

Сатонкина Наталья Петровна

**Физическая модель электропроводности при
детонации конденсированных взрывчатых веществ
вида $C_aH_bN_cO_d$**

1.3.17 Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

НОВОСИБИРСК — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

Официальные Вуль Александр Яковлевич

оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

Долгобородов Александр Юрьевич

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ударно-волновых воздействий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

Романенко Анатолий Иванович

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится « 11 » октября 2023 г. в « 15.00 » часов на заседании Диссертационного совета 24.1.150.01 при ФГБУН Институте химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН (ИХКГ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 3, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИХКГ СО РАН и на сайте <http://kinetics.nsc.ru>. Текст автореферата размещен на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации по адресу: <http://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан « 23 » мая 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат химических наук

И.П. Поздняков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одним из самых интересных и загадочных физических явлений является детонация. Несмотря на широкое применение конденсированных взрывчатых веществ (КВВ), есть ряд недостаточно изученных процессов. К ним относятся механизм запуска химической реакции и переход в детонационный процесс, детали формирования наноалмаза в детонационной волне, а также подробности кинетики химических реакций. В настоящее время рабочей моделью физики процесса является модель Зельдовича – Неймана – Дёринга [1–3], согласно которой детонационная волна состоит из ударного фронта, зоны химической реакции (химпика или пика Неймана), плоскости Чепмена – Жуге (ЧЖ) и волны разгрузки Тейлора. Первая публикация [1] относилась к газовой детонации, с тех пор были открыты спиновая и многофронтная детонация, показавших сложную структуру зоны реакции в газах. В конденсированных ВВ исследование химпика ведется преимущественно численными методами. Сложность экспериментального изучения зоны реакции при детонации КВВ связана с крайне агрессивной средой, образующейся во взрывном процессе, к тому же происходящем в экстремально узких временных рамках – за микросекунды. Дополнительным стимулом для исследования химпика является то, что в результате детонации органических веществ именно в зоне реакции образуется такой уникальный физический объект, как детонационный наноалмаз (ДНА).

Состояние вещества в химпике не соответствует плазме, газу, жидкости или твердому телу. Отсутствие достоверного теоретического описания вместе с перечисленными факторами делают задачу развития методов экспериментального исследования крайне востребованной.

В данной работе предлагаются результаты экспериментального исследования электрических характеристик при детонации широкого круга ВВ при варьировании начальных условий. На базе экспериментальных данных построена модель электропроводности, которая позволяет использовать электрические характеристики как инструмент для диагностики зоны реакции в реальном времени.

Актуальность темы исследования

Работа посвящена исследованию электрических свойств при детонации органических конденсированных взрывчатых веществ и определению ведущего механизма проводимости. Актуальность исследования определяется широким функциональным потенциалом модели электропроводности, в частности, возможностью теоретической оценки электрических характеристик по химической формуле вещества. На профиле электропроводности выделяется узкий пик, который коррелирует с зоной реакции, благодаря этому, электропроводность может быть использована как инструмент для

диагностики зоны реакции при детонации.

Еще один аспект актуальности связан с ультрадисперсными алмазами, образующимися в процессе детонации богатых углеродом ВВ. Детальное описание процесса формирования ДНА представляет собой важную научно – техническую проблему. Очевидно, что к образованию наноалмазов ведет процесс конденсации углерода, который, в свою очередь, связан с кинетикой химических реакций. Экспериментальное исследование кинетики затруднено в силу особенностей быстропротекающих процессов – малые времена и агрессивность исследуемой среды. Об особенностях кинетики судят по конечному результату, исследуя структуры, выделяемые из продуктов детонации (ПД) после химической обработки. Экспериментальных методов исследования зоны реакции, напрямую связанных с химическим составом, немного, метод меченых атомов и анализ сохраненных продуктов детонации. Эти способы дают интегральную информацию, искаженную химической обработкой и процессами догорания в волне Тейлора, не позволяя проводить исследование в реальном времени. Необходимо развитие альтернативных методов исследования, одним из которых является диагностика электропроводностью.

Степень разработанности тематики

Изучение электрических свойств детонирующих взрывчатых веществ началось около 70 лет назад, когда была обнаружена неожиданно высокая электропроводность. За долгую историю исследований о механизме проводимости были высказаны следующие гипотезы: хемоионизация вследствие химической реакции, ионизация при высоких термодинамических параметрах, термоэмиссия и термоионизация при высокой детонационной температуре, долгое время было принято объяснять высокую проводимость ионизацией воды, которой в продуктах традиционных ВВ содержится около 20%. В 1965 году Б. Хейзом было получено $100 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ при детонации жидкого тротила, этот результат невозможно объяснить упомянутыми механизмами, и Хейзом было высказано предположение о существовании углеродных сеток в детонационной волне, причем в качестве источника указывался так называемый свободный углерод – образующийся в продуктах детонации после окончания зоны реакции. В 2001 году С.Д. Гилёвым и А.М. Трубачевым была опубликована работа, в которой при детонации тротила получено еще большее значение – $280 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, говорится о необходимости существования протяженных структур с почти металлической проводимостью, на роль структур подходят углеродные фракталы. Несмотря на достаточно большую историю исследования процесса, модели, имеющей предсказательную силу, так и не появилось, систематических исследований проведено не было. Настоящей работой этот пробел восполнен.

Задача – всестороннее исследование электрических характеристик

детонирующих органических ВВ, получение профиля для разных начальных условий.

Цель работы – построение модели электропроводности конденсированных индивидуальных ВВ вида $C_aH_bN_cO_d$, верификация всеми доступными методами.

Научная новизна

Результаты диссертации, выносимые на защиту, являются новыми.

Создана база экспериментальных данных по электропроводности для большого круга конденсированных взрывчатых веществ и широкого диапазона начальных условий.

Предложена модель контактной проводимости по углеродным структурам, формирующимся за ударным фронтом и пронизывающим детонационную волну как в области химпика, так и за точкой Чепмена–Жуге.

Предложен и обоснован метод диагностики зоны реакции в процессе детонации по электропроводности, которая отслеживает проводящую форму углерода.

Теоретическая значимость работы определяется потребностью развития фундаментальных знаний о природе взрывного превращения. Исследование электрических свойств при детонации позволит существенно обогатить наши знания об этом физическом явлении через использование электропроводности как высокочувствительного инструмента для диагностики структурных изменений в среде ВВ.

Практическая значимость работы определяется, в первую очередь, необходимостью обеспечить максимальную безопасность при обращении с ВВ. Применение результатов данной работы возможно для создания быстродействующих взрывных размыкателей тока в схемах формирования сильноточных импульсов заданной формы, для гашения электрической дуги детонационной волной, для оптимизации магнитогидродинамических генераторов. Разработанная модель будет полезна для диагностики и понимания механизма развития и передачи детонации, что позволит оптимизировать взрывные устройства. Будет полезна для разработки миниатюрных взрывных устройств различного назначения: малогабаритных устройств взрывной логики [4], для локального взрывного воздействия на носители информации [5], устройств для прецизионного воздействия на химические и биологические объекты [6].

Методология и методы исследования

Использована общенаучная методология. Для экспериментального исследования использован специальный метод измерения электропроводности высокого разрешения, разработанный ранее автором диссертации в соавторстве с А.П. Ершовым и Г.М. Ивановым. С помощью метода получено распределение электропроводности для большого круга веществ и широкого спектра начальных условий. Основываясь на этой базе дан-

ных, с использованием сравнительного анализа и комплексного подхода построена модель электропроводности детонирующих твердых органических веществ. Способность диагностировать зону реакции детонационной волны электропроводностью доказана сравнением с результатами других методик, подтверждается согласованностью данных разных экспериментальных методик и корреляцией с результатами других работ.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

1. **Результаты экспериментального исследования электропроводности при детонации гексогена (RDX), октогена (HMX), тэна (PETN), бензотрифуроксана (BTF), тротила (TNT), гексанитростильбена (HNS), триаминотринитробензола (ТАТВ) и ВВ на его основе, эмульсионного ВВ (ЭмВВ) при разной плотности.**
2. **Модель электропроводности при детонации твердых взрывчатых веществ вида $C_aH_bN_cO_d$. Проводящие свойства конденсированных взрывчатых веществ при детонации определяются формированием за фронтом углеродных структур, пронизывающих все пространство детонационной волны.**
3. **Диагностика кинетики зоны реакции в процессе детонации конденсированных ВВ с использованием электропроводности.**

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов обеспечена проверкой с использованием численных методов на точных решениях, тщательным анализом экспериментальных подходов, подтверждается внутренней согласованностью данных разных экспериментальных методик и корреляцией с результатами других работ.

Апробация результатов работы

Основные результаты докладывались на конференциях и семинарах, в числе которых:

- ♦ V, VI, X, XI, XIII, XIV, XV Международная конференция «Забабахинские научные чтения» (Снежинск, 1998, 2003, 2010, 2012, 2017, 2019, 2021).
- ♦ XII Симпозиум по горению и взрыву «Химическая физика процессов горения и взрыва». (Москва, 1999).
- ♦ VIII, X, XII, XIV, XVII, IXX, XXI, XXII Международная конференция «Харитоновские научные тематические чтения. Экстремальные

состояния вещества. Детонация. Ударные волны.» (Саров, 2001, 2005, 2009, 2011, 2015, 2017, 2019, 2021).

- ❖ XII Международный симпозиум по детонации. (Сан – Диего, Калифорния, США, 2002).
- ❖ Международная конференция «Ударные волны в конденсированных средах». (Санкт–Петербург, 2004).
- ❖ XI Всероссийская школа-семинар «Современные проблемы математического моделирования», Абрау – Дюрсо, 2005.
- ❖ XIII Международный симпозиум по детонации. (Норфолк, Вирджиния, США, 2006).
- ❖ Международная конференция «Ударные волны в конденсированных средах» (Санкт-Петербург, 2006).
- ❖ XII Международная конференция по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам (Новосибирск, 2008).
- ❖ XI Всероссийская школа – конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (2010).
- ❖ VIII, IX Международная конференция «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике», (Новосибирск, 2010, 2015, 2020).
- ❖ XXVI, XXX, XXXII, XXXV International Conference on Equations of State for Matter (Elbrus, 2011, 2014, 2017, 2020).
- ❖ Международная конференция «Ударные волны в конденсированных средах» (Киев, Украина, 2012).
- ❖ VI, X Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2013, 2018).
- ❖ XV, XVI International Detonation Symposium (San Francisco, USA, 2014, Cambridge, USA, 2018).
- ❖ Fifth International Symposium on Explosion, Shock wave and High-strain-rate Phenomena (Beijing, China, 2016).
- ❖ Международная конференция «Современные углеродные наноструктуры» (Санкт – Петербург, 2017).

