

УДК 662.2-391.4:544.454.3

## СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ АЛЮМИНИЗИРОВАННОГО ЭмВВ В ПЛОСКОМ СЛОЕ

А. С. Юношев, А. В. Пластинин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск,  
yunoshev@hydro.nsc.ru

Измерена скорость детонации эмульсионного взрывчатого вещества с добавлением алюминиевых порошков ПАП-2 и АСД-4 в зарядах разной толщины с разной начальной плотностью. Показано, что добавление алюминиевого порошка ПАП-2 уменьшает критическую толщину эмульсионного взрывчатого вещества. При больших толщинах заряда и плотности алюминизированного эмульсионного взрывчатого вещества более  $1.0 \text{ г/см}^3$  влияние порошков ПАП-2 и АСД-4 на скорость детонации эквивалентно. Замена алюминиевого порошка на порошок талька заметно ухудшает детонационные характеристики эмульсионного взрывчатого вещества. Результаты работы позволяют предположить, что алюминиевые порошки ПАП-2 и АСД-4 в составе эмульсионного взрывчатого вещества плотностью более  $1.0 \text{ г/см}^3$  полностью реагируют при детонации до поверхности Чепмена — Жуге.

Ключевые слова: эмульсионное взрывчатое вещество, алюминизированное взрывчатое вещество, скорость детонации.

DOI 10.15372/FGV2023.9351  
EDN EUCRDC

### ВВЕДЕНИЕ

Эмульсионное взрывчатое вещество (ЭмВВ) — основное промышленное взрывчатое вещество (ВВ), используемое при работе в горной промышленности [1]. Алюминиевый порошок является компонентом многих составов ЭмВВ [1, 2]. Несмотря на это, трудно предсказать количественно влияние алюминиевого порошка на детонационные характеристики новых составов ЭмВВ. Из экспериментальных данных сложно сделать вывод о том, в какой части детонационного процесса алюминий вступает в химическое взаимодействие. Анализ работ на эту тему затруднен тем, что составы ЭмВВ, исследуемые в разных работах, отличаются наличием некоторых компонентов (например, натриевой селитры) и/или их количественным содержанием, технологией изготовления эмульсионной матрицы, типом эмульгатора и сенсibilизатора, плотностью готового ЭмВВ. Авторы используют разные марки порошков алюминия.

Считается, что добавление алюминия увеличивает энергетику ВВ, но уменьшает количество газообразных продуктов детонации [3, 4]. Поэтому не является очевидным то, как активность алюминия до поверхности Чепмена — Жуге будет влиять на скорость детонации, что осложняет анализ эксперимен-

тальных данных при выяснении влияния добавки алюминия на детонационные характеристики.

Экспериментально зафиксировано, что добавка алюминия увеличивает действие взрыва на окружающую среду. Результатом этого является повышение давления в окружающей среде, увеличение энергии пульсации пузыря и давления в ударной волне при подводном взрыве, лучшее дробление породы [1, 5–8]. Это свидетельствует о том, что алюминий химически реагирует в детонационной волне, но не отвечает на вопрос, в какой ее части. Оценить полноту реакции алюминия в детонационной волне до поверхности Чепмена — Жуге можно по измерению скорости детонации алюминизированного ЭмВВ и сравнению ее с результатами термодинамических расчетов. Такие попытки сделаны, например, в [5–7]. В большинстве работ скорость детонации измерялась в зарядах диаметром более 20 мм. Оказалось, что скорость детонации алюминизированного ЭмВВ плотностью  $1.0 \div 1.2 \text{ г/см}^3$  значительно меньше, чем предсказывают термодинамические расчеты в предположении, что алюминий участвует в химических реакциях с продуктами разложения эмульсии. И хотя добавление алюминия увеличивает давление в детонационной волне, в [5–7] сделан вывод, что большая часть алюминиевого порошка не реагирует до поверхности Чепмена — Жуге.

Похожий вывод сделан и в работах [9, 10].

В работах [8, 11] показано, что при начальной плотности ЭмВВ  $0.5 \text{ г/см}^3$  и менее добавление алюминиевого порошка ПАП-2 с частицами в форме чешуек увеличивает скорость детонации и детонационное давление. При этих же условиях алюминиевый порошок АСД-4 с частицами сферической формы скорость детонации не увеличивает. Порошки талька и стекла скорость детонации уменьшают. В [8, 11] критический диаметр детонации не измерялся. В работах сделан вывод, что порошок ПАП-2 «активнее» внутри зоны реакции, чем порошок АСД-4, но количественные оценки степени реакции алюминия не сделаны.

Реакция взаимодействия с алюминием в детонационной волне сильно зависит от формы и размера частиц алюминия, а также от плотности ЭмВВ. Структуры зон реакции алюминизированных ЭмВВ различны для разных составов. Поскольку в заряде конечного диаметра зона реакции испытывает влияние боковых волн разгрузки, зависимости скорости детонации от диаметра заряда также будут разными для разных составов. При построении моделей кинетики разложения алюминизированных ВВ в детонационной волне сравнение расчетов с известными зависимостями скорости детонации от диаметра/толщины заряда может быть критерием правдоподобия моделей.

Несмотря на то, что зависимость скорости детонации от диаметра заряда алюминизированного ЭмВВ измерялась неоднократно, эти зависимости часто не содержат участков вблизи критического диаметра [7, 8, 10]. Однако именно на этих участках влияние взаимодействия зоны реакции с волнами разгрузки на скорость детонации самое сильное. Отсутствие таких данных связано с тем, что аккуратное измерение скорости детонации ЭмВВ вблизи критического диаметра сопряжено с рядом проблем [8, 12]. Основная сложность связана с консистенцией большинства составов ЭмВВ, напоминающей вязкую жидкость, которая сама при этом не течет. Также в ЭмВВ присутствует большое количество технологических пузырей воздуха, размеры которых иногда достигают нескольких миллиметров. Консистенция ЭмВВ требует использования оболочки для придания заряду необходимой формы. Как правило, заряд изготавливается наполнением цилиндрической оболочки. С одного ее края небольшой порцией подается ЭмВВ и проталкивается

внутрь оболочки. При этом в заряд попадают воздушные пузыри, которые отчетливо заметны, если оболочка заряда прозрачная. Удалить эти пузыри практически невозможно. В итоге получается заряд, у которого трудно контролировать однородность плотности.

Другая проблема измерения скорости детонации возникает при плотности заряда ЭмВВ менее  $1.0 \text{ г/см}^3$ . В этом случае любая из доступных пластиковых трубок, применяемых в качестве оболочки заряда, уменьшает интенсивность боковой волны разрежения в процессе детонации. Особенно значительным это влияние становится для низкоплотных ЭмВВ. Проблему можно уменьшить, если использовать тонкостенные оболочки или оболочки из пористых материалов. Однако при критических диаметрах ВВ в несколько миллиметров [12] проблематичным становится наполнение таких оболочек.

