

УДК 662.2-391.4:544.454.3

# ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ АЛЮМИНИЯ НА СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ И МЕТАТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

А. С. Юношев<sup>1,2</sup>, А. В. Пластинин<sup>1</sup>, М. С. Воронин<sup>1,3</sup><sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, yunoshev@hydro.nsc.ru<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск

Измерена скорость детонации и метательная способность алюминизированного эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного полимерными микробаллонами Expancel. Плотность исследуемых взрывчатых составов  $0.2 \div 1.4 \text{ г/см}^3$ , массовое содержание алюминиевого порошка  $0 \div 0.29$ . Для измерения метательной способности использовался метод метания цилиндрической оболочки.

Ключевые слова: эмульсионное взрывчатое вещество, метательная способность, алюминизированное взрывчатое вещество.

DOI 10.15372/FGV20210611

## ВВЕДЕНИЕ

Эмульсионные взрывчатые вещества на сегодняшний день являются основными промышленными взрывчатыми веществами (ВВ) по объему производства и применениям. Используя разные компоненты и варьируя их количество, можно в широком диапазоне менять эксплуатационные и детонационные свойства эмульсионных ВВ [1, 2]. Алюминиевый порошок входит в состав ряда коммерческих взрывчатых композиций, основой которых являются эмульсионные ВВ. Например, для крепких и очень крепких пород предлагается использовать эмульсионные ВВ повышенной мощности, в состав которых входит алюминиевый порошок в количестве  $4 \div 10 \%$  [1, 2]. Несмотря на широкое использование алюминизированных эмульсионных ВВ в промышленности, детально детонационные характеристики этих композиций не изучены. Научные работы, в которых приводятся исследования детонационных характеристик эмульсионных ВВ с добавлением алюминия, немногочисленны, например [3–8]. Как правило, изучаются составы плотностью более  $1.0 \text{ г/см}^3$ , что актуально при ведении горных работ. При этом отмечается, что скорость детонации эмульсионных ВВ по-

сле добавления алюминия всегда уменьшается, а давление в окружающей среде при этом может оказаться несколько больше. Такое поведение можно объяснить, если предположить, что алюминий не успевает полностью прореагировать до поверхности Чепмена — Жуге, а основная масса алюминия сгорает уже при разлете продуктов детонации.

В практических приложениях важен вопрос о том, как алюминиевая добавка в составе эмульсионных ВВ повлияет на динамическое действие взрывчатой композиции на окружающую среду. Метательная способность — одна из характеристик ВВ, которая дает представление об интегральном действии продуктов детонации ВВ на прилегающие к заряду материалы. Поэтому определение метательной способности полезно как с практической стороны, так и для выяснения закономерностей поведения алюминизированных ВВ.

Целью данной работы является изучение зависимости скорости детонации и метательной способности алюминизированного эмульсионного ВВ от начальной плотности взрывчатой композиции и массового содержания алюминия. Проведено сравнение алюминизированных эмульсионных ВВ с взрывчатыми составами, в которых алюминий заменен на инертный материал.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИИ

В качестве основы взрывной композиции выбрано эмульсионное ВВ, состоящее из раствора аммиачной (68.25 %) и натриевой (10.55 %) селитры в воде (15.2 %), индустриального масла И-20 (4 %) и эмульгатора сорбитана моноолеата (2 %). Плотность чистой эмульсии  $1.41 \text{ г/см}^3$ . Кислородный баланс эмульсии близок к нулю. В качестве сенсibilизатора использовались полимерные микробаллоны Expancel 461 DET 40 d25 среднего размера около 60 мкм. Средняя плотность отдельного микробаллона  $0.024 \text{ г/см}^3$ . Плотность эмульсионного ВВ варьировалась путем изменения содержания микробаллонов. Более подробно технология изготовления эмульсионного ВВ описана в [9].

В качестве алюминиевой добавки в большинстве экспериментов использовался алюминиевый порошок ПАП-2, частицы которого представляют собой хлопья среднего размера около  $10 \div 30 \text{ мкм}$  и толщиной менее 1 мкм. Также использовался алюминиевый порошок марки АД0, сферические частицы которого имеют размер  $5 \div 15 \text{ мкм}$  со средним значением около 10 мкм. В контрольных экспериментах в качестве добавки к эмульсионному ВВ использовался порошок талька. Частицы талька также имели форму хлопьев среднего размера около 5 мкм.

