

УДК 662.2-391.4:544.454.3

ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО ПОРОШКА НА ДЕТОНАЦИОННЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

X.-C. Liu¹, X.-Y. Chen^{1,2}, Y.-M. Luo¹, F.-Y. Xu¹, X.-L. Wu¹,
F.-Q. Nan¹, X.-A. Wei¹, B.-B. Wang¹, D.-B. Liu¹

¹School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, dab63@vip.sina.com

²Sichuan Huachuan Industrial Co., LTD, Chengdu 610106, China, 835089150@qq.com

Знание энергосодержания в эмульсионных взрывчатых веществах с разным содержанием в них алюминиевого порошка позволит оперативно изменять их назначение с промышленного на военное и одновременно повышать энергетические характеристики устройств, в которых они используются. В зависимости от типа взрывчатого вещества и его энергосодержания можно выбрать подходящий сценарий его использования. Изучено влияние массового содержания алюминиевого порошка в эмульсионном взрывчатом веществе на скорость детонации, бризантность, характеристики подводных и воздушных взрывов. Результаты экспериментов показывают, что скорость детонации снижается с увеличением содержания алюминиевого порошка. При этом бризантность эмульсионного взрывчатого вещества сначала повышается, а затем уменьшается. Максимальное значение бризантности достигается при содержании алюминиевого порошка 20 %. Характеристики подводного взрыва по мере увеличения содержания алюминиевого порошка линейно возрастают. При содержании алюминиевого порошка 40 % общая энергия подводного взрыва увеличивается на 120 % по сравнению с эмульсионным взрывчатым веществом без алюминия. Наибольшее увеличение давления в ударной волне при воздушных взрывах достигается при содержании алюминиевого порошка 30 %.

Ключевые слова: эмульсионное взрывчатое вещество, содержание алюминиевого порошка, характеристики взрыва, энергосодержание.

DOI 10.15372/FGV2023.9418

EDN IAAUPW

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря низкой стоимости, хорошей энергоемкости и высокой степени безопасности эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ) являются широко используемыми промышленными взрывчатыми веществами (ВВ). С тех пор как алюминиевый порошок был впервые добавлен в ВВ в 1897 г., алюминийсодержащие ВВ получили широкое применение в авиационном и подводном оружии, полевых геологоразведочных работах, взрывных работах по твердым породам и в других областях. ЭВВ изготавливаются из эмульсии типа вода в масле, образующейся путем эмульгирования пересыщенного раствора окислителя (нитрата аммония) в масляной фазе при высоких скоростях сдвига [1–3]. Благодаря экономической эффективности, простоте изготовления и значительной энергетике они широко используются как в военной, так и в гражданской сфере. Проводятся исследования по улучшению ЭВВ путем модификации их состава для повышения энергосодержания [4, 5]. Обнаружено [6], что многочисленные инциденты, связанные с ЭВВ, происходят в результате нерегулируемого термического распада эмульсии нитрата аммония, промежуточного продукта

при производстве ЭВВ. Для исследования использовалось модифицированное испытание в вентилируемой трубе (MVPT) и дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC) в сочетании с калориметрией с ускорением (ARC). Температуры разложения нитрата аммония и ЭВВ, определенные методом MVPT, составили 146 и 144 °C соответственно, что значительно ниже значений, полученных методами DSC и ARC. Измерение температуры начала разложения методами DSC, ARC и MVPT показало ее снижение по мере постепенного увеличения размеров образцов. В [7] изучали влияние ионов Fe^{2+} на термическое поведение и стабильность ЭВВ при производстве и хранении. Результаты показали, что включение Fe^{2+} снижает температуру термического разложения и энергию активации ЭВВ. Кристалличность нитрата аммония возрастала с увеличением продолжительности хранения и содержания ионов двухвалентного железа. В [8] использовали DSC для определения начальных и максимальных температур при экзотермических реакциях разложения ЭВВ при различных скоростях нагрева. Кинетические характеристики реакции были рассчитаны с использованием методологии Киссинджера, в результате чего получены константы скорости реакции при температурах 120, 150 и 250 °C. В [9] исследовали влияние температуры эмульсионной матрицы и значений pH на сенсбилизацию ЭВВ при использовании пенообразователей. В [10] изучали механизм детонации ЭВВ, содержащих полые микробаллоны, в зарядах ограниченного диаметра, были установлены параметры, связывающие скорость детонации с характеристиками заряда. В [1] исследовали стабильность ЭВВ трех типов: насыпных, пакетированных и порошковых. Результаты экспериментов показали, что эмульгаторы, полученные из полиизобутиленсукцинимидов, при независимом использовании достигают хорошей динамической стабильности и текучести. Среди различных эмульгаторов полиизобутиленсукцинимид оказался наиболее подходящим для повышения стабильности упакованных ЭВВ. В [11] исследовали детонационные характеристики ЭВВ на основе нитрата аммония. Экспериментальным путем установлена связь критического диаметра с критической скоростью детонации и плотностью ЭВВ. Зависимость критического диаметра детонации от плотности (пористости) имеет U-образный вид.

В [12–14] изучали влияние высокоэнергетических добавок в ЭВВ, таких как металлические порошки, взрывчатые вещества и сплавы для хранения водорода (гидриды металлов), на повышение взрывной эффективности и функциональных возможностей ЭВВ. В [15] исследовали влияние порошка бора на детонационное поведение ЭВВ — температуру взрыва, параметры ударной волны и теплоту взрыва. Результаты экспериментов показали, что с увеличением массовой доли порошка бора от 0 до 20 % средняя температура, давление, положительный импульс и теплота взрыва ЭВВ сначала имеют тенденцию к увеличению, а затем к снижению. В [16] стремились разработать ВВ, подходящее для нанесения покрытия с помощью фольг методом сварки взрывом. Для снижения скорости детонации и критической толщины в эмульсионную матрицу наряду с порошком гексогена вводились полые стеклянные микробаллоны. Результаты показали, что по мере увеличения содержания гексогена критическая толщина ВВ значительно уменьшалась, в то время как скорость детонации вблизи критической толщины оставалась относительно постоянной. Более того, с увеличением содержания гексогена резко возросла сила действия смесового ВВ, что проявилось в увеличении энергоотдачи при подводных взрывах. В [17] разработано сенсбилизированное ЭВВ, содержащее MgH_2 , для решения проблем, связанных с неполной детонацией или горением. Установлено, что MgH_2 эффективно снижает чувствительность к давлению. В [18] для повышения детонационных характеристик ЭВВ в них вводили стеклянные микробаллоны, наполненные водородом. Экспериментальное исследование влияния давления водорода на детонационные характеристики ЭВВ показало, что прочность стеклянных микробаллонов, наполненных водородом, действует как

ограничивающий фактор на повышение детонационных характеристик ЭВВ. По сравнению с обычными ЭВВ максимальное давление ударной волны от ЭВВ с водородом при подводном взрыве увеличилось на 10.6 и 10.2 % на расстоянии от заряда соответственно 1.0 и 1.2 м. Максимальный положительный импульс также увеличился на 5.7 и 19.4 % на дистанциях 1.0 и 1.2 м соответственно.

