

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук А.Ю. Долгобородова
на диссертационную работу Сатонкиной Натальи Петровны
«Физическая модель электропроводности при детонации
конденсированных взрывчатых веществ вида $C_aH_bN_cO_d$ »,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика,
горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Диссертационная работа Сатонкиной Н.П. посвящена исследованию механизма проводимости продуктов детонации органических конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). В работе приведены результаты экспериментального исследования электрических характеристик при детонации различных ВВ, а также предложена модель электропроводности, которая позволяет использовать электрические измерения как инструмент для диагностики зоны реакции в реальном времени.

Актуальность работы определяется необходимостью получения достоверной информации о механизме развития быстропротекающих химических реакций в процессе детонации ВВ. Разработанная методика измерения электропроводности за фронтом детонационной волны позволяет получать уникальную информацию об изменении проводимости продуктов детонации за доли микросекунды. На профиле изменения электропроводности выделяется узкий пик, который коррелирует с зоной реакции, что позволяет использовать метод измерения электропроводности для диагностики зоны реакции при детонации ВВ.

В работе получен ряд **новых научных** результатов, имеющих **теоретическую и практическую значимость**: создана база экспериментальных данных по электропроводности для большого круга ВВ в широком диапазоне плотностей; предложена модель контактной проводимости по углеродным структурам, формирующимся за детонационным фронтом; предложен метод диагностики зоны реакции в процессе детонации по измерениям электропроводности. Разработанная модель может быть полезна для диагностики и понимания механизма развития и передачи детонации, что позволит оптимизировать взрывные устройства различного назначения.

Основной целью диссертационной работы являлась построение модели электропроводности конденсированных ВВ с атомарным составом $C_aH_bN_cO_d$ и её верификация всеми доступными методами.

Диссертация общим объемом 222 страницы состоит из введения, 4-х глав, заключения, библиографии и приложения, содержит 21 таблицу и 107 рисунков. Библиография содержит 327 ссылки.

Во введении обоснованы актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость диссертации, приведены выносимые на защиту положения.

В первой главе приведен литературный обзор имеющихся данных в области исследования электрических свойств твердых ВВ. Показана противоречивость имеющейся информации, что связано с недостатком экспериментальных данных и, как правило, недостаточно хорошим экспериментальным разрешением методик. Для объяснения высокой электропроводности предлагались различные механизмы: электронный в результате термоэмиссии и/или хемоионизации, ионный, контактный по «сетке» проводящих углеродных частиц. Для уточнения механизма электропроводности в работе предложен метод экспериментального исследования электропроводности высокого разрешения. В главе приведено подробное описание метода, приведена электрическая схема с измерительной ячейкой, описан метод обработки данных. Приведена оценка точности метода, объяснены некоторые экспериментальные эффекты. Измерительная ячейка осуществляет аппаратное дифференцирование проводимости четко выделенного объема среды. Пространственное разрешение метода зависит от толщины диэлектрика и составляет около 0.1 мм. Суммарная ошибка метода зависит от ряда факторов (неоднородность заряда ВВ, кривизна детонационного фронта и т.д.) и составляет до 20%.

Во второй главе приведены результаты экспериментального исследования восьми ВВ при разной плотности и структуре заряда: гексоген, октоген, тэн, тротил, ТАТБ, БТФ, ГНС и CL-20. Эти ВВ имеют существенные отличия как по кислородному балансу и содержанию углерода в молекулярной структуре, так и по параметрам детонации. Определены общие закономерности изменения электропроводности за детонационным фронтом. Электропроводность продуктов детонации гексогена, октогена, ТЭНа и БТФ резко неоднородна во всем диапазоне исследованных плотностей. За фронтом выделяется узкая область высоких значений, далее после точки перегиба следует плавное снижение электропроводности, соответствующее волне разгрузки. Длительность высокой