В ряде работ [7, 10, 13] скорость детонации и критический диаметр/толщину детонации ЭмВВ измеряли в зарядах, помещенных в массивную оболочку. Это, безусловно, имеет смысл, поскольку основная область применения ЭмВВ связана со взрывом в шпурах/скважинах. Но в некоторых приложениях заряд ВВ имеет свободную поверхность, например, когда ВВ используется для метания тонких пластин (сварке взрывом). Поэтому измерение скорости детонации ЭмВВ в заряде без оболочки тоже имеет практическую ценность. Однако, если ставится задача изучить влияние волны разрежения на зону реакции, лучше исследовать заряды без оболочки.

В данной работе была измерена скорость детонации алюминизированных ЭмВВ в плоских зарядах. Влияние оболочки в плоской геометрии можно минимизировать, разместив слой ВВ на основании с малым ударно-волновым импедансом, например на пенопласте. Большая ширина заряда при этом уменьшает влияние небольших неоднородностей структуры ЭмВВ на измеряемую скорость детонации. Таким образом, плоская геометрия зарядов лишена многих недостатков, присущих цилиндрическим зарядам.

## ИССЛЕДУЕМЫЕ СОСТАВЫ

В основе исследуемого ЭмВВ лежит эмульсионная матрица, состав которой приведен в табл. 1. Плотность эмульсии составляет  $1.41 \text{ г/см}^3$ . В качестве сенсibilизато-

Таблица 1

Состав эмульсионной матрицы

Компонент	Содержание, % (мас.)
Аммиачная селитра	68.25
Натриевая селитра	10.55
Вода	15.2
Индустриальное масло И-20	4
Эмульгатор моноолеат сорбитана	2

ра использовались полимерные микробаллоны Expancel 461 DET 40 d25. Плотность ЭмВВ варьировалась добавлением в эмульсию разного количества сенсibilизатора. Исследовались ЭмВВ с начальной плотностью 0.5, 1.0 и 1.2 г/см<sup>3</sup>. Также исследовались составы, полученные из ЭмВВ плотностью 0.5, 1.0 и 1.2 г/см<sup>3</sup> добавлением в них алюминиевых порошков АСД-4 или ПАП-2 либо добавлением порошка талька. Тальк был использован для

выяснения степени активности алюминия в детонационной волне, поскольку это инертный материал с близкими к алюминию плотностью и акустическим импедансом [14]. Изображения порошков, полученные с помощью электронного растрового микроскопа LEO-420, приведены на рис. 1, а их элементный состав — в табл. 2. Частицы порошка АСД-4 имеют сферическую форму и размер 1 ÷ 30 мкм. Частицы порошка ПАП-2 имеют форму чешуек с размером несколько десятков микрометров и субмикронной толщиной. Составы с этими порошками будем обозначать ЭмВВ(Х) и ЭмВВ(С) соответственно. Частицы талька в основном имеют форму чешуек размером 10 ÷ 30 мкм и толщиной около 1 мкм. ЭмВВ с добавлением талька будем обозначать ЭмВВ(Т).

В [8] показано, что добавление разного количества алюминиевого порошка ПАП-2 монотонно влияет на скорость детонации исследуемого ЭмВВ. У одних составов скорость детонации уменьшается, у других растет. Добавление небольшого количества порошка несильно влияет на скорость детонации. Для ЭмВВ с начальной плотностью 0.5 г/см<sup>3</sup> увеличение

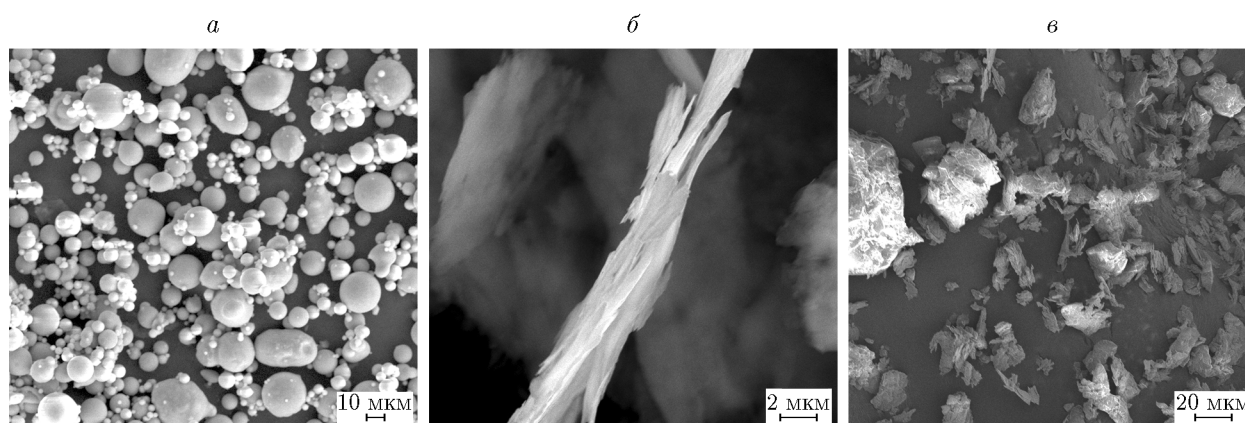


Рис. 1. Порошки добавок: АСД-4 (а), ПАП-2 (б), тальк (в)

Таблица 2

Состав порошков

Порошок	Al	O	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Ag
АСД-4	88.7 ± 0.7	1.4 ± 0.3	1.4 ± 0.04	0.5 ± 0.05	0.8 ± 0.02	1.0 ± 0.06	4.3 ± 0.4	1.9 ± 0.02
	92.1 ± 0.7	2.5 ± 0.6	1.6 ± 0.05	0.5 ± 0.05	0.4 ± 0.01	0.5 ± 0.05	1.9 ± 0.2	0.5 ± 0.01
ПАП-2	87.6 ± 3.5	10.8 ± 3.3	—	—	—	0.1 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.1 ± 0.2
	82.5 ± 5.0	17.0 ± 4.9	—	—	—	0.05 ± 0.05	0.15 ± 0.05	0.3 ± 0.05
Тальк	—	57.2 ± 4.7	17.1 ± 1.0	25.5 ± 3.6	—	—	0.2 ± 0.1	—
	—	68.8 ± 4.0	13.6 ± 1.1	17.5 ± 2.9	—	—	0.1 ± 0.03	—

Примечание. Верхнее значение — массовое содержание, %, нижнее — атомное, %.