Алюминиевый порошок широко применяется в химической промышленности и часто используется в пиротехнике в качестве добавки в ВВ для увеличения их энергосодержания [19–21]. В настоящее время проводятся ограниченные исследования характеристик энергосодержания ЭВВ с различным содержанием алюминиевого порошка. В [22] применили термодинамические принципы для расчета взрывного потенциала ЭВВ, наполненных алюминием, и тщательно изучили влияние алюминиевого порошка на параметры ВВ. В [10] исследовали изменение скорости детонации и плотности ЭВВ при увеличении содержания алюминия в ЭВВ от 0 до 20 %. В целом в работах по изучению алюминизированных ЭВВ прежде всего уделяли внимание отдельным видам реализации их энергии, таким как скорость детонации [23], часто пренебрегая всесторонним анализом или расчетами путей выхода энергии высокоэнергетических ЭВВ. В данном исследовании для высокоэнергетических ЭВВ, полученных путем добавления в них разного количества алюминиевого порошка, выполнена оценка параметров бризантности, энергии ударной волны и энергии пузыря при подводном взрыве и параметров избыточного давления при взрыве в воздухе. В экспериментах определяли скорость детонации, бризантность (испытание на сжатие свинцового цилиндра), характеристики подводного взрыва и взрыва в воздухе.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

1.1. Материал

Использовались следующие материалы: нитрат аммония (техническая чистота), поставляемый Sichuan Meifeng Chemical Technology Co., Ltd.; нитрат натрия, предоставленный Wuxi Fuyou Chemical Co., Ltd.; Span-80, полученный на нефтехимическом заводе Цзянсу Хайан; соевый лецитин производства Shanghai Mclean Biochemical Technology Co., Ltd; сферический алюминиевый порошок со средним размером частиц 10 мкм, полученный от Jiangsu Zhiren Jingxing New Material Research Institute Co., Ltd; полые стеклянные микросферы K20, доступные от 3M China Co., Ltd; вспененный перлит, предоставленный Yongxin Perlite; композитная масляная фаза, поставляемая Nanling Chemical Group Co., Ltd.

1.2. Приготовление ЭВВ, содержащего алюминиевый порошок

Состав используемого в работе ЭВВ представлен в табл. 1. Процедура приготовления следующая. Нитрат аммония, нитрат натрия и воду взвешивали и нагревали до 110 °С

Таблица 1

Состав эмульсионной матрицы					
Содержание, % (мас.)					
НА	НН	Span-80	Соевый лецитин	Масляная фаза	Вода
73.8	9.2	1.52	0.65	4.33	10.5

Примечания. НА — нитрат аммония, НН — нитрат натрия.

для получения водной фазы эмульсии. Композитную масляную фазу, соевый лецитин и Span-80 взвешивали и нагревали до 105 °С для образования масляной фазы. Температуру эмульгирования контролировали на уровне 100 °С. Водную фазу медленно и с равномерной скоростью добавляли к масляной фазе, одновременно проводили перемешивание со скоростью 1600 об/мин. После 4-минутного перемешивания процесс эмульгирования завершался. Образовавшуюся эмульсионную матрицу охлаждали до 60 °С. После этого в матрицу добавляли физические сенсибилизаторы, чтобы придать ей чувствительность к инициированию детонатором [24, 25].

Природа и количество физического сенсибилизатора существенно влияют на характеристики детонации. Чтобы оценить их влияние на скорость детонации и чувствительность к ударно-волновому воздействию, были приготовлены ЭВВ с добавлением вспененного перлита с массовым содержанием 0.5, 1, 2, 4, 8, 10, 12 и 15 %, а также полых стеклянных микробаллонов с массовым содержанием 0.5, 1, 2, 4 и 8 %.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

2.1. Микроморфология

Наблюдение за ЭВВ проводилось с помощью оптического микроскопа XSP-13C от Shanghai Batuo Instrument Co., Ltd. Исследовали структуру ЭВВ типа вода в масле.

Для этой процедуры образец массой 0.1 г помещали на предметное стекло. Для разбавления образца вводили 3–4 капли ацетона и равномерно распределяли смесь с помощью стеклянной палочки. Затем на образец помещали покровное стекло и устанавливали оптический микроскоп на увеличение в 400 раз, чтобы исследовать морфологию образца. Это позволило детально изучить водно-масляную структуру ЭВВ.

2.2. Скорость детонации

Подготовленные образцы ВВ помещали в трубку из воловьей бумаги с внутренним диаметром 32 мм. Использовались контактные датчики проволочного типа диаметром 0.12 ÷ 0.15 мм с медной жилой. Датчики срабатывали при замыкании их детонационной волной. Расстояние между датчиками составляло 50 мм. Измеритель скорости детонации взрывчатых веществ S9601A регистрировал сигналы от датчиков с точностью 0.1 мкс. Для инициирования ВВ использовался капсуль-детонатор. Измеритель скорости определял временной интервал между сигналами, полученными двумя датчиками, что позволяло рассчитать среднюю скорость детонации на данном участке [26]. Подробная процедура этого тестирования изображена на рис. 1.

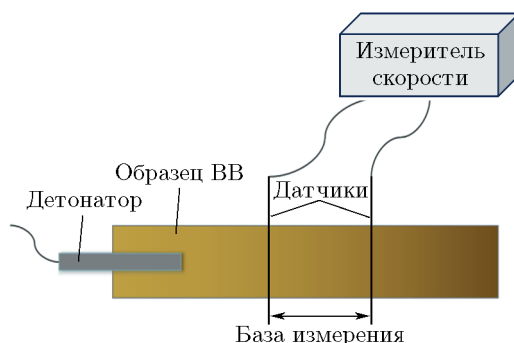


Рис. 1. Принципиальная схема измерения скорости детонации взрывчатого вещества

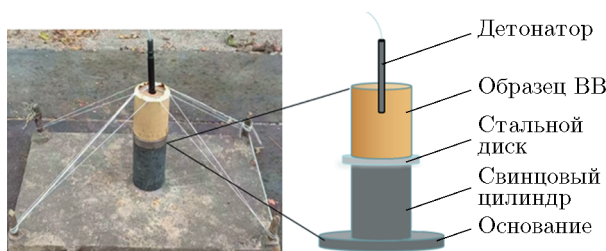


Рис. 2. Принципиальная схема испытания взрывчатого вещества на брыззантность

2.3. Брыззантность

Брыззантность характеризуется величиной, на которую при взрыве ВВ сжимался свинцовый столб диаметром 40 мм и начальной высотой $h_0 = 60$ мм [16, 27]. Экспериментальная сборка перед проведением теста на брыззантность показана на рис. 2. Образец ВВ массой 50 ± 1 г взвешивался и загружался в бумажную цилиндрическую оболочку диаметром 40 мм. Между бумажной оболочкой и свинцовым столбом помещалась стальная шайба диаметром 40 мм и высотой 10 мм для обеспечения равномерного распространения энергии взрывной ударной волны к свинцовому столбу. Капсюль-детонатор вставлялся в образец ВВ в верхней части и закреплялся скотчем. После взрыва измеряли высоту свинцового цилиндра в четырех точках и рассчитывали среднее значение, обозначаемое h_1 .

2.4. Измерение энергии подводного взрыва

Измерение энергии подводного взрыва проводилось в цилиндрическом резервуаре с водой диаметром 8.0 м и глубиной 8.0 м. Использовался подводный датчик давления РСВ138А10 (РСВ Piezotronics, США) с диапазоном измерения 68 950 кПа и чувствительностью 0.073 мВ/кПа ($\pm 15\%$). Образец ВВ и датчик погружали в воду на глубину 4.0 м. Датчик располагался горизонтально на расстоянии 2.5 м от центра взрыва. Образец ЭВВ цилиндрической формы с отношением высоты к диаметру, близким к 1, имел массу 200 г. Промышленный детонатор инициировал промежуточный заряд ВВ, который передавал детонацию в образец ЭВВ. Масса промежуточного заряда 10 г, диаметр 20 мм и высота 20 мм. Схема эксперимента показана на рис. 3.

