой детонации, что увеличивает скорость анаэробного горения во всех облаках и ускоряет аэробное горение алюминиевого порошка по краям облаков. В результате скорость распространения огненного шара, его яркость, механическая энергия и температура превышают таковые у однородного заряда.

(3) При концентрировании алюминиевого порошка во внутреннем слое он подвергается сильному когезионному сжатию с последующим отскоком. Из-за низкой скорости диффузии алюминиевый порошок отстает от продуктов газовой детонации внешнего взрывчатого вещества, что приводит к неполному перемешиванию. Недостаточно высокие температура и давление препятствуют анаэробному сгоранию, в результате чего в аэробном горении участвует избыточная порция алюминиевого порошка.

(4) Контроль за распределением алюминиевого порошка в композитных зарядах является ключевой стратегией для оптимизации процесса выделения энергии и повышения эффективности использования энергии. Ожидается, что разумное регулирование распределения алюминиевого порошка позволит добиться более эффективного преобразования энергии заряда в энергию поражения, что имеет значительный потенциал для применения в исследованиях боеприпасов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке National Natural Science Foundation of China (грант № 12202349).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Trzciński W. A., Maiz L.** Thermobaric and enhanced blast explosives — properties and testing methods // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2015. — V. 40, N 5. — P. 632–644. — DOI: 10.1002/prep.201400281.
2. **Türker L.** Thermobaric and enhanced blast explosives (TBX and EBX) // *Defence Technol.* — 2016. — V. 12, N 6. — P. 423–445. — DOI: 10.1016/j.dt.2016.09.002.
3. **Hu H.-W., Song P., Deng G.-Q., Xiao C.** Characteristics of thermobaric explosives and their advances // *Adv. Mech.* — 2022. — V. 52, N 1. — P. 53–78. — DOI: 10.6052/1000-0992-21-021.
4. **Remennikov A., Ngo T., Mohotti D., Uy B., Netherton M.** Reprint of: Experimental investigation and simplified modeling of response of steel plates subjected to close-in blast loading from spherical liquid explosive charges // *Int. J. Impact Eng.* — 2017. — V. 105. — P. 1–12. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.03.024.
5. **Jing Q., Wang D., Liu Q., Ren L., Wang Y., Liu C., Shen Y., Wang Z.** Study on transient reaction mechanism and explosion intensity parameters of micron-sized flake aluminum dust in air // *Chem. Eng. Sci.* — 2021. — V. 246. — P. 116884. — DOI: 10.1016/j.ces.2021.116884.
6. **Ma X., Chen X., Li Y., Qiao Z., Yang G., Zhang K.** Aluminized energetic coordination polymers constructed from transition metal centers (Co, Ni, and Cu) // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2021. — V. 46, N 10. — P. 1598–1610. — DOI: 10.1002/prep.202100097.
7. **Pontalier Q., Loiseau J., Goroshin S., Zhang F., Frost D. L.** Blast enhancement from metalized explosives // *Shock Waves*. — 2021. — V. 31, N 3. — P. 203–230. — DOI: 10.1007/s00193-021-00994-z.
8. **Omang M., Hauge K. O.** Shock ignition of aluminium particle clouds in the low-temperature regime // *Shock Waves*. — 2022. — V. 32, N 8. — P. 691–701. — DOI: 10.1007/s00193-022-01108-z.
9. **Wainwright E. R., Dean S. W., Vummidi Lakshman S., Weihs T. P., Gottfried J. L.** Evaluating compositional effects on the laser-induced combustion and shock velocities of Al/Zr-based composite fuels // *Combust. Flame*. — 2020. — V. 213. — P. 357–368. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.12.009.
10. **Jiang C., Lu G., Mao L., Wang Z.** Effects of aluminum content on the energy output characteristics of CL-20-based aluminized explosives in a closed vessel // *Shock Waves*. — 2021. — V. 31, N 6. — P. 141–151. — DOI: 10.1007/s00193-021-01001-1.
11. **Liu Z., Nie J., Xu X., Zhu Y., Liu P., Guo X., Yan S., Zhang T.** Energy release characteristics of CL-20-based composite explosives in confined space // *Acta Armamentarii*. — 2022. — V. 43, N 3. — P. 503–512. — DOI: 10.12382/bgxb.2021.0163.
12. **Zarei Z., Frost D. L.** Simplified modeling of blast waves from metalized heterogeneous explosives // *Shock Waves*. — 2011. — V. 21, N 5. — P. 425–438. — DOI: 10.1007/s00193-011-0316-0.
13. **Maiz L., Trzciński W. A., Paszula J.** Semi-closed investigations of new aluminized thermobaric and enhanced blast composites // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2017. — V. 42, N 8. — P. 857–863. — DOI: 10.1002/prep.201700062.
14. **Mohamed A. K., Mostafa H. E., Elbasuney S.** Nanoscopic fuel-rich thermobaric formulations: Chemical composition optimization and sustained secondary combustion shock wave modulation // *J. Hazard. Mater.* — 2016. — V. 301. — P. 492–503. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.09.019.

