

На правах рукописи



Работа Даниил Юрьевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ИНИЦИИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
ДЕТОНАЦИИ ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Черноголовка – 2024

Работа выполнена в ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Сосиков Василий Александрович

Официальные оппоненты: **Сатонкина Наталья Петровна**
доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, ведущий научный сотрудник

Комиссаров Павел Владимирович
кандидат физико-математических наук, ФГБУН Федеральный исследовательский центр “Институт химической физики имени академика Н.Н. Семёнова” Российской академии наук, Москва, заведующий лабораторией

Ведущая организация: ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова.

Защита состоится «19» сентября 2024 г. в 10 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.108.02 при ФИЦ ПХФ и МХ РАН по адресу: КОН, проспект Академика Семёнова, д. 1, г. Черноголовка, Московская обл., 142432.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИЦ ПХФ и МХ РАН по адресу: 142432, Московская область, г. Черноголовка, проспект Академика Семёнова д.1; и на сайте ФИЦ ПХФ и МХ РАН: https://icp-ras.ru/wp-content/uploads/DISS/Rapota/Diss_Rapota.pdf

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор химических наук



Е.В. Золотухина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Жидкие взрывчатые вещества (ВВ) являются хорошими модельными объектами для исследования процессов детонации и весьма перспективным ресурсом для использования в: промышленности (смеси на основе нитрометана [1]); детонационных двигателях (смеси на основе нитрометана [2]); ракетных топливах (бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль [3]); военных разработках; взрывных экспериментах (нитрометан, тетранитрометан, бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль и др.). Такой широкий спектр применимости достигается благодаря ряду особенностей, присущих этой разновидности ВВ. А именно: возможность варьировать детонационные параметры в широком диапазоне путём добавления инертных разбавителей; способность равномерного распределения по объёму сложной формы, что в свою очередь делает их лучшими кандидатами для использования в нестандартных условиях; высокую степень гомогенности и обладание детонационными параметрами, сопоставимыми с твёрдыми ВВ.

Однако существует ряд особенностей, понимание природы которых необходимо для реализации потенциала этой разновидности ВВ. К таковым можно отнести существование неустойчивости детонационного фронта на разных этапах его развития. Её принято разделять на три основных типа: неустойчивость инициирования детонационных волн в гомогенных ВВ, ячеистую неустойчивость детонационного фронта и образование волн срыва реакции на краю заряда. Все эти явления могут по-разному влиять на характер течений в детонационных волнах и на макрокинетику химических реакций приводя к возникновению уникальных картин на фронте.

Степень разработанности темы

Одни из первых экспериментальных исследований детонационных волн в жидких ВВ были проведены Дрёминым А.Н. с соавторами [4]. Ими, в частности, высказано предположение, что в жидких ВВ, как и в газах, в результате потери устойчивости формируется сложная трёхмерная структура фронта, одной из

особенностей которой является возникновение косых и поперечных детонационных волн, в которых температура должна быть выше ударно-сжатого не реагирующего ВВ, что должно проявляться на свечении фронта. Именно эта структура и приводит к образованию регистрируемых в дальнейшем ячеистых структур. На основе этих работ также была построена теория возникновения и развития волн срыва реакции на краю заряда, которые определяют критический диаметр гомогенных ВВ. Детальных исследований касательно очагового характера инициирования при ударно-волновом воздействии ранее не проводилось. Из современных авторов можно выделить исследования с применением интерферометрической методики, проведенные Уткиным А.В. с коллегами [5–9]. С появлением новейших типов фоторегистрирующего оборудования стало возможным не только по-новому взглянуть на уже полученные результаты, но и установить их соответствие как между собой, так и с разработанными на их основе теориями.

Цель работы:

Исследовать особенности проявления неустойчивых режимов инициирования и развития детонации в жидких ВВ на основе тетранитрометана (ТНМ), нитрометана (НМ) и бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формала (ФИФО) при помощи методик сверхскоростной фоторегистрации и лазерной интерферометрии.

