УДК 662.2-391.4:544.454.3

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ АЛЮМИНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

А. С. Юношев^{1,2}, С. А. Бордзиловский¹, С. М. Караханов¹, А. В. Пластинин¹

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, yunoshev@hydro.nsc.ru ²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Определены детонационные характеристики алюминизированного ЭмВВ плотностью ≈0.5 г/см³ с массовым содержанием алюминия до 20 %. Добавление алюминия приводит к увеличению скорости детонации и давления детонации по сравнению с параметрами чистого ЭмВВ. Замена алюминия на молотое стекло приводит к уменьшению и скорости детонации, и давления. Увеличение детонационных характеристик алюминизированного ЭмВВ может быть связано с частичной реакцией алюминия до плоскости Чепмена — Жуге. Также измерена яркостная температура продуктов детонации алюминизированных ЭмВВ. Показано, что она уменьшается при добавлении алюминия в ЭмВВ. Этот результат демонстрирует сложное влияние добавки алюминия на детонационные характеристики ЭмВВ.

Ключевые слова: эмульсионное взрывчатое вещество, алюминизированное взрывчатое вещество, детонационное давление, скорость детонации, температура продуктов детонации.

DOI 10.15372/FGV20220515

ВВЕДЕНИЕ

Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ) в данный момент являются основными промышленными взрывчатыми веществами (ВВ), поскольку обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными ВВ, использовавшимися ранее: безопасность обращения с ними, низкая стоимость, меньшее количество вредных газов при детонации, а также возможность варьировать их характеристики путем изменения состава или количества сенсибилизатора [1, 2].

Одним из возможных компонентов BB, в том числе и эмульсионных, является алюминиевый порошок [3, 4], который добавляют в BB, чтобы увеличить их мощность и метательную способность. В то же время считается, что добавление алюминия в BB уменьшает объем газообразных продуктов детонации (ПД) [3]. Алюминиевый порошок в количестве 4 ÷ 8 % входит в состав ЭмBB повышенной мощности [2], используемых для разрушения крепких пород.

Влияние алюминия на детонационные характеристики ВВ зачастую непредсказуемо [3, 5]. Оно в основном определяется природой BB, морфологией и размером алюминиевых частиц, структурой заряда BB. Для большинства мощных BB добавление алюминия не приводит к увеличению скорости или давления детонации [4, 5]. Однако время действия высокого давления на окружающее заряд вещество может значительно возрастать, что актуально, например, при обработке материалов взрывом.

Несмотря на широкое использование алюминизированных ЭмВВ в промышленности, детально их детонационные характеристики мало изучены. Работы, в которых проводятся исследования детонационных характеристик ЭмВВ с добавлением алюминия, немногочисленны [6–9]. Как правило, изучаются составы плотностью более 1.0 г/см³, что актуально при ведении горных работ. При этом отмечается, что скорость детонации ЭмВВ с добавлением алюминия всегда меньше, чем у исходного ЭмВВ [6, 7, 9], а давление в окружающей среде при этом оказывается несколько больше. Такое поведение можно объяснить, если предположить, что алюминий не успевает прореагировать до точки Чепмена — Жуге [6] или реагирует лишь частично [7], а основная масса алюминия сгорает уже при разлете ПД. При исследовании влияния алюминия на детонационные характеристики в основном измеряются механические параметры: скорость детона-

⁽с) Юношев А. С., Бордзиловский С. А.,

Караханов С. М., Пластинин А. В., 2022.

ции, массовая скорость, давление. В работе [5] на профилях давления ряда композиций октоген/алюминий через $0.2 \div 0.3$ мкс фиксируется подъем, который, по мнению авторов, может быть связан с взаимодействием алюминия с ПД.

Авторы [10] измеряли скорость детонации и давление ЭмВВ с добавкой от 10 до 40 % (мас.) частиц алюминия размером 5.7 мкм и сравнивали с алюминизированным нитрометаном для изучения эффекта от добавления Al. Измеренная скорость детонации алюминизированного ЭмВВ сильно зависела от диаметра заряда. По мнению авторов, длина реакционной зоны алюминизированного ЭмВВ значительно увеличивалась при содержании Al выше 30 %, тогда как в алюминизированном нитрометане она не изменялась при содержании Al до 45 %. Дефицит скорости алюминизированного ЭмВВ возрастал с ростом массовой доли Al. На профилях давления в пределах 5 мкс за фронтом детонационной волны не обнаружены особенности, связанные с энерговыделением в алюминизированном ЭмВВ из-за реакции Al. В то же время отметим, что на профилях давления алюминизированного нитрометана через 2 ÷ 3 мкс за фронтом детонации наблюдался рост за счет выделения энергии при реакции Al в волне Тейлора.