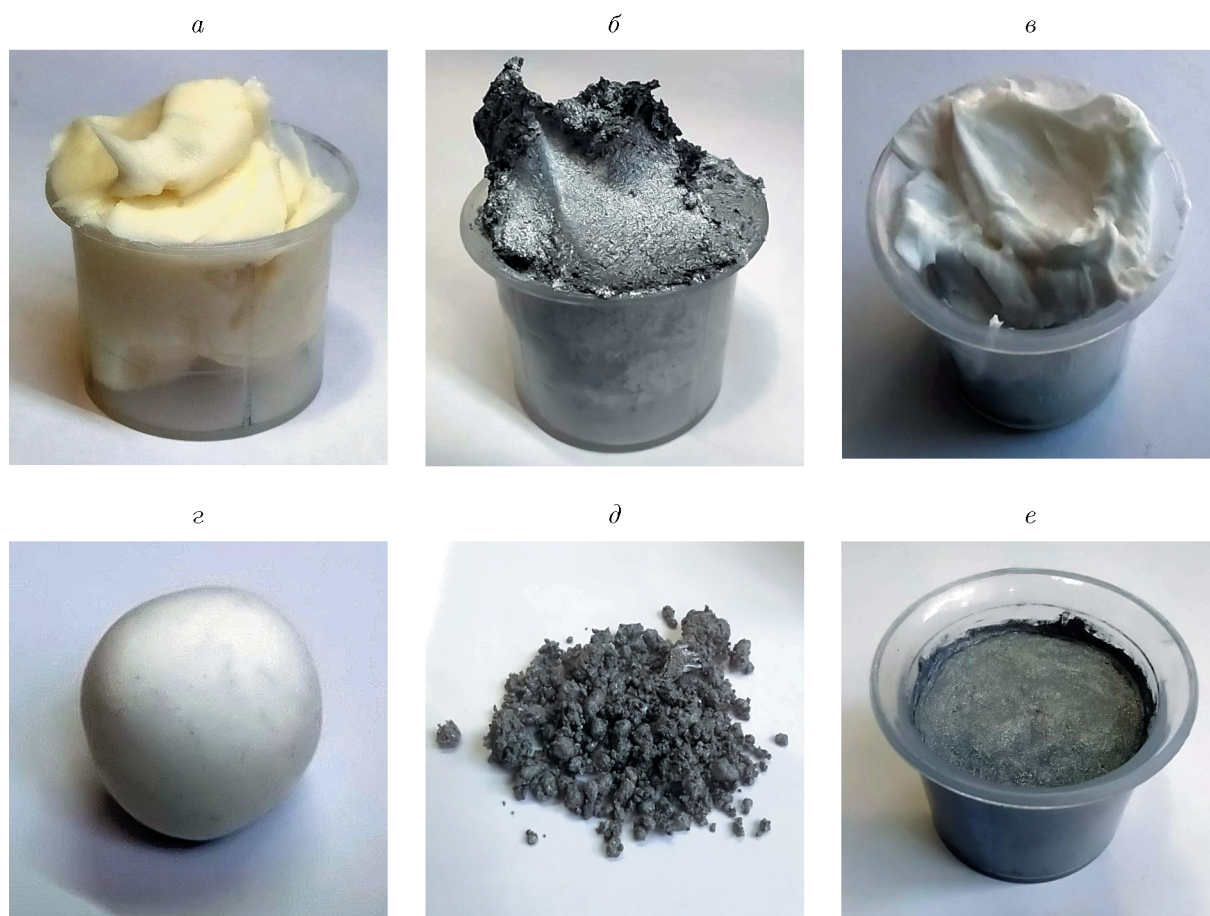


Рис. 2. Внешний вид исследуемых ЭмВВ в емкости объемом 15 мл:

*a* — без добавок,  $1.2 \text{ г/см}^3$ ; *б* — 23 % ПАП-2,  $1.31 \text{ г/см}^3$ ; *в* — без добавок,  $1.0 \text{ г/см}^3$ ; *г* — без добавок,  $0.5 \text{ г/см}^3$ ; *д* — 23 % ПАП-2,  $0.63 \text{ г/см}^3$ ; *е* — 23 % ПАП-2,  $0.63 \text{ г/см}^3$  (подпрессованный)

скорости детонации при добавлении порошка ПАП-2 становится больше экспериментального разброса измеряемой скорости при массовом содержании алюминия 23 %. На этом основании было решено, что в данной работе для определения влияния добавок на скорость детонации их массовое содержание в ЭмВВ будет составлять 23 % (что соответствует 30 % сверхмассы эмульсии).

Большие сложности с формированием однородного заряда возникают из-за консистенции ЭмВВ. По мере уменьшения плотности ЭмВВ консистенция изменяется от липкой вязкой жидкости с множеством больших технологических воздушных пузырей (плотность  $0.8 \div 1.2 \text{ г/см}^3$ , рис. 2, *a, в*) до легкого пластичного вещества, которое принимает любые формы и при этом почти не пачкает рук (плотность  $0.65 \div 0.5 \text{ г/см}^3$ , рис. 2, *г*). Добавление алюминия меняет консистенцию. При большой плот-

ности алюминизированное ЭмВВ становится более густым, но всё еще больше напоминает вязкую жидкость (рис. 2, *б*). При плотности меньше  $1 \text{ г/см}^3$  ЭмВВ после смешивания с алюминиевым порошком имеет склонность к образованию агломератов, которые легко прессуются (рис. 2, *д, е*). При одинаковом содержании в ЭмВВ алюминиевого порошка состав с добавлением АСД-4 всегда более подвижный, менее вязкий, чем состав с порошком ПАП-2.

Плотность составов с добавлением порошков АСД-4, ПАП-2 и талька в ЭмВВ начальной плотности 0.5, 1.0 и  $1.2 \text{ г/см}^3$  приведена в табл. 3. Также в табл. 3 указаны ожидаемые значения плотности ВВ, которые были рассчитаны исходя из известного массового содержания компонентов. Плотность ВВ измерялась взвешиванием части приготовленного состава, помещенного в мерную цилиндрическую емкость объемом 60 мл. Видно, что плотность

Таблица 3

Плотность исследованных ЭмВВ

Исходное ЭмВВ, г/см <sup>3</sup>	ЭмВВ(С), 23 % АСД-4, г/см <sup>3</sup>	ЭмВВ(Х), 23 % ПАП-2, г/см <sup>3</sup>	ЭмВВ(Т), 23 % талька, г/см <sup>3</sup>	Теоретическая плотность, г/см <sup>3</sup>
$0.50 \pm 0.005$	$0.63 \pm 0.01$	$0.62 \pm 0.01$	$0.62 \pm 0.01$	0.62
$1.00 \pm 0.005$	$1.15 \pm 0.02$	$1.12 \pm 0.02$	$1.15 \pm 0.02$	1.17
$1.20 \pm 0.005$	$1.36 \pm 0.02$	$1.30 \pm 0.05$	$1.35 \pm 0.02$	1.38

составов с порошком АСД-4 больше, чем с порошком ПАП-2, несмотря на одинаковое массовое содержание алюминия. Вероятно, это связано с тем, что при замешивании в эмульсию порошка ПАП-2 в ЭмВВ попадает большее количество воздуха.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе измерялась скорость детонации ЭмВВ разной плотности в зависимости от толщины заряда, имеющего форму плоского слоя. Скорость детонации определялась по схеме, изображенной на рис. 3, а.