В основном исследовались взрывчатые композиции с массовым содержанием алюминиевого порошка (или талька)  $\alpha = 0, 0.17$  и  $0.29$ , что соответственно равно массовому содержанию 0, 20 и 40 % сверх массы эмульсии.

Далее для краткости будем называть эмульсионное взрывчатое вещество без добавок — ЭмВВ, с добавлением порошка ПАП-2 с формой частиц подобной хлопьям — ЭмВВ(Х), с добавлением порошка АД0 со сферической формой частиц — ЭмВВ(С), с добавлением талька — ЭмВВ(Т).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

### Измерение скорости детонации

Исследуемые композиции помещались в пластиковые трубки с толщиной стенки 0.8 мм и длиной 10 диаметров заряда. Измерение скорости проводилось с помощью контактных датчиков. Погрешность измерения скорости детонации была не больше  $\pm 0.1 \text{ мм/мкс}$ .

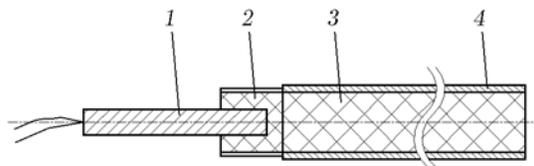


Рис. 1. Схема для изучения метательной способности:

1 — детонатор ЭДВ-1, 2 — промежуточный боевик, 3 — ВВ, 4 — медная трубка

### Определение метательной способности

Метание медной оболочки проводилось по схеме, показанной на рис. 1. Взрывчатое вещество помещалось в отожженную при температуре  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  медную трубку с внешним диаметром 22 мм, внутренним — 20 мм, длиной 230 мм. Иницирование проводилось детонатором ЭДВ-1 через промежуточный боевик высотой 20 мм из ЭмВВ плотностью 0.5 или  $1.0 \text{ г/см}^3$ . Для каждой из исследуемых взрывчатых композиций выбирался боевик с наиболее близким значением плотности. При изготовлении боевика ЭмВВ помещалось в бумажную трубку.

Во время детонации заряда проводилось рентгенографирование процесса расширения медной оболочки в три разных момента времени. Источники импульсного рентгеновского излучения — три аппарата «Арион-600». Расстояние от аппаратов до заряда 1 м, от заряда до кассеты с пленкой — 0.33 м. Коэффициент увеличения на снимке равен 1.33. Коррекция перспективы при обработке снимков не проводилась. По рентгенограммам определялась форма оболочки. Фронт детонации на рентгенограммах, как правило, не виден. Поэтому путь, который прошла детонационная волна между кадрами, определялся следующим образом. Два кадра совмещались так, чтобы изображения участков начала разлета медной оболочки совпали. После этого на совмещенных кадрах измерялось расстояние между двумя изображениями конца медной трубки, противоположного месту иницирования детонации (т. е. конца трубки, до которого детонация еще не дошла). Скорость детонации рассчитывалась как отношение этого измеренного расстояния (с учетом коэффициента увеличения) к интервалу времени между рентгеновскими вспышками. Точность определения скорости детонации в этой серии экспериментов существенно зависела от качества полученных рентгенограмм и формы

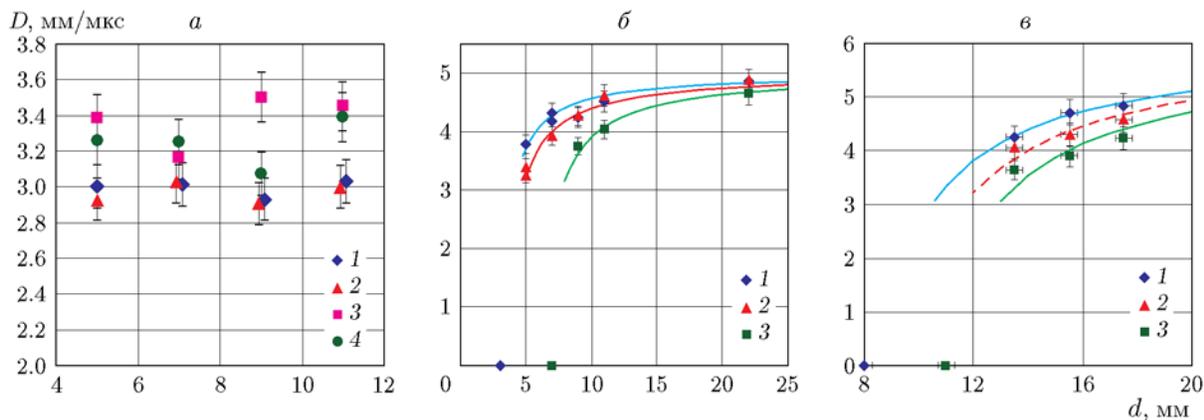


Рис. 2. Скорость детонации алюминизированных эмульсионных ВВ в зависимости от диаметра заряда:

а: 1 —  $\alpha = 0$  ( $\rho_0 = 0.5 \text{ г/см}^3$ ), 2 — 0.09 (0.54  $\text{г/см}^3$ ), 3 — 0.17 (0.58  $\text{г/см}^3$ ), 4 — 0.23 (0.62  $\text{г/см}^3$ );  
 б: 1 — 0 (1.0  $\text{г/см}^3$ ), 2 — 0.17 (1.12  $\text{г/см}^3$ ), 3 — 0.29 (1.22  $\text{г/см}^3$ );  
 в: 1 — 0 (1.2  $\text{г/см}^3$ ), 2 — 0.09 (1.26  $\text{г/см}^3$ ), 3 — 0.17 (1.32  $\text{г/см}^3$ )

разлетающейся медной оболочки. В разных экспериментах она лежала в диапазоне  $2 \div 5 \%$  от измеряемой величины.

Радиальная скорость  $v_r$  метаемой оболочки рассчитывалась по ее форме и измеренной скорости детонации  $D$  в предположении, что процесс детонации и разлета медной трубки стационарный. Для этого в определенной точке измерялся угол  $\theta$  между касательной к поверхности оболочки и осью симметрии. Затем радиальная компонента скорости оболочки в этой точке рассчитывалась по формуле

$$v_r = D \operatorname{tg}(\theta).$$

По величине  $v_r$  вдоль оси заряда определялась динамика разгона оболочки. Погрешность значений скорости  $v_r$  в проведенных экспериментах составляла около  $10 \%$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Скорость детонации

На рис. 2,а приведены значения скорости детонации ЭмВВ плотностью  $0.5 \text{ г/см}^3$ , а также скорости детонации составов ЭмВВ(X), полученных из этого ЭмВВ добавлением разного количества порошка ПАП-2, при различных диаметрах заряда в пластиковой оболочке. После добавления алюминия в ЭмВВ измерялась плотность приготовленного ЭмВВ(X)  $\rho_0$ , и она была больше, чем исходная  $0.5 \text{ г/см}^3$ . Затем

изготовленное ЭмВВ(X) помещалось в пластиковую трубку, при этом плотность ЭмВВ(X) в трубке уже не измерялась. Процесс наполнения трубок малого диаметра эмульсионным ВВ достаточно сложен и может привести к неконтролируемому изменению плотности как за счет наличия воздушных пузырей, так и за счет сжатия полимерных микросфер. Этот факт трудно учесть при анализе данных. Каждая точка на рисунке соответствует одному эксперименту. Немонотонность полученной зависимости вызвана, скорее всего, сложностью изготовления однородного высокопористого заряда столь малого диаметра. Тем не менее отчетливо видно, что при массовом содержании алюминиевого порошка  $\alpha = 0.17 \div 0.23$  скорость детонации увеличивается с  $3.0 \pm 0.1$  до  $3.4 \pm 0.1 \text{ мм/мкс}$ . Судить о величине критического диаметра для ЭмВВ(X) плотностью около  $0.5 \text{ г/см}^3$  по приведенным экспериментам сложно, поскольку используемая трубка из пластика является достаточно толстой для этого ВВ. На основании этих экспериментов можно лишь ожидать, что в медной трубке диаметром 20 мм (с помощью которой измерялась металательная способность) скорость детонации алюминизированных составов с близкой плотностью недалеко от предельного значения.

На рис. 2,б приведена зависимость скорости детонации ЭмВВ начальной плотности  $1.0 \text{ г/см}^3$ , а также скорости детонации составов ЭмВВ(X), полученных из этого ЭмВВ добавлением разного количества порошка ПАП-2, от

диаметра заряда. Видно, что добавление алюминиевого порошка приводит к увеличению критического диаметра и уменьшению скорости детонации. Причем при диаметре заряда 22 мм значения скорости детонации ЭмВВ и ЭмВВ(Х) близки к предельной скорости детонации 5.08 мм/мкс [9] заряда ЭмВВ плотностью 1.0 г/см<sup>3</sup>.