Кроме измерения механических характеристик, полезную информацию о поведении алюминия в детонационной волне можно получить, измерив температуру ПД. В таких экспериментах, как правило, используется методика регистрации яркостной температуры на границе ПД/окно. Подобные измерения проведены как для индивидуальных ВВ [11], так и для смесей BB с алюминием [5, 8, 10, 12]. Эти исследования показали, что у некоторых смесей октогена и бис(тринитроэтил)нитрамина (БТНЭН) с алюминием [5] температура ПД выше, чем в случае, когда алюминий в композиции отсутствует. Подобный рост температуры при введении алюминия отмечен и для смеси нитрометан/Al в работе [12], где проведена оценка количества Al, прореагировавшего за фронтом детонационной волны в зависимости от состава смеси. Что касается измерения температуры продуктов детонации ЭмВВ с алюминием, то на данный момент нам известна только одна работа [8]. В ней приведены предварительные результаты измерения яркостной температуры и давления продуктов детонации

ЭмВВ и показано, что добавление алюминия в ЭмВВ через несколько $(2 \div 5)$ микросекунд после детонационного фронта увеличивает температуру ПД. Степень увеличения температуры зависела от состава ЭмВВ и содержания алюминия в нем. Состав ЭмВВ и содержания алюминия в нем. Состав ЭмВВ в работе [8] подробно не описан. Авторы полагают, что за детонационным фронтом в течение $2 \div 3$ мкс происходит прогрев алюминиевых частиц и в это время температура продуктов падает, затем начинается реакция окисления Al и температура растет.

Целью данной работы является изучение влияния алюминиевого порошка на детонационные характеристики ЭмВВ, в частности на температуру продуктов детонации. Исследовался состав с начальной плотностью ЭмВВ 0.5 г/см³. Этот состав интересен тем, что обладает скоростью детонации около 3 км/с [13], что позволяет использовать его для сварки металлов взрывом.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Основой ЭмВВ, исследуемого в данной работе, является эмульсионная матрица, содержащая аммиачную селитру (68 %), натриевую селитру (11 %), воду (15 %), индустриальное масло И-20 (4 %) и эмульгатор сорбитан моноолеат (2 %). В качестве сенсибилизатора использовались полимерные микробаллоны Expancel 461 DET 40 d25 среднего размера 40 мкм и истинной плотностью 0.025 г/см^3 . В качестве добавки использовался алюминиевый порошок ПАП-2, частицы которого представляют собой хлопья толщиной до 200 нм и «диаметром» до 30 мкм. Для более полного понимания влияния добавок на детонационные характеристики ЭмВВ проводились дополнительные эксперименты с добавлением в ЭмВВ инертного материала. В качестве инертного материала использовано стекло, полученное путем помола микробаллонов МС-В с толщиной оболочки около 2 мкм. Стекло близко к алюминию по плотности и ударно-волновому импедансу и может имитировать алюминиевый порошок в случае, когда он ведет себя в зоне реакции как инертный материал. Составы исследуемых взрывчатых композиций приведены в табл. 1. Массовое содержание сенсибилизатора и других добавок рассчитывалось сверх массы эмульсии.

Эм
ВВ плотностью 0.5 г/см 3 представляет собой малопрозрачную рыхлую субстанцию

Номер опыта	Expancel, $\%$	Добавка	$ ho_{00}, m r/cm^3$	$ ho_0, m r/cm^3$	$ ho_{0t}, r/cm^3$
1	3	0	0.507	0.507	0.507
2	3	Аl ПАП-2, 10 %	0.499	0.54	0.54
3	3	Аl ПАП-2, 20 %	0.506	0.597	0.585
4	3	Молотое стекло, 20 %	0.5	0.57	0.585
5	2.2	0	0.589	0.589	0.589

Составы исследуемых взрывчатых композиций

Примечания. ρ₀₀ — плотность приготовленного ЭмВВ до добавления в него алюминиевого порошка или стекла; ρ₀ — плотность приготовленного ЭмВВ с добавками; ρ_{0т} — теоретическая плотность ЭмВВ с добавками.





