

УДК 544.454.3:534.222.2:662.215.2:662.216.3:662.237.3

# ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ИХ ДЕТОНАЦИОННОМ ПРЕВРАЩЕНИИ

Н. П. Сатонкина<sup>1,2</sup>, Э. Р. Прууэл<sup>1,2</sup>, А. П. Ершов<sup>1,2</sup>, **В. В. Сильвестров<sup>1,2</sup>**,  
Д. И. Карпов<sup>1,2</sup>, А. В. Пластинин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, snp@hydro.nsc.ru

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Измерена электрическая проводимость продуктов взрыва за фронтом детонации эмульсионных взрывчатых веществ. Изменялись состав эмульсионной матрицы и величина добавки сенсibiliзирующих микробаллонов из стекла. Пиковое значение электропроводности для исследованных композиций составляло  $0.5 \div 0.05 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ .

Ключевые слова: детонация, эмульсионное взрывчатое вещество, время химической реакции, зона химической реакции, электропроводность продуктов взрыва.

DOI 10.15372/FGV20150313

## ВВЕДЕНИЕ

Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ) готовятся на основе реагирующей матрицы (эмульсии), которая сама по себе не способна к детонации. Способность к детонации эмульсии придают специально добавляемые сенсibiliзаторы, например тонкостенные полые микросферы из стекла. При сжатии во фронте волны эти микробаллоны схлопываются, при этом достигаются высокие локальные давления и температура  $2500 \div 3000 \text{ К}$  [1, 2]. Таким образом, микросферы служат зародышами «горячих точек», в которых и начинается реакция [3]. ЭмВВ широко используются в горной промышленности [4] и демонстрируют такие особенности, как немонотонная зависимость скорости детонации от плотности, увеличение критического диаметра и времени химической реакции при росте плотности композиций [5, 6]. Оценки времени реакции, выполненные по профилю массовой скорости электромагнитным методом [7, 8] и методом лазерной интерферометрии

[9], по профилям давления [10] и плотности за фронтом волны детонации [11], дают значения в диапазоне  $0.5 \div 2.0 \text{ мкс}$ .

Цель исследования — измерение распределения электропроводности  $\sigma(t)$  продуктов взрыва (ПВ) за фронтом детонации в ЭмВВ и поиск корреляции между параметрами зоны реакции и профиля электропроводности. Для решения задачи применен разработанный ранее метод измерения  $\sigma(t)$  с субмикросекундным временным разрешением [12, 13]. Получены и проанализированы временные профили электропроводности при детонации в широком диапазоне начальных плотностей ЭмВВ.

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Использовались эмульсионные матрицы на основе водного раствора смеси аммиачной и натриевой селитры (АС/НС-эмульсия) и только аммиачной селитры (АС-эмульсия), составы которых приведены в таблице. Для приготовления ЭмВВ в эмульсию подмешивали полые стеклянные микросферы марки МС-В отечественного производства. Масса микросфер  $\mu$  составляла  $3 \div 50 \%$  сверх массы эмульсии, например, запись  $\mu = 20 \%$  означает, что на 1 г эмульсии добавлялось 0.2 г микросфер. Средний размер микросфер 58 мкм, насыпная плотность  $0.14 \div 0.15 \text{ г/см}^3$ , толщина стенки  $0.5 \div 1.0 \text{ мкм}$ . Методом рентгеновской томографии [14] исследован образец ЭмВВ размером

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП (государственный контракт № П 412), программы Президиума РАН № 2 (проект № 7), Лаврентьевского молодежного проекта № 4.5, гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-2695.2014.1).

© Сатонкина Н. П., Прууэл Э. Р., Ершов А. П., Сильвестров В. В., Карпов Д. И., Пластинин А. В., 2015.

