

Сатонкина Н.П.^{1,2}, Рубцов И.А.²¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Введение

Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ) получили широкое практическое применение благодаря безопасности, легкости изготовления, не токсичности, однако процесс детонации для них до сих пор остается недостаточно изученным.

ЭмВВ по ряду показателей является нетипичным: немонотонная зависимость скорости детонации от плотности, увеличение критического диаметра и времени реакции при росте плотности. Также наблюдаются особенности поведения и для электропроводности, этому и посвящена данная работа.

ЭмВВ интересно контролируемой по размеру неоднородностью, на нем можно исследовать процесс разгорания горячих точек. Горячие точки — основная на данный момент гипотеза распространения детонации по ВВ, но другие конденсированные ВВ в силу большей плотности и скорости не позволяют «заглянуть» в зону химической реакции из-за малой длительности химпика [1] и агрессивности исследуемой среды. Для ЭмВВ ширина зоны химической реакции ~ 2 мм, что превышает разрешение используемого метода на два порядка.

Методом высокого разрешения, разработанного ранее и подробно описанного в работе [1], получены данные по распределению электропроводности ЭмВВ, проведен их анализ.

Использовалась эмульсия на основе аммиачной и натриевой селитры, аналогичная использованной в [2]. Для получения ВВ в эмульсию добавляли сенситизатор — полые стеклянные микросферы, масса которых составляла долю от массы эмульсии сверх массы эмульсии.

Было учтено наличие в продуктах детонации диэлектрика, метод подробно описан в [2]. Все дальнейшие результаты приведены для чистых продуктов в приближении отсутствия заметного расширения.

Результаты экспериментов и обсуждение

Эволюция профиля электропроводности.

Согласно теории Зельдовича-Неймана-Деринга, детонационная волна состоит из ударной волны, примыкающей к ней области химической реакции (пик фон Неймана) и волны разгрузки (волны Тейлора). В наших экспериментах мы получаем профиль электропроводности качественно напоминающий профиль давления детонационной волны. Из ранних данных известно, что электропроводность отслеживает приход фронта с точностью не хуже 10 нс. В работе [1] показано, что для традиционных ВВ длительности пика электропроводности и химпика, полученного другими методами, близки.

На данный момент нет полного понимания природы проводимости детонационной волны, но есть основание полагать, что для ВВ сбалансированного состава (гексоген, октоген, тэн) проводимость в хим-

пике порождена хемоионизацией, а в волне Тейлора ионная проводимость.

Кратко опишем характерный профиль электропроводности конденсированных ВВ сбалансированного состава. Профиль состоит из пика шириной десятки наносекунд и остаточной электропроводности величиной ниже максимальной примерно на порядок. Время достижения максимума ограничено паразитными индуктивностями нашей схемы и составляет меньше 10 нс [1].

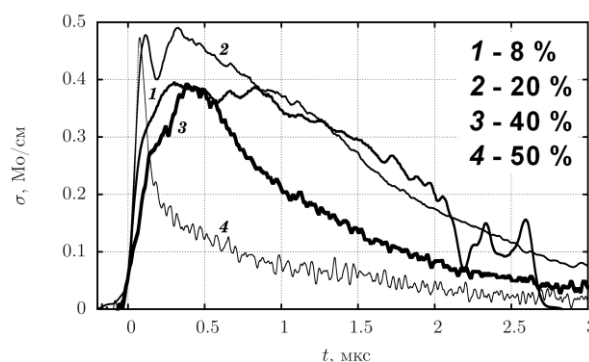


Рис.1. Эволюция профиля электропроводности.

На рисунке 1 приведены профили распределения электропроводности ЭмВВ при разном содержании сенситизатора. На профилях 1 и 2 для 8 и 20 % микросфер ярко выраженного пика, коррелирующего с зоной химической реакции, нет, распределение широкое со слабым спадом, остаточная электропроводность одинаковая, не смотря на отличие объемной доли эмульсий до взрыва в 1.5 раза и детонационной скорости на 800 м/с. Отличие есть в области максимума: профили для 8 % растут медленнее, что может говорить о более медленном разгорании, для 20 % максимум раздваивается. Причиной этого может быть пространственное разделение двух областей проводимости, первая - порожденная химической реакцией и вторая — ионная электропроводность, источником которой является натрий, содержащийся в составе ЭмВВ.

С увеличением доли микросфер характер распределения сильно меняется, происходит монотонное уменьшение значения электропроводности в волне Тейлора.

При этом, скорость спада электропроводности в волне Тейлора возрастает с увеличением содержания микросфер. Среда продуктов детонации (ПД) все больше заполняется диэлектриком, что ускоряет разгрузку, увеличивает длительность линий тока и, таким образом, увеличивает сопротивление. Кроме того, происходит снижение термодинамических параметров, таких как температура и давление. [3]

Для ЭмВВ с 50 % микросфер продукты детонации сильно разбавлены инертной добавкой, концентрация эмульсии до взрыва снижается почти в 3 раза по сравнению с 8 % и составляет 0.25 объемных долей, остаточная электропроводность сильно падает и на профиле выделяется пик длительностью ~ 0.2 мкс.

Максимальное значение электропроводности практически не зависит от содержания микросфер и составляет величину около $0.4 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. Напоминаем, что нами учтено наличие диэлектрика, и отсутствие зависимости говорит о схожести как химических реакций, так и термодинамических характеристик при разном содержании сенсibilизатора.