Задачи:

1. Исследовать особенности проявления неустойчивости ударно-волнового инициирования детонации в гомогенных смесях жидких ВВ с инертными разбавителями при разной концентрации последних.
2. Исследовать особенности проявления волн срыва реакции на краю заряда в гомогенных смесях жидких ВВ в зависимости от концентрации инертных разбавителей.
3. Исследовать особенности проявления ячеистой структуры фронта, возникающей при потере устойчивости детонационных волн в гомогенных смесях жидких ВВ с различной концентрацией инертных разбавителей.
4. Сопоставить результаты, полученные при помощи различных методик, для каждой серии экспериментов.

5. Сопоставить полученные результаты с существующими теоретическими представлениями.

Выбор объектов исследования

При выборе жидких ВВ и инертных разбавителей к ним, учитывались следующие факторы:

- взаимная растворимость в произвольном соотношении;
- химическая устойчивость компонентов смесей (ВВ/разбавитель) по отношению друг к другу;
- стабильность получаемых растворов (неизменность свойств в течение продолжительного промежутка времени);
- технологическая доступность компонентов в достаточном для проведения экспериментов количествах.

Исходя из описанных факторов в перечень исследуемых образцов вошли следующие жидкие взрывчатые вещества: ТНМ, НМ, ФИФО; в качестве инертных разбавителей выступали: нитробензол (НБ), метанол (М), ацетон (Ац).

Методология и методы диссертационного исследования

В ходе работы применялись такие методы исследования детонационного фронта как: сверхскоростная фоторегистрация в режиме щелевой развёртки (СФР), запись волновых профилей многоточечным лазерным интерферометром VISAR с наносекундным временным разрешением, а также покадровая съёмка процессов детонации сверхскоростной камерой НАНОГЕЙТ 22/16, подробные характеристики которой указаны далее в работе. Для синхронизации момента подрыва и начала съёмки, применялись электроконтактные датчики. Экспериментальные сборки конструировались на основе классической схемы постановки эксперимента по исследованию жидких ВВ.

Научная новизна

Впервые получены снимки детонационного фронта с высоким пространственным и временным разрешением для ряда жидких ВВ и их смесей с инертными разбавителями. В частности, показана

динамика эволюции детонационных волн на различных этапах их развития.

Показано влияние инертных добавок на характер инициирования жидких ВВ. Обнаружены неклассические режимы возникновения и развития детонационного фронта, описания которых не встречается в литературных данных.

Показана необычная динамика влияния краевых эффектов вблизи критических концентраций разбавителей на поверхность детонационного фронта. И их взаимодействие с присутствующими в нём ячеистыми неоднородностями.

Обнаружены различные типы ячеистых структур детонационного фронта в жидких ВВ и их смесях с разбавителями. Исследована динамика их развития.

Проведено комплексное исследование детонационных волн в жидких ВВ с использованием различного регистрирующего оборудования. И впервые выполнено сопоставление данных, полученных при помощи различных методик.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные снимки детонационного фронта жидких ВВ и проведённый в ходе работы анализ дают возможность выделить существенные, ранее не наблюдавшиеся, особенности и отличия в поведении исследованных образцов. В том числе позволяют по-новому взглянуть на процессы, протекающие на разных этапах развития детонации в них. Что, в свою очередь, может стать толчком к дальнейшему развитию теории детонации.

Помимо сугубо научного приложения, результаты исследований представляют практический интерес в сферах, где востребовано применение различных типов ВВ. В частности, для изучения поведения материалов при сверхвысоких нагрузках, проектировании новейших типов детонационных двигателей и в горнодобывающей промышленности.

Положения, выносимые на защиту

1. Очаговый характер инициирования гомогенных жидких ВВ в смесях с инертными разбавителями и влияние очагов на поле скоростей в области их возникновения и слияния.

2. Обнаружение условий и регистрация проявления неклассических режимов развития волн срыва реакции в смесях жидких ВВ с инертными разбавителями.
3. Проявление и эволюция различных типов ячеистой структуры детонационного фронта в смесях жидких ВВ с инертными разбавителями и их влияние на поле скоростей.
4. Метод сопоставления результатов, полученных при помощи методик сверхскоростной фоторегистрации и сверхскоростной фотосъёмки.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в теоретическом анализе литературы по теме диссертации; выполнении части экспериментальной работы, не касающейся личного контакта со взрывчатыми веществами; обработке, анализе и интерпретации данных, полученных при помощи фотометодик; формулировке выводов; подготовке докладов на конференции и участии в оформлении статей.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивается: стабильной воспроизводимостью экспериментальных данных, согласованностью и непротиворечивостью результатов, полученных с помощью различных современных методов анализа, соответствием полученных результатов данным, имеющимся в научной литературе, использованием отработанных методик. Применявшиеся в работе экспериментальные методики и приборы, отличаются высоким уровнем разработки и позволили получить надежные количественные и качественные данные.