- ✧ Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 60-летию Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН «Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва» (Новосибирск, 2017).
- ✧ 14th Biennial International Conference, Advanced carbon nanostructures (St. Petersburg, 2019).
- ✧ Всероссийская конференция «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения». (Новосибирск, 2018).
- ✧ III Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2018).

Основные результаты докладывались на научных семинарах Института гидродинамики СО РАН (семинар взрывных отделов под руководством академика РАН В.М. Титова 2008, 2014, 2018, под руководством зам. директора к.ф.-м.н. Э.Р. Прууэла 2019, 2021, общепитетутский семинар по результатам года 2010, 2014, 2016, 2019, 2020, 2022).

Тема диссертационной работы соответствует "Приоритетным направлениям развития науки, технологии и техники в Российской Федерации" – "1. Безопасность и противодействие терроризму", а также "Основным направлениям фундаментальных исследований": "1.4.1.5. Процессы горения и взрыва".

Материал диссертационной работы связан со следующими темами НИОКР Института гидродинамики СО РАН:

3.5.6.1. Исследование детонационных процессов в газовых, гетерогенных и конденсированных средах, в том числе для создания фундаментальных основ технологий, 2005–2008 гг.

III.19.6.1. Исследование высокоэнергетических воздействий на вещества для создания научных основ построения функциональных материалов, 2009–2012 гг.

III.22.2.2. Исследование высокоэнергетических воздействий на материалы и конструкции с целью создания научных основ новых технологий, 2013–2016 гг.

III.22.2.2. Развитие научных основ физики и механики детонации высокоэнергетических материалов и скоростного воздействия на инертные материалы для разработки принципов управления и повышения эффективности их практического использования, 2017–2020 гг.

2.3.1.2.5. Развитие научных основ физики и механики детонации высокоэнергетических материалов и скоростного воздействия на инертные материалы для разработки принципов управления и повышения эффективности их практического использования, 2021–2024 гг.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 28 печатных работах [1–28]^a; все работы из приведенного списка опубликованы в журналах (все входят в систему Scopus), рекомендованных ВАК, 7 работ – в журналах первого квартиля, 5 статей без соавторов.

Личный вклад автора

Диссертационная работа выполнена в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской Академии наук. Результаты, опубликованные в [13]^a, [15]^a, [18]^a, [19]^a, [23]^a, получены без соавторов. Участие автора диссертации в совместных работах отражено в прилагаемой справке о личном вкладе.

Соответствие специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Диссертационная работа соответствует п. 1 "физика и физические теории химических реакций и экспериментальные методы исследования динамики химических превращений", п. 5 "экспериментальные методы исследования химической динамики", и п. 7 "Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения, детонации, взрывных и ударных волн; связь химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками термического разложения, горения, взрывчатого превращения; термодинамика, термохимия и макрокинетика процессов горения и взрывчатого превращения;" паспорта научной специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества (отрасль науки – физико-математические).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 222 страницах, содержит 21 таблицу и 107 рисунков. Библиография состоит из 327 наименований.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект N 075-15-2020-781), Российского фонда фундаментальных исследований (15-03-01039-а, 18-03-00441-а, 18-03-00227-а руководитель), Сибирского отделения РАН (2009–2011, номер проекта 4.5, руководитель).

Я хочу искренне горячо поблагодарить Александра Петровича Ершова за совместную плодотворную работу, поддержку, проявленное терпение и глубокую мудрость истинного Учителя.

Моего любимого мужа Тодышева Корнелия Юрьевича за колоссальную поддержку, как близкого человека, так и профессионала своего дела.

За предоставленные с микроскопа фотографии благодарю Ярослава Львовича Лукьянова, за результаты просвечивающей электронной микро-

скопии – Кашкарова Алексея Олеговича.

Эксперименты проведены в разное время, в них участвовали Эдуард Рейнович Прууэл, Алексей Олегович Кашкаров, Иван Андреевич Рубцов, львиная доля – совместно с Александром Петровичем Ершовым, огромное им спасибо. Выражаю признательность Дмитрию Александровичу Медведеву и Александру Леонидовичу Куперштоху за совместную работу, ценные обсуждения и поддержку.

К сожалению, с нами нет Геннадия Матвеевича Иванова, который внес значительный вклад в экспериментальные исследования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы основные задачи исследования, теоретическая и практическая значимость. Сделан литературный обзор достижений в области исследования электрических свойств детонирующих твердых взрывчатых веществ. Для объяснения высокой электропроводности предлагались следующие механизмы: электронный в результате термоэмиссии и/или хемоионизации, ионный, контактный по «сетке» проводящих углеродных частиц. Противоречивость имеющейся информации связана с недостатком экспериментальных данных и, как правило, недостаточно хорошим экспериментальным разрешением.

В первой главе описан метод экспериментального исследования электропроводности высокого разрешения: приведена электрическая схема, описан метод обработки данных.

На рисунке 1 показана экспериментальная схема. Взрывчатое вещество помещалось в толстостенную медную оболочку с внешним диаметром 40 мм, диаметр заряда ВВ (внутренний диаметр оболочки) составлял $b = 8$ мм. Оболочка служила внешним электродом, состояла из двух деталей, обозначенных как 1 и 2, детали соединялись резьбой, в полости располагался датчик напряжения 7 – катушка тороидальной формы. Между деталями внешнего электрода размещался диэлектрик 6, толщина которого обычно была меньше 1 мм. Центральный электрод 3 из меди диаметром $c = 2$ мм располагался соосно с внешней цилиндрической оболочкой, был закреплен в оргстеклянной пробке 4, фиксировался медным болтом 5, который резьбой соединялся с цилиндрической оболочкой. Коэффициент взаимной индукции M между контуром с ВВ и тороидальной катушкой 7 определялся в каждом эксперименте и составил ≈ 15 нГн. Инициирование детонации осуществлялось высоковольтным детонатором через оргстеклянную пробку 8 специальной формы, полость которой была заполнена гексогеном насыпной плотности. Для изготовления заряда заданной плотности взрывчатое вещество запрессовывалось в медную оболочку с закрепленным центральным электродом отдельными порциями, прессование производилось на специализированном прессе при давлении около 300

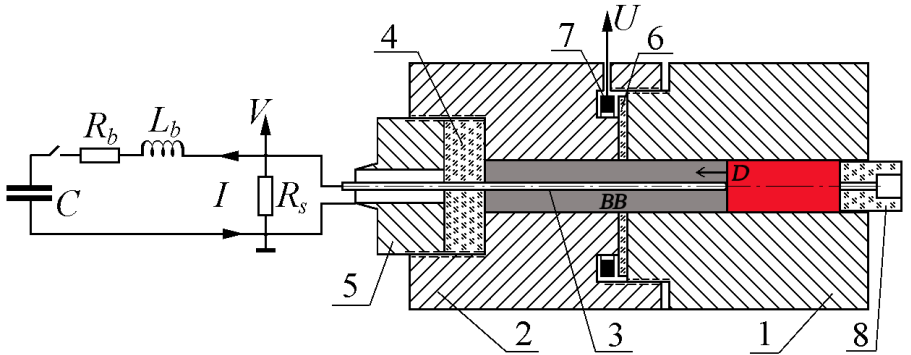


Рис. 1: Геометрия экспериментальной ячейки и схема цепи питания.

атмосфер, для контроля плотности высота порции определялась ограничительными кольцами высотой 5 мм. Количество порций на заряд было 10 – 11 штук.

До прихода детонационной волны ВВ является диэлектриком. В момент достижения детонацией центрального электрода (изображено на рисунке 1) экспериментальная ячейка, включенная параллельно сопротивлению шунта R_s и находящаяся под напряжением V_0 , начинает пропускать ток через детонационную волну, движущуюся вдоль электродов. Вследствие появления тока и возрастания магнитного потока на катушке 7 появляется импульс напряжения U . При прохождении фронтом детонации диэлектрика ток, протекающий через деталь 1, переключается на деталь 2. В результате магнитный поток уменьшается, создавая импульс обратной полярности на профиле напряжения U . Величина электропроводности при прохождении ДВ диэлектрика выражается формулой

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

где D – скорость распространения детонации, x – местонахождение фронта в момент времени t , V – напряжение на экспериментальной ячейке, M – коэффициент взаимной индукции между контуром с ВВ и тороидальной катушкой.

В дифференциальной ячейке минимизированы газодинамические возмущения; область, в которой проводятся основные измерения, имеет однородную плотность ВВ; искажения линий поля ограничены малой областью, примыкающей к щели. Дополнительное преимущество – небольшая паразитная индуктивность контура полости.

Результаты газодинамического моделирования деформации медной оболочки заряда показали, что в области химшика, расположенного за фрон-

том на расстоянии несколько мм, деформацией оболочки можно пренебречь.

Проведено моделирование отклика экспериментальной ячейки при разной зависимости электропроводности среды $\sigma(x)$ в цилиндрической геометрии. Считается, что детонационная волна одномерная, при фиксированной координате x потенциал φ и плотность тока не зависят от угла. Методом простых итераций решалось уравнение $\text{div}(\sigma(x)E(x, r)) = 0$. В качестве модельной зависимости были использованы постоянная электропроводность и с экспоненциальным падением после быстрого достижения максимума за фронтом детонации. Оценена точность метода, объяснены некоторые экспериментальные эффекты.

Выводы по главе 1

Развита методика измерения электропроводности для исследования структуры детонационных волн в плотных ВВ. Измерительная ячейка осуществляет аппаратное дифференцирование проводимости четко выделенного объема среды. Разрешение метода зависит от толщины диэлектрика и составляет около 0.1 мм.

Для достижения наилучшего результата необходимо использовать максимально тонкий диэлектрик, толстый диэлектрик ведет к искажению профиля электропроводности – снижению максимального значения σ_{max} и уширению области высокой электропроводности. В условиях агрессивной среды детонационной волны слишком тонкий диэлектрик может быть причиной раннего замыкания вплоть до полной потери полезного сигнала. Следовательно, необходим подбор подходящей толщины диэлектрика, исходя из паритета высокого разрешения схемы эксперимента и достаточной длительности сигнала.

Влияние нецентрального инициирования более значительное, чем толщины диэлектрика. В некоторых экспериментах с нецентральным инициированием результаты повторяют "хорошие" эксперименты, но вероятность удачного инициирования составляет 10%, поэтому требуется использование специального боевика, обеспечивающего инициирование вблизи оси заряда.

При запрессовке ВВ в оболочку в одном сечении возможно наличие локальных уплотнений и областей с пониженной плотностью, что порождает неоднородности и ускорение / замедление местной скорости детонации и ведет, в частности, к неплоскостности фронта. Эти неоднородности вызывают разность прихода волны по периметру не больше, чем 0.24 мм. Способ инициирования играет более важную роль для плоскостности фронта, чем локальные неоднородности плотности.