Рис. 1. Эм
ВВ плотностью 0.5 г/см³: a — без алюминия,
 δ — 20 % Al

светло-желтого цвета. На микрофотографии (рис. 1, *a*) хорошо видны микробаллоны, окруженные частицами эмульсии. После добавления 20 % алюминия ЭмВВ становится темносерым и непрозрачным (рис. 1, δ). Добавление алюминия в состав ЭмВВ увеличивает плотность ВВ. Известно, что скорость и давление детонации увеличиваются с ростом плотности ВВ (для ЭмВВ плотностью около 0.5 г/см³ это также справедливо [13]). Поэтому был исследован также состав без добавок с плотностью, близкой к алюминизированному ЭмВВ, ≈ 0.59 г/см³.

Схема эксперимента приведена на рис. 2. Заряд исследуемого ВВ помещался в трубу из поливинилхлорида (ПВХ) с внутренним диаметром 57 мм, толщиной стенки 3 мм и длиной 175 мм. В боковой стенке трубы монтировались 3-4 контактных датчика для измерения скорости детонации. В ряде опытов вместо трубы из ПВХ использовалась стальная труба внутреннего диаметра 55 мм с толщиной стенки 14.5 мм, длиной 150 мм. Эксперименты со стальной трубой были выполнены для того, чтобы выяснить (минимизировать) влияние боковой разгрузки на измеряемые параметры детонации.

На торце заряда располагалась пластинка из полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 2 мм и окно, также из ПММА толщиной 10 или 20 мм. Между пластинкой и преградой размещался манганиновый датчик Dynasen Mn4-50-EK с сопротивлением 50 Ом. Пластинка из ПММА предназначалась для защиты манганинового датчика от воздействия ПД. Детонационное давление и температура измерялись в

Таблица 1



Рис. 2. Схема экспериментов:

1 — детонатор и бустерный заряд, 2 — труба из ПВХ или стали, 3 — заряд ЭмВВ, 4 — контактные датчики, 5 — пластинка ПММА толщиной 2 мм, 6 — манганиновый датчик давления, 7 — блок ПММА толщиной 10 или 20 мм, 8 — маска с апертурой диаметром 6.3 мм, 9 — пучок световодов

разных экспериментах. При измерении температуры манганиновый датчик (5 на рис. 2) отсутствовал.

В этом случае излучение детонационного фронта проходило через преграду из ПММА, потом через диафрагму с апертурой диаметром 6.3 мм, расположенной на дальней от ВВ стороне преграды и выводилось из взрывной камеры при помощи оптоволокна (сердцевина $\emptyset 0.4$ мм из кварца, длина $8 \div 15$ м). Далее излучение поступало на вход трехканального пирометра. В качестве детекторов излучения использовали фотоумножители ФЭУ-51 со спектральной чувствительностью в оптическом диапазоне длин волн. В измерительных каналах между торцами световодов и фотоумножителями устанавливали различные светофильтры: интерференционные PF-630/20 и PF-550/12 или абсорбционный (стеклянный) КС-СЗС 660/120 (первое число в обозначении — длина волны в нанометрах, второе ширина полосы пропускания). Широкополосный светофильтр использовался с целью повышения отношения сигнал/шум. Временное разрешение пирометра составляло 25 нс.

Перед каждым экспериментом проводилась калибровка пирометра. В качестве эталонного источника излучения использовалась образцовая ленточная вольфрамовая лампа ТРУ 1100-2350. Яркостная температура ПД рассчитывалась с использованием калибровочных зависимостей по измеренным в эксперименте напряжениям с ФЭУ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измеренные скорости детонации D во всех экспериментах приведены в табл. 2. Скорость детонации исходного ЭмВВ плотностью 0.507 г/см^3 равна $3.14 \pm 0.05 \text{ мм/мкс}$, а скорость детонации ЭмВВ с 20 % Al (плотностью $\approx 0.60 \text{ г/см}^3$) составляет $3.38 \pm 0.05 \text{ мм/мкс}$, т. е. добавление алюминиевого порошка в ЭмВВ приводит к заметному увеличению скорости детонации. В то же время добавление в ЭмВВ молотого стекла, наоборот, заметно понижает скорость детонации (при плотности, близкой к плотности состава ЭмВВ с алюминием, скорость детонации такого состава равна 2.84 ± 0.05 мм/мкс). Была также измерена скорость детонации ЭмВВ без добавок, но с плотностью такой же, как у ЭмВВ с 20 % Al ($\approx 0.60 \ \text{г/см}^3$). Оказалось, что эта скорость примерно равна скорости детонации алюминизированного ЭмВВ $(3.42 \pm 0.05 \text{ мм/мкc})$. Разумеется, того факта, что эти скорости примерно равны, недостаточно ни для вывода о равном энерговыделении алюминия и эмульсионной матрицы на единицу массы, ни о полноте сгорания алюминия.