Заряд исследуемого ВВ (3) формировался на плоской поверхности из пенопласта (4) между параллельными бортиками из пластика или картона с расстоянием между ними около 60 мм. При толщине слоя ВВ более 15 мм ширина заряда составляла 90 мм. Заряд имел форму ступеньки, что позволяло в одном эксперименте измерять скорость детонации в слоях с двумя разными толщинами. Для минимизации влияния основания его изготавливали из пенопласта ПС плотностью 0.03 г/см<sup>3</sup>. Исследуемые составы ЭмВВ имели заметно большую плотность —  $0.5 \div 1.2$  г/см<sup>3</sup>. ЭмВВ помещалось на основание небольшими порциями, что минимизировало количество неоднородностей в структуре заряда. Заряд инициировался детонатором (1) через генератор линейной детонационной волны (2). Скорость детонации измерялась с помощью контактных датчиков. При малой толщине заряда использовались пьезодатчики Dynasen так, как показано на рис. 3, а. При большей толщине заряда использовались электроконтактные датчики, помещенные внутрь заряда на несколько миллиметров. Расстояние между датчиками в слое постоянной толщины составляло 70 мм. Экспериментальная сборка перед экспериментом показана на рис. 3, б.

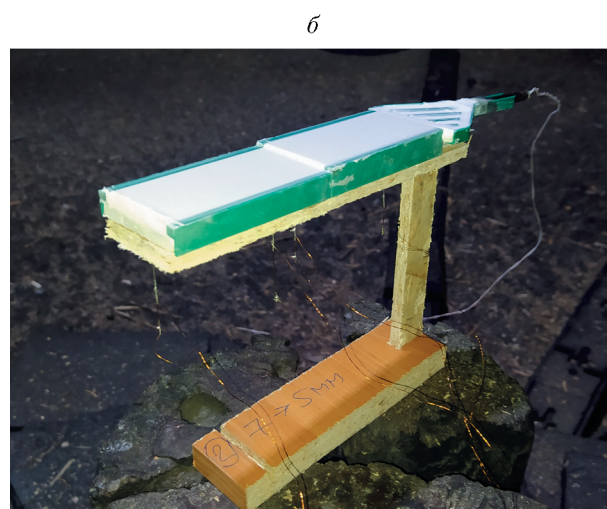
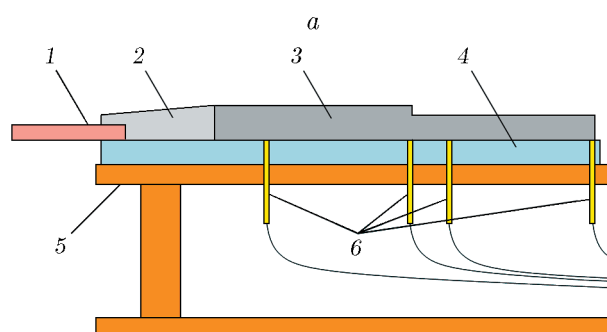


Рис. 3. Экспериментальная сборка. Схема (а) и вид перед экспериментом (б):

1 — детонатор, 2 — генератор линейной детонационной волны, 3 — плоский слой исследуемого ВВ, 4 — основание из пенопласта, 5 — подставка, 6 — контактные датчики

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 приведены результаты измерения скорости детонации ЭмВВ без добавок с начальной плотностью 0.5, 1.0 и 1.2 г/см<sup>3</sup> в зарядах разной толщины. Как видно на рис. 4, зависимость скорости детонации от обратной толщины заряда  $D(1/h)$  близка к линейной в



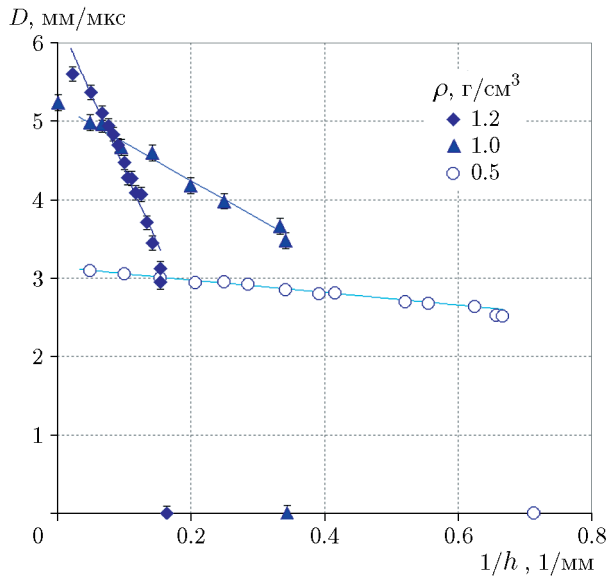


Рис. 4. Зависимость скорости детонации ЭмВВ разной плотности от обратной толщины

широком диапазоне толщин.

Это означает, что экспериментальные данные на рисунке можно описать формулой Эйринга, в которой диаметр заряда заменен на толщину:

$$D = D_i (1 - A/h),$$

где  $D_i$  — идеальная скорость детонации (скорость детонации заряда бесконечно большой толщины),  $A$  — параметр, характеризующий

зону реакции [15]. Параметры уравнения, а также критические толщины для ЭмВВ с разной начальной плотностью приведены в табл. 4. Видно, что увеличение начальной плотности ЭмВВ приводит к увеличению идеальной скорости детонации. При этом также возрастает критическая толщина детонации  $h_{cr}$ . Удовлетворительное описание экспериментальных данных формулой Эйринга начинается при толщине заряда, превышающей критическую толщину примерно на 25 %.

На рис. 5 представлены результаты измерения скорости детонации составов, полученных из ЭмВВ с начальной плотностью 0.5, 1.0 и 1.2 г/см<sup>3</sup>, при добавлении различных порошков. В табл. 4 приведены параметры формулы Эйринга, описывающие эти экспериментальные данные и критические толщины для ЭмВВ(Х), ЭмВВ(С) и ЭмВВ(Т). Как наблюдалось и ранее [8], добавление алюминиевых порошков ПАП-2 и АСД-4 несильно влияет на зависимость скорости детонации от толщины заряда. Тем не менее, влияние присутствует, и оно различно для разных порошков.

