

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ РЕАКЦИИ В НЕОДНОРОДНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

А. П. Ершов, Н. П. Сатонкина

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

Техника измерения профиля электропроводности за фронтом детонационной волны с разрешением порядка 0.1 мм применена к анализу зоны реакции в неоднородных взрывчатых веществах. Исследованы смеси тротил — гексоген; гексоген с добавками воды, NaCl и насыщенного водного раствора NaCl, а также чистый гексоген низкой плотности. Показано, что дисперсность ВВ может существенно влиять на структуру зоны реакции. Наиболее узкая проводящая зона (0.22 мм) наблюдалась в мелкодисперсном гексогене плотностью 1.2 г/см³.

Ключевые слова: детонация, взрывчатые вещества, химическая реакция, электропроводность, мезопроцессы.

ВВЕДЕНИЕ

Практически все широко применяемые взрывчатые вещества неоднородны. В смешанных промышленных взрывчатых веществах (ВВ), составах типа тротил/гексоген (ТГ), пластифицированных ВВ и других неоднородности играют важную роль в инициировании детонации. В индивидуальных ВВ наличие неоднородности также достаточно очевидно (хотя часто ее считают второстепенным фактором).

В последнее время изучению влияния неоднородности на процесс детонации придается все большее значение. Детонационная волна в гетерогенной системе — источник мощного перемешивания веществ и их взаимодействия. Только благодаря такому перемешиванию могут детонировать смеси горючего и окислителя. В индивидуальных ВВ, включая прессованные, фронт детонации также вызывает сильнейшую механическую активацию. Вещество разделяется на «горячие точки» — места концентрации энергии — и сравнительно холодные микрообъемы. Из-за различия температур различаются плотности, а значит, и скорости течения на масштабе неоднородностей по мере развития гидродинамических неустойчивостей и перемешивания. Таким явлениям уделяется все большее внимание. В то же время есть и противоположные мнения о несущественности мезоскопических процессов, по крайней ме-

ре в установившейся детонации индивидуальных ВВ.

В значительной степени неопределенность в понимании основных процессов детонации связана с трудностями экспериментального исследования узкой зоны химической реакции за фронтом детонационной волны. Нами разработана методика измерения профиля электропроводности за фронтом детонации [1, 2]. Для плотных индивидуальных ВВ сбалансированного состава (тэн, гексоген, октоген) установлено хорошее совпадение измеренных зон повышенной электропроводности с зонами реакции, определенными по профилям механических параметров (давление, массовая скорость). В данной работе эта методика применяется к исследованию роли дисперсности и взаимодействия компонентов гетерогенных ВВ.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Ограничимся кратким описанием методики, подробно изложенной в [1, 2]. Взрывчатое вещество располагалось в медной коаксиальной ячейке (рис. 1), внешний диаметр которой $b = 8$ мм. Диаметр внутреннего электрода $c = 2$ мм. Внешний электрод был составным, его части 1, 2 плотно фиксировались резьбовым соединением. В полости внешнего электрода размещалась тороидальная катушка, служившая датчиком электропроводности. Узкая щель, соединяющая полость с измерительным объемом ячейки, заполнялась диэлектриком (фторопласт, $0.3 \div 0.6$ мм, или оргстекло, $0.2 \div 1$ мм). Заряд инициировали через осе-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-03-32412) и фонда Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ-8583.2006.1).

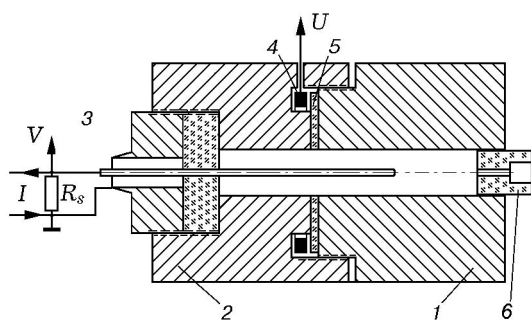


Рис. 1. Измерительная схема и геометрия ячейки:

1, 2 — составные части внешнего электрода, 3 — внутренний электрод, 4 — тороидальная катушка, 5 — диэлектрик, 6 — пробка из оргстекла

вой канал диаметром 2.4 мм в пробке из оргстекла.