Как уже отмечалось выше, ЭмВВ плотностью 0.5 г/см³ представляет собой сильно гетерогенное вещество, поэтому область на границе заряд/окно неоднородна. Для того чтобы понять, как влияет эта неоднородность на регистрацию яркостной температуры ПД (T_b) , проведены эксперименты с идентичными зарядами ЭмВВ без алюминиевой добавки. Результаты этих экспериментов показаны на рис. 3.

На временно́й шкале момент времени t = 0 соответствует приходу детонационного фронта на границу заряд/окно. Поскольку ЭмВВ без алюминия частично прозрачно, то часть нарастающего профиля яркости в диапазоне $t = -1 \div 0$ мкс соответствует приближению детонационной волны к поверхности раздела ЭмВВ/окно. Рост обусловлен тем, что умень-

Номер опыта	Добавка	$ ho_0, \ {\Gamma/{ m CM}^3}$	D, мм/мкс	$p_{\mathrm{DP}},$ $\Gamma\Pi\mathrm{a}$	$p_{\rm CJ},\ \Gamma\Pi{ m a}$	n	$T_b, 10^3 { m K}$	$T_{ m CJ}^{*}, \ 10^{3}~{ m K}$	au, MKC		
1		0.507	3.14	2.30	1.54	2.24	2.4	1.93	0.97		
2	Al, 10 %	0.54	3.20	2.71	1.86	1.98	1.96	1.62	1.60		
3	Al, 20 %	0.597	3.38	3.33	2.36	1.89	2.02	1.73	1.72		
4	Стекло, 20 %	0.57	2.84	2.28	1.55	1.97	1.53	1.2	0.85		
5		0.59	3.42	2.9	2.16	2.55			0.53		

Результаты экспериментов

 Π римечания. $T^*_{\rm CJ}$ — результат получен с использованием УРС совершенного газа для описания ПД.



Рис. 3. Профили яркостной температуры ПД плотностью 0.5 г/см³ без Al (оболочка — труба из ПВХ)

шается поглощение излучения от фронта исходной, еще не прореагировавшей частью заряда. Максимальные значения яркостной температуры на профилях находятся в диапазоне $(3 \div 3.3) \cdot 10^3$ К и являются результатом коллапса горячих точек. В работе [14] ранее отмечалось, что судить о температуре ПД можно лишь в конце зоны реакции, длительность которой для ЭмВВ низкой плотности примерно 1 мкс. Значения температуры к этому моменту падают до $(2.4 \div 2.55) \cdot 10^3$ К. Поэтому разброс пиковых значений T_b составляет ≈ 10 %, а разброс в конце зоны реакции не превышает 6 %.

Профили давления, полученные в экспериментах с оболочкой из полимерной трубы, приведены на рис. 4. Эти профили описывают дав-



Рис. 4. Профили давления ЭмВВ с разными добавками:

номер профиля соответствует номеру эксперимента в табл. 2: 1 — без добавки, 2 — 10 % Al, 3 — 20 % Al, 4 — 20 % молотого стекла

ление в ПД при их взаимодействии с преградой из ПММА.

Давление в точке Чепмена — Жуге рассчитывалось методом *p*-*U*-диаграмм. Для этого на каждом профиле предварительно определялись время реакции и давление в конце зоны реакции, по которому рассчитывалось давление в состоянии Чепмена — Жуге. Не существует однозначного метода, позволяющего по одному измеренному профилю давления определить время реакции. Часто используются приближенные способы определения этого параметра [15, 16]. Один из них заключается в следующем. Вдоль участка профиля, соответствующего волне разрежения, проводится прямая линия. Полагается, что часть профиля вблизи фронта ударной волны, которая оказывается выше этой прямой, соответствует

Таблица 2



Рис. 5. Профили яркостной температуры ПД: номер профиля соответствует номеру эксперимента в табл. 2: 1 — без добавки, 2 — 10 % Al, 3 — 20 % Al, 4 — 20 % молотого стекла

зоне реакции. Тогда точка, ближайшая к фронту, где проведенная прямая и измеренный профиль становятся близки, определяет конец зоны реакции. На профилях рис. 4 точки, соответствующие предполагаемому концу зоны реакции, помечены маркерами.