В составах, полученных из ЭмВВ плотностью 1.2 г/см<sup>3</sup>, при уменьшении толщины заряда были зарегистрированы следующие минимальные скорости: 1.4 мм/мкс для ЭмВВ(С), 2.1 мм/мкс для ЭмВВ(Х) и 1.8 для ЭмВВ(Т). Эти скорости в 3 ÷ 4 раза меньше, чем скорость идеальной детонации соответствующего состава.

Таблица 4

Параметры формулы Эйринга для разных ЭмВВ

Состав	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$D_i$ , мм/мкс	$A$ , мм	$h_{cr}$ , мм
ЭмВВ	$0.5 \pm 0.01$	$3.14 \pm 0.06$	$0.26 \pm 0.05$	$1.45 \pm 0.05$
ЭмВВ(Х)	$0.62 \pm 0.01$	$3.37 \pm 0.11$	$0.41 \pm 0.08$	$1.21 \pm 0.05$
ЭмВВ(С)	$0.63 \pm 0.01$	$3.11 \pm 0.08$	$0.46 \pm 0.07$	$1.84 \pm 0.05$
ЭмВВ(Т)	$0.63 \pm 0.01$	$2.49 \pm 0.16$	$1.66 \pm 0.98$	$9.5 \pm 2.0$
ЭмВВ	$1.0 \pm 0.01$	$5.21 \pm 0.15$	$0.93 \pm 0.13$	$2.90 \pm 0.1$
ЭмВВ(Х)	$1.12 \pm 0.02$	$4.97 \pm 0.13$	$1.03 \pm 0.09$	$2.50 \pm 0.1$
ЭмВВ(С)	$1.15 \pm 0.02$	$5.06 \pm 0.10$	$1.27 \pm 0.12$	$3.70 \pm 0.1$
ЭмВВ(Т)	$1.15 \pm 0.02$	$4.48 \pm 0.43$	$2.60 \pm 1.48$	$9.5 \pm 2.0$
ЭмВВ	$1.20 \pm 0.02$	$6.32 \pm 0.19$	$3.05 \pm 0.25$	$6.4 \pm 0.1$
ЭмВВ(Х)	$1.30 \pm 0.02$	$5.72 \pm 0.20$	$2.47 \pm 0.32$	$6.25 \pm 0.5$
ЭмВВ(С)	$1.36 \pm 0.02$	$6.30 \pm 0.23$	$3.16 \pm 0.37$	$8.0 \pm 0.5$
ЭмВВ(Т)	$1.35 \pm 0.02$	$5.15 \pm 0.23$	$4.11 \pm 0.37$	$12.0 \pm 2.0$

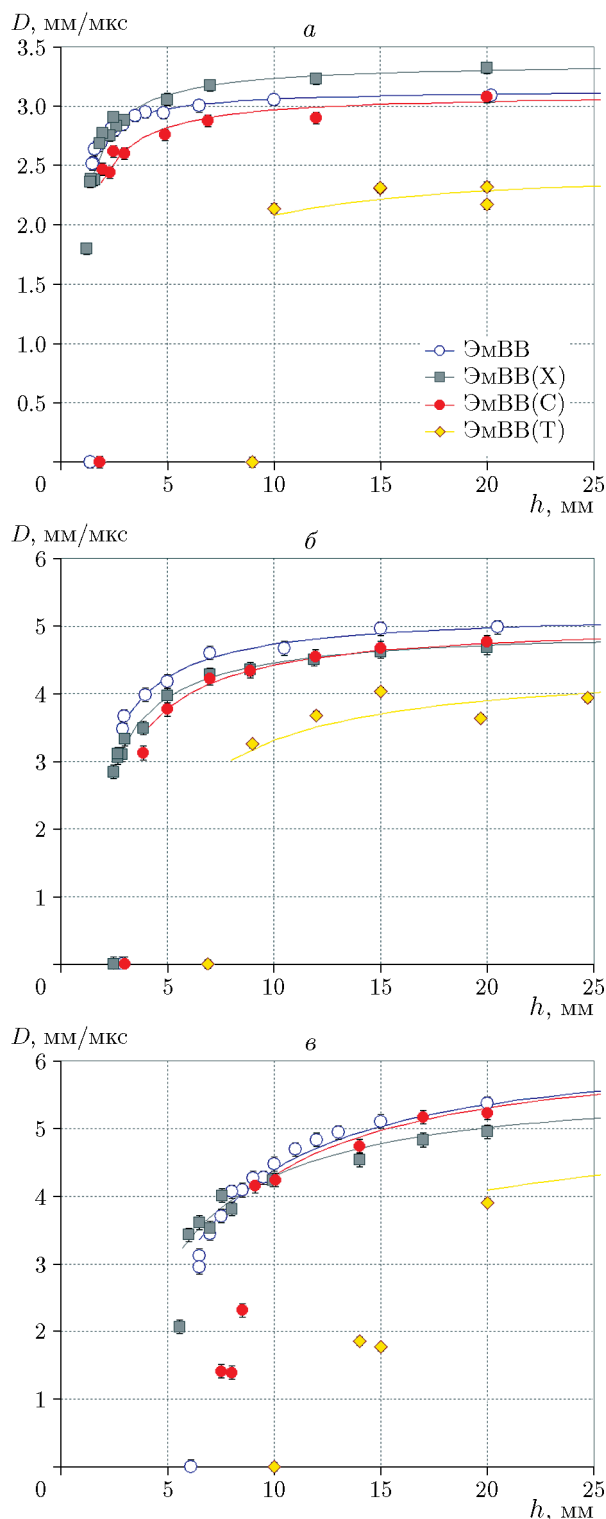


Рис. 5. Зависимость скорости детонации составов, полученных из ЭМВВ с начальной плотностью 0.5 (а), 1.0 (б), 1.2 г/см<sup>3</sup> (в), от толщины заряда при добавлении различных порошков к ЭМВВ

ва. Нами не предпринимались попытки выяснить, что это — низкоскоростной режим детонации или медленное затухание детонации.

Добавление порошка талька в ЭМВВ приводит к значительному разбросу скорости детонации, намного превышающему ошибку измерения скорости детонации в отдельном эксперименте. Разброс возникает между экспериментами, для которых ЭМВВ(Т) приготовлено в разные дни. Возможно, это связано с изменением свойств ЭМВВ(Т) при хранении. Между приготовлением ВВ и экспериментом прошло 1 ÷ 4 дня. Для алюминизированных ЭМВВ подобного не наблюдалось. Причины этого явления остались непонятны.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формула Эйринга имеет приближенный эмпирический характер. С ее помощью удовлетворительно описать экспериментальные зависимости скорости детонации от диаметра/толщины заряда можно, только если диаметр/толщина существенно превышают критическое значение. Соответственно, придавать физический смысл параметрам формулы Эйринга можно только при рассмотрении детонации вдали от критических условий.