Матрица	Состав, % (масс.)					Кислородный баланс, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
	селитра аммиачная	селитра натриевая	вода	эмульгатор с маслом	парафин		
АС/НС-эмульсия	68.25	10.55	15.2	4	2	-2	1.4
АС-эмульсия	76.9	—	15.2	4	3.9	-12	1.5

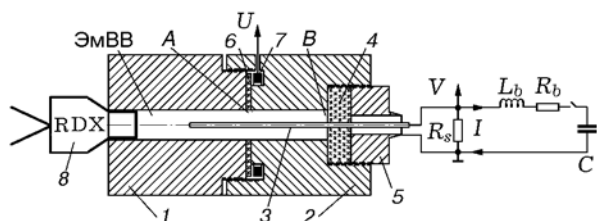


Рис. 1. Электрическая схема и экспериментальная ячейка

$\approx 1$  мм с  $\mu = 3$  % и подтверждено, что микросферы распределены по объему равномерно.

Техника измерения электропроводности и обработки данных подробно рассмотрена в [12, 13], здесь приведем только краткое описание.

Взрывчатое вещество располагалось в медной коаксиальной ячейке (рис. 1). Диаметр заряда  $b = 8$  мм. Внешний электрод был составным, его части 1, 2 плотно соединялись резьбой. Внутренний медный электрод 3 диаметром  $c = 2$  мм находился в ВВ и закреплялся в пробке из оргстекла 4, которая фиксировалась медным болтом 5. В полости внешнего электрода размещалась тороидальная катушка 7, служившая датчиком электропроводности. Узкая щель, соединяющая полость с измерительным объемом ячейки, заполнялась диэлектриком 6 из оргстекла толщиной  $0.4 \div 0.7$  мм. Полость внутри коаксиальной ячейки заполнялась исследуемым ВВ, которое инициировалось гексогеном плотностью  $\rho = 1.1$  г/см<sup>3</sup> через осевой канал диаметром 4 мм в пробке из оргстекла 8. Мощность инициатора варьировалась путем измерения длины заряда гексогена от 5 до 25 мм, и в результате были реализованы режим ударного нагружения ЭМВВ без развития детонации, нормальная детонация и режим перешагнутой детонации. Общая длина заряда ЭМВВ — 50 мм.

Питание ячейки током  $I$  осуществлялось от конденсатора через балластное сопротивление  $R_b$ , параллельно ячейке включался шунт  $R_s$ . Измерялись питающее напряжение  $V(t)$  и сигнал на датчике  $U(t)$ . Электропроводность

в плоскости щели пропорциональна сигналу с катушки:

$$\sigma(t) = \frac{\ln(b/c) U(t)}{2\pi DM V(t)}. \quad (1)$$

Здесь  $t$  — время, прошедшее после того, как фронт детонации миновал щель,  $D$  — скорость детонации,  $M$  — взаимная индуктивность катушки и контура полости. Проводилась корректировка сигнала, для устранения искажения  $U(t)$  из-за индуктивности датчика [13].

Пространственное разрешение схемы оценивается в четверть толщины изолятора 6 [13]. Ошибка измерения электропроводности не превышала 20 %. К моменту достижения детонационной волной изолятора фронт детонации проходит от места инициирования больше четырех калибров. Измерение скорости детонации  $D$  проводилось на базе АВ, примерно равной 15 мм. Точка А соответствует моменту прохождения детонационной волной разреза внешнего электрода и диэлектрика, В — моменту выхода детонации на торец заряда. При достаточной мощности инициирования все исследуемые составы детонировали внутри экспериментальной ячейки, так как критический диаметр детонации ЭМВВ в оболочке с высоким акустическим импедансом (из стали) меньше 8 мм [15].

Для каждой эмульсионной взрывчатой композиции выполнено по 2–3 эксперимента, результаты которых удовлетворительно повторялись. Разброс в виде случайных колебаний на фоне основного сигнала (см. ниже рис. 6, б) вызван, главным образом, неоднородностью заряжения, которую трудно избежать при небольшом диаметре заряда.