электропроводности для тэна, октогена и гексогена слабо зависит от давления в точке Чепмена-Жуге и чувствительна к размеру зерна при насыпной плотности. Для всех исследованных ВВ максимум электропроводности достигается за фронтом на временах около десятка нс, находится внутри зоны реакции и растет с плотностью. Проведено исследование прессованных и литых зарядов тротила. Для высокоплотных зарядов получена сильная зависимость формы сигнала и пикового значения от структуры заряда, определяющейся способом изготовления, отличие максимума проводимости для литого и прессованного составляет 200%. При детонации ГНС высокой плотности получен максимум электропроводности $60 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, что выше, чем для всех исследованных ранее веществ, за исключением тротила. Проведено экспериментальное исследование промышленного эмульсионного ВВ на основе смесей селитры с углеводородами, с низким содержанием углерода (меньше 6%) и кислородным балансом, близким к нулю. Максимум электропроводности для всех исследованных плотностей не превышает $1 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, что подтверждает концепцию ключевой роли углерода для процесса проводимости при детонации. В целом сравнение данных для различных типов ВВ показало, что определяющим для проводимости является содержание углерода в структуре молекул, несмотря на значительное отличие параметров детонации.

В третьей главе приводится обоснование предложенного механизма электропроводности. Проведен анализ данных по электропроводности широкого спектра ВВ с разными параметрами детонации, плотностью и структурой заряда. Сравнение ширины зоны реакции и линейного размера области высокой электропроводности для зарядов индивидуальных ВВ с близкими характеристиками показало удовлетворительное согласие, это дает основание утверждать, что область высокой электропроводности взаимосвязана с зоной химической реакции. Исследование сохранных продуктов детонации богатых углеродом БТФ, ТАТЬ, ТНТ и ТГ показало наличие графитоподобных углеродных структур, которые способны обеспечить контактную проводимость при детонации. Проведен сравнительный анализ электропроводности с учетом элементного состава ВВ и расчетных термодинамических параметров продуктов детонации, полученных численно с использованием модифицированного уравнения ВКВ. Показано, что давление, температура, интенсивность химической реакции, наличие воды в продуктах не являются ключевыми для электрических характеристик заряда ВВ. Наибольшие значения электропроводности получены при детонации веществ с высоким

содержанием углерода, что говорит о его доминирующей роли в процессе проводимости. Предложена модель контактной электропроводности при детонации ВВ, которая предполагает образование за детонационным фронтом углеродных структур, пронизывающих все пространство детонационной волны, причем плотность проводящей структуры и ее проводимость больше в области химпика, к точке ЧЖ за счет химических реакций содержание углерода уменьшается, электропроводность падает. Предложенная модель объясняет все наблюдаемые экспериментальные данные исследований электрических свойств ВВ, согласуется с результатами моделирования методом молекулярной динамики и экспериментальными выводами, полученными с использованием разных методик.,

В четвертой главе приводятся результаты по изучению возможности применения измерений электропроводности для диагностики зоны реакции при детонации ВВ. Методом электропроводности исследована зона химической реакции при детонации зарядов октогена, гексогена и тэна насыпной плотности с разным начальным размером зерна. Получено сокращение области высокой электропроводности при увеличении дисперсности. Аналогичное влияние начального размера зерна зафиксировано для прессованных плотных зарядов гексогена. Это объясняется интенсификацией химической реакции вследствие роста концентрации горячих точек. Для объяснения сильной зависимости длительности зоны реакции от сплошности ВВ автор предполагает, что ключевым для развития химической реакции является не разогрев вследствие изоэнтропического сжатия пор, а достижение в горячих точках порогового давления, достаточного для выведения из равновесия метастабильной молекулы ВВ. Формирование сквозных проводящих структур из углерода происходит за фронтом детонационной волны вследствие перестройки химических связей при сжатии и соотносится с первой стадией химической реакции. Второй стадией является разрушение наноструктур вследствие как химических реакций, так и расширения вещества при снижении давления в детонационной волне. Конденсированный углерод в сохранных продуктах детонации является остатком после физико-химических превращений углеродных структур, образованных в химпике.

В заключении приведены выводы по основным результатам работы.

В приложении приведены графики и таблицы с экспериментальными данными по электропроводности при детонации гексогена, октогена, тэна разной дисперсности, а также эмульсионного ВВ на основе аммиачной и натриевой селитры.