На рис. 6 представлены зависимости идеальной скорости детонации  $D_i$ , параметра  $A$  и критической толщины  $h_{cr}$  от начальной плотности зарядов разных составов. Значение скорости детонации в заряде бесконечной толщины  $D_i$  характеризует теплоту взрыва  $Q$ , выделившуюся в ВВ до поверхности Чепмена — Жуке ( $D_i \sim \sqrt{Q}$ ). Часто считается, что параметр  $A$  в формуле Эйринга пропорционален ширине зоны реакции ВВ. Авторы работы [15] интерпретируют параметр  $A$  как величину, пропорциональную расстоянию от детонационного фронта, на котором энерговыделение незначительно. На наш взгляд, сложно найти однозначное соответствие величины параметра  $A$  какой-либо геометрической характеристике зоны реакции. Скорее, параметру  $A$  соответствует выражение типа

$$A = \frac{C}{Q} \int_0^L x \cdot q(x) dx,$$

где  $q(x)$  — плотность выделившейся энергии

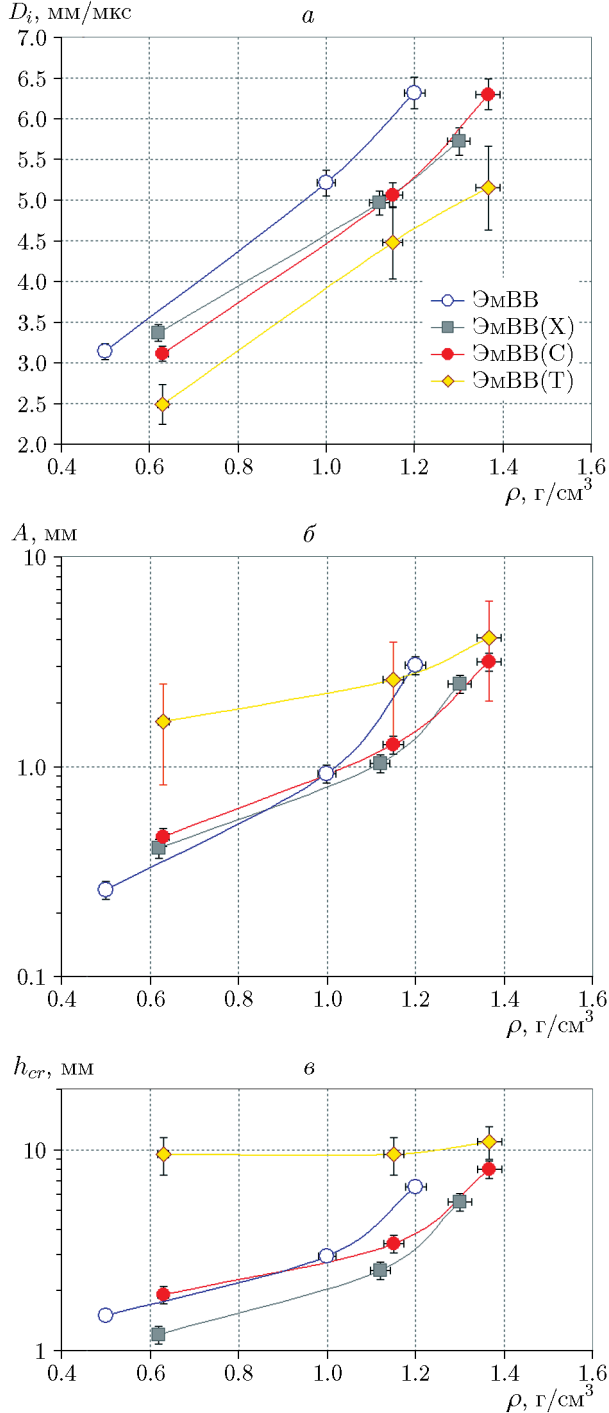


Рис. 6. Зависимость параметров формулы Эйринга и критической толщины от плотности зарядов разных составов:

$a$  — идеальная скорость детонации  $D_i$ ;  $б$  — параметр  $A$ ;  $в$  — критическая толщина  $h_{cr}$

( $Q = \int_0^L q(x) dx$ ),  $x$  — расстояние от фронта

ударной волны, ведущей детонацию,  $L$  — ширина зоны реакции,  $C$  — константа. Определение такого типа показывает, что параметр  $A$  зависит не только от геометрических характеристик зоны реакции, но и от характеристик энерговыделения в ней. Предложенное определение находится в согласии с обычным смыслом параметра  $A$  ( $\sim L$ ), и с интерпретацией из [15]. Действительно, представим, что существуют два различных ВВ с одинаковой теплотой взрыва  $Q$  и постоянной, но различной плотностью энерговыделения (ширина зоны реакции первого ВВ —  $L_1$ , второго —  $L_2$ ):  $q_1 = Q/L_1$ ,  $q_2 = Q/L_2$ . Тогда рассчитанные значения параметра  $A$  для этих ВВ будут равны

$$A_1 = \frac{C}{Q} \int_0^{L_1} x \cdot q_1 dx = \frac{CL_1}{2},$$

$$A_2 = \frac{C}{Q} \int_0^{L_2} x \cdot q_2 dx = \frac{CL_2}{2}.$$

При условии  $L_1 > L_2$  оказывается, что  $A_1 > A_2$ . То есть параметр  $A$  больше у того ВВ, у которого ширина зоны реакции больше, что находится в согласии с обычной интерпретацией.

Рассмотрим другой случай. Представим существование двух других ВВ, у которых теплота взрыва  $Q$  и ширина зоны реакции  $L$  одинаковы. Реакция разложения при этом у первого ВВ начинается непосредственно за фронтом ударной волны, ведущей детонацию, а у второго ВВ — через некоторый период индукции, т. е. на расстоянии  $l$  от фронта. Если после начала реакции плотности энерговыделения у этих ВВ постоянные, то их величины равны соответственно  $q_1 = Q/L$  и  $q_2 = Q/(L-l)$ . В этом случае рассчитанные значения параметра  $A$  будут равны

$$A_1 = \frac{C}{Q} \int_0^L x \cdot q_1 dx = \frac{CL}{2},$$

$$A_2 = \frac{C}{Q} \int_l^{L_2} x \cdot q_2 dx = \frac{C(L^2 - l^2)}{2(L-l)} = \frac{C(L+l)}{2}.$$



Данный результат находится в согласии с интерпретацией авторов [15]. Параметр  $A$  больше у того ВВ, у которого больше толщина слоя ВВ за фронтом детонации, в котором реакция незначительна (при одинаковой ширине зоны реакции).