*Предварительные оценки.* При нормальных условиях электропроводность чистой эмульсии, без сенсibilизатора, составила: для АС/НС-эмульсии — около  $4 \cdot 10^{-8}$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>, для АС-эмульсии — около  $8.4 \cdot 10^{-8}$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>. При ударном нагружении чистой АС/НС-эмульсии (средняя скорость волны сжатия 1800 м/с на базе

$AB = 30$  мм) электропроводность увеличилась до  $\sigma = 6.6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , что на два порядка меньше значений, регистрируемых в детонационной волне. После спада давления через  $\approx 40$  мкс исходное сопротивление восстановилось, что указывает на отсутствие заметных физико-химических превращений в чистой эмульсии при динамическом нагружении, достаточном для инициирования ЭМВВ, включающего в себя сенсibiliзирующую добавку.

В исходной эмульсии содержится около 15 % воды, диссоциация которой могла бы внести вклад в электрическую проводимость за фронтом ударной волны. Но даже при давлении за ударной волной  $5 \div 8$  ГПа, характерном для детонации ЭМВВ, электропроводность воды  $\sigma < 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  [16], что существенно меньше, чем ударная проводимость эмульсии. Поэтому вкладом ударной проводимости воды не объяснить наблюдаемые значения проводимости продуктов взрыва ЭМВВ.

При детонации ЭМВВ полые микросферы из стекла разрушаются на субмикронные фрагменты. Как показано в [17], в ударных волнах электропроводность стекла резко увеличивается, однако в нашем диапазоне давления она не превышает  $10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , так что ею можно пренебречь. В результате в продуктах детонации присутствует диэлектрик, который в химических реакциях практически не участвует и занимает часть объема среды. Объемную долю стекла  $\alpha$  после разрушения микросфер можно оценить по формуле

$$\alpha = \frac{\mu}{\mu + \rho_g / \rho_m},$$

где  $\rho_g$  и  $\rho_m$  — плотности стекла и матрицы соответственно. При сравнительно невысоком давлении, развиваемом при детонации ЭМВВ, в этой формуле разумно пренебречь сжатием как стекла, так и матрицы в окрестности точки Чепмена — Жуге. Тогда при изменении  $\mu$  в диапазоне  $3 \div 50$  % значение  $\alpha$  меняется от 0.016 до 0.22.

Присутствие непроводящих стеклянных фрагментов может повлиять на измеряемую электропроводность среды. Для оценки этого эффекта проводилось численное моделирование по методу, описанному в [18]. Зависимость электропроводности среды, содержащей диэлектрические включения, от объемной доли диэлектрика можно представить в виде

$$\sigma_g / \sigma = 1 - 1.5\alpha,$$

где  $\sigma_g$  и  $\sigma$  — электропроводность среды с непроводящими включениями и чистого проводящего компонента соответственно. Эта зависимость выполняется вплоть до  $\alpha = 0.5$ . При максимальном для наших условий значении  $\mu = 50$  % ( $\alpha = 0.22$ ) проводимость среды уменьшается примерно на треть.

Приводимые ниже значения электропроводности скорректированы на эту поправку, чтобы выделить роль проводящей фазы. Заметим, что в процессе расширения ПД объемная доля диэлектрика  $\alpha$  уменьшается и блокирующий эффект включений ослабевает. Учтеть эти изменения в рамках данного исследования затруднительно, поэтому коэффициент пересчета для всего измеренного профиля  $\sigma(t)$  принимался постоянным, соответствующим предположению о равенстве плотности проводящего компонента начальной плотности матрицы, как указано выше. Таким образом, наиболее точная коррекция соответствует окрестности зоны реакции, где наблюдалась максимальная или близкая к максимальной электропроводность и где приводимые значения  $\sigma$  близки к истинной электропроводности проводящего компонента. Этим достигается более аккуратное сравнение различных композиций. Форма же профиля (т. е. его относительные изменения) отражает поведение непосредственно измеряемой электропроводности среды с включениями  $\sigma_g$ ; электропроводность проводящей фазы спадает при расширении ПД несколько быстрее.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

За фронтом детонации давление, температура и плотность вещества увеличиваются. В ходе химической реакции изменяется состав продуктов взрыва, возможна их термическая диссоциация и ионизация. В результате за фронтом волны появляется электрическая проводимость.