15. **Maiz L., Trzciński W. A., Szala M., Paszula J. M., 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.
16. **Kline J. C., Mason B. P., Hooper J. P.** Energy release and fragmentation of brittle aluminum reactive material cases // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2021. — V. 46, N 8. — P. 1324–1333. — DOI: 10.1002/prop.202100014.
17. **Trzciński W., Barcz K.** Investigation of blast wave characteristics for layered thermobaric charges // *Shock Waves.* — 2012. — V. 22. — P. 119–127. — DOI: 10.1007/s00193-012-0357-z.
18. **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/prop.201300011.
19. **Hong X.-W., Li W.-B., Li W.-B., Xu H.-Y., Wang B.-L., 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.
20. **Котомин А. А., Козлов А. С., Душенюк С. А.** Детонационная способность энергоемких гетероциклических соединений // *Хим. физика.* — 2007. — Т. 26, № 12. — С. 5–7. — EDN: IBMRAV.
21. **Luo Y.-M., Shen F., Jiang Q.-L., Zhang M. M., Wang D.-J.** Driving performance and JWL EOS of DNTF charge with two densities // *Chin. J. Explos. Propell.* — 2021. — V. 44, N 2. — P. 175–180. — DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202002004.
22. **Chen K., Xiao W., Han Z., Huang W., Liu T., Zheng S., Wang B.** Effect of aluminum particle size on the explosion parameters of HMX-based thermobaric explosives in confined space // *Chin. J. Explos. Propell.* — 2020. — V. 43, N 3. — P. 298–302. — DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201909018.
23. **Zhang Y.-L., Li Z.-R., Jiang H.-Y., Zhai H.-B., Yuan J.-F., Zhong K.** Experimental study of the characteristics of internal explosion pressure and power of thermobaric explosive // *Acta Armamentarii.* — 2018. — V. 39, N 7. — P. 1333–1338. — DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.07.011.
24. **Xu Q. P., Li Z. R., Wang X. J., Su J. J., Liu Y., Huang F. L.** Оценка эффективности термобарических взрывчатых веществ в испытаниях в открытом и замкнутом пространстве // *Физика горения и взрыва.* — 2022. — Т. 58, № 1. — С. 104–117. — DOI: 10.15372/FGV20220110. — EDN: FFFSIB.
25. **Maiz L., Trzciński W. A., Paszula J.** Investigation of faired temperatures in confined thermobaric explosions // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2017. — V. 42, N 2. — P. 142–148. — DOI: 10.1002/prop.201600150.
26. **Feldgun V. R., Karinski Y. S., Edri I., Yankelevsky D. Z.** Prediction of the quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures // *Int. J. Impact Eng.* — 2016. — V. 90, N 5. — P. 46–60. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.12.001.
27. **Maiz L., Trzciński W. A., Paszula J.** Optical spectroscopy to study confined and semi-closed explosions of homogeneous and composite charges // *Opt. Laser. Eng.* — 2017. — V. 88. — P. 111–119. — DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.08.006.
28. **Shen F., Wang H., Luo Y.-M.** Detonation waveform and driving performance of a kind of coaxial binary composite charge // *Chin. J. Explos. Propell.* — 2018. — V. 41, N 6. — P. 588–593. — DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2018.06.010.
29. **Shen F., Luo Y.-M., Yu W.-L., Wang X.-J.** Experimental study on propagation characteristics of detonation wave of typical coaxial binary charges // *Chin. J. Explos. Propell.* — 2022. — V. 45, N 3. — P. 412–418. — DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202202002.

30. **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, N 2. — P. 2205–2212. — DOI: 10.1016/j.proci.2012.05.069.
31. **Duan X.-Y., Guo X.-Y., Jiao Q.-J., Zhao Q., Zhang J.-Y., Zhang Q.-M.** Effect of aluminum size and content on explosion performance of aluminized explosives in confined space // Chin. J. Energ. Mater. — 2017. — V. 25, N 6. — P. 472–478. — DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.06.005.

Поступила в редакцию 11.01.2024.

После доработки 22.02.2024.

Принята к публикации 15.05.2024.