Питание ячейки током I осуществлялось от конденсатора через балластное сопротивление; параллельно ячейке включался шунт R_s . Измерялись питающее напряжение $V(t)$ и сигнал на датчике $U(t)$. Электропроводность в плоскости щели пропорциональна сигналу датчика:

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

Здесь $x = Dt$ — расстояние от щели, на которое удаляется фронт волны к моменту времени t , D — скорость детонации, M — взаимная индуктивность. Корректировка сигнала позволяет устранить искажение зависимости $U(t)$ из-за индуктивности датчика и получить профиль электропроводности за фронтом в предположении стационарности волны.

Пространственное разрешение оценивается в четверть толщины изолятора и при наиболее тонком зазоре достигало 0.05 мм. Величина измеряемой электропроводности лимитируется утечкой по проводящей среде «поверх щели», возникающей из-за малой, но конечной индуктивности полости датчика L_c . В рассматриваемых ниже экспериментах утечка была существенной в случае чистого тротила. По известным размерам ячейки и характерным точкам на осциллограммах определяли скорость детонации ВВ, а из нее по зависимостям $D(\rho)$, взятым из [3, 4], определяли плотность заряда ρ (из-за потерь при зарядании она могла быть на несколько процентов ниже расчетной загрузочной плотности). Для состава ТГ 60/40 (далее массовое соотношение компонентов опуска-

ем) принималось, что зависимость $D^2(\rho)$ есть линейная по содержанию ТНТ интерполяция между соответствующими функциями для тротила и гексогена. Для смесей гексогена с водой, NaCl и насыщенным раствором NaCl плотность по значениям D не рассчитывалась.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Тротил и ТГ

Тротил интересен как классическое ВВ с избытком углерода, тогда как состав тротил — гексоген — это своего рода эталон двухкомпонентного ВВ. Ранее нами [5, 6] исследовалось распределение электропроводности в литых и прессованных ТНТ и ТГ, причем в ТГ наблюдалось явное влияние дисперсности гексогена. Однако эти данные были получены в интегральных измерениях с довольно низким пространственным разрешением (1 ÷ 2 мм).

Известно, что в чистом тротиле выделение свободного углерода приводит к аномально высокой электропроводности [7, 8]. Имеются расхождения во мнениях [5, 9] относительно существования в тротиле выраженного пика электропроводности. Поэтому значительный интерес представляло бы распределение электропроводности в ТНТ, измеренное с приемлемым разрешением.

Заряд запрессовывался в ячейку порциями высотой 5 мм, причем измерительная щель приходилась на середину одной из порций; разрешение ячейки 0.25 мм. На рис. 2 приведен профиль электропроводности, полученный для тротила плотностью 1.5 г/см³. Явного пика в области, соответствующей зоне реакции

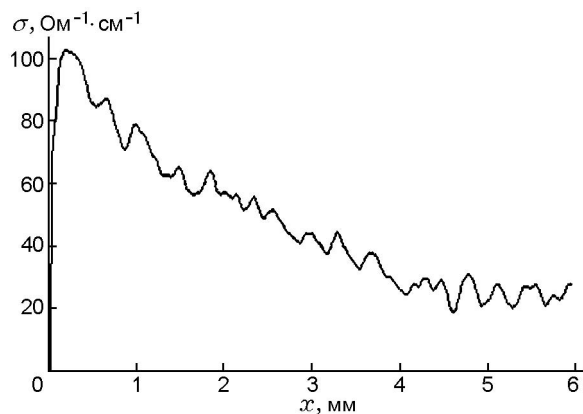


Рис. 2. Профиль электропроводности для прессованного ТНТ

(≈ 1 мм), не выявлено. Однако оценки показали, что в данном случае утечка, упомянутая выше, могла существенно исказить начальный участок сигнала. Как показано в [1, 2], относительная ошибка, возникающая из-за утечки, порядка $L_c b \sigma / \tau$, где τ — характерное время сигнала (например, длительность пика электропроводности). При индуктивности $L_c = 0.9$ нГ, электропроводности $\sigma = 100 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и ожидаемой длительности пика $\tau \approx 100$ нс относительная ошибка составляет около 0.7, т. е. имеет порядок измеряемой величины. Завал фронта сглаживает сигнал, так что в области шириной ≈ 1 мм результат может быть занижен, а ниже по течению — завышен. Поэтому вопрос о существовании в тротиле пика, коррелирующего с зоной химической реакции, остается открытым. Тем не менее, в этих измерениях подтвердились данные [8, 9] о существовании высокой (по сравнению с оценкой $\approx 25 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [5]) электропроводности в области, примыкающей к фронту волны.