Очевидно, что параметр  $A$  также может зависеть от природы ВВ и характеристик продуктов детонации. Поэтому сравнивать абсолютную величину этого параметра имеет смысл для ВВ с одинаковым составом, но с разной структурой. При этом, как мы полагаем, сравниваются не размеры зоны реакции, а интегральные характеристики энерговыделения внутри зоны реакции.

На рис. 6 видно, что порошки талька и алюминия в составе ЭмВВ по-разному влияют на детонационные характеристики. Добавление алюминия и талька в ЭмВВ увеличивает плотность композиции. Как видно на рис. 6, *a*, добавление алюминия сдвигает вправо зависимости  $D_i(\rho)$  для ЭмВВ(X) и ЭмВВ(С) относительно зависимости для ЭмВВ. Добавление талька сдвигает зависимость для ЭмВВ(Т) вправо и вниз. Это означает, что добавление талька в ЭмВВ увеличивает плотность и уменьшает идеальную скорость детонации. Добавление в ЭмВВ алюминиевого порошка ПАП-2 или АСД-4 практически не уменьшает идеальную скорость детонации. При плотности ЭмВВ  $0.5 \text{ г/см}^3$  добавление порошка ПАП-2 увеличивает скорость детонации.

На рис. 6, *б* видно, что добавление талька значительно увеличивает критическую толщину детонации ЭмВВ при любой из исследованных начальных плотностей. При этом порошок ПАП-2 в составе ЭмВВ уменьшает критическую толщину детонации. Эти факты говорят о том, что порошки алюминия химически активны внутри зоны реакции.

Для ЭмВВ(X) и ЭмВВ(С) при плотности больше  $1.0 \text{ г/см}^3$  зависимости  $D_i(\rho)$  и  $A(\rho)$  практически совпадают (см. рис. 6, *a, б*). Это означает, что при больших толщинах/диаметрах зарядов ЭмВВ(X) и ЭмВВ(С) с одинаковыми начальными плотностями близки как величины энерговыделения в зоне реакции, так и параметры зоны реакции. Наблюдаемое различие в идеальной скорости детонации у исследованных ЭмВВ(X) и ЭмВВ(С) в этом диапазоне плотностей вызвано разными начальными плотностями составов (см. табл. 3). Как обсуждалось ранее, замешивание в ЭмВВ порош-

ков с разной формой частиц приводит к сопутствующему замешиванию разного количества воздуха. Из-за этого при замешивании в ЭмВВ одинаковой массы порошков ПАП-2 и АСД-4 получаются составы разной плотности. Плотность ЭмВВ(X) меньше, чем ЭмВВ(С). Это приводит к тому, что идеальная скорость детонации и ширина зоны реакции ЭмВВ(X) будут меньше. Но для обоих алюминизированных ЭмВВ их параметры  $D_i$  и  $A$  всё равно лежат на общей соответствующей кривой  $D_i(\rho)$  или  $A(\rho)$ , как видно на рис. 6, *a, б*.

Несмотря на то, что ЭмВВ(X) и ЭмВВ(С) с одинаковыми начальными плотностями ведут себя одинаково при больших толщинах зарядов, критическая толщина ЭмВВ(С) больше, чем у ЭмВВ(X). Подобное поведение можно объяснить следующим образом. При уменьшении толщины заряда и приближении ее к критическому значению детонационное давление в алюминизированном ЭмВВ уменьшается более чем в два раза по сравнению с детонационным давлением ( $\sim D^2$ ) в заряде предельного размера. При меньшем давлении более прочные сферические частицы порошка АСД-4 подвержены меньшей фрагментации во фронте ударной волны, ведущей детонацию, и не успевают реагировать в той же степени, что и тонкие частицы порошка ПАП-2. Непрореагировавшие до поверхности Чепмена — Жуге остатки алюминиевых частиц играют роль инертного компонента, и в случае АСД-4 инертного компонента остается больше. Подтверждением этой гипотезы является то, что при плотности алюминизированного ЭмВВ около  $0.6 \text{ г/см}^3$ , когда детонационное давление сравнимо с динамической прочностью алюминия ( $\approx 1 \text{ ГПа}$  [16]), даже при большом диаметре заряда идеальная скорость детонации ЭмВВ(X) больше, чем у ЭмВВ(С).

В работе [17] утверждается, что у смесевых ВВ типа окислитель — горючее критический диаметр детонации меньше, чем у чистого ВВ (на основе только окислителя). Это утверждение справедливо для смеси нитрата аммония с алюминиевым порошком плотностью  $\approx 1.0 \text{ г/см}^3$  [18, 19]. В основе эмульсионного ВВ тоже лежит окислитель — водный раствор нитратов аммония, натрия и т. д. Однако остальные компоненты состава (масло, эмульгатор) подбираются так, чтобы кислородный баланс ЭмВВ был нулевым или близким к нулю [1, 2]. Результаты данной работы не противоречат выводам работы [17], поскольку ЭмВВ

после добавления алюминия все равно остается смесевым ВВ типа окислитель — горючее. Меняется только горючее в этой смеси — к маслу и эмульгатору добавляется алюминий. Очевидно, что разные типы горючего по-разному влияют на критический диаметр/толщину. В нашем случае среди разных типов горючего смесь масло + ПАП-2 сильнее уменьшает критическую толщину водного раствора селитр, чем масло или масло + АСД-4.

На основании приведенных выше рассуждений можно предположить, что в ЭмВВ(С) и ЭмВВ(Х) с начальной плотностью более  $1.0 \text{ г/см}^3$  при толщине заряда, значительно превышающей критическую толщину, алюминий практически полностью реагирует в детонационной волне до поверхности Чепмена — Жуге. Это вытекает из следующей упрощенной цепочки рассуждений. Алюминиевые порошки реагируют (хотя и частично) до поверхности Чепмена — Жуге. Разные критические толщины ЭмВВ(С) и ЭмВВ(Х) свидетельствуют о разной скорости реакции порошков ПАП-2 и АСД-4 в детонационном фронте. При большой толщине заряда начальные скорости реакции алюминиевых частиц в детонационной волне тоже будут разными. Однако одинаковые идеальные скорости детонации ЭмВВ(С) и ЭмВВ(Х) свидетельствуют об одинаковом выделившемся тепле в этих составах до поверхности Чепмена — Жуге. Если разные алюминизированные ЭмВВ с разной структурой, но одинаковым составом начинают реагировать с разной скоростью, а до поверхности Чепмена — Жуге результат реакций (количество тепла) одинаков, это означает, что до поверхности Чепмена — Жуге прореагировало одинаковое количество порошков ПАП-2 и АСД-4. Такое возможно, только если до поверхности Чепмена — Жуге порошки прореагировали полностью. В противном случае нужно принять, что скорость реакций в ЭмВВ(С) в начальный момент меньше, чем в ЭмВВ(Х), но в процессе реакции она становится больше, чем в ЭмВВ(Х), что мало вероятно. Возможно, состояние Чепмена — Жуге ( $D = c + u$ ,  $c$  — скорость звука в продуктах детонации,  $u$  — массовая скорость продуктов) в реагирующей смеси выполняется при неполном сгорании алюминия. В этом случае для ЭмВВ(С) и ЭмВВ(Х) количество прореагировавшего алюминия до поверхности Чепмена — Жуге будет неполным, но все равно одинаковым.