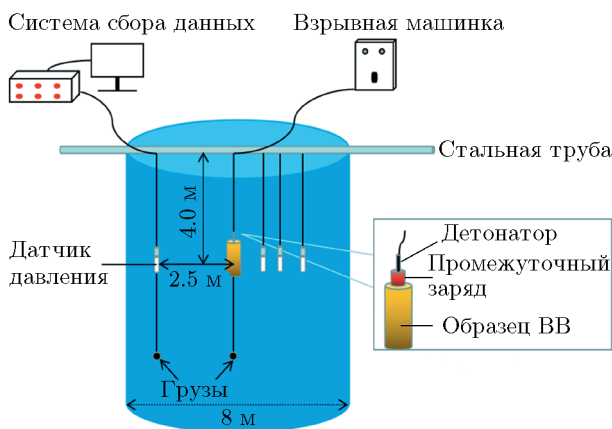


Рис. 3. Схема эксперимента по измерению энергии взрыва при подводном испытании

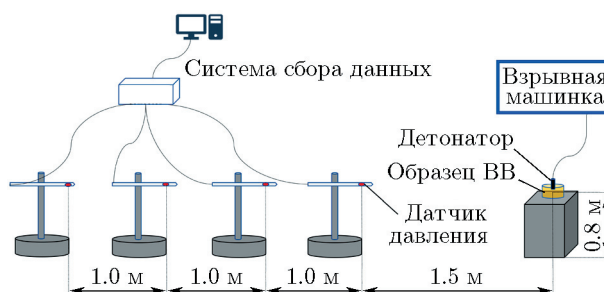


Рис. 4. Схема эксперимента при взрыве в воздухе

2.5. Измерение избыточного давления при взрыве в воздухе

Эксперимент по измерению давления воздушной ударной волны при взрыве заряда ЭВВ в воздухе проводился на открытой площадке, схема показана на рис. 4. Образец ЭВВ массой 200 г помещался в бумажный стаканчик с отношением высоты к диаметру около 1. Стаканчик располагался на стойке высотой 0,8 м над землей. Датчики давления находились на расстоянии 1,5, 2,5, 3,5 и 4,5 м от заряда параллельно земле. Использовались датчики динамического давления производства РСВ Piezotronics, модель 113В21, диапазон измеряемого давления $0 \div 6,9$ МПа, чувствительность 1,45 мВ/кПа.

При инициировании ВВ образовавшаяся в результате взрыва ударная волна вызывает интенсивное сжатие окружающего воздуха. Когда фронт ударной волны достигает датчика давления, чувствительный элемент датчика деформируется. Напряжение с чувствительного элемента усиливается и передается на регистрирующую аппаратуру. Осциллограф отображает полученный сигнал в виде кривой напряжение — время. Система сбора данных обрабатывает эту информацию и автоматически выдает результат в виде зависимости давления от времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Микроструктура ЭВВ, содержащих алюминий

Для изучения микроструктуры ЭВВ использовался оптический микроскоп. На рис. 5 приведены фотографии образцов ЭВВ с различным содержанием алюминиевого порошка.

Как показали наблюдения, увеличение содержания алюминиевого порошка вызывает изменения в водно-масляной структуре эмульсии. Примечательно, что при содержании алюминиевого порошка 40 % становятся очевидно заметными затененные области. Это объясняется разрушительным влиянием избыточного количества алюминиевого порошка на структурную целостность эмульсии. Алюминий взаимодействует как физически, так и химически с водной фазой, что приводит к образованию оксидного слоя на поверхности алюминиевого порошка. В результате структура вода в масле разрушается и происходит слияние капель водного раствора.

3.2. Влияние физических сенсibilизаторов на скорость детонации

Для повышения энергетического потенциала и функциональных свойств ЭВВ решающее значение имеет выбор соответствующих сенсibilизаторов. Сенсibilизаторы создают во фронте детонационной волны горячие точки, в которых ЭВВ могут воспламеняться, что повышает чувствительность ВВ при инициировании. Результаты измерения скорости детонации для различных физических сенсibilизаторов представлены в табл. 2, из

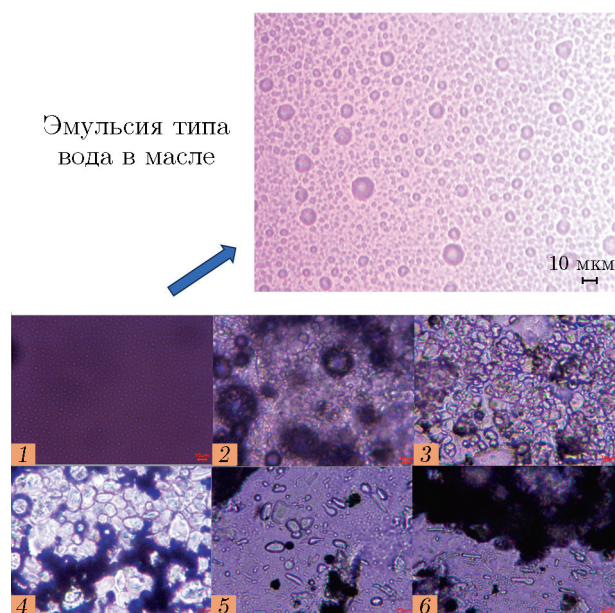


Рис. 5. Фотографии ($\times 400$) ЭВВ без алюминиевого порошка (1) и с его содержанием 5 % (2), 10 % (3), 20 % (4), 30 % (5), 40 % (6)

Таблица 2

Результаты измерения плотности и скорости детонации заряда ЭВВ диаметром 32 мм с различными типами сенсibilизаторов

Сенсibilизатор, %	D , м/с		ρ , г/см ³	
	Вспененный перлит	СМ	Вспененный перлит	СМ
0.5	Отказ		1.18	1.18
1	2874	4348	1.17	1.17
2	3521	5477	1.15	1.16
4	3788	5128	1.1	1.08
8	3906	4425	1.03	1.01
10	4032	—	0.99	—
12	3571	—	0.91	—
14	3030	—	0.88	—

Примечания. D — скорость детонации, ρ — плотность ЭВВ, СМ — стеклянные микробаллоны.

которой видно, как различное массовое содержание вспененного перлита и стеклянных микробаллонов влияет на скорость детонации ЭВВ. Поскольку на скорость сильно влияет не только количество сенсibilизатора, но и диаметр заряда [28], следует учитывать, что представленные в таблице закономерности скорости детонации получены в зарядах фиксированного диаметра (32 мм). При массовой доле 0.5 % как вспененного перлита, так и стеклянных микробаллонов детонация в ЭВВ не распространяется из-за недостатка горячих точек [24, 29]. При увеличении содержания сенсibilизатора скорость детонации ЭВВ вначале возрастает. Это происходит потому, что с ростом количества сенсibilизатора растет количество горячих точек, а также уменьшается плотность ЭВВ. Однако далее при избыточном увеличении количества сенсibilизатора уменьшение плотности

ЭВВ вызывает непрерывное снижение скорости детонации. При использовании в качестве сенсibilизатора вспененного перлита в количестве 10 % скорость детонации ЭВВ достигает максимального значения 4032 м/с. При использовании в качестве сенсibilизатора стеклянных микробаллонов максимальная скорость детонации составляет 5477 м/с при содержании микросфер 2 %.

3.3. Влияние содержания алюминиевого порошка на плотность заряда и скорость детонации

После экспериментов с различными типами и количествами сенсibilизаторов нами выбраны в этом исследовании в качестве сенсibilизатора стеклянные микробаллоны в количестве 2 %. Проведены оценки плотности и скорости детонации ЭВВ с одержанием алюминиевого порошка 0.5, 10, 20, 30 и 40 %, результаты представлены в табл. 3. Кислородный баланс ЭВВ рассчитывался по формуле

$$ОВ = \frac{c - 2a - b/2}{M} \times 16, \quad (1)$$

где c — молярное количество кислорода, a — молярное количество углерода, b — молярное количество водорода в ВВ, M — относительная молекулярная масса ВВ; 16 — относительная молекулярная масса кислорода. Кислородный баланс воды равен нулю.

При увеличении содержания алюминиевого порошка от 0 до 40 % скорость детонации снижается с 5476 м/с (для ЭВВ без добавок) до 4672 м/с (для ЭВВ с содержанием алюминиевого порошка 40 %), что соответствует уменьшению на 14.68 %. По мере того, как алюминиевый порошок постепенно вводится в ЭВВ, он систематически снижает кислородный баланс ВВ, сдвигая его почти с нулевого состояния до -0.3625 . Такое значительное уменьшение кислородного баланса приводит к неполным реакциям во время детонации, что снижает скорость детонации. Кроме того, с увеличением содержания алюминиевого порошка уменьшается количество аммиачной селитры и газовых продуктов, образующихся при детонации. В процессе детонации алюминизированных ЭВВ алюминиевый порошок незначительно участвует в реакциях до поверхности Чепмена — Жуге. Подобно инертным веществам, он может даже поглощать некоторое количество тепла, тем самым уменьшая общую энергию ударной волны. Из рис. 6 видно, что скорость детонации последовательно снижается линейным образом с увеличением содержания алюминиевого порошка.