Разбавление тротила гексогеном снижает электропроводность смеси и тем самым утечку. Исследовалась смесь ТГ 60/40. Применялся тротил с размером частиц ≈ 10 мкм и гексоген двух видов: штатный (200 мкм) и «мелкий» (≈ 10 мкм). На рис. 3 показаны профили электропроводности в ТГ с «мелким» и штатным гексогеном при одинаковой плотности зарядов 1.54 г/см^3 , а также профиль в чистом (штатном) гексогене той же плотности. Эксперименты проведены при разрешении ≈ 0.125 мм.

Видно, что вклад гексогена в электропроводность может быть замечен только в самом начале пиков, полученных для ТГ. Следовательно, проводимость этих составов в основном определяется тротилом. Электропроводность на порядок меньше, чем в чистом гексогене, и роль утечки незначительна. Таким образом, введение гексогена дало возможность зафиксировать пик электропроводности тротила. За пиком наблюдается протяженный «хвост» электропроводности, характерный для тротил-содержащих смесей и также связанный с выделением свободного углерода [5].

По излому профиля определялась ширина пика электропроводности (на рис. 3 показана процедура ее определения на примере профиля в гексогене): для смеси ВВ с малым размером частиц (профиль 1) среднее значение составило 0.66 мм, что соответствует длительности пика 90 нс, для смеси со штатным гексогеном (про-

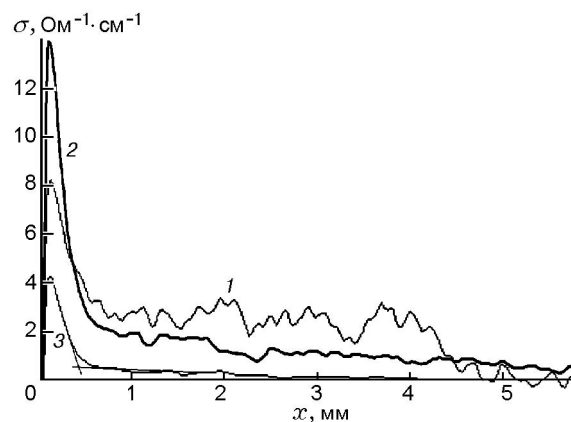


Рис. 3. Распределения электропроводности в смеси ТГ 60/40 и в гексогене (плотность зарядов 1.54 г/см^3):

1 — ТГ, гексоген мелкий; 2 — ТГ, гексоген штатный; 3 — чистый гексоген

филь 2) — соответственно 0.42 мм и 59 нс. Следует учесть, что наша процедура определяет время продвижения детонационной волны мимо измерительного элемента, тогда как в литературе приводятся лагранжевы времена реакции, которые в $1.4 \div 1.5$ раза больше. С учетом этого замечания наши результаты согласуются с известными данными о зоне реакции ТГ близкого состава ($0.44 \div 0.68$ мм и $80 \div 130$ нс, см. [10–12]). Результаты работы [13] (0.13 мм) и причины их отклонения от более поздних критически обсуждаются в [10, 12].

Роль дисперсности гексогена можно объяснить следующим образом. Если частицы гексогена крупнее частиц ТНТ, пик получается заметно более выраженным и быстрее происходит спад электропроводности за пределами зоны реакции. В такой системе изначально частицы ТНТ образуют тонкие слои вокруг более крупных частиц гексогена, и эта геометрия в основном сохраняется при прессовании. За фронтом детонации такая структура сначала хорошо проводит (по прослойкам ТНТ), но довольно быстро разрушается из-за мезоскопических течений [14]. Если же размеры частицы примерно одинаковы, часть тротила «окружается» частицами гексогена и исключается из проводимости в пике, вследствие чего и уменьшается его амплитуда. Однако позднее перемешивание компонентов восстанавливает контакт между этими объемами, в результате чего спад электропроводности замедляется и «хвост» профиля становится более выражен-

ным. Таким образом, кроме времени реакции, форма профиля отражает также мезопроцессы в гетерогенном веществе. Вместе с тем различие в ширине пиков не выходит за рамки разброса данных, полученных традиционными методами, т. е. длительность пика менее чувствительна к структуре заряда, чем детали его формы.