Аналогичные зависимости получены для ЭмВВ начальной плотности 1.2 г/см<sup>3</sup> и изготовленных из него составов ЭмВВ(Х) (рис. 2,б). Как и для ЭмВВ плотностью 1.0 г/см<sup>3</sup>, увеличение массового содержания алюминиевого порошка приводит к увеличению критического диаметра и уменьшению скорости детонации. При диаметре заряда чуть менее 20 мм измеренные значения скорости детонации значительно меньше предельной скорости детонации 6.2 мм/мкс [9] заряда ЭмВВ этой плотности.

### МЕТЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

При определении метательной способности плотность каждого заряда ВВ  $\rho_{00}$  измерялась непосредственно после наполнения медной трубки этим ВВ. Рентгенограмма разлета оболочки показана на рис. 3. Небольшая несимметричность формы оболочки, вероятно, вы-

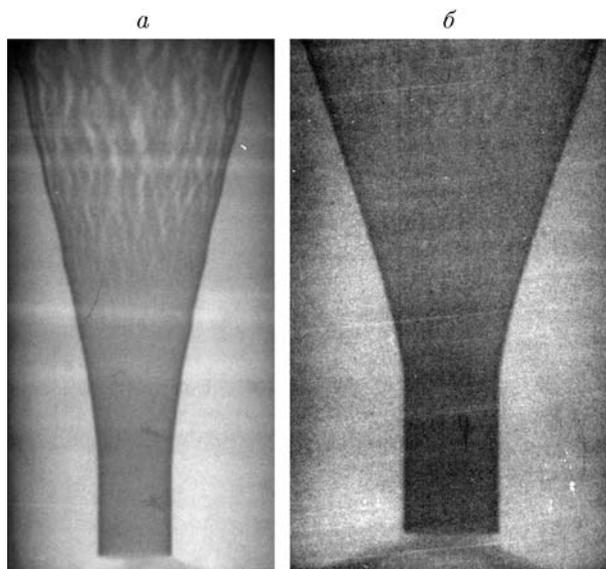


Рис. 3. Рентгенограммы метания медной оболочки зарядами ЭмВВ(Х) при массовом содержании добавки алюминия  $\alpha = 0.29$  и плотности  $\rho_{00} = 0.21$  г/см<sup>3</sup> (а) и 1.375 г/см<sup>3</sup> (б)

звана неоднородной структурой заряда. Поэтому при определении формы оболочки, необходимой для измерения угла ее поворота, брали среднее положение поверхности левой и правой сторон оболочки на снимке. Неопределенность в процессе совмещения рентгенограмм вносила основной вклад в погрешность измеряемого значения скорости детонации.

На рис. 4 приведены зависимости скорости детонации ЭмВВ, а также составов ЭмВВ(Х), ЭмВВ(С) и ЭмВВ(Т) от начальной плотности, измеренные в медной трубке.

Для всех составов с одинаковым содержанием алюминия эту зависимость можно удовлетворительно описать своей прямой линией. Увеличение содержания алюминия приводит к уменьшению наклона этой прямой. Зависимости для ЭмВВ(Х) и ЭмВВ(С) очень близки при одинаковом содержании алюминия. Видно, что влияние порошков ПАП-2 и АД0 на скорость детонации различно только при плотности заряда около 0.2 г/см<sup>3</sup>. При такой плотности скорость детонации ЭмВВ(Х) больше, чем у ЭмВВ, а скорости детонации ЭмВВ(С) и ЭмВВ примерно равны.

Как видно из рис. 4, добавление в ЭмВВ порошка талька всегда приводит к заметному уменьшению скорости детонации. При массовом содержании талька 0.17 зависимость скорости детонации от плотности ВВ практически

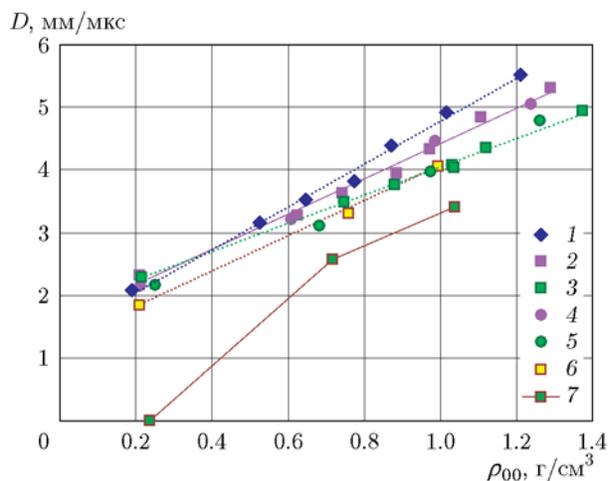


Рис. 4. Скорость детонации:

состав ВВ и массовое содержание добавки: 1 — ЭмВВ без добавки,  $\alpha = 0$ , 2 — ЭмВВ(Х),  $\alpha = 0.17$ , 3 — ЭмВВ(Х),  $\alpha = 0.29$ , 4 — ЭмВВ(С),  $\alpha = 0.17$ , 5 — ЭмВВ(С),  $\alpha = 0.29$ , 6 — ЭмВВ(Т),  $\alpha = 0.17$ , 7 — ЭмВВ(Т),  $\alpha = 0.29$

линейная. При массовом содержании 0.29, по-видимому, тоже присутствует линейный участок. Чем больше массовое содержание талька в составе ВВ, тем меньше скорость детонации и, как и в случае с алюминием, меньше наклон линейной зависимости  $D(\rho_{00})$ , чем у ЭМВВ.

На рис. 5 приведены значения радиальной скорости  $v_r$  медной оболочки в момент ее разрушения. В разных экспериментах разрушение происходило при разных диаметрах медной трубки, в большинстве случаев — при диаметре, примерно в два раза превышающем начальный диаметр. Иногда разрушение трубки происходило при значительно меньшем расширении. Мы связываем это с неоднородностью наполнения трубки взрывчатым веществом — скорее всего, в трубке присутствует большой воздушный пузырь. Полученное в таком эксперименте значение  $v_r$  в дальнейшем в расчет не принималось (измеренное значение скорости детонации учитывалось), а эксперимент, как правило, повторялся.

Для ЭМВВ зависимость радиальной скорости оболочки  $v_r$  от начальной плотности  $\rho_{00}$  можно описать прямой линией (см. рис. 5). Интересно, что этой же линией описывается зависимость  $v_r(\rho_{00})$  для ЭМВВ(Х) с массовым содержанием ПАП-2 как 0.17, так и 0.29. Зависимость  $v_r(\rho_{00})$  для ЭМВВ(С) тоже линейная до

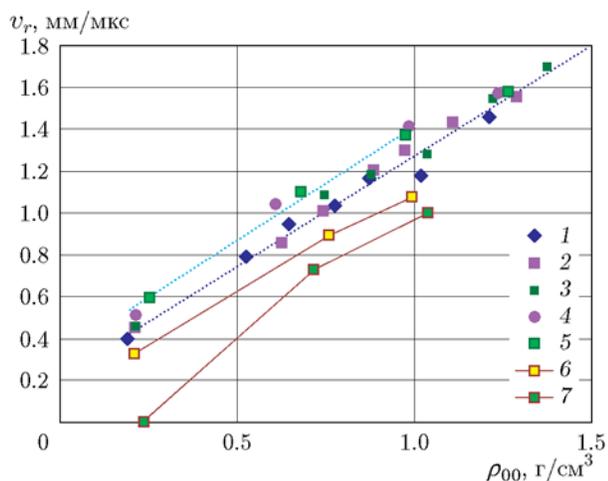


Рис. 5. Радиальная скорость медной оболочки: состав ВВ и массовое содержание добавки: 1 — ЭМВВ без добавок,  $\alpha = 0$ , 2 — ЭМВВ(Х),  $\alpha = 0.17$ , 3 — ЭМВВ(Х), 0.29, 4 — ЭМВВ(С), 0.17, 5 — ЭМВВ(С), 0.29, 6 — ЭМВВ(Т), 0.17, 7 — ЭМВВ(Т), 0.29

плотности  $1.0 \text{ г/см}^3$ , но лежит несколько выше, чем для ЭМВВ и ЭМВВ(Х). Для ЭМВВ(С) с плотностью более  $1.0 \text{ г/см}^3$  значения  $v_r$  близки к значениям  $v_r$  для ЭМВВ и ЭМВВ(Х). Для ЭМВВ(Т), как и при измерении скорости детонации, добавление талька уменьшает радиальную скорость метаемой медной оболочки.