Рис. 7 иллюстрирует влияние содержания алюминиевого порошка на плотность заряда, установлена соответствующая формула зависимости посредством линейного регрессионного анализа. При добавлении в ЭВВ алюминиевого порошка в количестве 40 % плотность ЭВВ увеличивается с 1.16 до 1.51 г/см³, что соответствует росту на 37.27 %. Таким образом, алюминиевый порошок выступает в качестве не только высокоэнергетической добавки, но и регулятора плотности, которую можно настраивать в зависимости от условий практического применения ЭВВ.

Таблица 3

Скорость детонации, плотность и кислородный баланс ЭВВ
с различным содержанием алюминиевого порошка

Al, %	D , м/с	ρ , г/см ³	ОВ, г/г	Al, %	D , м/с	ρ , г/см ³	ОВ, г/г
0	5476	1.16	-0.0109	20	5004	1.31	-0.1872
5	5360	1.17	-0.0549	30	4762	1.43	-0.2746
10	5321	1.22	-0.0988	40	4673	1.51	-0.3625

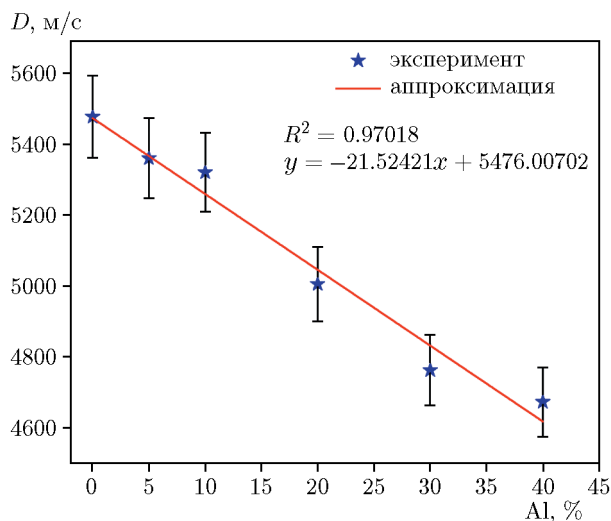


Рис. 6

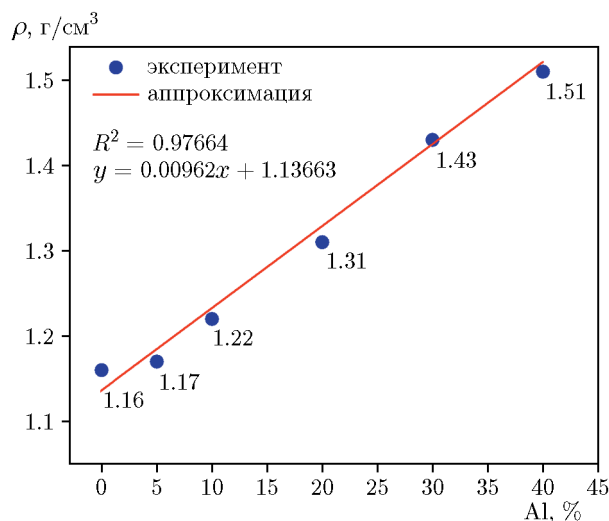


Рис. 7

Рис. 6. Зависимость скорости детонации ЭВВ от содержания алюминиевого порошка

Рис. 7. Связь между содержанием алюминиевого порошка в ЭВВ и плотностью

3.4. Бризантность

Испытания на бризантность проводились с ЭВВ, содержащими алюминиевый порошок в количестве 0, 5, 10, 20, 30 и 40 %. Результаты воздействия алюминизированного ЭВВ на свинцовый цилиндр представлены на рис. 8. Чтобы точно оценить величину бризантности, использовалась следующая формула [16]:

$$\alpha = \frac{\Delta h}{h_0 - \Delta h}, \quad (2)$$

где α — коэффициент сжатия, Δh — величина сжатия свинцового столбца ($h_0 - h_1$).

Результаты экспериментов, приведенные на рис. 9, показывают, что при содержании алюминиевого порошка в ЭВВ 5 и 10 % бризантность несколько снижается и остается относительно постоянной. При содержании алюминиевого порошка 20 % бризантность достигает максимального значения: $\Delta h = 22.71$ мм. При содержании алюминиевого порошка 30 и 40 % значение Δh не увеличивается, но все же больше, чем у ЭВВ без алюминиевого порошка. Таким образом, можно сделать вывод, что в определенном диапазоне содержания алюминиевого порошка бризантность ЭВВ может повышаться, что усиливает выделение химической энергии в процессе детонации.

3.5. Подводный взрыв

На рис. 10 показаны профили давления, записанные при подводных взрывах образцов ЭВВ. При детонации под водой давление во фронте ударной волны быстро достигает максимального значения и затем почти экспоненциально уменьшается до гидростатического давления [30]. Такое поведение можно описать уравнением [31]

$$p(t) = p_m \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right), \quad (3)$$

где $p(t)$ — изменение во времени давления за фронтом ударной волны, МПа; p_m — максимальное давление в ударной волне, МПа; θ — постоянная времени, указывающая интервал