ВВ с инертными добавками

Естественно ожидать, что процессы, происходящие на масштабе порядка размера зерна ВВ, достаточно резко проявятся при измерении электропроводности в системе ВВ — инерт. Для исследования выбран штатный гексоген с добавками: 1) 10 % NaCl с размером частиц 10 мкм, 2) воды до заполнения пор, 3) насыщенного водного раствора NaCl до заполнения пор. Парциальная плотность гексогена в случаях 2 и 3 была близка к насыпной ($\approx 1.15 \text{ г/см}^3$), в случае 1 — на $\approx 10\%$ меньше. Количество NaCl на единицу объема смеси в случаях 1 и 3 было практически одинаковым. Измеренные распределения электропроводности приведены на рис. 4. Во всех случаях, кроме сухого NaCl, добавка увеличивает ширину пика (в среднем 0.8 мм при добавлении воды и 1.1 мм для раствора NaCl, тогда как при сухом NaCl получено 0.32 мм). В измерениях электромагнитным методом [15] получена ширина зоны химической реакции в водонаполненном гексогене 2.17 мм, что заметно боль-

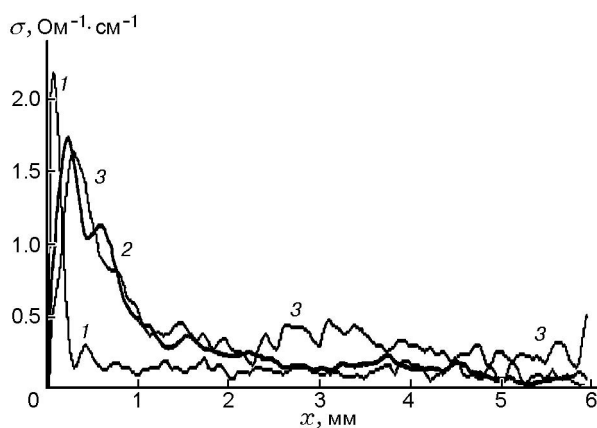


Рис. 4. Распределения электропроводности в гексогене с добавками:

1 — 10 % NaCl, $D = 5955 \text{ м/с}$; 2 — вода, $D = 7388 \text{ м/с}$; 3 — насыщенный раствор NaCl в воде, $D = 7186 \text{ м/с}$; разрешение 0.15 мм

ше, чем ширина пика электропроводности в нашей работе. Такое различие данных измерения столь разными методами не является чем-то необычным; при этом ширина зоны химической реакции [15] также превышает измеренную электромагнитным методом ширину зоны реакции (1.29 мм) в сухом гексогене при плотности 1.1 г/см^3 [10]. Добавление воды, NaCl и особенно раствора NaCl увеличивает электропроводность в «хвосте», причем при добавке соли спад равновесной электропроводности во времени весьма медленный. Амплитуда же пика практически одна и та же во всех случаях.

Низкоплотный гексоген — влияние дисперсности

Неоднократно предпринимались попытки обнаружить влияние дисперсности на продолжительность реакции во фронте детонационной волны. Полученные результаты были противоречивыми. Измерения электромагнитным методом [10] не показали заметного эффекта. В опытах с более высоким разрешением [16, 17] наблюдалось влияние дисперсности, хотя оно и не сводилось только к изменению времени реакции. В наших экспериментах с высокоплотными гексогеном и октогеном [2] заметного влияния дисперсности на профиль электропроводности не обнаружено.