### АС/НС-эмульсия

На рис. 2 приведены три характерных профиля  $\sigma(t)$  для ЭМВВ на основе АС/НС-эмульсии. Параметры ЭМВВ изменялись в широких пределах: плотность —  $1.2 \div 0.5 \text{ г/см}^3$ , скорость детонации —  $5 \div 2.1 \text{ км/с}$ , давление

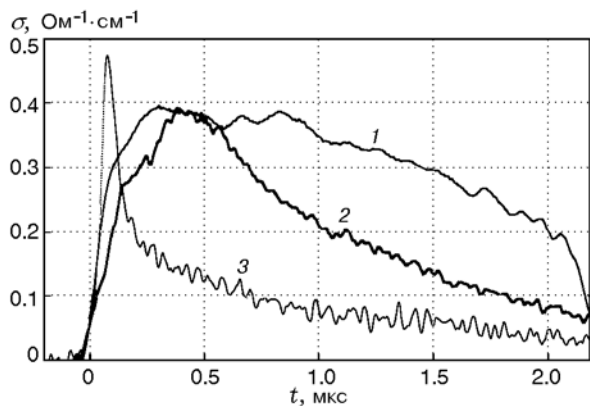


Рис. 2. Профили электропроводности при детонации ЭМВВ на основе АС/НС-эмульсии при  $\mu = 8\%$  (кривая 1), 40 % (2), 50 % (3)

детонации —  $8 \div 0.7$  ГПа. Время реакции и температура продуктов взрыва изменяются в указанном диапазоне давления относительно слабо и составляют  $0.5 \div 0.8$  мкс [9] и  $1750 \div 2100$  К [19, 2].

Максимальное значение электропроводности  $\sigma_{\max} \approx 0.4 \div 0.5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  достигается в течение  $t_{\max} \approx 0.1 \div 0.5$  мкс. В последующие 2 мкс проводимость уменьшается, причем скорость спада растет при увеличении содержания микробаллонов из стекла.

Начальный рост электропроводности естественно связать с изменением состояния вещества в ходе химической реакции. В частности, происходят разгорание и последующее слияние «горячих точек», возникающих в основном за счет схлопывания микробаллонов. Кроме того, реакция вызывает общее повышение температуры и изменение состава. Спад электропроводности после окончания реакции обусловлен, по-видимому, падением параметров при разгрузке в волне Тейлора.

Композиция при  $\mu = 50\%$  — самое маломощное из исследованных ЭМВВ, объемная доля эмульсии в нем до взрыва около 25 %. Для этого состава легче всего получить пересжатие. При изменении массы заряда-инициатора реализовалась как нормальная детонация (рис. 3, профиль 1,  $D = 2130$  м/с), так и пересжатый режим (профиль 2,  $D = 3000$  м/с). Интенсивность инициирования незначительно влияет на длительность пика  $\sigma(t)$ , а  $\sigma_{\max}$  увеличивается на 30 %. Электропроводность в волне разгрузки в последующие 2 мкс в 2–3 раза больше для профиля 2

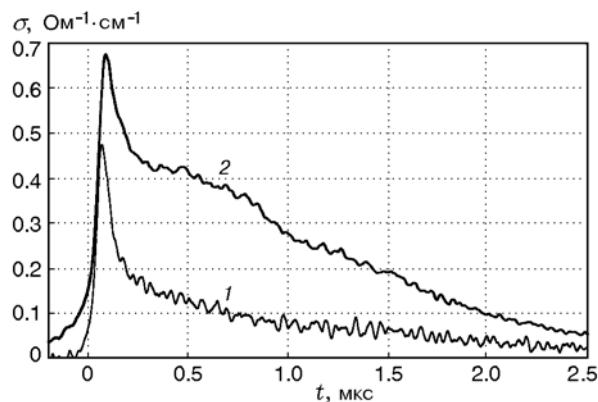


Рис. 3. Влияние мощности инициирования на профиль  $\sigma(t)$  для АС/НС-эмульсии при  $\mu = 50\%$ :