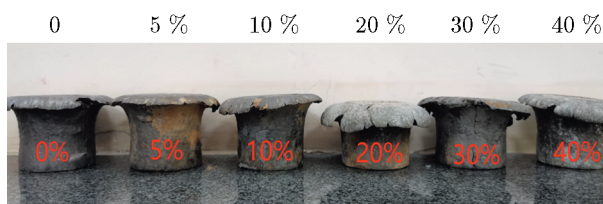


Рис. 8. Результаты воздействия алюминизированного ЭВВ на свинцовый цилиндр

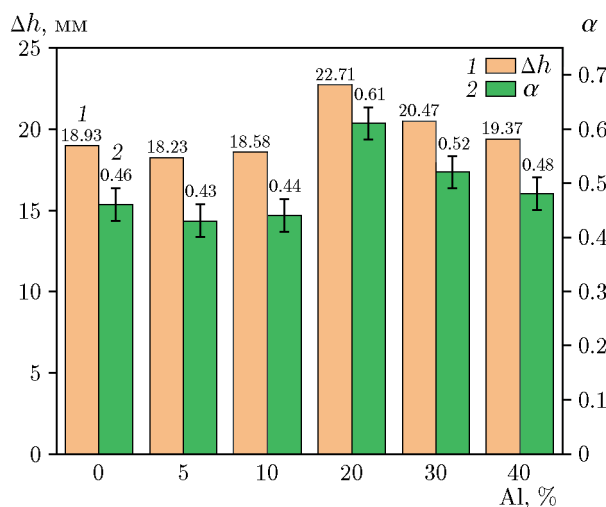


Рис. 9. Бризантность ЭВВ с различным содержанием алюминиевого порошка

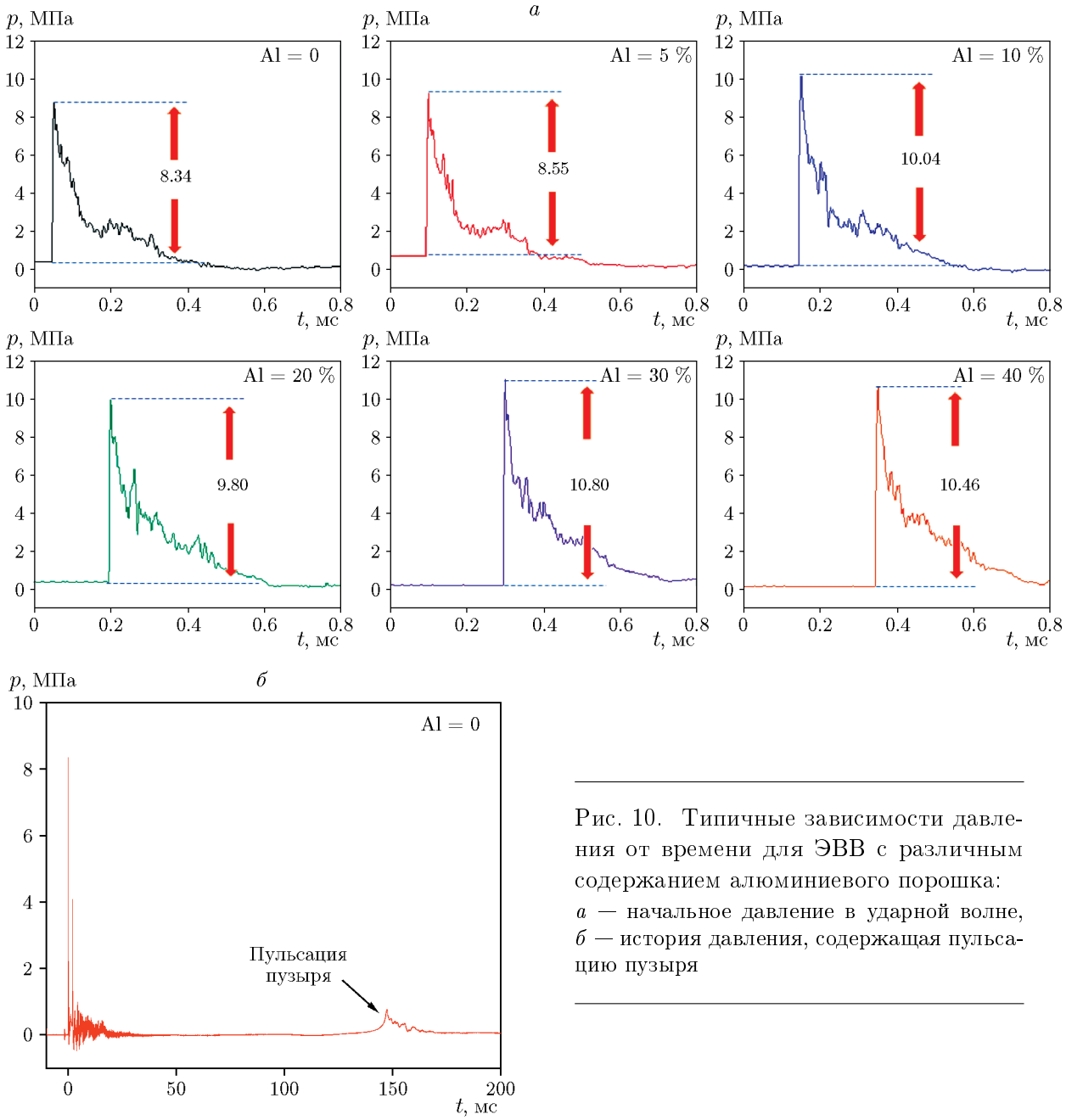
времени, необходимый для того, чтобы давление в ударной волне уменьшилось в e раз. Эффективная энергия ударной волны, вырабатываемая на единицу массы ВВ, определяется выражением [31]

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

где R — расстояние от центра заряда до места расположения датчика давления, м; ω — масса заряда ВВ, кг; ρ_0 — плотность воды, кг/м³; c_0 — скорость звука в воде, м/с.

Величины максимального избыточного давления p_m , а также рассчитанные по формуле (4) значения энергии ударной волны E_s представлены в табл. 4. По сравнению с ЭВВ без добавления алюминиевого порошка, максимальное избыточное давление ударных волн в алюминийсодержащих ЭВВ увеличилось. При содержании алюминиевого порошка 30 % пиковое давление ударной волны является самым высоким. Аналогичным образом, энергия ударной волны, рассчитанная по избыточному давлению, повышается с ростом содержания алюминия. Видно, что при содержании алюминиевого порошка в ЭВВ 30 % рост энергии ударной волны достигает порога, при котором дальнейшее добавление алюминиевого порошка не оказывает положительного влияния на энергию ударной волны.

На рис. 11 изображена часть зависимости давления от времени, соответствующая пульсации пузырей, генерируемых подводными взрывами. Давление пульсации пузыря существенно ниже давления ударной волны, но его продолжительность достаточно сильно превышает длительность ударной волны. Значительная продолжительность импульса играет решающую роль в нанесении ущерба целям. Формула для расчета энергии пузыря



выглядит следующим образом [31]:

$$E_b = \frac{0.675 p_0^{\frac{5}{2}}}{\omega \rho_0^{\frac{3}{2}}} T_b^3, \quad (5)$$

где p_0 — статическое давление воды, Па, T_b — период пульсации пузыря, с.

Полная энергия (E_u) подводного взрыва включает в себя энергию ударной волны (E_s) и энергию пузыря (E_b) в предположении пренебрежимо малых потерь энергии при распространении волны:

$$E_u = E_s + E_b. \quad (6)$$

Таблица 4

Al, %	p_m , МПа	E_s , МДж/кг	T_b , с	E_b , МДж/кг	E_u , МДж/кг
0	8.34	0.56	0.147	2.44	3.00
5	8.55	0.59	0.153	2.66	3.25
10	10.04	0.68	0.162	3.28	3.96
20	9.60	0.75	0.178	4.36	5.11
30	10.80	0.87	0.186	4.91	5.78
40	10.46	0.88	0.195	5.72	6.6
TNT	8.55	0.60	0.136	2.57	3.08

Результаты расчета энергии пульсации пузыря при подводном взрыве ЭВВ с различным содержанием алюминиевого порошка представлены в табл. 4.

С увеличением массовой доли алюминиевого порошка в ЭВВ заметно увеличивается и период пульсации подводного пузыря: с 147 мс для ЭВВ без добавок до 195 мс для ЭВВ, содержащего 40 % алюминиевого порошка, что больше начального значения на 32.60 %. Это явление в первую очередь связано с немгновенным характером реакции алюминиевого порошка внутри ВВ. Часть алюминиевого порошка вступает во вторичные реакции, увеличивая время реакции и период пульсации пузыря. Более того, определенные части алюминиевого порошка непосредственно реагируют с водой, что продлевает пульсацию пузырей и еще больше увеличивает период.

Влияние алюминиевого порошка на энергетические параметры подводного взрыва ЭВВ иллюстрирует рис. 12. С увеличением содержания алюминиевого порошка различные параметры подводного взрыва ЭВВ линейно растут, достигая максимальных значений при содержании порошка 40 %. Примечательно, что увеличение энергии подводного взрыва в ЭВВ с повышенным содержанием алюминиевого порошка обусловлено прежде всего увеличением энергии пульсаций.

На рис. 13 представлено сравнение энергии подводного взрыва тротила и алюми-

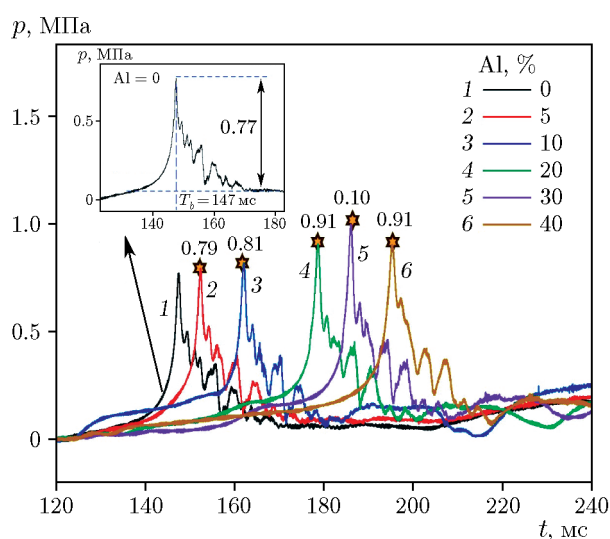


Рис. 11. Профиль давления, регистрируемый при пульсации пузыря при подводном взрыве ЭВВ с различным содержанием алюминиевого порошка (на врезке — давление пульсации пузыря)