Основные результаты диссертации подвергались многократной независимой положительной экспертизе и опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, индексируемых в Scopus, Web of Science, относящихся к журналам K1 в классификации ВАК Минобрнауки РФ; неоднократно обсуждались на российских и международных конференциях, на семинарах ФИЦ ПХФ и МХ РАН и доступны для широкого круга специалистов.

Результаты диссертации опубликованы в 4-х статьях в научных журналах и в 5-ти сборниках докладов российских и зарубежных конференций.

Структура работы

Диссертационная работа объемом **130** страниц состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы, состоящего из **82** ссылок. В работе содержится **58** рисунков и **2** таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, описаны объекты и метод исследования, сформулированы цели и задачи работы, новизна, теоретическая и практическая ценность полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ литературы по теме исследования. Рассмотрены как классические схемы и теории, описывающие явления, наблюдаемые в жидких ВВ [4, 10, 11], так и новейшие научные исследования [12, 13], ставящие цель их дополнить и расширить. К классическим можно отнести: одномерную схему ударно-волнового инициирования гомогенных жидких ВВ, предложенную Дрёминым А.Н. [4]; схему течений детонационной волны в заряде с оболочкой и механизм образования волн срыва реакции описанные в работах Кобылкина И.Ф. и др. [11]; механизм образования ячеистой неустойчивости и описание структуры негладкой детонационной волны Дрёмина А.Н. и Зельдовича Я.Б. [10]. Из современных работ особенно выделяется схема процесса образования ячеистой неустойчивости, предложенная в работах Ниссен и др. [13], а так же моделирование процессов, происходящих при детонации жидких ВВ описанное в работах Браун К.Э. и др. [12].

Во второй главе приведено краткое описание используемых в работе методик и схемы проведения экспериментов.

Описываемые методы исследования, можно условно разделить на дискретные и непрерывные. К первым относятся:

электроконтактные датчики и сверхскоростная фотокамера НАНОГЕЙТ-22/16. Ко вторым: сверхскоростной фоторегистратор и лазерный доплеровский измеритель скорости. Каждая из методик обладает уникальным набором параметров, что позволило получить широкий спектр информации о процессах, происходящих на разных этапах инициирования и развития детонации в жидких ВВ.

Схемы проведения экспериментов были разработаны на основе классического опыта по наблюдению образования детонации на пределе возбуждения, предложенного в работах Кемпбелла и др. в 1961 году [4]. Их строение приведено на Рисунках 1-3.

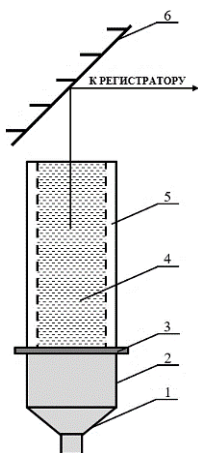


Рисунок 1 – Схема экспериментов по регистрации свечения детонационного фронта.

- 1 – плосковолновой генератор;
- 2 – таблетка ВВ;
- 3 – экран;
- 4 – исследуемое ЖВВ;
- 5 – оболочка;
- 6 – фольга;
- 6 – зеркало.

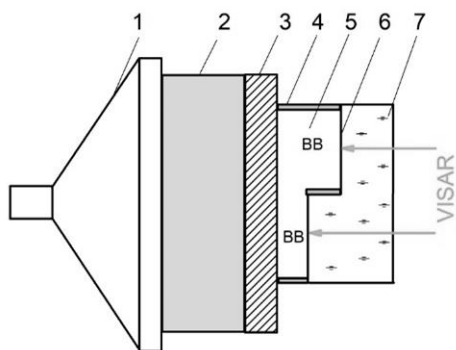


Рисунок 2 – Схема экспериментальной сборки по регистрации ударно-волновых профилей в двух точках.