Значения времени реакции τ в точке Чепмена — Жуге и давления продуктов детонации ($p_{\rm DP}$) на профилях, соответствующие этому времени, приведены в табл. 2. Рассчитанные по этим величинам значения давления детонации в состоянии Чепмена — Жуге ($p_{\rm CJ}$) также приведены в таблице. Для всех экспериментов ударно-волновой импеданс ПД оказался меньше, чем у материала преграды — ПММА. Поэтому после взаимодействия детонационной волны с преградой в ПД распространялась отраженная ударная волна, из-за чего измеряемое давление $p_{\rm DP}$ почти в полтора раза превышало давление Чепмена — Жуге продуктов детонации.

На рис. 5 показаны результаты измерения яркостной температуры в экспериментах, профили давления которых приведены на рис. 4. Каждая линия получена осреднением двух профилей, зарегистрированных в каналах с разными светофильтрами. Максимальная разница между значениями яркостной температуры, измеренной с помощью разных светофильтров, не превышает 200 К, что составляет менее 13 % от измеряемой величины. Видно, что для экспериментов 1 и 4 сигнал на пирометре нарастает почти экспоненциально по мере приближения детонационной волны к окну и достигает максимума в момент выхода фронта детонационной волны на границу заряд/окно. Это связано с тем, что, как отмечено выше, ЭмВВ без добавок или с добавлением молотого стекла являются частично прозрачными веществами. После добавления в ЭмВВ алюминиевого порошка взрывчатая композиция становится непрозрачной. Поэтому сигнал с пирометра в экспериментах 2 и 3 появляется непосредственно в момент выхода детонационной волны на границу заряд/окно.

На рис. 5 нанесены точки, предположительно соответствующие концу зоны реакции. Положение этих точек соответствует времени, определенному в экспериментах по измерению давления. Значения яркостной температуры в этих точках Т_b приведены в табл. 2. Из сопоставления этих данных и вида профилей следует, что добавление алюминия (см. рис. 5, кривые 2, 3) понижает температуру ПД по сравнению с ЭмВВ без добавок (см. рис. 5, кривая 1). Наблюдаемое понижение температуры, как предполагали и авторы работ [6, 8], можно объяснить тем, что за фронтом детонационной волны в зоне реакции ЭмВВ частицы алюминия прогреваются и ведут себя как инертный материал, отбирая тепло от ПД. Температура, регистрируемая в экспериментах, в которых в качестве добавки использовалось молотое стекло (см. рис. 5, кривая 4), заметно ниже, на $\approx 4 \cdot 10^2$ K, чем в опытах с добавкой алюминия.

Кроме экспериментов с оболочкой из ПВХ, проведены опыты, в которых заряд запрессовывался в стальную оболочку. На рис. 6 сопоставлены зарегистрированные профили давления от зарядов с различными добавками в трубе из ПВХ и в стальной оболочке. Сравнение профилей давления 1, 2, 4, 5, полученных при детонации зарядов в разных оболочках, показывает, что влияние материала оболочки на регистрируемые профили незначительно, поскольку диаметры зарядов больше критического. Однако хорошо видно, насколько давление у зарядов ЭмВВ с 20 % Al (кривые 1, 2) больше, чем у зарядов без Al (кривые 4, 5): через 1 мкс от фронта это отношение превышает значение 1.5. На этом же рисунке приведен и профиль давления, зарегистрированный при



Рис. 6. Профили давления зарядов разного состава в разных оболочках:

1-20% Al (труба из ПВХ), 2-20% Al (труба стальная), 3- без добавок (труба из ПВХ), 4-20% стекла (труба из ПВХ), 5- без добавок (труба из ПВХ); плотность исходного ЭмВВ для зарядов 1, 2, 4, 5 $\rho_{00}=0.5~{\rm r/cm}^3$, для заряда 3 $\rho_{00}=0.6~{\rm r/cm}^3$



Рис. 7. Профили яркостной температуры ПД: 1 — без добавки, труба из ПВХ, 2 — 20 % Al, труба стальная, 3 — 20 % Al, труба из ПВХ

детонации ЭмВВ без добавок, но с плотностью 0.6 г/см³ (кривая 3). Эксперимент выполнен с целью определить, как увеличение плотности заряда отражается на профиле давления. Этот профиль проходит выше (примерно на 20 %) профилей зарядов без Al (рис. 6, кривые 4, 5), но заметно ниже профилей от зарядов с 20 % Al.