1 — нормальная детонация, 2 — пересжатая детонация

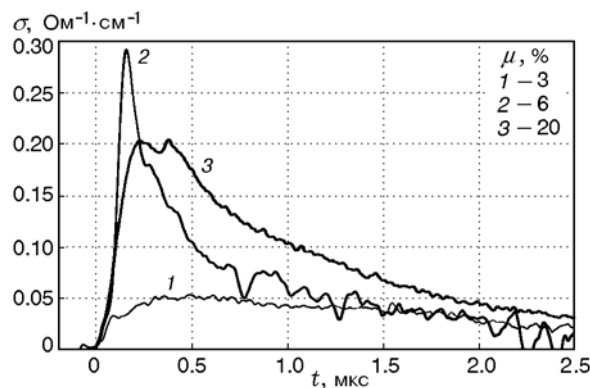


Рис. 4. Профили электропроводности при детонации ЭМВВ на основе АС-эмульсии с различными добавками микросфер

по сравнению с профилем 1, что также связано, по-видимому, с более высокой температурой в пересжатой детонационной волне.

### АС-эмульсия

На рис. 4 приведены три профиля электропроводности для ЭМВВ на основе АС-эмульсии. Скорость детонации изменяется от 4.0 до 3.5 км/с, давление от 8.4 до 1.9 ГПа. Отметим немонотонную эволюцию профиля  $\sigma(t)$  при изменении  $\mu$ . Выделяется композиция при  $\mu = 6\%$  (профиль 2), для которой наблюдаются максимальная электропроводность  $\sigma_{\max} \approx 0.3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  и максимальная скорость ее падения. Для контроля сделано четыре опыта с этой композицией, качественные характеристики профиля  $\sigma(t)$  не изменились, а зна-

чения  $\sigma_{\max}$  находились в интервале  $0.28 \div 0.43 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . Для этой композиции профиль  $\sigma(t)$  сходен с профилем 3 на рис. 2, для которого число сенсibiliзирующих включений почти на порядок больше ( $\mu = 50 \%$ ). Причина подобного поведения ЭмВВ на основе АС-эмульсии с  $\mu = 6 \%$  связана, вероятно, с созданием оптимальных условий для детонации, при отклонении от которых достигается более слабая ионизация. Косвенным подтверждением оптимальных условий для этого состава является факт минимальной длительности химпика [9].

### Влияние давления и температуры

Для ЭмВВ на основе АС/НС-эмульсии  $\sigma_{\max}$  слабо зависит от давления детонации  $p$  (рис. 5). При изменении давления более чем на порядок значение  $\sigma_{\max}$  изменяется приблизительно в 2.5 раза, причем уменьшение  $\sigma_{\max}$  наблюдается при максимальных давлениях. Это отличается от поведения  $\sigma_{\max}$  для мономолекулярных ВВ. Например, для гексогена  $\sigma_{\max}$  приблизительно пропорционально давлению детонации [12, 13] (точки 3 на рис. 5). Поведение  $\sigma_{\max}$  для ЭмВВ аналогично изменению расчетной температуры продуктов взрыва [19] (линия 4 на рис. 5). Можно предположить, что максимальное значение проводимости для ЭмВВ на основе АС/НС-эмульсии определяется в основном температурой продуктов взрыва.

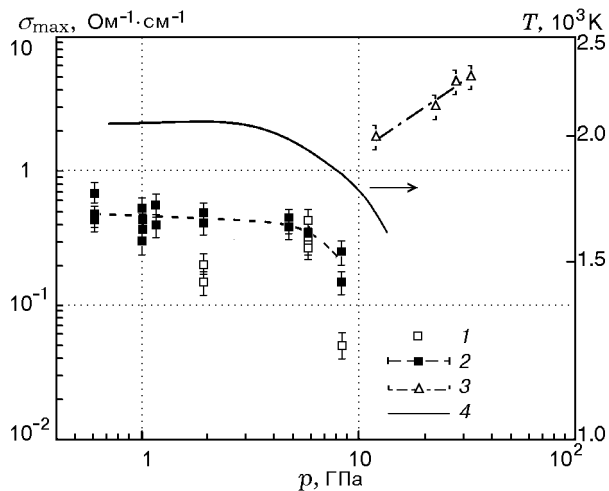


Рис. 5. Зависимость максимальной электропроводности от давления:

1, 2 — ЭмВВ на основе АС- и АС/НС-эмульсии соответственно, 3 — гексоген [12, 13], 4 — температура детонации ЭмВВ [19]

Для чисто аммиачно-селитренного ЭмВВ зависимость  $\sigma_{\max}(p)$  немонотонна, причем максимум достигается при добавке 6 % сенсibiliзатора (ср. рис. 4).

### Влияние состава эмульсии

На рис. 6 приведены данные для эмульсий разного состава при  $\mu = 3$  и 20 %. Рис. 6, б иллюстрирует также повторяемость экспериментов. Общим для всех профилей  $\sigma(t)$  является меньшее (в 2–3 раза) значение электрической проводимости продуктов взрыва ЭмВВ на основе АС-эмульсии по сравнению с АС/НС-эмульсией. Термодинамические параметры этих композиций, реализуемые при взрыве, близки, так как содержание натриевой селитры составляло всего  $\approx 10 \%$ . По существу, небольшая часть одного окислителя (АС) заменена другим. Рост электропроводности при добавлении металлической соли  $\text{NaNO}_3$  с очевидностью вызван появлением носителей заряда, поставляемых продуктами реакции, содержащими натрий.

Следуя [20], рассмотрим возможность электролитической диссоциации за фронтом

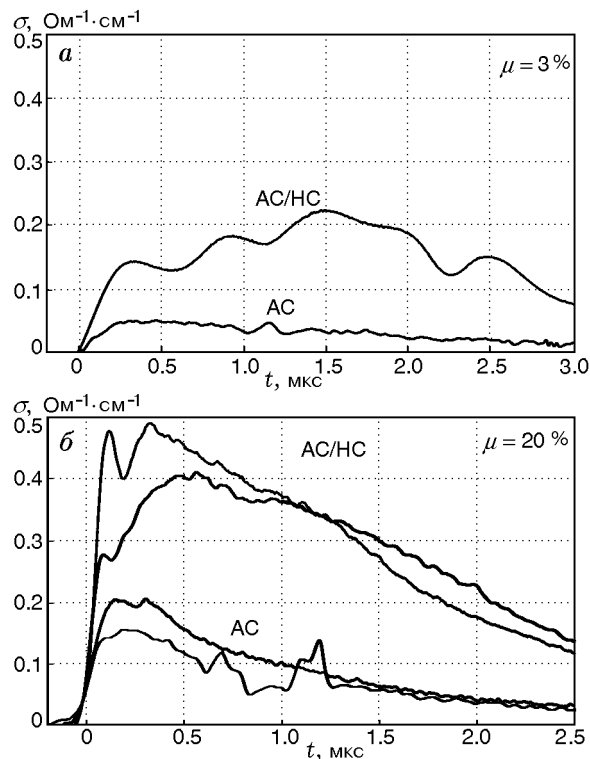


Рис. 6. Профили электропроводности при детонации ЭмВВ

детонации, чему способствует присутствие воды, которая входит в исходный состав ЭМВВ и является одним из основных компонентов продуктов взрыва [7]. При температуре взрыва  $\approx 2000$  К диссоциация, естественно, облегчается. Роль натрия согласуется с такой гипотезой, если ион  $\text{Na}^+$  образуется легче, чем другие возможные кандидаты. Действительно, водные растворы солей — хорошие проводники даже при комнатных условиях. Вклад ионов натрия в проводимость продуктов детонации ЭМВВ относительно велик и составляет  $0.1 \div 0.2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ .

Более низкая проводимость при взрыве ЭМВВ на основе аммиачной селитры может возникать за счет диссоциации воды на ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ , также стимулируемой высокой температурой взрыва (как говорилось выше, одного только ударного давления для диссоциации воды недостаточно). Таким образом, вероятно ионная природа электрической проводимости за фронтом детонации ЭМВВ.