Результаты газодинамического моделирования деформации медной оболочки заряда показывают, что в области химпика, расположенного за фронтом на расстоянии несколько миллиметров, деформацией оболочки можно

пренебречь.

Проведено численное моделирование отклика экспериментальной ячейки в плоском и квазитрехмерном приближении. Объяснены экспериментальные эффекты, подтверждена эффективность экспериментальной методики.

Основные результаты первой главы опубликованы в работах [1]^a, [2]^a, [3]^a, [4]^a.

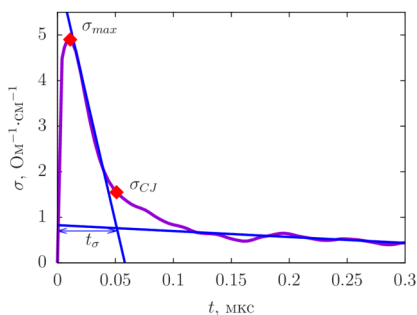
Во **второй главе** приведены результаты экспериментального исследования восьми ВВ при разной плотности и структуре заряда. В таблице 1 даны характеристики исследованных индивидуальных ВВ. Типичный про-

Таблица 1: Данные по взрывчатым веществам, для которых получены экспериментальные результаты. Даны обозначение вещества, максимальная плотность ρ_{max} в г/см³, химическая формула, массовая доля углерода в молекуле r_C , кислородный баланс КБ, скорость детонации D в км/с при плотности ρ и соответствующее давление в точке ЧЖ P_{CJ} в ГПа.

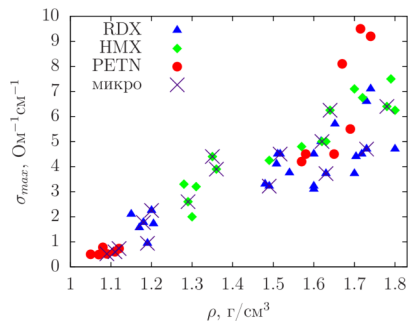
1	2	3	4	5	6	7	8
ВВ	ρ_{max}	хим. формула	r_C	КБ, %	ρ	D	P_{CJ}
RDX	1.82	C ₃ H ₆ N ₆ O ₆	0.162	-21.6	1.8	8.743	33.6
HMX	1.905	C ₄ H ₈ N ₈ O ₈	0.162	-21.6	1.9	9.074	39.3
CL-20	2.044	C ₆ H ₆ N ₁₂ O ₁₂	0.164	-10.9	2.035	9.50	46.6
PETN	1.77	C ₅ H ₈ N ₄ O ₁₂	0.19	-10.1	1.76	8.29	30.3
TATB	1.93	C ₆ H ₆ N ₆ O ₆	0.279	-55.8	1.86	7.93	29.3
BTF	1.903	C ₆ N ₆ O ₆	0.286	-38	1.86	8.19	32.8
TNT	1.66	C ₇ H ₅ N ₃ O ₆	0.37	-74	1.64	6.97	20.3
HNS	1.74	C ₁₄ H ₆ N ₆ O ₁₂	0.373	-67.6	1.74	7.18	23.1

филь электропроводности на примере заряда высокоплотного гексогена приведен на рисунке 2(а). Показаны способы определения длительности высокой электропроводности (пересечение аппроксимационных прямых), электропроводности максимальной σ_{max} и в точке ЧЖ σ_{CJ} . Максимум электропроводности растет с плотностью, что иллюстрирует рисунок 2(б).

На рисунке 3 приведены экспериментальные данные по электропроводности гексогена (■), октогена (▲) и тэна (●), синим цветом даны результаты настоящей работы, сплошные символы соответствуют максимуму электропроводности, пустые – точке ЧЖ. Результаты настоящей работы представлены двумя группами символов, расположение которых сдвинуто по вертикали относительно друг друга, это отражает тенденцию более низкого значения электропроводности за зоной реакции, что выполняется для всех исследованных индивидуальных ВВ. На графике цветом выделе-



(a)



(б)

Рис. 2: (а) Профиль электропроводности при детонации гексогена с плотностью заряда 1.7 г/см^3 и характерные обозначения: σ_{max} – максимум электропроводности, σ_{CJ} – электропроводность в точке ЧЖ, t_σ – длительность высокой электропроводности; (б) максимум электропроводности σ_{max} от плотности заряда ρ для трех ВВ.

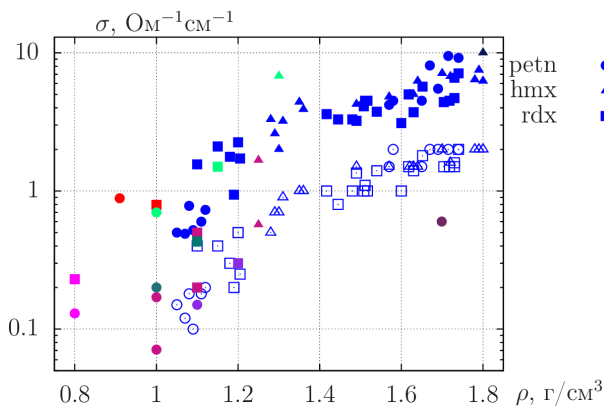


Рис. 3: Максимум электропроводности – сплошные символы, электропроводность в точке ЧЖ – пустые символы той же формы, цветом выделены результаты работ [7–14].

ны результаты ранних работ [7–14]. Чем медленнее измерение, чем больше ширина зоны усреднения, которую в ранних работах было принято брать порядка сантиметра, тем измеренное значение электропроводности ближе

к так называемому равновесному, соответствующему локализации волны Тейлора (пустые символы). С учетом сказанного, результаты измерений настоящей работы и литературные данные хорошо согласуются между собой.

Как будет показано ниже, область высокой электропроводности при детонации конденсированных ВВ со средним содержанием углерода пространственно соответствует зоне реакции. В контексте этой связи уместно сравнить полученные экспериментальные данные с имеющимися.

Для широко применяемых и интенсивно исследуемых ВВ типа гексогена и октогена получена длительность зоны реакции около 100 нс [15]. Позднее с развитием оптических методов время реакции несколько сократилось. В обзорных работах ярко видны имеющиеся противоречия между результатами, полученными разными методиками. Как указано в работе [16], это связано не столько с несовершенством измерений, сколько объясняется разными структурой и параметрами зарядов. В этой работе проведена систематизация данных авторов, которая позволила им вывести универсальную зависимость времени реакции t_J от давления P_J в точке ЧЖ.

На рисунке 4(а) приведена обобщенная зависимость $t_J(P_J)$ для нескольких веществ (ТНТ, гексоген, тэн, октоген, тетрил, дина и составы на их основе), время реакции t_J аппроксимируется выражением [16]

$$t_J = 0.7 \exp(-P_J/14),$$

где P_J давление в точке ЧЖ, выраженное в ГПа, t_J в мкс. Среднеквадратичное отклонение точек данной зависимости составило 20%, что примерно равно экспериментальной погрешности. Из общей зависимости выпадают данные для ТАТВ (обозначено \blacktriangle), отмечается, что угол наклона аппроксимационной прямой такой же, как для других ВВ, то есть длительность зоны реакции увеличивается с уменьшением давления в точке ЧЖ. Механизм зависимости t_J от P_{CJ} авторы связывают с ростом амплитуды ударной волны, ведущей детонацию, и температуры ВВ на фронте, что должно способствовать повышению скорости реакции и, следовательно, сокращению длительности зоны реакции. Мнение об увеличении длительности зоны реакции с падением давления высказывалось в работах [15–18] и широко распространено.

Необходимо отметить, что по данным работы [19] с уменьшением плотности температура в точке ЧЖ для гексогена, октогена и тэна растет, что связано с ростом пористости при снижении плотности. И, следовательно, аргумент о росте температуры с давлением на ударном фронте является спорным.

На рисунке 4(б) приведены результаты экспериментального исследования длительности высокой электропроводности t_σ от давления в точке

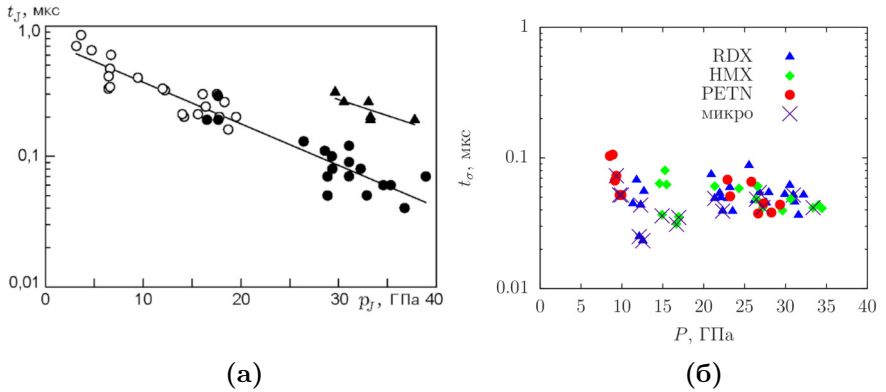


Рис. 4: (а) Приведена обобщенная зависимость времени реакции t_J от давления в точке ЧЖ P_J для ТНТ, гексогена, тэна, октогена, тетрила, дины и составов на их основе, обозначение \blacktriangle соответствует результатам для ТАТВ, цитирование работы [16]; (б) дана длительность высокой электропроводности t_σ от давления в точке ЧЖ P_{CJ} , рассчитанного по формуле $P_{CJ} = 0.25\rho_0 D^2$, приведены данные для трех ВВ, высокодисперсное зерно обозначено как \times .

ЧЖ P_{CJ} для трех ВВ (октоген, гексоген, тэн), масштаб графиков одинаковый. По графику $t_\sigma(P_{CJ})$ видно слабое влияние давления на зону высокой электропроводности. Разброс экспериментальных данных такой же, как на левом графике. Аппроксимация данных дает близкое к константе значение, наблюдается даже некоторое снижение t_σ с уменьшением давления для высокодисперсного зерна.

В отличие от левого графика, на котором минимальное время меньше максимального в 25 раз, на правом графике максимальный разброс значений наблюдается при насыпной плотности зарядов и одинаковом давлении, и составляет ≈ 5 раз (110 нс и 23 нс для тэна и гексогена, соответственно), причем диапазон значений сокращается с ростом давления. Таким образом, обнаруживается противоречие между характером зависимости времени реакции от давления по данным работы [16] и длительности высокой электропроводности.

Необходимо отметить, что по литературным данным нет согласия между длительностью зоны реакции, для одного ВВ и близких параметров заряда при использовании разных методик измерения зона реакции может отличаться больше, чем на порядок. В рамках изложенного, можно констатировать удовлетворительное соответствие длительностей зоны реакции и высокой электропроводности, последняя имеет среднее значение

между максимальным и минимальным.