Профили температуры в экспериментах с разным материалом трубы приведены на рис. 7. Сравнение профилей 2 и 3 показывает, что через ≈ 0.3 мкс после фронта различие температур в интервале времени $0.3 \div 1.0$ мкс у зарядов в стальной и ПВХ оболочках не превосходит 150 К (≈ 6 %), что не превышает разброса в экспериментах, поставленных в одинаковых условиях. Отметим, что, как и на рис. 5, температурные профили зарядов с добавкой алюминия идут заметно ниже температурного профиля заряда без добавки. Следует обратить внимание также на то, что у заряда в стальной оболочке (см. рис. 7, кривая 2) скорость спада температуры заметно ниже, чем у заряда в оболочке из ПВХ.

Истинная температура выше измеренной яркостной и зависит от излучательной способности (степени черноты) ПД. В работе [8] измерена излучательная способность ПД нитрометана. В диапазоне длин волн 500 ÷ 1500 нм излучательная способность уменьшается от 1 до 0.77. При этом на длине волны 650 нм она составляет 0.97. Даже если принять, что излучательная способность продуктов детонации ЭмВВ на длине волны 630 нм составляет 0.7, истинная температура ПД оказывается выше измеренной яркостной примерно на 3 %. Таким образом, суммарная ошибка измерения яркостной температуры, включая точность процедуры калибровки, по нашим оценкам не превышает $10 \div 15$ %.

Поскольку в ПД после взаимодействия с преградой идет отраженная ударная волна, то измеренная температура завышена по сравнению с температурой в состоянии Чепмена — Жуге. Для описания поведения ПД выполнен расчет температуры в состоянии Чепмена — Жуге T_{CJ}^* с использованием уравнения состояния совершенного газа. Определенные таким образом значения также приведены в табл. 2. С учетом того, что для расчета T_{CJ}^* используется уравнение состояния совершенного газа, значение T_{CJ}^* является минимально возможным. Таким образом, величины T_b и T_{CJ}^* задают интервал, в котором находится истинное значение температуры детонации ЭмВВ.

Одним из основных результатов данной работы является заметное увеличение скорости детонации ЭмВВ при добавлении алюминиевого порошка. Увеличение небольшое, и при добавке 10 % алюминия оно находится в пределах экспериментальной ошибки. Однако добавление 20 % алюминия увеличивает скорость детонации уже до значения, превышающего ошибку измерения. Также показано, что добавление стекла вместо алюминия уменьшает скорость детонации. Эти данные свидетельствуют о том, что увеличение скорости детонации вызвано химической активностью алюминиевого порошка, который успевает частично реагировать в детонационной волне до точки Чепмена — Жуге. Различное поведение скорости детонации при добавлении алюминия в данной работе и в [6-8] можно объяснить разной начальной плотностью исследованных ЭмВВ: в данной работе плотность ЭмВВ была около $0.5 \ r/cm^3$, что примерно в два раза меньше, чем в [6-8]. Плотность ЭмВВ варьируется изменением количества микробаллонов, т. е. чем больше плотность ЭмВВ, тем меньше в нем микробаллонов. При одинаковой массовой доле алюминия в ЭмВВ в композиции с большей плотностью на один микробаллон приходится бо́льшая масса алюминия. Вероятно, при плотности ЭмВВ больше 1 г/см³ интенсивности горячих точек, образующихся после сжатия микробаллонов, не хватает, чтобы прогреть значительное количество алюминия, часть которого расположена далеко от пор. При плотности ЭмВВ 1.1 г/см³ расстояние между микробаллонами ≈ 20 мкм. В то же время при плотности ≈ 0.5 г/см³ расстояние между микробаллонами ≈ 2 мкм и структура ЭмВВ напоминает собой пену, в которой весь алюминий расположен вблизи поверхности пор. За фронтом ударной волны чешуйки алюминия интенсивно деформируются и перемешиваются с ударно-сжатой пористой эмульсией. Это приводит к росту площади контакта реагирующих компонентов, что в совокупности с более однородно прогретым алюминием дает увеличение скорости его реакции с продуктами детонации ЭмВВ. Результаты измерения давления детонации подтверждают предположение о возможной реакции алюминия до плоскости Чепмена — Жуге. Давление в точке Чепмена — Жуге при добавлении 10 и 20 % алюминия выросло соответственно в 1.2 и 1.5 раза (см. табл. 1), что больше, чем при увеличении плотности ЭмВВ без добавления алюминия. В [6] при добавлении 20 % алюминия давление выросло всего на 10 %.