#### Корреляция электропроводности и времени реакции

Для всех исследованных нами ранее мономолекулярных сбалансированных ВВ (гексоген, октоген, тэн) характерно быстрое достижение максимума электропроводности, практически в пределах разрешения метода. Длительность пиков электропроводности была близка к длительности химпика, полученной оптическими методами [13]. Максимальная электропроводность монотонно увеличивалась с плотностью (точки 3 на рис. 5).

Для ЭМВВ характерны более низкие значения максимальной электропроводности  $\approx 0.4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  при слабой зависимости от плотности. Время достижения максимума электропроводности изменяется от 0.1 мкс при  $\mu = 50\%$  до  $\approx 0.5$  мкс при  $\mu = 3\%$  и растет с повышением плотности и уменьшением количества микробаллонов («горячих точек»). Такое поведение можно объяснить формированием все более плотной пространственной сетки проводящей фазы, возникающей при разгорании и слиянии «горячих точек».

Как видно из рис. 2 и 4, в ряде случаев на профилях электропроводности для ЭМВВ на фоне квазиравновесной ионной проводимости выделяются отчетливые пики, длительность которых может коррелировать со временем реакции. В зоне реакции (химпике) увели-

чение электрической проводимости возможно за счет повышения и давления, и температуры. При химической реакции образуются неравновесные промежуточные продукты, которые могут давать свой вклад в электропроводность.

Для ЭМВВ на основе АС/НС-эмульсии явный пик электропроводности наблюдался только при  $\mu = 50\%$ , его длительность составила 0.2 мкс. В то же время в [9] получено значение длительности пика на профиле скорости границы раздела ЭМВВ—ПММА 0.6 мкс. Разница, возможно, связана с использованием различных методов исследования структуры фронта детонации. Таким образом, длительность пика  $\sigma(t)$  можно считать оценкой времени реакции при  $\mu = 50\%$ . При меньших значениях  $\mu$  спад профиля электропроводности гораздо более медленный. По-видимому, в таких составах медленно спадающая квазиравновесная ионная проводимость маскирует зону реакции и метод электропроводности не позволяет ее выявить. В малоплотном составе при  $\mu = 50\%$  вклад ионной проводимости меньше и пиковая электропроводность связана, по-видимому, с протеканием химической реакции.

Для ЭМВВ на основе АС-эмульсии явные пики электропроводности получены при  $\mu = 6$  и 20%. Их длительность около 0.4 и 0.6 мкс соответственно, что довольно близко к данным оптического метода. При  $\mu = 3\%$  пик не выделяется и проводимость, вероятно, имеет квазиравновесный характер.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характерные значения максимальной электропроводности продуктов взрыва эмульсионных ВВ на основе водного раствора аммиачной и натриевой селитр составляют  $0.4 \div 0.5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , слабо зависят от давления детонации и коррелируют с оценками температуры продуктов взрыва.

Присутствие в составе окислителя небольшого количества натриевой селитры увеличивает проводимость в 2–3 раза по сравнению с эмульсией, содержащей только аммиачную селитру, что связано с появлением дополнительных носителей заряда, образующихся при разложении соли металла. Предположительный механизм проводимости ЭМВВ на основе АС/НС-эмульсии — электролитическая диссоциация в продуктах детонации, представляющих собой, по существу, плотный горячий раствор электролита. Скорость спада проводимо-

сти в тыльной волне разгрузки в значительной степени определяется концентрацией физического сенсibilизатора (полых микросфер из стекла).