Итак, демонстрируемая несогласованность литературных данных между собой показывает отсутствие консенсуса не только по поводу изменения параметров зоны реакции в зависимости от структуры и свойств заряда, но и просто общепризнанного значения ширины зоны реакции.

На рисунке 5 приведены профили электропроводности при детонации ВВ с высоким содержанием углерода при насыщенной плотности заряда (справа) и близкой к максимальной (слева). Характер зависимости, показанной на рисунке 2, сохранился только для бензотрифуроксана. Для ТАТВ и TNT, веществ с медленной кинетикой, после широкой области высоких значений наблюдается очень медленный спад, для ТАТВ вырождающийся в полочку. Примечательно отличие профиля тротила заряда прессованного и литого (метки 3 и 4, соответственно), для литого достижение максимального значения происходит за значительно большее время, форма профиля напоминает ступеньку, максимумы при одинаковой плотности, но с разной структурой заряда, отличаются в три раза, что объясняется разной скоростью химического разложения. Максимум σ_{max} для детонирующего HNS ниже, чем для прессованного тротила, но выше, чем для литого. Тем не менее, несмотря на это, величина σ для HNS уступает только тротилу.

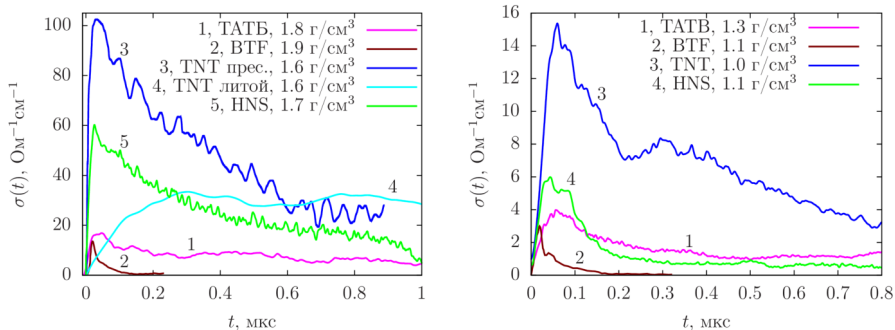


Рис. 5: Профили электропроводности ВВ с высоким содержанием углерода: **слева** высокоплотные, **справа** насыщенной плотности.

Для всех экспериментов с высокой плотностью заряда ВТФ было замечено, что скачок проводимости за фронтом детонирующего ВВ происходит за время меньше 6 нс.

Выводы по главе 2

Проведено экспериментальное исследование электрических характеристик в процессе детонации следующих высоко бризантных индивидуальных взрывчатых веществ: гексогена, октогена, тэна, ТАТВ и ВВ на его

основе, бензотрифуроксана, тротила, гексанитростильбена. Общие закономерности распределения электропроводности следующие:

Электропроводность за фронтом детонации гексогена, октогена, тэна и бензотрифуроксана резко неоднородна во всем диапазоне исследованных плотностей. На профиле выделяется узкая область высоких значений, далее после точки перегиба следует плавное снижение электропроводности, пространственно соответствующее волне Тейлора.

Измеренная длительность высокой электропроводности для тэна, октогена и гексогена слабо зависит от давления в точке ЧЖ и при насыпной плотности чувствительна к размеру зерна.

Для всех исследованных индивидуальных ВВ максимум электропроводности достигается за фронтом на временах около десятка нс, находится внутри зоны реакции и растет с плотностью.

Проведено исследование прессованных зарядов чистого тротила с разной плотностью, а также литого. Для высокоплотных зарядов получена сильная зависимость формы сигнала и пикового значения от структуры заряда, определяющейся способом изготовления, отличие максимума σ_{max} для литого и прессованного составляет 200%. При добавлении эффективного в случае эмульсионного ВВ сенсibilизатора – стеклянных микросфер – ожидаемого увеличения чувствительности не произошло как для насыпной плотности, так и для высокоплотного низко чувствительного литого заряда. При заполнении пор низкоплотного вещества водой получено существенное увеличение электропроводности, которое нельзя объяснить проводимостью воды, имеющей при детонационных термодинамических параметрах электропроводность ниже экспериментального значения на порядок.

При детонации гексанитростильбена высокой плотности получен максимум электропроводности $60 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, что выше, чем для всех исследованных ранее веществ, за исключением заряда прессованного тротила.

Исследование бензотрифуроксана – мощного безводородного ВВ – показало, что максимум электропроводности при детонации зарядов ВТГ и ТАТВ составил около $16 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, то есть, несмотря на значительное отличие кинетики зоны реакции и других свойств, определяющим для проводимости является содержание углерода.

Проведено экспериментальное исследование промышленного составного ВВ 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. Профиль электропроводности при изменении плотности существенно эволюционирует, узкая область высоких значений присутствует только на профилях состава АС. При наиболее высокой плотности, соответствующей

добавлению 3% микросфер, область относительно высоких значений исчезает. При добавлении в ЭМВВ алюминиевого порошка на профиле появился пик длительностью около 200 нс, который близок к продолжительности зоны реакции, полученной в работе [20].

Основные результаты второй главы опубликованы в работах [4]^a, [5]^a, [7]^a, [8]^a, [9]^a, [10]^a, [11]^a, [12]^a, [14]^a, [15], [20]^a, [21]^a, [22]^a, [27]^a.

В **третьей главе** обоснован и озвучен механизм электропроводности при детонации твердых органических взрывчатых веществ. Прямое сопоставление профилей массовой скорости и электропроводности при близких условиях, доказывающее корреляцию области высокой электропроводности и зоны реакции, приведено на рисунке 6. Линии U_{CJ1} и U_{CJ2} показы-

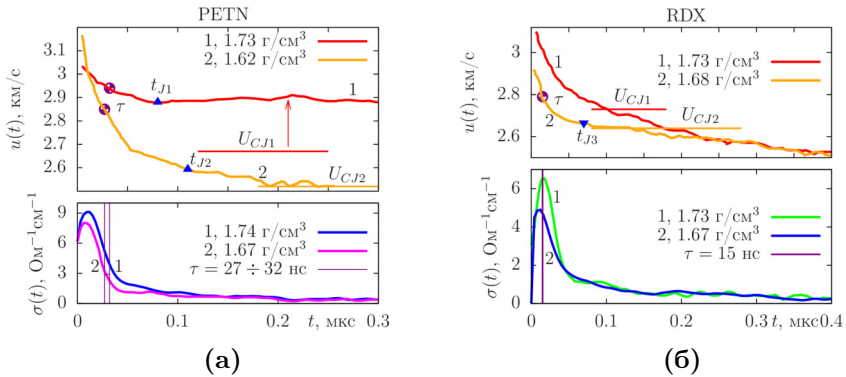


Рис. 6: Данные для PETN (а) и RDX (б). В верхней части – массовая скорость $u(t)$ из работы [16], метки t_J соответствуют времени реакции, τ – ”характерное время реакции, примерно соответствующее уменьшению количества не прореагировавшего ВВ в e раз“, показано линией на нижнем графике. Линиями U_{CJ1} , U_{CJ2} отмечен ожидаемый уровень скорости границы раздела, соответствующий точке ЧЖ. В нижней части – графики электропроводности $\sigma(t)$.

вают ожидаемый уровень массовой скорости в точке ЧЖ, окончание зоны реакции обозначено как t_{J1} , t_{J2} , t_{J3} . Длительность высокой электропроводности t_σ короче значений t_J в 1.5 – 2 раза. При сравнении профилей массовой скорости и электропроводности зарядов насыпной плотности с разной дисперсностью зерна получено синхронное сокращение длительности области высоких значений с увеличением дисперсности для обоих параметров, что говорит о чувствительности обеих методик к кинетике зоны реакции. Как в высокоплотных ВВ, так и при насыпной плотности массовая скорость изменяется плавно и поэтому зона реакции имеют слабый

контраст, что допускает значительный произвол в локализации состояния Чепмена – Жуге. Напротив, область высокой электропроводности выделяется четко.

На рисунке 7 приведено отношение линейного размера области высокой электропроводности $X_\sigma = Dt_\sigma$ к ширине зоны реакции, приводимой в литературе, $X_J = (D - \langle u \rangle)t_J$, для различных плотностей зарядов PETN, RDX и HMX. При заметном разбросе точек на рис. 7 они группируются вокруг уровня $k = 1$; среднее значение для всех данных равно 1.06. Яркого влияния диаметра заряда и плотности на отношение ширин не выявлено, разброс значений примерно постоянный.

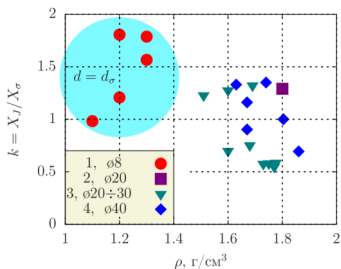


Рис. 7: Отношение размеров зон реакции к ширинам пиков электропроводности $k = X_J/X_\sigma$. Маркерам соответствуют следующие работы: 1 – [16]^a, 2 – [5, 6], 3 – [7], 4 – [4]. Указаны диаметры зарядов, использованные в экспериментах с ”механическими“ параметрами.

Таким образом, при сравнении характеристик зоны реакции детонирующих индивидуальных ВВ, полученных из профиля электропроводности и массовой скорости, доказана корреляция области высокой электропроводности и химпика. Причем надежно зафиксировано, что максимум электропроводности достигается внутри зоны реакции.

Еще одной особенностью контактной проводимости является присутствие протяженных углеродных структур, зафиксировать которые в процессе детонации в области химпика пока не позволяет развитие технологий. Но следы их существования можно обнаружить в сохранных продуктах детонации (СПД) богатых углеродом ВВ. На рисунке 8 приведены результаты просвечивающей электронной микроскопии, наблюдаются удлиненные структуры в проводящей графитовой фазе, выделены ветвления и удлиненные цельные ветвящиеся структуры, способные сформировать углеродный каркас.

Проведен сравнительный анализ электропроводности, измеренной при детонации RDX, HMX, PETN и TNT с рассмотрением термодинамических параметров и элементного состава ВВ и продуктов детонации, полученных численно в работе [8] с использованием модифицированного уравнения ВКВ. Однообразной корреляции между максимумом электропроводности и температурой, давлением и составом продуктов детонации (за исключением углерода) не выявлено.

До недавнего времени было принято объяснять проводимость при де-

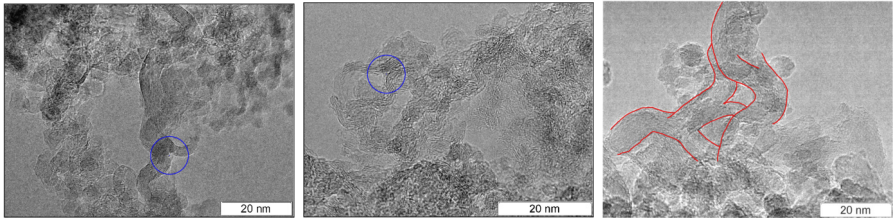


Рис. 8: Результаты просвечивающей электронной микроскопии сохраненных продуктов детонации слева направо: СПД TNT, TATB, TNT. Синими кругами выделены точки ветвления, красным – удлиненная проводящая структура.