Переходные режимы детонации.

На рисунке 2 приведены профили электропроводности с добавлением 30 % микросфер при разных режимах, детонация 1 стационарная, 2 – пересжатая. Через 3 мкс наблюдается значительное отличие величин в волне Тейлора, что говорит о разной кинетике химических реакций. По-видимому, ЭмВВ с 30 % микросфер позволяет реализоваться разным режимам детонации при варьировании условий инициирования.

На рисунке 3 показаны профили электропроводности для ЭмВВ с 40 % сенсibilизатора. Для одинаковой детонационной скорости реализованы три режима детонации, что видно из разной формы пиков электропроводности. При этом, все три профиля в волне Тейлора имеют одинаковую электропроводность и, по-видимому, одинаковые термодинамические параметры. Примечательно, что пик 1 раздвоен, и длительность первого пика совпадает с длительностью пика профиля 3.

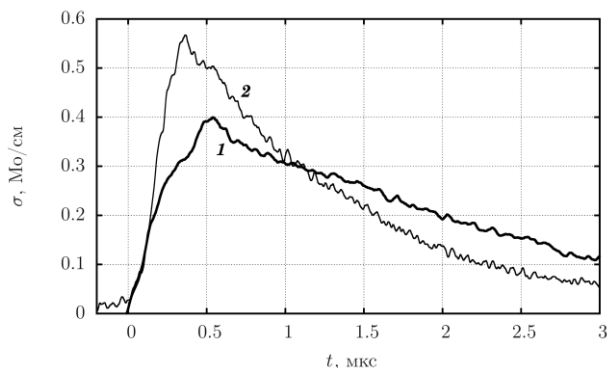


Рис. 2. Профили электропроводности ЭмВВ с содержанием 30 % микросфер. Скорости детонации для 1 – 2.89 км/с, для 2 – 3.4 км/с.

Тонкая структура зоны реакции.

Эмульсионные ВВ уникальны тем, что, являясь конденсированным ВВ, позволяют различать тонкую структуру реакции благодаря относительно небольшой скорости и широкой зоне реакции.

Электропроводность чутко отслеживает состояние среды продуктов детонации. На рис. 1 профили 1, 3 видно, что в момент ~ 0.1 мкс происходит изме-

нение угла наклона, далее идет более пологий рост. На рис. 2 наблюдается изгиб при $t \sim 0.3$ мкс на обоих профилях. На рис. 3 профиль 2 имеет ту же особенность. Такое поведение профиля вблизи максимума наблюдается только для эмульсионных ВВ и отражает ход химической реакции.

Время роста электропроводности до максимального значения минимально при наибольшем содержании микросфер 50 %, составляет величину 0.1 мкс, максимально при 3 % – 0.5 мкс и монотонно возрастает с плотностью. Оценка времени схлопывания для микросфер диаметром $d=60$ мкм (средний размер) при скорости детонации $D=4$ км/с (соответствует содержанию микросфер $\mu=8$ %), считая показатель адиабаты равным $n=3$ [4], составляет $d(n+1)/D \approx 60$ нс, для $\mu=50$ % время схлопывания 120 нс. Эти значения близки времени роста электропроводности с максимальным градиентом.

При сравнении наших данных и данных работы [4] интересно отметить, что особенности, наблюдаемые нами на профилях электропроводности, коррелируют с длительностями указанной работы.

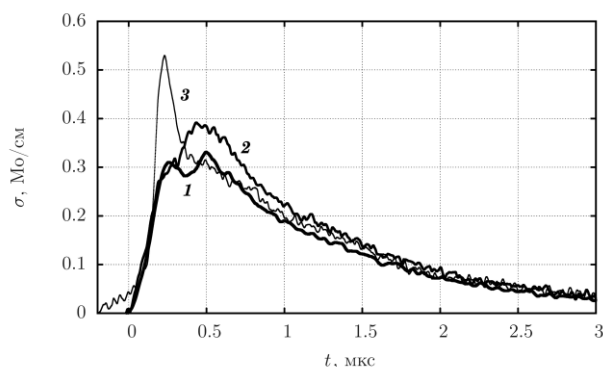


Рис. 3. Профили электропроводности ЭмВВ с содержанием 40 % микросфер. Скорость детонации 3.1 км/с.

Список литературы:

1. Ершов А.П., Сатонкина Н.П., Иванов Г.М. Профили электропроводности в плотных взрывчатых веществах // Химическая физика. 2007. Т. 26, № 12. С. 21-33.
2. Satonkina N.P., Prueel E.R., Ershov A.P., et al. Electrical conduction of emulsion explosives // Journal of Engineering Thermophysics. 2011. V. 20, № 3. P. 315-319.
3. Yoshida M., Iida M., Tanaka K., Fudjiwara S. Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // Proc. 8th Symposium (Intern.) on Detonation. 1985. P. 993-1000.
4. Юношев А.С., Пластинин А.В., Сильвестров В.В. Исследование влияния плотности эмульсионного взрывчатого вещества на ширину зоны реакции // ФГВ. 2012, Т. 48, N 3, С. 79 -- 88.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы президиума РАН № 2 (проект № 7), Лаврентьевского молодежного проекта № 4 (проект № 5).