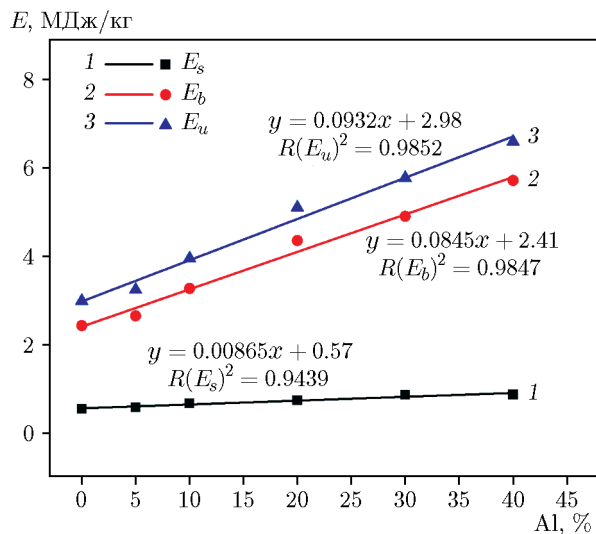


Рис. 12

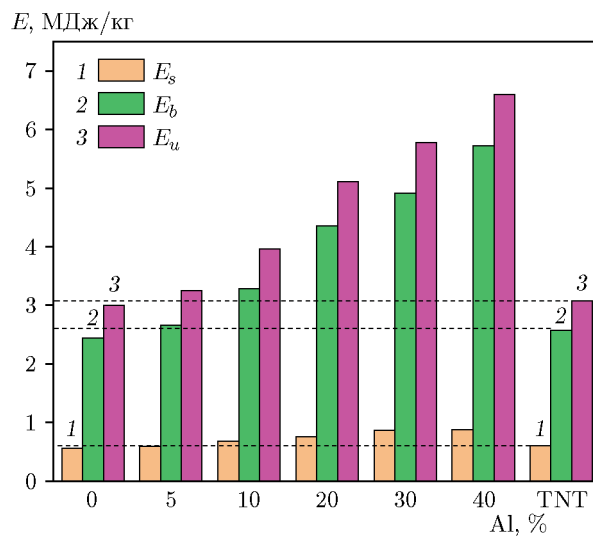


Рис. 13

Рис. 12. Результаты определения энергетических параметров подводного взрыва ЭВВ с добавлением алюминиевого порошка (точки — эксперимент, линии — аппроксимация)

Рис. 13. Результаты оценки энерговыделения различных алюминизированных ЭВВ при подводном взрыве

зированных ЭВВ. На графике ясно видно, что включение алюминиевого порошка значительно повышает энергетические характеристики ЭВВ. При содержании алюминиевого порошка 5 % полная энергия подводного взрыва достигает 3.25 МДж/кг, что немного выше, чем у тротила. При содержании алюминиевого порошка 40 % энергия подводного взрыва достигает 6.6 МДж/кг, что в 2.14 раза превышает тротильный эквивалент. Это подчеркивает потенциал алюминийсодержащих ЭВВ, как жизнеспособной альтернативы тротилу в различных условиях применения.

3.6. Измерение давления ударной волны при взрыве в воздухе

На рис. 14 показаны профили измеренного избыточного давления в ударной волне, генерированной воздушными взрывами зарядов ЭВВ с различным содержанием алюминиевого порошка (результаты обобщены в табл. 5).

Из рис. 14 и табл. 5 становится очевидным, что содержание алюминиевого порошка существенно влияет на максимальное избыточное давление (p_m) ударной волны, исходящей от взрыва ЭВВ. Эта тенденция выделения энергии согласуется с предыдущими наблюдениями. При содержании алюминиевого порошка 5 % максимальное избыточное давление на расстоянии 1.5 м составляет 56.79 кПа, что несколько ниже, чем у безалюминиевого ЭВВ. Это снижение объясняется относительно ограниченной долей алюминиевого порошка в этой композиции. Как следствие, алюминиевый порошок легко реагирует с водой внутри ЭВВ, образуя оксидный слой. Этот оксидный слой препятствует участию алюминиевого порошка в реакции, что приводит к задержке энерговыделения и расходу энергии на алюминий как на инертный материал.

С увеличением содержания алюминиевого порошка максимальное избыточное давление в ударной волне заметно растет и достигает максимального значения 113.28 кПа (1.5 м от заряда) при содержании алюминия в ЭВВ 30 %. Это давление на 78 % больше, чем у ЭВВ без алюминия. Такое повышение возникает из-за того, что по мере расширения продуктов взрыва алюминиевый порошок начинает участвовать в реакции (о чем

Таблица 5

Максимальное избыточное давление ударной волны при взрыве в воздухе
ЭВВ (200 г) с различным содержанием алюминиевого порошка

Al, %	p_m , кПа, на расстоянии				Al, %	p_m , кПа, на расстоянии			
	1.5 м	2.5 м	3.5 м	4.5 м		1.5 м	2.5 м	3.5 м	4.5 м
0	63.64	25.55	16.39	10.94	20	86.88	32.17	19.00	12.47
5	56.79	23.95	15.59	11.12	30	113.28	40.39	23.03	15.55
10	66.82	29.30	17.64	12.12	40	111.76	38.90	23.47	16.66

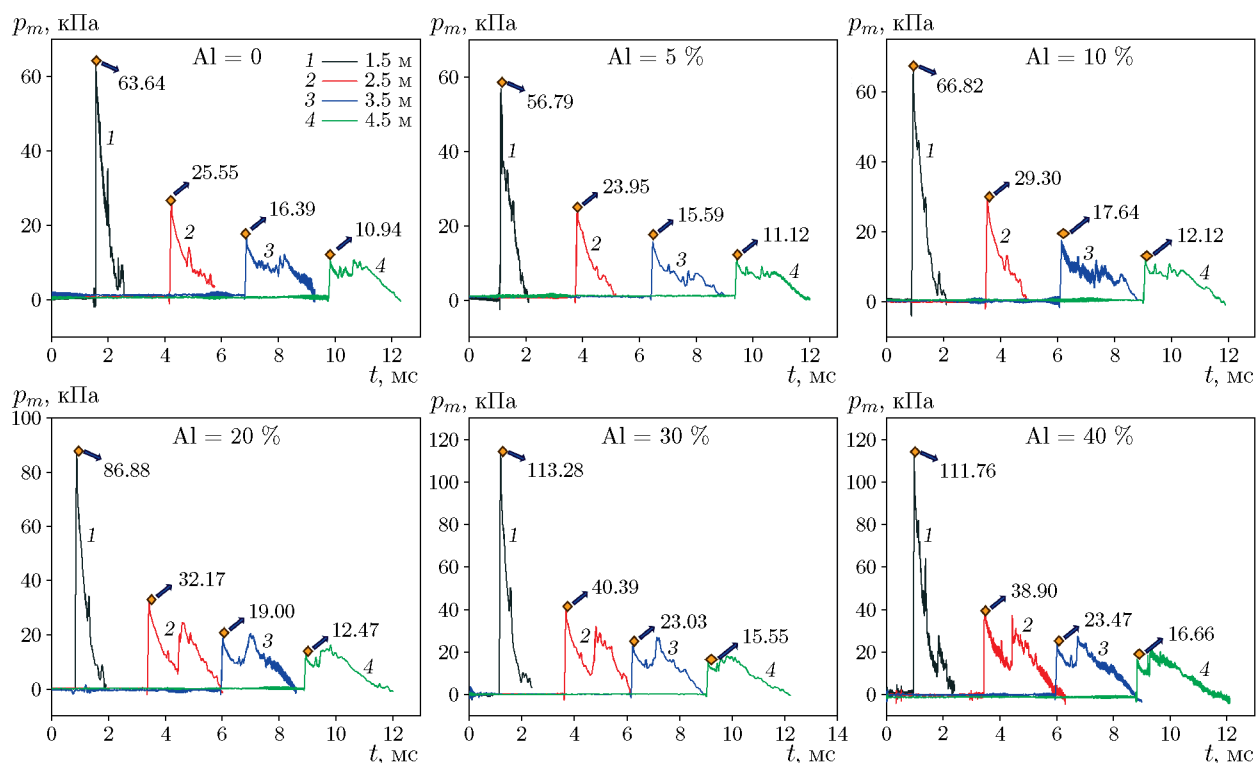


Рис. 14. Избыточное давление в ударной волне, возникающей при воздушном взрыве ЭВВ с различным содержанием алюминиевого порошка

также свидетельствует увеличение периодов пульсаций и энергии пузырей при подводных взрывах). Эта реакция поддерживает высокое давление в продуктах детонации ЭВВ.