тонации диссоциацией на ионы молекул воды. Ярким доказательством отсутствия влияния воды на электропроводность в области химпика является ВТФ, так как в его составе нет водорода. На рисунке 9 приведены данные для трёх ВВ с разными термодинамическими параметрами. Максимальное

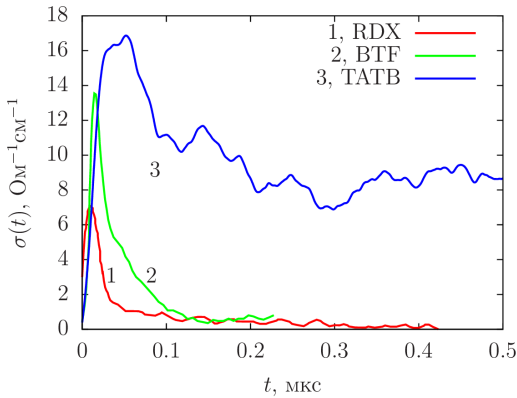


Рис. 9: Профили электропроводности при детонации высокоплотных RDX ($\rho = 1.74 \text{ г/см}^3$), ВВ на основе TATB ($\rho = 1.8 \text{ г/см}^3$) и ВТФ ($\rho = 1.9 \text{ г/см}^3$).

из трех значение и протяженная область слабо спадающей электропроводности наблюдается для "холодного" TATB, причем σ_{max} выше, чем для заряда RDX, и близко к полученному при детонации ВТФ. Примечательно одинаковое значение электропроводности при $t > 0.1$ мкс для TATB и ВТФ, что указывает на отсутствие ключевой роли воды для проводимости и в волне Тейлора.

Доминирующим фактором, имеющим решающее значение, является углерод, это хорошо иллюстрирует рисунок 10. Приведены максимальное значение σ_{max} от доли углерода в молекуле (сплошные значки) и электропроводность в точке Чепмена-Жуге σ_{CJ} от массовой доли свободного углерода в точке ЧЖ, согласно работе [19] (полые значки). Данные для со-

ставного эмульсионного ВВ с низким содержанием углерода согласуются с приведенными. С увеличением доли углерода электропроводность возрастает.

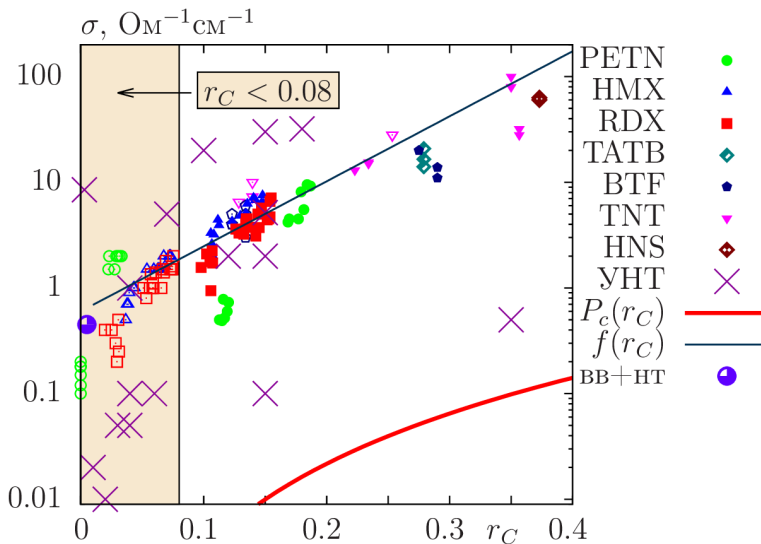


Рис. 10: Экспериментальные данные по электропроводности σ от доли углерода r_C , сплошные значки соответствуют максимуму, пустые той же формы – точке ЧЖ. Функция $f(r_C) = 0.6 e^{14.2r_C}$ – аппроксимация экспериментальных данных по электропроводности. $P_c(r_C) = 5 \cdot (r_C/1.5)^{2.7}$ – линия, ниже которой основной механизм проводимости связан с тунелированием электронов, выше – контактная проводимость по нанотрубкам, значки \times – электропроводность полимера с углеродными нанотрубками при их объемной доле r_C , данные работы [21]. Обозначение $вв+нт$ соответствует значению электропроводности заряда гексоген+нанотрубки 99.5/0.5 [22]. Цветом выделена область $r_C < 0.08$, для которой происходит увеличение относительного вклада ионного механизма в проводимость при детонации.

тает, существенный разброс значений вызван сильным отличием термодинамических параметров среды для разных ВВ. Таким образом, в предположении связи электропроводности с углеродом как в максимуме, так и в точке ЧЖ, зависимость становится универсальной. Полулогарифмический масштаб позволяет привести данные для нулевой доли углерода.

Из общей зависимости выпадает несколько областей. Для РЕТН насышной плотности это может быть связано с неклассическим режимом распространения детонации через струйный механизм. При таком режиме мо-

жет отсутствовать плоскость ЧЖ. В работе [16] получен неклассический режим при детонации заряда PETN.

На рисунке 10 также приведены результаты экспериментального исследования электропроводности полимерных композитов, содержащих углеродные нанотрубки, работа [21]. Полимерный материал является диэлектриком, проводимость композитных материалов осуществляется по углеродным нанотрубкам, при добавлении в материал со свойствами изолятора проводящих удлиненных включений в виде нанотрубок перколяционный порог преодолевается при долях процента и меньше. Массовая доля углерода в исследованных взрывчатых веществах составляет значительно больше 0.01. На примере композитов экспериментально показана принципиальная возможность контактной проводимости в диэлектрике с удлиненными проводящими включениями уже при их незначительном количестве.

Разброс экспериментальных значений электропроводности для ВВ значительно меньше, чем для полимерных композиций, что, по-видимому, связано с близкими физическими и химическим свойствами среды детонационной волны разных ВВ. Разброс экспериментальных значений для композиционных материалов составляет несколько порядков, перколяционный порог и электропроводность композита существенным образом зависят от аспектного отношения нанотрубок, их свойств и степени смешения. На рисунке приведена линия зависимости $P_c(r_C)$, ниже которой проводимость композита осуществляется путем туннелирования электронов через потенциальный барьер. Данные для ВВ расположены на два – три порядка выше.

Проблема электропроводности многопараметрическая. Как показано выше, есть монотонное увеличение максимума электропроводности σ_{max} и в точке ЧЖ σ_{CJ} с плотностью и давлением для каждого индивидуального ВВ, есть влияние дисперсности начального зерна ВВ на параметры профиля электропроводности. Электропроводность зависит от кинетики, значительно отличающейся для разных ВВ, так, при близком составе молекул ТАТВ и ВТФ длительность зоны высокой электропроводности отличается в несколько раз при контрастных значениях термодинамических параметров. Поэтому зависимость электропроводности от доли углерода, приведенная на рисунке 10, можно считать удовлетворительно объясняющей природу электропроводности через контактную проводимость по углеродным структурам, пронизывающим все пространство детонационной волны.

Выводы по главе 3

Основываясь на полученных ранее экспериментальных данных по распределению электропроводности при детонации широкого спектра веществ с разными параметрами и варьируя начальные плотность и структуру заряда, показано следующее:

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.

Исходя из избыточного содержания углерода и резко отрицательного кислородного баланса исходного вещества, проведено исследование сохраненных продуктов детонации с использованием просвечивающей электронной микроскопии. В продуктах детонации богатых углеродом бензотрифуроксана, триаминотринитробензола, тротила и сплава тротил–гексоген найдены графитоподобные углеродные структуры, которые вследствие значительного недостатка кислорода сохранились в ПД. Эти структуры являются результатом формирования в ДВ проводящих сеток. Кроме углеродных лент протяженностью в десятки и сотни нанометров, найдены ветвящиеся структуры. Такие образования способны обеспечить контактную проводимость при детонации, наблюдаемую экспериментально.

Рассмотрены электрические свойства при детонации индивидуальных конденсированных взрывчатых веществ. Проведен сравнительный анализ электропроводности с рассмотрением термодинамических параметров, полученных численно с использованием модифицированного уравнения ВКВ, и элементного состава ВВ и продуктов детонации. Показано, что давление, температура, интенсивность химической реакции, наличие воды 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.

Моделирование методом молекулярной динамики среды с разными элементами показывает возможность формирования протяженных углеродных структур. Массовое содержание углерода, при котором для формирования углеродных "проводов" требуется время в десятки раз больше, составляет около 7%.

Показано, что такие механизмы, как хемоионизация, полупроводниковый при воздействии высоким давлением, ионный, в том числе при ионизации воды, термоэмиссия, термоионизация не объясняют экспериментальные данные по электропроводности. Продемонстрирована корреляция с содержанием углерода, высокие значения $\sigma(t)$ всех исследованных детонирующих индивидуальных органических ВВ объясняются в рамках модели контактной проводимости.

Модель контактной электропроводности для детонирующих твердых органических взрывчатых веществ заключается в следующем: за ударным фронтом детонационной волны происходит формирование углеродных структур, пронизывающих все пространство детонационной волны,

причем плотность проводящей структуры и ее проводимость больше в области химика, к точке ЧЖ вследствие химических реакций масса структуры 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.

Основные результаты третьей главы опубликованы в работах [6]^a, [17]^a, [18]^a, [19]^a, [22]^a, [24]^a, [26]^a.