Естественно было бы ожидать сокращения зоны реакции для ВВ с малым размером частиц, благодаря увеличению плотности «горячих точек», которые согласно большинству расчетных моделей являются первичными очагами реакции. Однако, как отмечается в [10], ряд обстоятельств может препятствовать прямой зависимости ширины зоны реакции от размера зерна. К таким факторам относятся дробление частиц до размера, слабо зависящего от исходного, в ударной волне либо при прессовании. Минимизировать роль прессования можно, перейдя к ВВ плотности, близкой к насыпной, у которых практически сохраняется исходная структура. Отметим, что и в экспериментах [16, 17] роль дисперсности проявлялась при низких плотностях. Поэтому мы попытались сравнить профили электропроводности в гексогене плотностью 1.2 г/см^3 при исходном размере частиц 200 и 10 мкм. Заряд ВВ с размером частиц 200 мкм готовился практически без прессования (легкое уплотнение небольшим весом), в случае частиц размером 10 мкм потребовался ручной пресс. В остальной процедуры приготовления зарядов были идентичны.

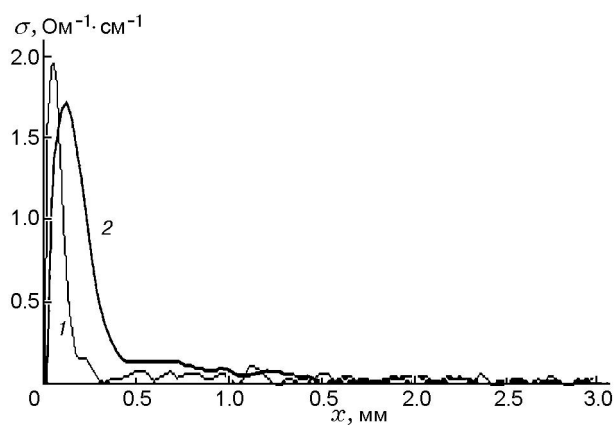


Рис. 5. Влияние дисперсности для низкоплотного гексогена:

1 — размер частиц 10 мкм, разрешение 0.05 мм;
2 — размер частиц 200 мкм, разрешение 0.1 мм

На рис. 5 показаны полученные профили электропроводности. Пик в ВВ с малым размером частиц примерно вдвое короче при сравнимых амплитудах. Средняя ширина проводящей зоны в случае штатного гексогена — 0.4 мм, мелкодисперсного — 0.22 мм. Таким образом, налицо явное влияние размера частиц. Отметим, что пик в мелком гексогене настолько узкий, что для корректного его измерения ширину щели пришлось довести до 0.2 мм (разрешение 0.05 мм); при щели шириной 0.6 мм проводящая зона целиком закрывается изолятором, что приводит к заметному «выбросу» напряжения на ячейке из-за роста ее сопротивления.

ОБСУЖДЕНИЕ

Электрическая диагностика позволяет проследить мезопроцессы на масштабе порядка размера зерна ВВ, к которым другие методы нечувствительны. Например, традиционные методы измерения механических параметров не позволяют уловить сколько-нибудь заметное влияние дисперсности в прессованном ТГ, тогда как метод электропроводности демонстрирует явную зависимость от дисперсности. Ранее [5] отмечался рост проводимости в крупнозернистом литом ТГ, содержащем до 50 % гексогена, однако пики в этих экспериментах из-за их низкого разрешения различить не удалось. Длительности пиков согласуются с известными данными о времени реакции в ТГ, полученными в измерениях электромагнитными и оптическими методами. Заметное влияние размера частиц гексогена

на профили электропроводности позволяет предположить, что по крайней мере часть разброса литературных данных по размерам и длительности зоны реакции в ТГ может быть связана с различным гранулометрическим составом вещества.

Остается открытым вопрос о наличии пика электропроводности в плотном тротиле. О таком пике, амплитудой $200 \div 250 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и шириной около 1 мм, за которым следует зона более низкой электропроводности ($30 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$), сообщалось в [9]. Следует заметить, что постановка экспериментов [9], при достаточном электромагнитном разрешении, отличалась газодинамической нестационарностью, которая могла отразиться на измеряемом профиле. Наши эксперименты, описанные выше, показали результат, более близкий к [9] по сравнению с интегральными измерениями [5], однако зафиксировать пик не удалось. Регистрация пика в чистом ТНТ представляла бы значительный интерес. Это позволило бы распространить корреляцию повышенной электропроводности и зоны реакции на случай ВВ с большим избытком углерода. Авторы предполагают вернуться к этой проблеме в будущем.