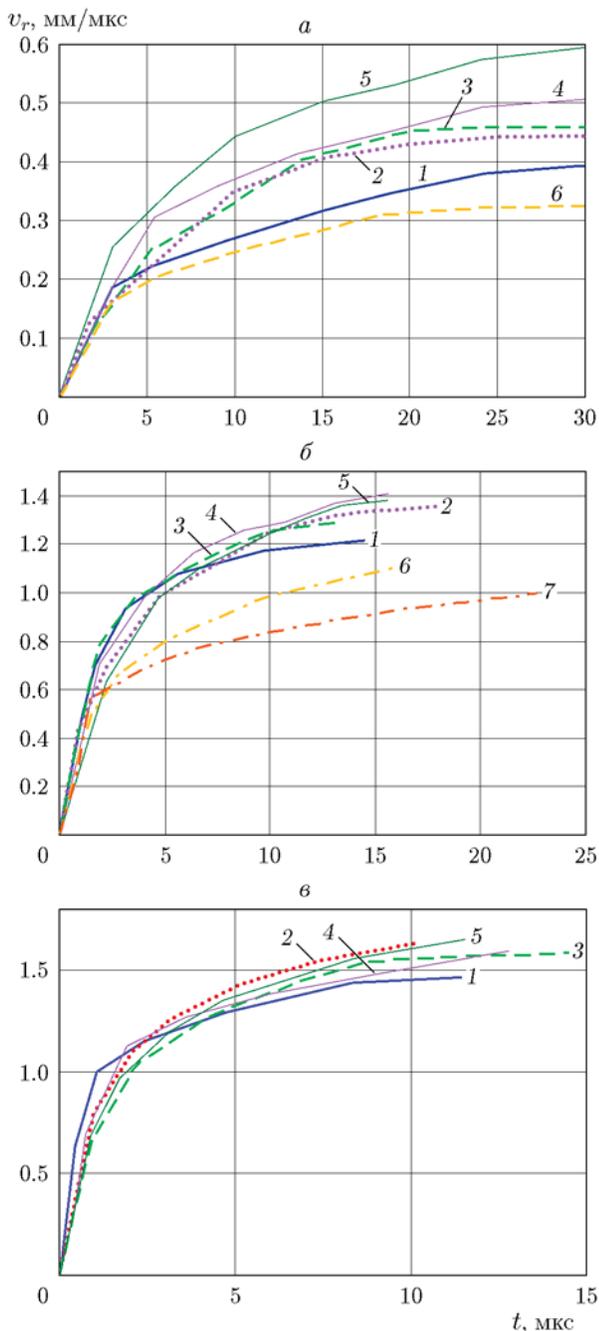
На рис. 6 приведена динамика разгона оболочки зарядами с близкой начальной плотностью, но с разным содержанием алюминиевого порошка или порошка талька. К сожалению, в проведенной серии экспериментов сложно найти такое значение плотности, чтобы можно было определить метательную способность всех исследованных составов с этой начальной плотностью.

Следует отметить, что на рис. 6 время отсчитывается от момента, когда фронт детонационной волны проходит участок трубы, скорость которого показана на рисунке. Из-за того, что на рентгенограммах фронт детонации виден плохо или не виден совсем, изображенные на рисунке кривые имеют неопределенную систематическую погрешность по времени около 1 мкс. Это не позволяет аккуратно сравнивать динамику разгона оболочек в самый начальный момент времени.

При плотности зарядов, близкой к  $0.2 \text{ г/см}^3$ , все составы разгоняют медную оболочку за первые  $2 \div 3$  мкс до скорости  $0.2 \text{ мм/мкс}$  (рис. 6,а). После этого ускорение уменьшается. Причем отчетливо видно, что при использовании алюминизированных составов темп замедления ускорения меньше, чем у ЭМВВ и ЭМВВ(Т). Это приводит к тому, что скорость метания оболочки составами ЭМВВ(Х) и ЭМВВ(С) больше, чем при использовании ЭМВВ без добавок.

При плотности зарядов, близкой к  $1.0 \text{ г/см}^3$ , добавление талька в ЭМВВ приводит к заметному уменьшению ускорения оболочки примерно через 2 мкс (рис. 6,б). Алюминизированные составы ЭМВВ(Х) и ЭМВВ(С) и состав без добавок ЭМВВ при данной плотности разгоняют оболочку очень похожим образом.

При плотности зарядов, близкой к  $1.22 \text{ г/см}^3$ , как и в случае  $\rho_{00} = 1.0 \text{ г/см}^3$ , составы ЭМВВ, ЭМВВ(Х) и ЭМВВ(С) разгоняют медную оболочку достаточно плавно, за одинаковые характерные времена (рис. 6,в).



### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В [10] приведено большое количество данных о влиянии различных порошков (в том числе порошков алюминия и талька) на детонационные характеристики различных ВВ. Влияние алюминиевого порошка на эмульсионные ВВ отличается от влияния как на мощные ВВ типа гексогена, так и на насыпные и прессованные заряды аммиачной селитры. В отличие от ЭМВВ, добавление алюминия к гексо-

Рис. 6. Радиальная скорость медных трубок:

*а* — взрывчатые составы плотностью, близкой к  $0.2 \text{ г/см}^3$ ; состав, массовое содержание добавки и плотность: 1 — ЭМВВ без добавок,  $\alpha = 0$  ( $\rho_{00} = 0.19 \text{ г/см}^3$ ), 2 — ЭМВВ(X),  $\alpha = 0.17$  ( $0.21 \text{ г/см}^3$ ), 3 — ЭМВВ(X), 0.29 ( $0.21 \text{ г/см}^3$ ), 4 — ЭМВВ(С), 0.17 ( $0.21 \text{ г/см}^3$ ), 5 — ЭМВВ(С), 0.29 ( $0.25 \text{ г/см}^3$ ), 6 — ЭМВВ(Т), 0.17 ( $0.22 \text{ г/см}^3$ );  
*б* — взрывчатые составы плотностью, близкой к  $1.0 \text{ г/см}^3$ ; состав, массовое содержание добавки и плотность: 1 — ЭМВВ без добавок,  $\alpha = 0$  ( $\rho_{00} = 1.02 \text{ г/см}^3$ ), 2 — ЭМВВ(X),  $\alpha = 0.17$  ( $0.97 \text{ г/см}^3$ ), 3 — ЭМВВ(X), 0.29 ( $1.04 \text{ г/см}^3$ ), 4 — ЭМВВ(С), 0.17 ( $0.99 \text{ г/см}^3$ ), 5 — ЭМВВ(С), 0.29 ( $0.98 \text{ г/см}^3$ ), 6 — ЭМВВ(Т), 0.17 ( $0.99 \text{ г/см}^3$ ), 7 — ЭМВВ(Т), 0.29 ( $1.04 \text{ г/см}^3$ );  
*в* — взрывчатые составы плотностью, близкой к  $1.2 \text{ г/см}^3$ ; состав, массовое содержание добавки и плотность: 1 — ЭМВВ без добавок,  $\alpha = 0$  ( $\rho_{00} = 1.21 \text{ г/см}^3$ ), 2 — ЭМВВ(X),  $\alpha = 0.17$  ( $1.29 \text{ г/см}^3$ ), 3 — ЭМВВ(X), 0.29 ( $1.22 \text{ г/см}^3$ ), 4 — ЭМВВ(С), 0.17 ( $1.24 \text{ г/см}^3$ ), 5 — ЭМВВ(С), 0.29 ( $1.25 \text{ г/см}^3$ )

гену всегда приводит к понижению скорости детонации даже при малой плотности заряда. У ВВ на основе аммиачной селитры плотностью  $0.9 \div 1.1 \text{ г/см}^3$  скорость детонации заряда диаметром около  $200 \text{ мм}$  значительно растет при добавлении небольшого количества алюминия [11]. Однако это вызвано значительным увеличением чувствительности смеси аммиачной селитры с алюминием по сравнению с чистой аммиачной селитрой. При этом отсутствуют экспериментальные данные о предельной скорости детонации аммиачной селитры. Для определения влияния алюминиевого порошка на предельную скорость детонации зарядов на основе аммиачной селитры необходимы, вероятно, эксперименты с зарядами диаметром более  $1 \text{ м}$  [11]. В отличие от селитры, у ЭМВВ при плотностях  $1.0$  и  $1.2 \text{ г/см}^3$ , как было показано, чувствительность уменьшается при добавлении алюминия. Об этом можно судить по возрастанию критического диаметра ЭМВВ после добавления алюминия (см. рис. 2, б, в).