На рис. 6,б видно, что для составов ЭмВВ(С) и ЭмВВ(Х) с начальной плотностью более  $1.0 \text{ г/см}^3$  наблюдается близость значений параметра  $A$ . Одним из объяснений этого может быть то, что характер энергосвечения в зоне реакции для этих ВВ в зарядах с предельным диаметром/толщиной одинаков. Значит, различная морфология алюминиевых частиц порошков ПАП-2 и АСД-4 не влияет существенно на характер энергосвечения. Такое возможно в нескольких случаях. Например, в случае, когда во фронте ударной волны частицы алюминия порошков ПАП-2 и АСД-4 интенсивно фрагментируются и в результате этой фрагментации образуются похожие распределения алюминиевых частиц по размерам. Образовавшиеся фрагменты частиц горят внутри зоны реакции. Другой вариант — интенсивная фрагментация алюминиевых частиц сопровождается их перемешиванием и реакцией с эмульсионной матрицей. Если характерное время реакции алюминия значительно меньше, чем время разложения эмульсионной матрицы, то общая структура энергосвечения внутри зоны реакции тоже изменится несильно. Второй вариант показывает, что возможна ситуация, когда алюминиевый порошок в составе ЭмВВ не только успевает прореагировать полностью, но и реакции алюминия протекают в начальной части зоны реакции. Вероятно, возможны и другие объяснения близости значений параметра  $A$  для составов ЭмВВ(С) и ЭмВВ(Х).

Таким образом, можно сделать вывод, что полностью прореагировавший алюминий в составе ЭмВВ практически не изменяет скорость детонации при плотности ЭмВВ более  $1 \text{ г/см}^3$ . При меньшей плотности ЭмВВ добавление алюминия может увеличить скорость детонации только в том случае, если существуют физические механизмы в детонационном фронте, позволяющие быстро фрагментировать алюминиевые частицы для их быстрой химической реакции.

## ВЫВОДЫ

Определены зависимости скорости детонации ЭмВВ с добавлением алюминиевых порошков ПАП-2 и АСД-4 от толщины заряда и его плотности. Показано, что добавление алюминиевого порошка ПАП-2 уменьшает критическую толщину ЭмВВ. Результаты работы позволяют сделать предположение, что алюминиевые порошки ПАП-2 и АСД-4 в составе ЭмВВ

плотностью более 1.0 г/см<sup>3</sup> полностью реагируют в детонационной волне до поверхности Чепмена — Жуге.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (номер госрегистрации 2.3.1.2.5).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. Колганов Е. В., Соснин В. А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. Кн. 1: Составы и свойства. — Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009.
2. Ванг Ксюгуанг. Эмульсионные взрывчатые вещества: перевод с китайского. — М.: Красноармейск, 2002.
3. Физика взрыва: в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, испр. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 1.
4. Вадхе П. П., Павар Р. Б., Синха Р. К., Астана С. Н., Субхананда Рао А. Алюминизированные литьевые взрывчатые вещества (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 98–115. — EDN: JZGCCF.
5. Mendes R., Ribeiro J. B., Plaksin I., Campos J. Non ideal detonation of emulsion explosives mixed with metal practices // AIP Conf. Proc. — 2012. — V. 1426, N 1. — P. 267–270. — DOI: 10.1063/1.3686270.
6. Bednarczyk E., Maranda A., Paszula J., Rapliński 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.
7. Kato Y., Murata K., Kaga N., Tanaka K., Takahashi K. Reaction of aluminum particles in detonation of emulsion explosive // 6th EFEE World Conf. on Explosives and Blasting, Lisbon, 2011: Conf. Proc. — P. 281–289.
8. 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. — EDN: RSFNED.
9. Hansson H. Determination of properties for emulsion explosives using cylinder expansion tests and numerical simulation // Swebrec Rep. — Stockholm, 2009. — N 1.
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 N 70. — DOI: 10.1007/s00894-019-3961-3.
11. Юношев А. С., Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Пластинин А. В. Влияние добавки алюминия на температуру детонации эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 5. — С. 125–134. — DOI: 10.15372/FGV20220515. — EDN: VFAXVO.
12. Юношев А. С., Пластинин А. В., Рафеевич С. И. Скорость детонации эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilizированного полимерными микробаллонами // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 6. — С. 132–137. — DOI: 10.15372/FGV20170616. — EDN: ZVMVIR.
13. Petel O., Mack D., Higgins A. J., Turcotte R., Chan S. Comparison of the detonation failure mechanism in homogeneous and heterogeneous explosives // Proc. 13th Int. Detonation Symp., Norfolk, Virginia, USA, 2006. — P. 2–12.
14. Mainprice D., Le Page Y., Rodgers J., Jouanna P. Ab initio elastic properties of talc from 0 to 12 GPa: Interpretation of seismic velocities at mantle pressures and prediction of auxetic behaviour at low pressure // Earth Planet. Sci. Lett. — 2008. — V. 274, N 3–4. — P. 327–338. — DOI: 10.1016/j.epsl.2008.07.047.
15. Clark Souers P., Vitello P., Esen S., Kruttschnitt J., Bilgin B. The effects of containment on detonation velocity // Propell., Explos., Pyrotech. — 2004. — V. 29, N 1. — P. 19–26. — DOI: 10.1002/prep.200400028.
16. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Янус-К, 1996.
17. Алымова Л. Н., Стесик Л. Н., Апин А. Я. К вопросу о детонационной способности перхлоратных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 1967. — Т. 3, № 3. — С. 386–392.
18. Cook M. A., Filler A. S., Keyes R. T., Partridge W. S., Ursenbach W. O. Aluminized explosives // J. Phys. Chem. — 1957. — V. 61, N 2. — P. 189–196. — DOI: 10.1021/j150548a013.
19. Zygmunt B. Detonation parameters of mixtures containing ammonium nitrate and aluminium // Centr. Eur. J. Energ. Mater. — 2009. — V. 6, N 1. — P. 57–66.

Поступила в редакцию 28.04.2023.

После доработки 05.09.2023.

Принята к публикации 11.10.2023.