Интерпретировать данные по измерению яркостной температуры ПД алюминизированного ЭмВВ сложнее. Если предположить, что методология измерения яркостной температуры непрозрачных тел, примененная в данной работе, допускает ту же интерпретацию, что и в случае прозрачных или частично прозрачных тел, то можно сделать вывод, что яркостная температура продуктов детонации ЭмВВ уменьшается при добавлении алюминия. В то же время яркостная температура при добавке алюминия заметно выше, чем при добавке заведомо инертного стекла, следовательно, можно предположить, что непосредственно за фронтом детонации одновременно идут два процесса — частичная реакция алюминия с выделением тепла и, с другой стороны, прогрев частиц алюминия с отбором тепла у продуктов реакции. В данной работе конструкция экспериментальной сборки позволяла регистрировать температуру в пределах 3 мкс до выхода ударной волны из окна в воздух. По-видимому, этого времени недостаточно для реакции большей части алюминия. Такой вывод подтверждается и результатами работы [8], в которой заметный рост температуры алюминизированного ЭмВВ был зарегистрирован через 5 мкс после фронта детонации.

Для того чтобы частицы алюминия сгорели в зоне реакции детонационной волны, недостаточно прогреть эти частицы до условно высокой температуры. Необходимо перемешивание частиц горячего алюминия с частицами окружающей его матрицы. Во фронте ударной волны, ведущей детонацию в ЭмВВ, равновесие по давлению и скорости не устанавливается мгновенно. При схлопывании пор возникают пульсации, локальные завихрения и другие особенности неравновесного течения. При этом частицы алюминия активно обтекаются потоком окружающего вещества, что может приводить к дроблению частиц и их абляции. В горячих точках, как видно по максимумам регистрируемых профилей, локальная температура превышает 3000 К, что выше температуры кипения алюминия при нормальном давлении (2800 К). Поэтому в фазе пульсаций с низким давлением возможно даже частичное испарение алюминия. Это обстоятельство существенно облегчает перемешивание алюминия и продуктов разложения эмульсии с последующим протеканием химических реакций с участием алюминия. После установления механического равновесия в смеси непрореагировавшие частицы алюминия перестают обтекаться потоком окружающей среды, а температура быстро падает до значений, меньших 2400 ÷ 2200 К. Скорость перемешивания компонентов смеси резко уменьшается, что также влечет за собой уменьшение скорости реакции. Температура ПД при этом продолжает падать за счет прогрева частиц алюминия без реакции, так как массообмена нет. Таким образом, быстро успевает прореагировать только та часть алюминия, которая была сорвана с поверхности алюминиевых частиц в процессе установления механического равновесия во фронте детонационной волны. Оставшаяся доля алюминия относительно медленно догорает в волне разрежения, что не влияет на скорость детонации, но дает вклад в метательное действие ВВ [17]. Соответственно, в рамках сделанных оценок уменьшается и истинная температура ПД. Если это так, то большее давление детонации алюминизированных ЭмВВ нужно объяснять не их более высокой температурой, а другими причинами. Давление можно условно разделить на упругую и тепловую составляющие. Возможно, в промежуточном составе ПД алюминизированного ЭмВВ присутствует компонент, который обеспечивает большее давление при меньшей температуре за счет упругого, а не теплового вклада.

выводы

Определены детонационные характеристики алюминизированного ЭмВВ плотностью ≈0.5 г/см³ с массовой долей алюминия до 20 %. Добавление алюминия приводит к увеличению скорости детонации ЭмВВ, а добавление молотого стекла — к ее уменьшению, это различие может быть связано с частичной реакцией алюминия до плоскости Чепмена — Жуге.

Давление в детонационной волне для состава ЭмВВ + 20 % Al увеличивается по сравнению с давлением чистого ЭмВВ. В специальных экспериментах на чистом ЭмВВ повышенной плотности $\rho \approx 0.6~{\rm r/cm}^3,$ достигнутой за счет изменения концентрации микробаллонов Expancel, наблюдался подъем профиля p(t)на
 ${\approx}25~\%$ по сравнению с профилем давления при детонации чистого ЭмВВ плотностью $\rho \approx 0.5 \ \mathrm{r/cm^3}$. Однако подъем профиля p(t) для состава ЭмВВ + 20 % Al ($\rho \approx 0.6 \ r/cm^3$) составлял ≈50 % по сравнению с чистым ЭмВВ $(\rho \approx 0.5 \text{ г/см}^3)$. Полученный результат можно объяснить дополнительным вкладом реакции алюминия с ПД сразу за фронтом ударной волны, наряду с эффектом от увеличения плотности алюмосодержащего ЭмВВ.

