

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГУП Всероссийский
научно-исследовательский институт
автоматики им. Н.Л. Духова
доктор экономических наук
Лопарев Сергей Юрьевич



«22» августа 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова» на диссертационную работу Рапота Даниила Юрьевича на тему «Экспериментальное исследование инициирования и эволюции неустойчивости детонации жидких взрывчатых веществ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

Актуальность темы диссертации

Жидкие взрывчатые вещества (ВВ) обладают рядом уникальных свойств, сочетающих в себе простоту, универсальность в применении и высокие детонационные параметры. Однако существует ряд открытых вопросов, связанных с влиянием кинетики химических реакций на структуру и устойчивость детонационных волн (ДВ) в них. Существует несколько возможных сценариев потери устойчивости одномерного течения ДВ, среди них можно выделить: возникновение неустойчивости на границе заряда (называемые волнами срыва реакции) и потеря устойчивости, реализующаяся вдоль оси заряда при отсутствии влияния границ (ячеистые неоднородности). Ввиду возможности варьировать детонационные параметры путём создания смесей жидких ВВ с недетонирующими добавками, становится актуальным исследование влияния добавок на процесс инициирования детонации и дальнейшее развитие фронта в полученной смеси. Такое исследование способно расширить представления о процессах, протекающих в зоне реакции ДВ. Как следствие, исследование актуально для создания передовых математических моделей процессов инициирования и развития детонации, в частности, поиска наиболее оптимальных составов ракетных топлив и улучшения качества взрывных экспериментов.

Таким образом, диссертационная работа Рапота Д.Ю. посвящена актуальной задаче: исследование влияния недетонирующих добавок на структуру детонационных волн в жидких взрывчатых веществах.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа Рапота Даниила Юрьевича выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки, Федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН).

Представленная работа изложена на **130** страницах, содержит 58 рисунков и 2 таблицы. Состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Список литературы насчитывает 82 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены новизна результатов и их теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о методологии работы, обоснован выбор объектов исследования, сформулированы основные положения.

В **первой главе** приведен анализ литературы об исследованиях детонационных процессов в жидких ВВ. Рассмотрены классические работы и принятые на их основе теории. Также рассмотрены результаты современных исследований для ряда жидких взрывчатых веществ. Рассмотрены механизмы реакций и их барьеры на основе атомистического моделирования, приведен анализ литературы о влиянии переноса водорода, катализаторов данной реакции. Приведен обзор литературы по влиянию на структуру детонационного фронта в жидких ВВ с качественными объяснениями наблюдаемой ячеистой неустойчивости в нитрометане.

Во **второй главе** описаны методы исследования. Приведены технические характеристики используемого оборудования. Описаны: электроконтактный датчик, сверхскоростной фоторегистратор, сверхскоростная камера НАНОГЕЙТ-22/16, многоточечный лазерный интерферометр. В конце главы приводятся схемы постановки экспериментов и характеристики экспериментальныхборок для исследования свечения детонационных волн в жидких ВВ и записи эволюции их амплитудных показателей.

В **третьей главе** изложены результаты проведенных соискателем экспериментов. Всего в главе 4 раздела: первые 3 посвящены исследованию разных типов неустойчивости в жидких ВВ, в четвертом обобщены и подробно изложены результаты экспериментов, сделаны отдельные выводы на их основе. В общей сложности автором исследовано более 10 уникальных смесей жидких ВВ с недетонирующими добавками и 2 жидких взрывчатых

вещества в чистом виде. Приведены уникальные фоторазвертки и кадры свечения детонационного фронта на разных этапах его развития в жидких ВВ. Получено 25 графиков зависимости массовой скорости от времени. В этой же главе Рапота Даниилом Юрьевичем предложена и описана уникальная методика обработки результатов экспериментов для сопоставления щелевых фоторазверток с покадровой фотосъемкой.

В **заключении** подведены итоги проделанной работы и тезисно сформулированы основные выводы.

Оценка новизны полученных результатов

В диссертационной работе соискателем получены новые результаты, наиболее значимые из которых:

- Обнаружен очаговый характер инициирования жидких ВВ на основе тетранитрометана и ФИФО. Описаны особенности этого процесса для каждого состава смеси. На основе профилей зависимости массовой скорости от времени проведено сравнение динамики развития детонационной волны при ударно-волновом инициировании смеси тетранитрометана с нитробензолом и чистого нитрометана с классической одномерной схемой ударно-волнового инициирования жидких ВВ. Описана применимость этой модели по отношению к исследованным веществам. Зафиксированы возникновение и рост области преднагрева в период между входом ударной волны в вещество и вспышкой очагов в чистом тетранитрометане и ФИФО.
- На основе смесей тетранитрометана с недетонирующими добавками показано, что волны срыва реакции возникают не по всему периметру заряда, а в отдельных точках вдоль краев и развиваются ассиметрично. Описанная динамика возникновения и развития не соответствует теоретическим представлениям об этом процессе.
- Показано влияние оболочки заряда на структуру фронта в смеси ФИФО с метанолом вблизи критического диаметра заряда и предельных концентраций метанола.
- Впервые показано существование различных типов ячеистой неустойчивости в жидких взрывчатых веществах и их смесях с недетонирующими добавками. Описана динамика развития этих неустойчивостей и проведено ее сравнение с классической схемой. Установлено, что неустойчивость детонационного фронта проявляется в виде более сложных течений, зачастую не образуя при этом отдельных ячеек на поверхности фронта.
- Предложена и описана уникальная методика обработки результатов экспериментов для сопоставления щелевых фоторазверток с покадровой фотосъемкой. На примере отдельных смесей показана ее применимость. При этом обнаружено, что влияние оболочки заряда на структуру фронта в отдельных случаях способно приводить к

ошибочной интерпретации результатов, получаемых при помощи сверхскоростного фоторегистратора.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и заключений соискателя, сформулированных в диссертации

Достоверность результатов гарантируется применением высокоточного сертифицированного оборудования, отработанностью методик постановки экспериментов и обоснованным использованием современных методов исследования. Экспериментальные результаты воспроизводимы и согласуются между собой, что показано в работе в ходе использования предложенной автором методики. Сопоставления результатов с имеющимися в научной литературе данными согласованы с результатами диссертации.