Добавление любого нового компонента в ВВ влияет как на его детонационные характеристики, так и на его взрывное действие. Проведенные эксперименты с добавлением в эмульсионное ВВ порошка талька наглядно демонстрируют, как инертная добавка влияет на детонационные характеристики, а именно на скорость детонации, и на взрывное действие, в качестве характеристики которого рассматрива-

лась метательная способность ВВ. Очевидно, что влияние алюминиевой добавки на взрывчатые характеристики ЭМВВ отличается от действия инертной добавки.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при плотности заряда менее  $0.4 \text{ г/см}^3$  существует механизм в детонационном фронте, который позволяет более полно реализоваться энергетическим возможностям порошка ПАП-2 по сравнению с АД0. При большей начальной плотности зарядов порошки ПАП-2 и АД0 оказывают одинаковое влияние на скорость детонации.

Если рассматривать метательную способность эмульсионного ВВ, то алюминиевая добавка также является активной. Радиальная скорость метаемой оболочки примерно одинакова для ЭМВВ и ЭМВВ(Х) во всем диапазоне начальной плотности. При использовании состава ЭМВВ(С) плотностью менее  $1.0 \text{ г/см}^3$  скорость оболочки оказывается даже больше, чем при использовании ЭМВВ той же плотности.

Экспериментальные данные демонстрируют сложность процесса детонации алюминизированного ВВ. Для более полного его понимания необходимы экспериментальные данные о влиянии на него параметров пор, дисперсности эмульсионной матрицы, размеров частиц алюминия. Также необходимы эксперименты по измерению дополнительных параметров детонационной волны, например детонационного давления. Тем не менее уже сейчас видно, что использование алюминиевого порошка позволяет получать взрывчатые составы на основе эмульсионного ВВ гораздо более мощные, чем ЭМВВ без добавок. У используемого в данной работе ЭМВВ критический диаметр сильно растет с увеличением плотности ВВ [9]. При плотности больше  $1.33 \text{ г/см}^3$  критический диаметр превышает 40 мм, а предельный диаметр, вероятно, больше 100 мм. Это сильно осложняет практическое использование ЭМВВ плотностью больше  $1.2 \text{ г/см}^3$ . Добавление порошка алюминия с массовым содержанием 0.29 в эмульсионное ВВ позволило получить взрывчатый состав плотностью  $1.38 \text{ г/см}^3$ , детонирующий в тонкостенной медной трубке внутреннего диаметра 20 мм со скоростью около  $5.0 \text{ мм/мкс}$ . Метательная способность данного алюминизированного состава значительно превышает метательную способность ЭМВВ плотностью  $1.2 \text{ г/см}^3$ , которая является почти

предельной при практическом использовании ЭМВВ [1, 2].

## ВЫВОДЫ

Исследовано влияние пористости и разного содержания алюминиевого порошка на скорость детонации и метательную способность эмульсионного взрывчатого вещества. Показано:

- алюминиевый порошок — активная энергетическая добавка, которая при небольшой плотности ЭМВВ может увеличивать скорость детонации;
- порошок ПАП-2 «активнее» внутри зоны реакции, а порошок АД0 дает больший вклад в метательную способность при плотности взрывчатой композиции менее  $1.0 \text{ г/см}^3$ ;
- использование алюминия в составе ЭМВВ позволяет получать составы более мощные, чем ЭМВВ без добавок, за счет увеличения плотности ВВ при сохранении достаточной чувствительности взрывчатой композиции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колганов Е. В., Соснин В. А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. Кн. 1: Составы и свойства. — Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009.
2. Wang Xuguang. Emulsion Explosives. — Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
3. Mendes R., Ribeiro J., Plaksin I., Campos J. Non ideal detonation of emulsion explosives mixed with metal particles // AIP Conf. Proc. — 2011. — V. 1426, N 1. — P. 267–270. — DOI: 10.1063/1.3686270.
4. 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.
5. 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., USA. — 2002. — P. 584–593. — DOI: 10.1201/9781439833476.ch25.
6. Arvind Kumar Mishra, Hemant Agrawal, Manamohan Raut. 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.

7. **Hansson H.** Determination of properties for emulsion explosives using cylinder expansion tests and numerical simulation // Swebrec Rep. — Stockholm, 2009. — N 1.
8. **Kato Y., Murata K., Kaga N., Tanaka K., Takahashi K.** Reaction of aluminum particles in detonation of emulsion explosive // 6th EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Lisbon, 2011: Conf. Proc. — P. 281–289.
9. **Юношев А. С., Пластинин А. В., Рафейчик 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.
10. **Физика взрыва:** в 2 т. // под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, испр. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 1.
11. **Cook M. F., 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.

*Поступила в редакцию 18.02.2021.*

*После доработки 22.04.2021.*

*Принята к публикации 09.06.2021.*

---