При массовой доле алюминиевого порошка больше 30 % наблюдается умеренная тенденция к снижению максимального избыточного давления. Это обусловлено тем, что эмульсионная матрица может полностью реагировать с алюминиевым порошком до массовой доли алюминия 30 %. Алюминиевый порошок сверх 30 % действует как инертный материал и не участвует в реакции. Следовательно, включение алюминиевого порошка в количестве более 30 % нецелесообразно.

Уравнение аппроксимации величин максимального избыточного давления в ударной волне в зависимости от пройденного ею пути описывается известным законом для воздушных взрывов [32]:

$$p_m = a \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right) + b \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right)^2 + c \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right)^3, \quad (7)$$

Таблица 6

Коэффициенты в формуле (7) аппроксимации максимального избыточного давления зарядов алюминизированных ЭВВ и гексогена

Тип ВВ	a	b	c
Гексоген	87.9	402.3	321.81
ЭВВ, Al = 0	73.36	48.08	463.55
ЭВВ, Al = 5 %	81.42	−16.72	461.88
ЭВВ, Al = 10 %	52.95	318.08	−40.29
ЭВВ, Al = 20 %	67.05	161.69	604.02
ЭВВ, Al = 30 %	84.19	155.15	951.45
ЭВВ, Al = 40 %	131.18	−217.06	1 570.89

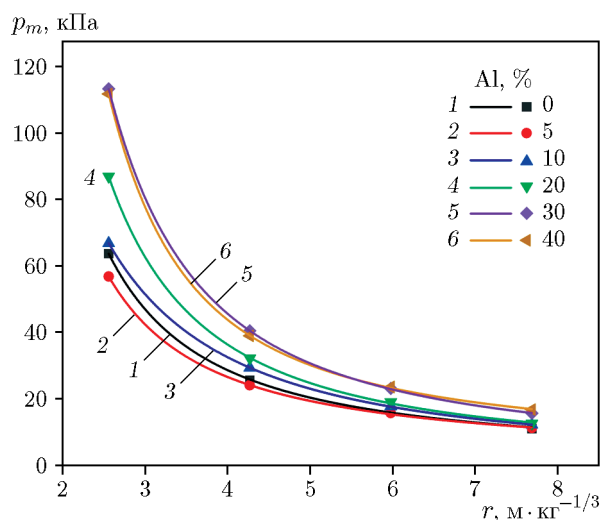


Рис. 15. Аппроксимация (линии) данных экспериментов (точки) по зависимости максимального избыточного давления от расстояния до взрыва ЭВВ с различным содержанием алюминиевого порошка

где a , b , c — неопределенные коэффициенты, R — расстояние от центра взрыва до точки измерения давления, w — масса заряда ВВ. Параметры уравнения (7) для зарядов ЭВВ с различным содержанием алюминиевого порошка и для заряда гексогена массой 200 г представлены в табл. 6. Аппроксимация экспериментальных данных для изученных составов алюминизированных ЭВВ согласно уравнению (7) показана на рис. 15.

Для зарядов ЭВВ с различным содержанием алюминиевого порошка были рассчитаны величины гексогенового эквивалента: 0.32, 0.30, 0.41, 0.53, 0.81, 0.79 при содержании Al в ЭВВ соответственно 0, 5, 10, 20, 30, 40 %. Эти значения получены следующим образом. В формулу (7) с параметрами гексогена подставлялись значения максимального избыточного давления, измеренного для ЭВВ. Далее подбиралась соответствующая масса гексогена (w_1), при которой экспериментальные данные описывались наилучшим образом. Значения гексогенового эквивалента определены как отношение массы w_1 к массе гексогена, равной массе ЭВВ в эксперименте ($w_{\text{РДХ}} = 200$ г).

ВЫВОДЫ

Для исследования влияния содержания алюминиевого порошка на детонационные характеристики ЭВВ к эмульсионным взрывчатым веществам добавляли алюминиевый

порошок в массовых пропорциях от 0 до 40 %. Экспериментальным способом, включая измерение скорости детонации, бризантности, характеристик подводного и воздушного взрыва, определено влияние массового содержания алюминиевого порошка на детонационные характеристики алюминизированных ЭВВ. На основании данного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Сенсibiliзирующее действие стеклянных микробаллонов превосходит действие вспененного перлита. Оптимальное содержание стеклянных микробаллонов в ЭВВ составляет 2 %. При увеличении массовой доли алюминиевого порошка в ЭВВ от 0 до 40 % плотность ЭВВ увеличивается с 1.16 до 1.51 г/см³. При этом скорость детонации монотонно снижается с 5476 до 4672 м/с, что соответствует уменьшению на 14.68 %.

2. Бризантность ЭВВ остается практически постоянной при увеличении содержания алюминиевого порошка от 0 до 10 %. При содержании алюминиевого порошка 20 % бризантность достигает своего максимального значения, увеличиваясь примерно на 20 % по сравнению с ЭВВ без добавления алюминия. Увеличение массовой доли алюминиевого порошка от 20 до 40 % приводит к плавному уменьшению бризантности.

3. Повышение массового содержания алюминиевого порошка в ЭВВ до 40 % приводит к увеличению полной энергии подводных взрывов ЭВВ с 3.07 до 6.77 МДж/кг, что соответствует росту на 120.7 %. Общее энерговыделение при подводном взрыве ЭВВ достигает своего максимума, когда содержание в нем алюминиевого порошка составляет 40 %.

4. Максимальное избыточное давление при воздушных взрывах достигается при содержании алюминиевого порошка в ЭВВ 30 %. Рост давления при этом составляет 78 %. Увеличение содержания алюминиевого порошка до 40 % существенно не меняет величину регистрируемых давлений, что указывает на достижение порогового значения массового содержания алюминия.

Авторы выражают благодарность В.-В. Wang за помощь в проведении экспериментов и D.-В. Liu за ценное обсуждение.

Вклад авторов: X.-C. Liu — формальный анализ, написание и подготовка черновика, визуализация; X.-Y. Chen и X.-A. Wei — концептуализация, методология; Y.-M. Luo и F.-Y. Xu — написание, рецензирование и редактирование; X.-L. Wu, В.-В. Wang и X.-A. Wei — ресурсы; D.-В. Liu и F.-Q. Nan — надзор, финансирование приобретения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке National Natural Science Foundation of China (No 22305123).

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang K., Cui Z., Chen X., Zhao H. Peculiarity for the stability of three different emulsion explosives // J. Dispersion Sci. Technol. — 2022. — V. 43, N 11. — P. 1725–1734. — DOI: 10.1080/01932691.2021.202088.
2. Cao X., Yang X., Zhang L. Conversion of dual-use technology: A differential game analysis under the civil-military integration // Symmetry. — 2020. — V. 12, N 11. — 1861. — DOI: 10.3390/sym12111861.
3. Zolfaghari R., Fakhru'l-Razi A., Abdullah L. C., Elnashaie S. S. E. H., Pendashteh A. Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry // Sep. Purif. Technol. — 2016. — V. 170. — P. 377–407. — DOI: 10.1016/j.seppur.2016.06.026.
4. Al-Sabagh A. M., Hussien M. A., Mishrif M. R., El-Tabey A. E., Elawady A. A. A. Preparation and investigation of emulsion explosive matrix based on gas oil for mining process // J. Mol. Liq. — 2017. — V. 238. — P. 198–207. — DOI: 10.1016/j.molliq.2017.04.085.