Четвертая глава посвящена применению электропроводности в качестве метода диагностики зоны реакции – самой сложной для исследования области детонационной волны. На данный момент исследование кинетики ведется, преимущественно, численными методами, с использованием эмпирических подходов. На рисунке 11 приведены результаты моделирования времени химической реакции τ от температуры горячих точек T_{hs} для октогена с использованием пяти наиболее известных моделей. Для сравне-

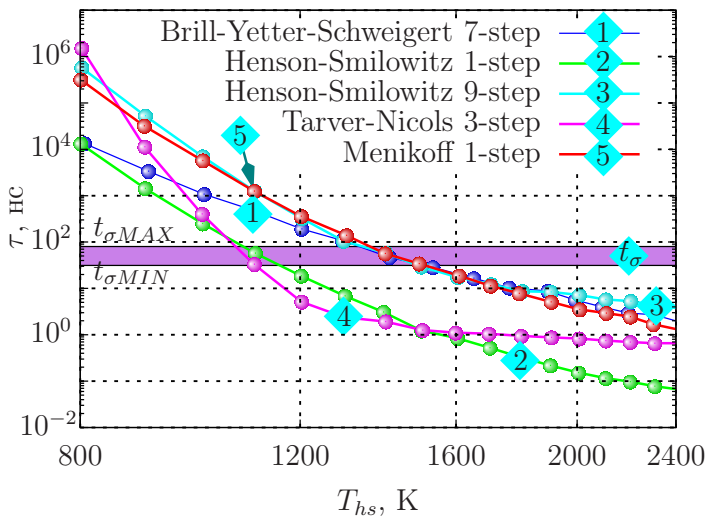


Рис. 11: Зависимость длительности зоны реакции τ от температуры горячих точек T_{sh} , результаты моделирования: одноступенчатая модель Henson-Smilowitz [23], одноступенчатая модель Menikoff [24], трехступенчатая модель Tarver-Nichols [25], девятиступенчатая модель [26], семиступенчатая модель Brill-Yetter-Schweigert [27]; $t_{\sigma MIN}$ и $t_{\sigma MAX}$ отмечают диапазон длительности области высокой электропроводности детонирующего НМХ с плотностью от 1.3 до 1.9 г/см³.

ния приведены минимальная длительность области высокой электропроводности $t_{MIN\sigma}$ и максимальная $t_{MAX\sigma}$ по всем экспериментам. Охвачен весь возможный диапазон температур, результаты довольно сильно разнятся, при этом, полученный в итоге переход от ударного воздействия к детонации удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными для всех численных моделей. Несоответствие результатов моделирования между собой и с экспериментальными данными по t_σ доказывает необходимость развития методов диагностики зоны реакции.

Отсутствие яркого влияния температуры характерно не только для октогена. В таблице 2 приведены данные по длительности высокой электропроводности t_σ от плотности заряда ρ_0 при разной дисперсности зерна ВВ, приведена оценка давления согласно формуле $P_{CJ} = \rho_0 D^2 / 4$, дана температура в точке ЧЖ (данные [19]). Видно, что длительность t_σ слабо зависит от плотности, давления и температуры, но чувствительна к размеру зерна d . При увеличении плотности вещество становится более однородным, поэтому длительность зоны реакции становится близка к веществу насыпной плотности с высокой дисперсностью. Связь скорости реакции с дисперсностью в рамках теории горячих точек выражается в увеличении концентрации зародышей горячих точек при измельчении зерна. То есть концентрация горячих точек влияет на зону химической реакции сильнее, чем величина давления или температуры [18]^a.

Возможности диагностики методом электропроводности демонстрирует следующий пример. На рисунке 12 приведены результаты экспериментов по влиянию дисперсности зерна ВВ на кинетику зоны реакции для насыпных веществ.

При увеличении дисперсности уверенно диагностируется однообразный сдвиг зависимости $\sigma_{max}(t_\sigma)$ и проводимости $\sigma_{max} \cdot t_\sigma$ (показано стрелочками), который означает влияние размера зерна на химическую реакцию. Этот эффект ранее не был найден для высокоплотных ВВ.

На рисунке 13 приведены аналогичные зависимости для всех экспериментов с гексогеном, по которому статистика наибольшая.

Результаты для высокодисперсного зерна на графике (а) (отмечено значком \times) отличаются для насыпного и при плотности 1.5 г/см^3 , но ничем себя не выдают при бóльшей плотности. Напротив, на графике (б) все точки с высокой дисперсностью принадлежат одной линейной зависимости $\sigma_{max} \cdot t_\sigma = \alpha\rho + \beta$. Исследование методом χ^2 показало, что уровень достоверности гипотезы отсутствия влияния дисперсности для функции $\Phi(\rho) = \sigma_{max} \cdot t_\sigma$ составляет $4 \cdot 10^{-23}$. Уровень достоверности гипотез принадлежности штатного и высокодисперсного к линейным зависимостям $\Phi_1(\rho)$ и $\Phi_2(\rho)$ составляют 62.7% и 88.2%, соответственно.

Таблица 2: Длительность высокой электропроводности $\langle t_\sigma \rangle$ (усреднено по нескольким экспериментам) при плотности заряда ρ_0 , давлении и температуре в точке ЧЖ P_{CJ} и T_{CJ} , соответственно, $\langle d \rangle$ – средний размер зерна ВВ, данные работ [7]^a, [16]^a, [23]^a.

ВВ	ρ_0 , г/см ³	$\langle d \rangle$, мкм	P_{CJ} , ГПа	T_{CJ} , К	$\langle t_\sigma \rangle$, нс
RDX	1.2	11	12	4000	31
RDX	1.2	160	12	4000	56
RDX	1.7	160	31	3550	48
HMX	1.3	21	15	3950	34
HMX	1.3	430	15	3950	63
HMX	1.8	430	34	3500	42
PETN	1.1	80	9	4100	59
PETN	1.1	260	9	4100	92
PETN	1.7	260	29	3700	44

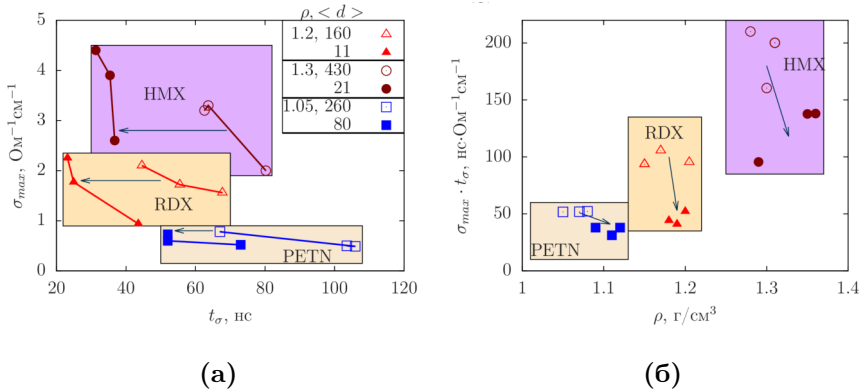
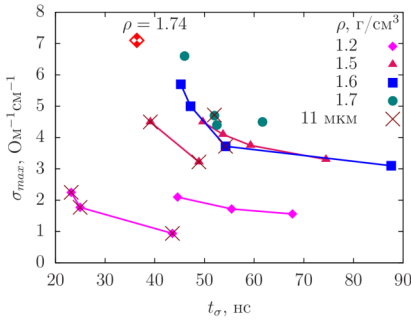
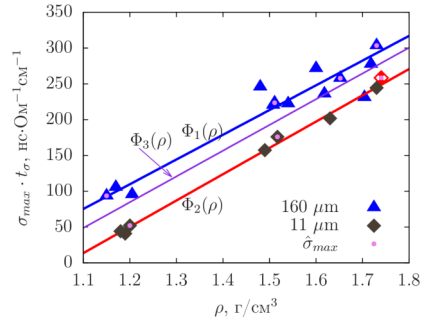


Рис. 12: Влияние дисперсности на характеристики профиля электропроводности при детонации RDX, HMX и PETN насыпной плотности: (а) – максимальная электропроводность σ_{max} от длительности зоны высокой электропроводности t_σ , (б)– функция произведения зависимых величин $\Phi = \sigma_{max} \cdot t_\sigma$ от плотности ВВ. Приняты обозначения: $\langle d \rangle$ – средний размер зерна в мкм, ρ – плотность в г/см³. Стрелка указывает направление сдвига экспериментальных данных при увеличении дисперсности.

Проведено томографическое исследование структуры заряда тротила разного способа изготовления. На рисунке 14 приведены характерные срезы срезы, показывающие, что прессованный заряд значительно одно-



(a)



(б)

Рис. 13: **(а)**: максимальное значение электропроводности σ_{max} от длительности высокой электропроводности t_σ при разной плотности RDX, данные для высокой дисперсности обозначены как \times ; **(б)**: произведение $\sigma_{max} t_\sigma$ от плотности заряда RDX, обозначение $\hat{\sigma}_{max}$ соответствует максимальному значению при заданной плотности (левые точки зависимостей рисунка 13(а)). Функции аппроксимации: Φ_1 – для среднего размера зерна $\langle d \rangle = 160$ мкм, Φ_2 – для $\langle d \rangle = 11$ мкм, Φ_3 – аппроксимация по всем точкам без учета дисперсности.

родней. На срезе литого заряда присутствую поры бóльшего размера и значительного количества, форма пор преимущественно неправильная.

На рисунке 15(а) приведено распределение по количеству пор от диаметра d поры сферической формы эквивалентного объема. Максимальное количество пор с минимальным размером $d = 4$ мкм в литом и прессованном одинаковое, пористость и неоднородность литого заряда значительно выше. На рисунке 15(б) показаны профили электропроводности литого и прессованного зарядом. Максимум электропроводности отличается в три раза, характер профилей разный. Это объясняется разной кинетикой химических реакций, которая определяется структурой заряда.

Выводы по главе 4

Диагностика зоны химической реакции при детонации КВВ электропроводностью оказалась информативной и доказала свою состоятельность.

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 зарядов гексогена во всем диапазоне исследованных плотностей, вплоть до максимально достиг-

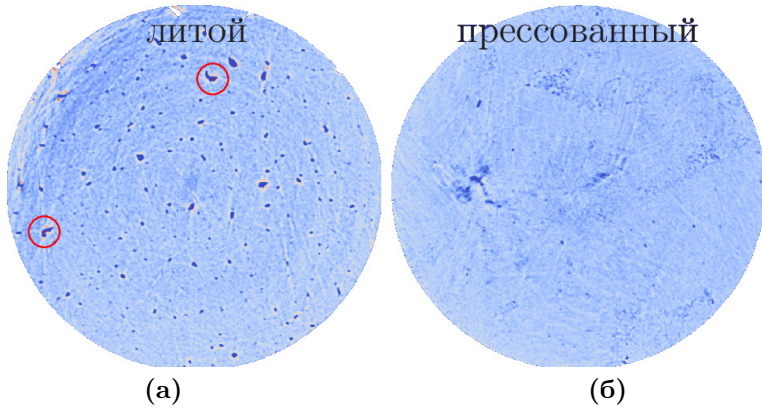


Рис. 14: Диаметр образцов 1.5 мм, (а) – литой, (б) – прессованный. В литом присутствуют поры с вогнутой внутренней поверхностью (выделено красным).