Результаты диссертации представлены в 4-х статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, входящих в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science. Результаты докладывались на Всероссийских и международных конференциях и симпозиумах.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Практическая и теоретическая значимость результатов работы и рекомендации по ее использованию

Результаты, полученные в диссертационной работе Рапота Д.Ю., позволяют глубже понять фундаментальные механизмы распространения детонационной волны в жидкой среде, а именно влияние различных факторов (например, состава жидких ВВ, размера заряда, давления) на характеристики детонационного фронта. Эти знания могут быть использованы для уточнения существующих моделей и разработки новых теорий, описывающих поведение жидких взрывчатых веществ при детонации. В дальнейшем эти теории могут быть интегрированы в расчетные модели, которые описывают поведение различных смесей на основе исследованных жидких ВВ при их ударно-волновом нагружении, например, в следующих организациях: РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ, ИПМ им. М.В.Келдыша, ФГУП ВНИИА им Н.Л. Духова, ФИЦ ХФ РАН.

Практическая значимость исследования заключается в улучшении методов предсказания и управления процессами детонации в различных областях, таких как экспериментальная физика высоких давлений, космическая индустрия, горная и оборонная промышленности. Углубленное понимание характеристик детонационного фронта позволяет оптимизировать составы взрывчатых смесей, повышая их эффективность и снижая риск непредсказуемых или нежелательных последствий. Более

того, результаты исследования могут способствовать разработке более безопасных и эффективных методов инициирования детонации, а также совершенствованию технологии создания и использования жидких ВВ в промышленных масштабах. А предложенная и апробированная автором методика сопоставления результатов экспериментов, полученных с использованием сверхскоростного фоторегистратора в режиме щелевой развёртки и сверхскоростной камеры НАНОГЕЙТ-22/16, способна существенно упростить анализ и интерпретацию результатов, получаемых с их помощью.

Общие замечания

К диссертации Рапота Даниила Юрьевича имеется ряд замечаний и вопросов дискуссионного характера, на которые стоит обратить внимание:

1. В диссертации автором сделан акцент на гомогенности исследуемых жидких ВВ и их смесей с недетонирующими добавками, при этом отсутствуют сведения о количестве растворенного в них газа и проведении предварительной дегазации образцов перед проведением экспериментов.
2. Исходя из замечания выше, возникает закономерный вопрос. Могли ли присутствующие в веществах пузыри растворенного газа приводить к возникновению наблюдаемых очагов и иных типов неустойчивостей?
3. При обсуждении результатов экспериментов по исследованию волн срыва реакции автором не упоминается влияние шероховатости внутренней поверхности труб и присутствие на ней возможных загрязнений на возможность возникновения наблюдаемых картин и на динамику их развития.
4. В диссертации встречаются опечатки, стилистические ошибки и иные погрешности:
 - 1) В начале работы (стр. 5-6) автором вводятся сокращения жидких ВВ и инертных разбавителей, метанол сокращается до «М», далее работе несколько раз встречается сокращение этой добавки в виде «МЕ», а именно: на рисунке 48 (ФИФО/МЕ 70/30), и 2 раза в выводах на (стр. 123 п.7);
 - 2) В подписях к рисункам 45-46 отсутствуют пояснения к стрелкам, а в тексте эти пояснения несколько хаотичны.
 - 3) В подписи к рисунку 16 «детонационная адиабата максимального тепловыделения» употреблена во множественном числе.

Указанные замечания не оказывают существенного влияния на общее положительное впечатление и не снижают достоинств исследования. Все поставленные в диссертационной работе цели достигнуты и соответствуют положениям выносимым на защиту.

Диссертация Рапота Д.Ю. соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, и «Изменений, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №355 от 21 апреля 2016 г. Диссертация Рапота Д.Ю. является законченной научно-исследовательской работой в области детонации жидких взрывчатых веществ и соответствует требованиям ВАК к диссертациям, предъявляемым на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор диссертации Рапота Даниил Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

Настоящий отзыв и диссертационная работа Рапота Даниила Юрьевича обсуждены и одобрены на заседании НТС ЦФПИ, протокол №25.

«21» августа 2024 г.

Отзыв подготовлен:

к.ф-м.н. (специальность 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния»),
начальник отдела ФГУП «ВНИИА»

 Янилкин Алексей Витальевич

к.ф-м.н. (специальность 01.04.17 - «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»),
старший научный сотрудник ФГУП «ВНИИА»

 Мурзов Семен Александрович

Подписи Янилкина А.В. и Мурзова С.А. заверяю

Ученый секретарь НТС ФГУП «ВНИИА»

к.т.н.



Феоктистова Любовь Валерьевна

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»

Адрес: 127055, г.Москва, ул. Суцневская, д. 22

Телефон: +7(499) 978-78-03

E-mail: vniia@vniia.ru