5. **Wang Y., Wang X.** Crystallization of interphase droplets in emulsion explosive matrices // *J. Dispersion Sci. Technol.* — 2017. — V. 38, N 10. — P. 1483–1488. — DOI: 10.1080/01932691.2016.1255954.
6. **Wu Q., Tan L., Xu S., Liu D., Min L.** Study on thermal decomposition characteristics of ammonium nitrate emulsion explosive in different scales // *J. Energ. Mater.* — 2018. — V. 36, N 2. — P. 202–210. — DOI: 10.1080/07370652.2017.1343408.
7. **Xie X.-H., Feng Y.-Q., Liu S.-H., Zhu J.** Thermal behavior and stability of emulsion explosives in the presence of ferrous ion // *J. Therm. Anal. Calorim.* — 2020. — V. 139. — P. 999–1006. — DOI: 10.1007/s10973-019-08494-0.
8. **Ma Z., Wang J.** Thermal decomposition of emulsion explosives // *Chin. J. Energ. Mater.* — 2004. — V. 12, N 5. — P. 294–296. — URL: http://www.energetic-materials.org.cn/hnclen/article/abstract/20040509?st=article_issue.
9. **Chen J., Deng C.** Bubbles sensitization technology of emulsion explosives // *Jiangxi Coal Sci. Technol.* — 2009. — V. 4. — P. 75–76. — DOI: 10.3969/j.issn.1006-2572.2009.04.039 (in Chinese).
10. **Mishra A. K., Agrawal H., Raut M.** Effect of aluminum content on detonation velocity and density of emulsion explosives // *J. Mol. Model.* — 2019. — V. 25. — Article number 70. — DOI: 10.1007/s00894-019-3961-3.
11. **Лавров В. В., Зубарева А. Н., Комиссаров П. В.** Зависимость детонационной способности эмульсионного взрывчатого вещества на основе нитрата аммония от пористости // *Хим. физика.* — 2019. — Т. 38, № 8. — С. 31–39. — DOI: 10.1134/S0207401X19080089. — EDN: AOYIOC.
12. **Wang F., Ma H., Shen Z.** Explosion performance of high-temperature degraded emulsion explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2017. — V. 42, N 11. — P. 1325–1332. — DOI: 10.1002/prep.201700052.
13. **Wu X. L., Wang X., Xu F. Y.** Energy output characteristics and evaluation method of poly-black aluminum explosive // *Chin. J. High Press. Phys.* — 2022. — V. 36. — P. 142–152.
14. **Chen Y., Ma H., Shen Z., Yang M., Tian Q.** Explosion characteristics of emulsion explosive mixed with RDX powder // *Chin. J. Explos. Propell.* — 2019. — V. 42, N 3. — P. 242–246 — DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2019.03.005.
15. **Yao Y., Cheng Y., Liu R., Hu F., Zhang Q., Xia Y., Chen Y.** Effects of micro-encapsulation treatment on the thermal safety of high energy emulsion explosives with boron powders // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2021. — V. 46, N 3. — P. 389–397. — DOI: 10.1002/prep.202000130.
16. **Yang M., Ma H., Shen Z.** Effect of RDX powders on detonation characteristics of emulsion explosives // *J. Energ. Mater.* — 2019. — V. 37, N 4. — P. 459–474. — DOI: 10.1080/07370652.2019.1637480.
17. **Cheng Y. F., Yan S. L., Ma H. H., Shen Z. W., Liu R.** A new type of functional chemical sensitizer MgH_2 for improving pressure desensitization resistance of emulsion explosives // *Shock Waves.* — 2016. — V. 26. — P. 213–219. — DOI: 10.1007/s00193-015-0585-0.
18. **Chen J., Ma H., Wang Y., Huang L., Shen Z.** Effect of hydrogen-storage pressure on the detonation characteristics of emulsion explosives sensitized by glass microballoons // *Defence Technol.* — 2022. — V. 18, N 5. — P. 747–754. — DOI: 10.1016/j.dt.2021.03.021.
19. **Wang D. Q., Yu H. M., Liu J., Li F. S., Jin X. X., Zheng S. J., Zheng T. T., Li Y., Zhang Z. J., Li D., Lan Z. G.** Получение чешуйчатого алюминиевого порошка и его свойства в составе смесового модифицированного двухосновного топлива на основе перхлората аммония // *Физика горения и взрыва.* — 2020. — Т. 56, № 6. — С. 78–84. — DOI: 10.15372/FGV20200608. — EDN: YUEHZN.

20. **Jing Q., Wang D., Liu Q., Shi C., Liu J.** Ignition sensitivity and explosion behaviors of micron-sized aluminum powder: Comparison between flake aluminum powder and spherical aluminum powder // *Chem. Eng. Sci.* — 2022. — V. 252. — 117502. — DOI: 10.1016/j.ces.2022.117502.
21. **Fu S., Lou W., Wang J., Ji T., Li C., Chen Z.** Dynamic concentration measurement of micro/nano aluminum powder // *Powder Technol.* — 2021. — V. 380. — P. 303–310. — DOI: 10.1016/j.powtec.2020.11.052.
22. **Zhang J., Wang W.** Emulsion explosive containing aluminum energy capacity calculation and analysis // *Guangdong Chem. Ind.* — 2015. — V. 42, N 19. — P. 57–58. — DOI: 10.3969/j.issn.1007-1865.2015.19.027. — (in Chinese).
23. **Zhang H., Xie X., Guo Z., Wan X.** Effect of aluminum powder content on performance of emulsion explosive // *Energ. Mater.* — 2008. — V. 16, N 6. — P. 738–740. — DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2008.06.023. — (in Chinese).
24. **Liu L., Qi H., Zhang H., Qi J.** Effect of perlite content on performance of emulsion explosive in under-water environment // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2022. — V. 2381. — 012102. — DOI: 10.1088/1742-6596/2381/1/012102.
25. **Song J., Wang X., Yu Y., Cui A.** Detonation velocity characteristics of emulsion explosives sensitized by glass micro-balloons // *Chin. J. Eng.* — 2000. — V. 22, N 6. — P. 497–500. — DOI: 10.13374/j.issn1001-053x.2000.06.003.
26. **Li H., Lei Z., Gui J.** Effect of composite emulsifiers on thermal decomposition characteristics and detonation velocity of HANFO emulsion matrices // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2020. — V. 45, N 9. — P. 1465–1471. — DOI: 10.1002/prep.202000007.
27. **Cheng Y. F., Meng X. R., Feng C. T., Wang Q., Wu S. S., Ma H. H.** The effect of the hydrogen containing material TiH_2 on the detonation characteristics of emulsion explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2017. — V. 42, N 6. — P. 585–591. — DOI: 10.1002/prep.201700045.
28. **Сильвестров В. В.** О зависимости скорости детонации от плотности для ряда взрывчатых веществ // *Физика горения и взрыва.* — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 116–124. — EDN: NXZVWZ.
29. **Du J., Hua L., Duan H.** Properties and applications of hollow glass microspheres // *Sci. Technol. Rev.* — 2013. — V. 31, N 15. — P. 73–79. — DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.15.013.
30. **Cole R. H.** *Underwater Explosions.* — New York: Dover Publ., 1965.
31. **Bjarnholt G.** Suggestions on standards for measurement and data evaluation in the underwater explosion test // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 1980. — V. 5, N 2-3. — P. 67–74. — DOI: 10.1002/prep.19800050213.
32. **Xu F. Y., Li H. B., Sang F. N., Zhang Y., Wang Y. R., Ge Z. C., Luo Y. M., Liu X. C.** Comparative study on the damage effects in the deflagration process of typical liquid propellants // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2022. — V. 47, N 6. — e202100280. — DOI: 10.1002/prep.202100280.

Поступила в редакцию 02.11.2023.

После доработки 04.04.2024.

Принята к публикации 15.05.2024.