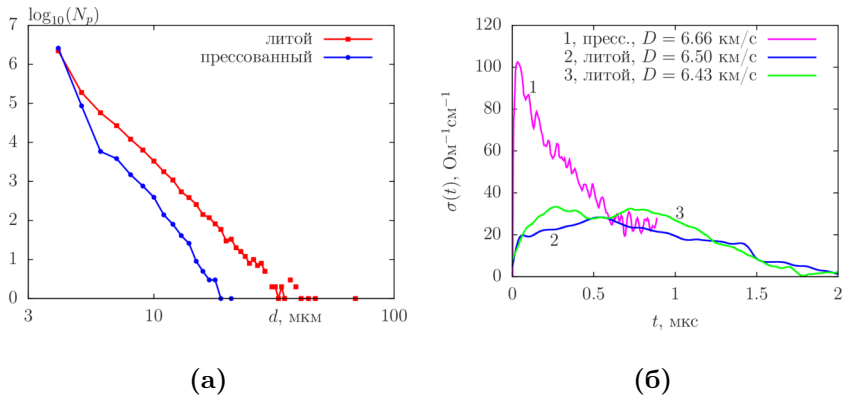


Рис. 15: (а) Результаты томографического исследования пустот в литом и прессованном зарядах, количество пор N_p от диаметра d поры сферической формы эквивалентного объема; (б) – профили электропроводности при детонации тротила с разной структурой заряда: **1** – прессованный заряд [5], **2, 3** – литой.

нутых. Это объясняется интенсификацией химической реакции вследствие роста концентрации горячих точек.

Проведено сравнение результатов экспериментального исследования длительности высокой электропроводности и результатов моделирования пяти моделей с использованием кинетики Аррениуса. В отличие от слабо

меняющейся длительности t_{σ} во всем диапазоне плотностей заряда октогена, модельная длительность химической реакции изменяется на несколько порядков. Такое резкое противоречие показывает необходимость развития альтернативной имеющимся кинетики.

Проведено томографическое исследование с разрешением 2.6 мкм на точку зарядов тротила разного способа изготовления. По количеству, объему занимаемых пор и площади внутренней поверхности пор эквивалентным диаметром около 4 мкм заряды литого и прессованного тротила не отличаются. Различие томографических данных заключается в наличии у литого заряда в значительном количестве пор с размером больше 10 мкм, их объем не превышает 10% всего занимаемого порами. Геометрия пор отличается многообразием и неправильной формой, встречаются поры с вогнутой внутренней поверхностью. В прессованном заряде поры более компактные, максимальный размер около 20 мкм, в литом 70 мкм. Полученная из томографических данных пористость близка к измеренной напрямую.

В рамках теории горячих точек в качестве зародышей ГТ выступают поры, то есть ожидаемая кинетика при детонации литого заряда должна быть более динамичной, а чувствительность выше, чем для прессованного. Это противоречит экспериментальным данным по критическому диаметру, ударно-волновой чувствительности, результатам исследования кинетики [28, 29] и данным по электропроводности, во всех перечисленных случаях прессованный заряд обладает большей чувствительностью и динамикой, чем литой. Следовательно, экспериментальное исследование структуры и несоответствие с результатами разных методик также показывает необходимость разработки новой кинетики.

За отличие чувствительности литого от прессованного отвечают не поры, которых в литом заряде больше, а межзеренные и межкристаллические границы, которые содержат молекулы вещества в другом, по отношению к внутренним молекулам, энергетическом состоянии.

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 выведения из равновесия метастабильной молекулы ВВ.

Формирование сквозных проводящих структур из углерода происходит в зоне реакции 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 сохраненных продуктах детонации является остатком после химических и физических процессов со структурой, образованной в химике.

Основные результаты четвертой главы опубликованы в работах [7]^a, [16]^a, [23]^a, [27]^a, [28]^a.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ✧ Разработана и реализована экспериментальная схема измерения электропроводности высокого пространственного разрешения, пригодная для исследования электрических свойств конденсированных взрывчатых веществ в процессе детонации. Численный эксперимент показал, что разрешение методики растет с уменьшением толщины диэлектрика. Рассмотрены ограничения методики, определены оптимальные условия эксперимента, объяснены некоторые наблюдаемые эффекты. Моделирование отклика экспериментальной ячейки доказало, что разрешение метода составляет четверть ширины диэлектрика.
- ✧ Получен широкий спектр экспериментальных данных по электропроводности для тротила, гексогена, октогена, тэна, бензотрифуроксана, ВВ на основе триаминотринитробензола, гексанитростильбена, СL-20, эмульсионных ВВ при разных начальных условиях. Характерным для большинства исследованных веществ является резко неоднородный профиль электропроводности, содержащий область высоких и низких значений. Для всех исследованных индивидуальных ВВ прослеживается тенденция увеличения максимального значения σ_{max} с плотностью. Для составного вещества – эмульсионного ВВ – с минимальным среди исследованных веществ содержанием углерода получены наименьшие значения электропроводности.
- ✧ Основываясь на экспериментальных данных, проведено всестороннее исследование, содержащее изучение сохраненных продуктов детонации, анализ корреляции значения электропроводности и термодинамических параметров, состава продуктов в точке Чепмена–Жуге и элементов исходного ВВ. Методом сравнительного анализа показано, что зона химической реакции коррелирует с областью высокой электропроводности, максимум профиля электропроводности достигается внутри зоны реакции. Показано, что однообразная корреляция величины электропроводности наблюдается только с углеродом, причем максимум тем больше, чем выше содержание углерода в молекуле ВВ. Точка перегиба на профиле $\sigma(t)$ ассоциирована с точкой Чепмена–Жуге, что подтверждается увеличением значения σ_{CJ} с массовой долей углерода, полученного с помощью модифицированного уравнения БКВ [19]. Исследование сохраненных продуктов детонации богатых углеродом веществ методом просвечивающей электронной микроскопии показало наличие протяженных углеродных

структур в проводящей графитоподобной модификации. Эти структуры сформировались в области химпика и обеспечили контактную электропроводность, наблюдаемую в эксперименте.

Показано, что хемоионизация, ионный механизм проводимости, полупроводниковый в условиях высокого давления, термоэмиссия электронов с углеродных частиц и термоионизация вследствие высокой температуры не могут удовлетворительно объяснить экспериментальные данные по электропроводности. Корреляция величины электропроводности наблюдается с содержанием углерода, причем высокие значения могут быть объяснены только в рамках контактной проводимости.

- ✧ Сформулирована модель электропроводности при детонации твердых взрывчатых веществ вида $C_aH_bN_cO_d$, согласно которой в детонационном фронте начинается формирование протяженных углеродных структур, максимум электропроводности достигается за фронтом на некотором удалении, время достижения максимума для всех ВВ, за исключением высокоплотного бензотрифуроксана, составляет порядка 10 нс, проводимость осуществляется по сквозным углеродным структурам. Далее в зоне реакции осуществляются окислительные реакции с атомами углерода, находящимися на поверхности углеродных "сеток", вследствие чего проводящая структура истончается и частично разрушается, электропроводность падает. Настоящая модель объясняет все наблюдаемые экспериментальные данные и находится в согласии с данными разных методик.
- ✧ Разработанная модель электропроводности позволяет диагностировать кинетику химических реакций в области химпика при детонации конденсированных ВВ, что дало возможность изучить некоторые закономерности влияния дисперсности исходного вещества на ширину зоны реакции при детонации зарядов как насыпной плотности, так и высокоплотных. При детонации зарядов тротила близкой плотности разного способа изготовления амплитуда электропроводности отличается в три раза, что отражает разную динамику кинетики и подтверждается литературными источниками. Показаны имеющиеся на сегодняшний день противоречия между зависимостью длительности зоны реакции при разных термодинамических параметрах и начальных условиях и модельными зависимостями, основанными на кинетике Аррениуса. Предложено феноменологическое описание механизма запуска химической реакции при детонации конденсированных ВВ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих статьях

- [1] ^a Ершов, А.П., Сатонкина, Н.П., Дибиров, О.А., Цыкин, С.В., Янилкин, Ю.В. Исследование взаимодействия компонентов гетерогенных взрывчатых веществ методом электропроводности // *Физика горения и взрыва*. – 2000. – Т. 36, N 5. – С. 97–108.
- [2] ^a Ершов, А.П., Сатонкина, Н.П., Иванов, Г.М. Распределение электропроводности при детонации прессованного взрывчатого вещества // *Письма в Журнал технической физики*. – 2004. – Т. 30, N 24. – С. 63–69.
- [3] ^a Ershov, A.P., Satonkina, N.P., Ivanov, G.M. Reaction zones and conductive zones in dense explosives // In Proc. of 13th International Detonation Symposium. ONR 351-07-01. Norfolk, VA, 2006. Office of Naval Research, Arlington, VA. P. 79–88.
- [4] ^a Ершов, А.П., Сатонкина, Н.П., Иванов, Г.М. Профили электропроводности в плотных взрывчатых веществах // *Химическая физика*. 2007. – Т. 26, N 12. – С. 21–33.
- [5] ^a Ершов, А.П., Сатонкина, Н.П. Исследование зон реакции в неоднородных взрывчатых веществах методом электропроводности // *Физика горения и взрыва*. – 2009. – Т. 45, N 2. – С. 109–115.
- [6] ^a Satonkina, N.P., Safonov, A.A. Electrical properties of trotyl detonation products // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2009. – V. 18, N 2. – P. 177–181.
- [7] ^a Ershov, A.P., Satonkina, N.P. Electrical conductivity distributions in detonating low-density explosives – Grain size effect // *Combustion and Flame*. – 2010. – V. 157, N 5. – P. 1022–1026.
- [8] ^a Ershov, A.P., Satonkina, N.P. Electrical conductivity profiles in detonating low-density explosives of various grain sizes // In Proc. of 14th International Detonation Symposium. ONR 351-10-185. Coeur d'Alene, ID, 2010. Office of Naval Research, Arlington, VA. – P. 302–305.
- [9] ^a Satonkina, N.P., Pruel, E.R., Ershov, A.P., Karpov, D.I., Sil'vestrov, V.V., Plastinin, A.V., Savrovskii, P.A. Electrical conduction of emulsion explosives // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2011. – V. 20, N 3. – P. 315–319.
- [10] ^a Satonkina, N.P., Ershov, A.P., Pruel, E.R., Karpov, D.I. Electric conductivity of detonating trotyl at different initial conditions // Proc. XXIX International Conference Physics of Extreme States of Matter. 2014.