Добавление сухого NaCl к гексогену существенно не меняет электропроводность в зоне реакции, но дает протяженный «хвост» (см. рис. 4), отсутствующий в чистом гексогене (см. рис. 5). Это связано с постепенным «растворением» NaCl в продуктах детонации (этот процесс включает также дробление частиц добавки и перемешивание веществ).

Для водонаполненного гексогена, как и для гексогена с насыщенным раствором NaCl, характерен широкий пик ($\approx 1 \text{ мм}$). Давление Чепмена — Жуге в смеси при измеренной скорости детонации 7.2 км/с составляет около 15 ГПа (это следует из данных [15]). Электропроводность ударно-сжатой воды в таких условиях, согласно [18, 19], достигает $1 \div 2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. В этот же диапазон попадает пиковая электропроводность сухого гексогена насыпной плотности. Следовательно, электропроводность в пике для водонаполненного гексогена должна быть примерно такой же величины, что и наблюдается. Уширение зоны реакции по сравнению с чистым ВВ вполне естественно, благодаря явно сверхравновесному количеству воды. Это отражается в профиле электропроводности. Следует заметить, однако, что электропроводность смеси имеет более сложную при-

роду, чем в случае чистого ВВ, и наблюдаемое распределение определяется как химическими реакциями (в гексогене, а также между продуктами детонации гексогена и водой), так и изменением степени диссоциации воды [20] в ходе газодинамического расширения. Оба этих процесса существенно зависят от гидродинамического перемешивания веществ за фронтом детонации. Постепенное нарастание электропроводности (фронт ≈ 0.3 мм) может быть связано с взаимодействием веществ, но возможны перекосы фронта волны из-за неоднородности заряда, которой трудно избежать для этих составов.

Пики для образцов с добавкой чистой воды и раствора NaCl почти не отличаются до расстояния ≈ 2.5 мм, т. е. вклад NaCl в этой области не играет заметной роли на фоне диссоциации воды (молярная концентрация NaCl в насыщенном растворе в ≈ 9 раз меньше, чем у воды, даже без учета воды в продуктах детонации гексогена). Далее, по мере расширения вещества, различие профилей становится заметным: в опыте с раствором NaCl электропроводность в «хвосте» выше и спад ее медленнее, так как NaCl — легкоионизируемая добавка (распадается в растворе на ионы даже при нормальных условиях).

Особого внимания заслуживает роль дисперсности в малоплотном гексогене. В ВВ с малым размером частиц пик проводимости более узкий, чем в штатном гексогене, чего можно было ожидать. Неожиданным оказалось то, что этот пик даже уже, чем в гексогене плотностью $1.5 \div 1.7$ г/см³, что видно из сравнения с данными [1, 2]. Объяснить такое поведение можно, исходя из представлений, развитых А. Н. Дреминым и др. (см., например, [21]). Предполагается наложение двух основных процессов: поверхностного горения, развивающегося из горячих точек, и объемной реакции, причем объемный механизм преобладает при давлениях, превышающих примерно половину давления Чепмена — Жуге в веществе максимальной плотности. При высоких плотностях работает в основном объемный гомогенный механизм, так что начальная дисперсность ВВ не важна. Это согласуется и с нашими измерениями профиля электропроводности [1, 2]. При низких плотностях основным становится механизм горячих точек, для которого влияние дисперсности существенно. Это проявляется, например, в повышенной чувствительности ВВ

с частицами малого размера. При достаточно мелких частицах скорость брутто-реакции вполне может превысить таковую при высоких плотностях, с чем, по-видимому, и связан аномально узкий пик электропроводности. Большой интерес представляло бы прямое измерение традиционными методами времени реакции в таких условиях. Некоторые аномалии в ВВ, состоящих из мелких частиц, наблюдались в работах [16, 17]. Заметим, что оптические способы измерения механических параметров затруднены именно при малых плотностях ВВ, поскольку трудно обеспечить однородность образца и формирование границ раздела. Метод электропроводности оказался более удобным, поскольку ВВ помещается в жесткую оболочку, а измерение производится в объеме вещества.