Измерена яркостная температура продуктов детонации алюминизированных ЭмВВ. Показано, что яркостная температура ПД уменьшается при добавлении алюминия в ЭмВВ. Этот результат может быть связан с неоднородностью распределения поля температур в веществе за фронтом детонационной волны. Согласно предположению авторов [6, 8], за фронтом ударной волны частицы алюминия прогреваются, отбирая тепло от ПД. На начальном этапе этого процесса температура частиц алюминия значительно ниже температуры ПД. Вследствие этого происходит экранировка излучения от высокотемпературных ПД частицами алюминия. Следует отметить, что использованный в работе метод измерения яркостной температуры осредняет яркость зоны реакции по площади ≈ 50 мм².

Результаты данной работы демонстрируют сложность интерпретации влияния добавки алюминия на детонационные характеристики ЭмВВ. Дальнейшее исследование детонационных характеристик алюминизированного ЭмВВ может расширить области практического использования данного класса взрывчатых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Соснин В. А., Межерицкий С. Э. Состояние и перспективы развития промышленных взрывчатых веществ в России и за рубежом // Вестн. Технол. ун-та. Казань, 2016. Т. 19, № 19. С. 84–89.
- 2. Колганов Е. В., Соснин В. А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. Кн. 1: Составы и свойства. — Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009.
- 3. Вадхе П. П., Павар Р. Б., Синха Р. К., Астана С. Н., Субхананда Рао А. Алюминизированные литьевые взрывчатые вещества (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 98–115.
- Махов М. Н., Гогуля М. Ф., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Архипов В. И., Пепекин В. И. Метательная способность и теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 96–105.
- Гогуля М. Ф., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Архипов В. И., Щетинин В. Γ. Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 82–95.

- Mendes R., Ribeiro J., Plaksin I., Campos J. Non ideal detonation of emulsion explosives mixed with metal practices // AIP Conf. Proc. — 2012. — V. 1426. — P. 267–270. — DOI: 10.1063/1.3686270.
- Bednarczyk E., Maranda A., Paszula J., Papliński A. Studies of effect of aluminium powder on selected parameters of emulsion explosive sensitized with microballoons // Polish J. Chem. — 2016. — V. 70, N 1. — P. 41–50.
- Lefrancois A., Grouffal J.-Y., Bouinot P., Mencacci S. Temperature and pressure measurements comparison of the aluminized emulsion explosives detonation front and products expansion // Proc. 12th Int. Detonation Symp., 2002. — P. 432–439.
- 9. 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, N 3. — DOI: 10.1007/s00894-019-3961-3.
- Kato Y., Murata K., Kaga N., Tanaka K. Measurements of detonation properties of aluminized emulsion explosive // 15th Int. Detonation Symp., July 13–18, 2014. — P. 1464– 1469.
- 11. Гогуля М. Ф., Бражников М. А. Температуры продуктов детонации конденсированных веществ. 1. Твердые ВВ // Хим. физика. — 1994. — Т. 13, № 1. — С. 52–63.
- Kato Y., Murata K., Kaga N. Aluminum reactions in detonation products of nitromethane — aluminum mixtures // 15th Int. Detonation Symp., July 13–18, 2014. — P. 1392–1397.

- 13. Юношев А. С., Пластинин А. В., Рафейчик С. И. Скорость детонации эмульсионного взрывчатого вещества, сенсибилизированного полимерными микробаллонами // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 6. — С. 132–137. — DOI: 10.15372/FGV20170616.
- 14. Сильвестров В. В., Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Пластинин А. В. Температура детонационного фронта эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 135–142.
- 15. Лобойко Б. Г., Любятинский С. Н. Зоны реакции детонирующих твердых взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 45–64.
- Юношев А. С., Бордзиловский С. А., Воронин М. С., Караханов С. М., Макаров С. Н., Пластинин А. В. Детонационное давление эмульсионного взрывчатого вещества, сенсибилизированного полимерными микробаллонами // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55, № 4. С. 60–68. DOI: 10.15372/FGV20190408.
- Юношев А. С., Пластинин А. В., Воронин М. С. Влияние добавки алюминия на скорость детонации и метательную способность эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57, № 6. С. 93–100. DOI: 10.15372/FGV20210611.

Поступила в редакцию 29.03.2022. После доработки 13.04.2022. Принята к публикации 25.05.2022.