Интерпретация полученных профилей электропроводности оказалась сложнее, чем в случае сбалансированных молекулярных ВВ, что естественно в силу более сложной структуры ЭМВВ. Тем не менее, метод измерения электропроводности высокого разрешения оказался полезным для изучения детонации гетерогенных эмульсионных композиций, получена дополнительная информация к результатам исследования традиционными методиками.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Сильвестров В. В.** Оптическое излучение ударно-сжатой эпоксидной смолы со стеклянными микросферами // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 3. — С. 105–112.
2. **Сильвестров В. В., Бордзиловский С. А., Караханов С. М.** Температура детонационного фронта эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 135–142.
3. **Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И.** Промышленные взрывчатые вещества. — М.: Недра, 2009.
4. **Соснин В. А., Колганов Е. В.** Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. — Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009. — Т. 1.
5. **Lee J., Persson P. A.** Detonation behavior of emulsion explosives // Propel., Explos., Pyrotech. — 1990. — N 15. — P. 208–216.
6. **Сильвестров В. В., Пластинин А. В.** Исследование низкоскоростных эмульсионных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 124–133.
7. **Соснин В. А., Колганов Е. В.** Исследование процесса детонации в эмульсионных промышленных взрывчатых веществах // Хим. физика. — 2003. — Т. 22, № 8. — С. 100–107.
8. **Leiper G. A., Kirby I. J., Hackett A.** Determination of reaction rates in intermolecular explosives using the electromagnetic particle velocity gauge // Proc. Eight Symp. on Detonation. — 1985. — P. 187–195.
9. **Юношев А. С., Пластинин А. В., Сильвестров В. В.** Исследование влияния плотности эмульсионного взрывчатого вещества на ширину зоны реакции // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 79–88.
10. **Сильвестров В. В., Караханов С. М., Пластинин А. В., Дерibas А. А.** Влияние плотности эмульсионного ВВ на ширину зоны реакции // VII Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. — С. 132–137.
11. **Колесников С. А., Лавров В. В., Мочалова В. М., Прууэл Э. Р., Савченко А. В., Тен К. А., Уткин А. В.** Экспериментальное исследование структуры детонационных волн в эмульсионных ВВ // Междунар. конф. «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике». — Новосибирск: ИГиЛ, 2010. — С. 216–217.
12. **Ershov A. P., Satonkina N. P., Ivanov G. M.** Reaction zones and conductive zones in dense explosives // Proc. of 13th Intern. Detonation Symp. — Norfolk, VA, 2006. — ONR 351-07-01. — P. 79–88.
13. **Ершов А. П., Сатонкина Н. П., Иванов Г. М.** Профили электропроводности в плотных взрывчатых веществах // Хим. физика. — 2007. — Т. 26, № 12. — С. 21–33.
14. **Титов В. М., Прууэл Э. Р., Тен К. А., Лукьянчиков Л. А., Мерзиевский Л. А., Толочко Б. П., Жуланов В. В., Шехтман Л. И.** Опыт применения синхротронного излучения для исследования детонационных процессов // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 3–15.
15. **Рафейчик С. И.** Исследование зависимости критического диаметра эмульсионных взрывчатых веществ от плотности в стальной оболочке // Вестн. НГУ. Сер. Физика. — 2013. — Т. 8, № 6. — С. 107–110.
16. **Mitchell A. C., Nellis W. J.** Equation of state and electrical conductivity of water and ammonia shocked to the 100 GPa (1 Mbar) pressure range // J. Chem. Phys. — 1982. — V. 76, N 12. — P. 6273–6281.
17. **Орлов А. В.** Влияние температуры на неупругое деформирование стекла ЛК-105 в ударных волнах: дис. . . к.ф.-м.н. / МФТИ. — М., 1992.
18. **Satonkina N. P., Prueel E. R., Ershov A. P., Karpov D. I., Sil'vestrov V. V., Plastinin A. V., Savrovskii P. A.** Electrical conduction of emulsion explosives // J. Eng. Thermophys. — 2011. — V. 20, N 3. — P. 315–319.
19. **Yoshida M., Iida M., Tanaka K., Fudjiwara S.** Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // Proc. 8th Symp. (Intern.) on Detonation. — 1985. — P. 993–1000.
20. **Якушев В. В., Дремин А. Н.** Природа электропроводности продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. — 1975. — Т. 221, № 5. — С. 1143–1144.

Поступила в редакцию 12/XII 2013 г.,  
в окончательном варианте — 26/VIII 2014 г.