Таким образом, метод электропроводности высокого разрешения оказался полезным и информативным средством для исследования детонации гетерогенных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. — Arlington, VA: Office of Naval Research, 2006. — ONR 351-07-01. — P. 79–88.
2. Ершов А. П., Сатонкина Н. П., Иванов Г. М. Профили электропроводности в плотных взрывчатых веществах // Хим. физика. — 2007. — Т. 26, № 12. — С. 21–33.
3. Urizar M. J., James E., Jr., Smith L. C. Detonation velocity of pressed TNT // Phys. Fluids. — 1961. — V. 4, N 2. — P. 262–274.
4. Альтшулер Л. В., Доронин Г. С., Жученко В. С. Режимы детонации и параметры Жуге конденсированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 2. — С. 84–103.
5. Ершов А. П., Сатонкина Н. П., Дибиров О. А., Цыкин С. В., Янилкин Ю. В. Исследование взаимодействия компонент гетерогенных взрывчатых веществ методом электропроводности // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 5. — С. 97–108.
6. Ершов А. П., Сатонкина Н. П. Электропроводность при детонации плотных ВВ // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны (III Харитоновские тематические научные чтения: Труды). Саров, 2001. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. — С. 54–59.
7. Бриш А. А., Тарасов М. С., Цукерман В. А. Электропроводность продуктов взрыва конденсированных взрывчатых веществ //

- Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1959. — Т. 37, № 6(12). — С. 1543–1549.
8. **Hayes W.** On the electrical conductivity in detonation products // Proc. 4th Symp. (Intern.) on Detonation, White Oak, MD, 1965. — Washington: Office of Naval Research, ACR-126, 1967. — P. 595–601.
 9. **Гилев С. Д., Трубачев А. М.** Высокая электропроводность продуктов детонации тротила // Журн. техн. физики. — 2001. — Т. 71, № 9. — С. 123–127.
 10. **Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К.** Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
 11. **Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф.** Свечение ударного фронта в жидкости вблизи границы с детонирующим зарядом // Хим. физика. — 1984. — Т. 3, № 7. — С. 1036–1041.
 12. **Лобойко Б. Г., Любятинский С. Н.** Зоны реакции детонирующих твердых взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 45–64.
 13. **Duff R. E., Houston E.** Measurement of Chapman — Jouguet pressure and reaction zone length in a detonating high explosive // J. Chem. Phys. — 1955. — V. 23, N 7. — P. 1268.
 14. **Медведев Д. А., Ершов А. П., Янилкин Ю. В., Гаврилова Е. С.** Мезоскопические течения в неоднородном газе // Физ. мезомеханика. — 2004. — Т. 7, № 3. — С. 101–112.
 15. **Кузнецов Н. М., Шведов К. К.** Параметры детонационной волны и уравнение состояния продуктов детонации водонасыщенного гексогена // Хим. физика. — 1999. — Т. 18, № 2. — С. 80–83.
 16. **Федоров А. В.** Параметры пика Неймана и структура фронта детонационной волны конденсированных взрывчатых веществ // Хим. физика. — 2005. — Т. 24, № 10. — С. 13–21.
 17. **Utkin A. V., Kolesnikov S. A., Pershin S. V., Fortov V. E.** Influence of the initial density on the reaction zone for steady-state detonation of high explosives // Proc. 12th Intern. Detonation Symp., San Diego, CA, 2005. — Arlington, VA: Office of Naval Research, 2005. — ONR 333-05-2. — P. 175–182.
 18. **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.
 19. **Якушев В. В., Постнов В. И., Фортов В. Е., Якушева Т. И.** Электропроводность воды при квазиизэнтропическом сжатии до 130 ГПа // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 2000. — Т. 117, № 4. — С. 710–716.
 20. **Якушев В. В., Дремин А. Н.** Природа электропроводности продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. — 1975. — Т. 221, № 5. — С. 1143–1144.
 21. **Дремин А. Н.** Открытия в исследовании детонации молекулярных конденсированных взрывчатых веществ в XX веке // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 31–44.

*Поступила в редакцию 15/V 2008 г.,
в окончательном варианте — 15/X 2008 г.*