- [11] ^a Satonkina, N.P., Pruel, E.R., Karpov, D.I. Formation of carbon nets in detonation products of high explosives // Proc. XV International Detonation Symposium. 2014.
- [12] ^a Сатонкина, Н.П., Пруэл, Э.Р., Ершов, А.П., Сильвестров, В.В., Карпов, Д.И., Пластинин, А.В. Эволюция электропроводности эмульсионных взрывчатых веществ при их детонационном превращении // *Физика горения и взрыва*. – 2015. – Т. 51, N 3. – С. 91–97.
- [13] ^a Satonkina N.P. The dynamics of carbon nanostructures at detonation of condensed high explosives, *Journal of Applied Physics*. – 2015. – V. 118. – P. 245901.
- [14] ^a Сатонкина, Н.П., Рубцов, И.А. Распределение электропроводности при детонации взрывчатого вещества на основе ТАТБ // *Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 86, N 1. – С. 144–147.
- [15] ^a Сатонкина, Н.П. Связь электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ с содержанием в них углерода // *Физика горения и взрыва*. – 2016. – Т. 52, N 4. – С. 129–134.
- [16] ^a Ershov, A.P., Kashkarov, A.O., Pruel, E.R., Satonkina, N.P., Sil'vestrov, V.V., Yunoshev, A.S., Plastinin, A.V. Nonideal detonation regimes in low density explosives // *Journal of Applied Physics*. – 2016. – V. 119, N 7. – P. 075903.
- [17] ^a Satonkina, N. P. and Medvedev, D. A. On the mechanism of carbon nanostructures formation at reaction of organic compounds at high pressure and temperature // *AIP Advances*. – 2017. – V. 7, N 8. – P. 085101.
- [18] ^a Satonkina. N.P. Duration of the zone of high electrical conductivity at the detonation of RDX of different densities // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – V. 894. – P. 012136.
- [19] ^a Satonkina, N.P. Chemical composition of detonation products of condensed explosives and its relationship to electrical conductivity // *Journal of Physics: Conference series*. 2017. V. 946. P. 012059.
- [20] ^a Satonkina, N.P., Bordzilovsky, S.A., Danilko, D.A., Ershov, A.P., Karakhanov, S.M., Plastinin, A.V., Rafeichik, S.I., Yunoshev, A.S. Influence of aluminum on the characteristics of detonating emulsion explosives // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 1128. – P. 012063.
- [21] ^a Satonkina, N.P., Ershov, A.P., Kashkarov, A.O., Mikhaylov, A.L., Pruel, E.R., Rubtsov, I.A., Spirin, I.A., Titova, V.B. Electrical conductivity distribution in detonating benzotrifuroxane // *Scientific Reports*. – 2018. – V. 8. – P. 9635.

- [22] ^a Satonkina, N.P., Ershov, A.P., Plastinin, A.V., Yunoshev, A.S. Chemical reaction zone and electrical conductivity profile in detonating high explosives // *Combustion and Flame*. – 2019. – V. 206. – P. 249–251.
- [23] ^a Satonkina, N.P. Influence of the grain size of high explosives on the duration of a high conductivity zone at the detonation // *Scientific Reports*. – 2019. – V. 9. – P. 12256.
- [24] ^a Satonkina, N.P., Ershov, A.P. Kashkarov, A.O., Rubtsov, I.A. Elongated conductive structures in detonation soot of high explosives // *RSC Advances*. – 2020. – V. 10, N 30. – P. 17620–17626.
- [25] ^a Ершов, А.П., Сатонкина, Н.П., Пластинин, А.В., Юношев, А.С. О диагностике зоны химической реакции при детонации твердых взрывчатых веществ // *Физика горения и взрыва*. – 2020. – Т. 56, N 6. – С. 95–106.
- [26] ^a Satonkina, N.P., Ershov, A.P. Dynamics of carbon nanostructures in the benzotrifuroxan detonation // *Journal of Physics: Conference Series*.. – 2021. – V. 1787. – P. 012015.
- [27] ^a Satonkina, N.P., Medvedev, D.A. On the kinetics of chemical reactions at the detonation of organic high explosives // *Physics of Fluids*. – 2022. – V. 34, N 8. – P. 08711.
- [28] ^a Satonkina, N.P., Kuper, K.E., Ershov, A.P., Pruel, E.R., Yunoshev, A.S., Lukyanov, Ya.L., Gusachenko, D.V., Khorungenko, A.S., Kuzminykh, A.A. Tomographic study of the structure of cast and pressed trotyl charges // *Results in Engineering*. – 2022. – V. 16. – P. 100621.

Цитируемая литература

- [1] Зельдович, Я.Б. К теории распространения детонации в газообразных системах // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 1940. – Т. 10, N 5. – С. 542–568.
- [2] von Neumann, J. Theory of detonation waves // In John von Neumann, *Collected Works*. Taub A.J. (Ed). V. 6 of Shock Wave Science and Technology Reference Library, Pergamon Press, 1963. N.Y., P. 203–218.
- [3] Döring W. Über den Detonationsvorgang in Gasen [About the detonation process in gases] // *Annalen der Physik*. – 1943. – V. 43, N 6-7. – P. 421–436.

- [4] Пат. РФ N RU 2247923. Взрывная логическая схема / Орликов, Ю.П., Герман, В.Н., Александрова, С.А., Денденков Ю.П., Фисенко А.К. – М., 2006.
- [5] Пат. РФ N RU 2527241 Способ разрушения интегральных схем памяти носителя информации / Орликов, Ю. П., Денденков, Ю. П., Дреннов, О. Б. – М., Изобретение N 2013125512, опубл. 31.05.2013 г.
- [6] Пат. РФ N RU 2202384. Устройство для волнового воздействия на биологические объекты / Орликов, Ю.П., Фисенко А.К., Герман, В.Н., Фомичева, Л.В., Денденков, Ю.П. – М., 2003, опубл. 20.04.2003.
- [7] Бриш, А.А., Тарасов, М.С., Цукерман, В.А. Электропроводность продуктов взрыва конденсированных взрывчатых веществ // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 1959. – Т. 37, N 6(12). – С. 1543–1549.
- [8] Cook, M.A. The science of high explosives / Reinhold Publ., N.Y., 1959. – P. 143–171.
- [9] Hayes, B. On the electrical conductivity in detonation products // *Proc. 4th Symposium (Internat.) on Detonation*. White Oak, MD, 1965. Washington: Office of Naval Research, ACR-126. – 1967. – P. 595–601.
- [10] Зубков, П.И., Лукьянчиков, Л.А., Новоселов, Б.С. Электропроводимость в зоне детонации конденсированных ВВ // *Физика горения и взрыва*. – 1971. – Т. 7, N 2. – С. 295–299.
- [11] Ершов, А.П., Зубков, П.И., Лукьянчиков, Л.А. Об измерениях профиля электропроводности во фронте детонации конденсированных ВВ // *Физика горения и взрыва*. – 1974. – Т. 10, N 6. – С. 864–873.
- [12] Антипенко, А.Г., Дремин, А.Н., Якушев, В.В. О зоне электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ // *Доклады АН СССР*. – 1975. – Т. 225, N 5. – С. 1086–1088.
- [13] Yakushev, V.V. Electrical conductivity of shock-compressed liquid dielectric and weak electrolytes // *Report at Intern. AIRAPT Conference on High Pressure Science and Technology*. Honolulu, Hawaii, USA. – 1999.
- [14] Зубков, П.И., Лукьянчиков, Л.А. Электропроводность продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ / Труды международного семинара "Гидродинамика высоких плотностей энергии" 11–15 августа 2003 г., Новосибирск, с. 112–131.

- [15] Дремин, А.Н., Савров, С.Д., Трофимов, В.С., Шведов, К.К. Детонационные волны в конденсированных средах / Изд-во Наука, Москва. 1970. 164 с.
- [16] Лобойко, Б.Г., Любятинский, С.Н. Зоны реакции детонирующих взрывчатых веществ // *Физика горения и взрыва*. – 2000. – Т. 36, N 6. – С. 45–64.
- [17] Федоров, А.В., Меньших, А.В., Ягодин, Н.Б. Структура детонационного фронта в гетерогенных ВВ // *Химическая физика*. – 1999. – Т. 18, N 11. – С. 64–68.
- [18] Уткин, А.В., Колесников, С.А., Першин, С.В. Влияние начальной плотности на структуру детонационных волн в гетерогенных взрывчатых веществах // *Физика горения и взрыва*. – 2002. – Т. 38, N 5. – С. 111–118.
- [19] Tanaka, K. Detonation Properties of Condensed Explosives Computed Using the Kihara-Hikita-Tanaka Equation of State. Technical report. National Chemical Laboratory for Industry, Tsukuba Research Center, Tsukuba, Japan, 1983. 304 p.
- [20] Сильвестров, В.В., Пластинин, А.В. Исследование низкоскоростных эмульсионных взрывчатых веществ // *Физика горения и взрыва*. – 2009. – Т. 45, N 5. – С. 124–133.
- [21] Елецкий, А.В., Книжник, А.А., Потапкин, Б.В., Кенни, Х.М. Электрические характеристики полимерных композиций, содержащих углеродные нанотрубки // *Успехи физических наук*. – 2015. – Т. 185, N 3. – С. 225–270.
- [22] Ершов, а.П., Дашапилов, Г.Р., Карпов, Д.И., Кашкаров, А.О., Лукьянов, Я.Л., Прууэл, Э.Р., Рубцов, И.А. Детонация взрывчатого вещества, содержащего наноразмерные включения // *Физика горения и взрыва*. – 2020. – Т. 57, N 1. – С. 112–119.
- [23] Henson, B.F., Asay, B.W., Smilowitz, L.B., Dickson, P.M. Ignition chemistry in HMX from thermal explosion to detonation / *Proceedings of the 13th International Detonation Symposium*. – 2002. – V. 620. – P. 1069–1072.
- [24] Menikoff, R. Detonation waves in PBX 9501 // *Combustion Theory and Modelling*. – 2006. – V. 10. – P. 1003–1021.
- [25] Tarver, C.M., Chidester, S.K., Nichols III, A.L. Critical conditions for impact- and shock-induced hot spots in solid explosives // *Journal of Physical Chemistry*. – 1996. – V. 100. – P. 5794–5799.

- [26] Henson, B.F., Smilowitz, L., Romero, J.J. Asay, B.W. Modeling thermal ignition and the initial conditions for internal burning in PBX 9501 // *AIP Conference Proceedings*. – 2009. – V. 1195. P. 257–262.
- [27] Rai, N.K., Sen, O., Udaykumar, H.S. Macro-scale sensitivity through meso-scale hotspot dynamics in porous energetic materials: Comparing the shock response of 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene (TATB) and 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraoxtane (HMX) // *Journal of Applied Physics*. – 2020. – V. 128(8). – P. 085903.
- [28] Канель, Г.И. Кинетика разложения литого тротила в ударных волнах // *Физика горения и взрыва*. – 1978. – Т. 14, N 1. – С. 113–117.
- [29] Балинец, Ю.М., Дремин, А.Н., Канель, Г.И. О кинетике разложения прессованного тротила за фронтом ударной волны // *Физика горения и взрыва*. – 1978. – Т. 14, N 3. – С. 111–116.

САТОНКИНА Наталья Петровна

Физическая модель электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ вида $C_aH_bN_cO_d$

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Подписано в печать 16 мая 2023 г.
Формат бумаги 60x84 1/16
Тираж 100 экз.

Заказ № 321
Объем 2.0 п.л.
Бесплатно

Ротапринт Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева 15