Диссертационная работа в целом выполнена на высоком научном уровне с использованием современных экспериментальных методов и теоретических подходов, что позволяет сделать заключение о надежности и **достоверности** полученных результатов. Результаты работы получили свое отражение в достаточном количестве публикаций в российских и зарубежных изданиях из перечня ВАК, докладывались на ряде международных и российских конференциях. Результаты, полученные в работе, являются новыми, интересными и имеют важное научное и прикладное значение. Основные выводы работы вполне **обоснованы**.

По тексту диссертации есть ряд замечаний:

1. На страницах 48-49 описана странная процедура определения плотности. Плотность не измерялась напрямую, а определялась по измерениям скорости детонации с использованием зависимостей скорости детонации от плотности $D(\rho)$. В качестве источника этих зависимостей указана работа Альтшулера, Доронина и Жученко 1989 года [105]. Однако в этой работе скорости детонации не определялись, а были использованы опубликованные ранее различными авторами данные по тротилу, гексогену и тэну. Точность этих зависимостей не указана. Также в диссертации не указана точность и разброс данных при определении скорости детонации. Поэтому ошибка 1% для определения плотности выглядит некорректной. Также непонятно какая процедура определения плотности использовалась для бензотрифуроксана, ТАТБ, CL-20 и эмульсионного ВВ – в работе [105] данных для этих ВВ нет.

2. Последний вывод к главе 4 на стр. 183 претендует на некоторую общность. «Наблюдаемая сильная зависимость длительности зоны реакции от сплошности ВВ объясняется тем, что ключевым для развития химической реакции является не разогрев вследствие изоэнтропического сжатия, а достижение в горячих точках порогового давления, достаточного для выведение из равновесия метастабильной молекулы ВВ», однако вывод нужно было конкретизировать, поскольку он обоснован только на сравнении данных для прессованного и литого тротила. Для других ВВ это неверно, для высокопористых составов с гетерогенной структурой, например, для эмульсионного ВВ, исследованного в данной работе, работает очаговый механизм со схлопыванием пор, для высокоплотных беспористых составов используется дислокационный механизм. В качестве примера можно привести работы В.Ю. Клименко по многопроцессорной модели детонации (Хим. физика, 1998, т. 17, № 1, стр. 11-24), где в зависимости от структуры заряда работают разные механизмы.

3. В подписи к рис. 3.16 приведены данные для скорости детонации гексогена и CL-20 при одинаковой плотности 1,19, CL-20 более мощное ВВ, однако скорость детонации почти на 400 м/с ниже, чем для гексогена, объяснения нет.

4. Замечания к приложению. В Таблице 4.9 стр. 217 приведены данные по электропроводности тэна. При близких плотностях 1,65, 1,67 и 1,69 получены значения максимальной электропроводности с разбросом, превышающим заявленную точность методики 20% - 4,5, 8,1 и 5,5 при близкой электропроводности в точке Чепмена-Жуге. Однако пояснения этого в тексте нет. В Таблице 4.12 стр. 222 в строке 20 указана скорость детонации для аммиачно-селитренного ВВ около 6 км/с, это существенно выше типичной скорости такого типа ВВ, но пояснений также нет.

5. Замечания по оформлению текста. Имеются опечатки, в основном это неправильные окончания слов, пропущенные буквы и запятые. В некоторых случаях из-за этого предложения становятся малопонятными. Например, стр. 22 "быстрый рос (рост)", стр. 24 «В результате магнитный потом уменьшается (поток)», стр. 138 «резко отрицательного кислородного баланса (кислородного)» и т.д. Нет расшифровок обозначений к формулам 1.3 и 1.4.

6. Автореферат диссертации в целом правильно отражает основные результаты работы. Имеются два замечания. В автореферате написано, что литературный обзор приведен во введении, однако в тексте диссертации обзор находится в главе 1. На стр. 21 ошибка в обсуждении результатов, приведенных на рис. 9 – «Примечательно одинаковое значение электропроводности при $t > 0.1$ мкс для ТАТВ и ВТФ». На самом деле электропроводность для ТАТВ выше в 10 раз, имелось ввиду значение электропроводности для гексогена (RDX). В тексте диссертации эта ошибка не повторяется.

Однако в целом, указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки работы.

Считаю, что диссертационная работа «Физическая модель электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ вида $C_aH_bN_cO_d$ » соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, в том числе отвечает критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в действующей редакции), а ее автор, **Сатонкина Наталья Петровна**,