- 1 – плосковолновой генератор;
- 2 – таблетка ВВ;
- 3 – экран;
- 4 – кювета;
- 5 – исследуемое жидкое ВВ;
- 6 – фольга;
- 7 – водяное окно.

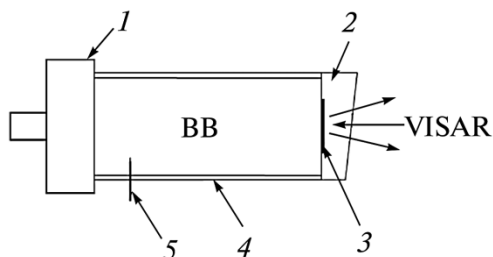


Рисунок 3 – Схема экспериментов по оценке амплитуды неоднородностей и ширины зоны реакции при помощи интерферометра VISAR.

- 1 – взрывная линза;
- 2 – водяное окно;
- 3 – алюминиевая фольга;
- 4 – стальная оболочка;
- 5 – детонационный датчик.

В третьей главе представлены результаты экспериментов по изучению особенностей инициирования и эволюции детонации в жидких ВВ. Приведено подробное описание наблюдаемых явлений и предложен метод сопоставления результатов, получаемых с применением различного фоторегистрирующего оборудования.

Инициирование детонационных волн

При рассмотрении процессов ударно-волнового инициирования и развития детонации в жидких ВВ на основе тетранитрометана и ФИФО, был обнаружен и описан очаговый характер теплового взрыва в ударно-сжатом гомогенном ВВ, который существенно отличается от классических представлений. Динамика возникновения, роста и слияния очагов определяется кинетикой химических реакций и изменяется при использовании различных разбавителей. При этом качественная картина явления остается неизменной, что демонстрируют результаты оптических методов регистрации свечения детонации (Рисунок 4). Вероятно, инициирование не по всей поверхности ударно-сжатого слоя, прилегающего к экрану, а в отдельных очагах, обусловлено неустойчивостью теплового взрыва. Следствием неустойчивости является и формирование неоднородной, слабосветящейся области

преднагрева в чистых тетранитрометане и ФИФО, которая связана с протеканием экзотермических реакций в веществе до теплового взрыва.

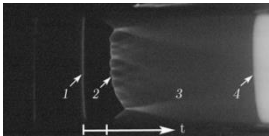
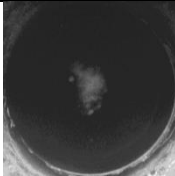
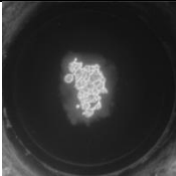
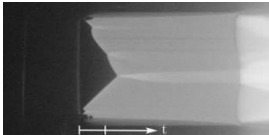
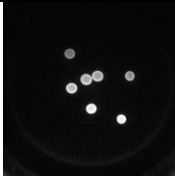
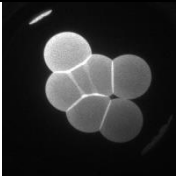
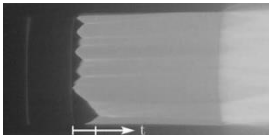
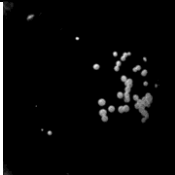
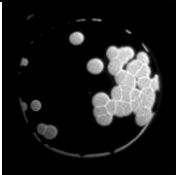
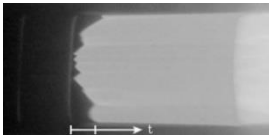
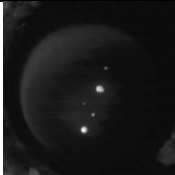
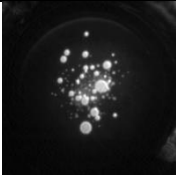

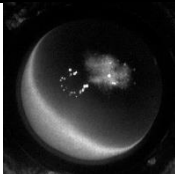
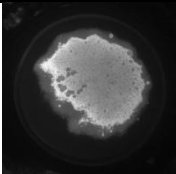
Смесь	СФР	Камера		V_p
ТНМ				25-8,5 (км/с)
ТНМ/М 85/15				4,5 (км/с)
ТНМ/НБ 85/15				7,5-15 (км/с)
ТНМ/Ац 85/15				5-14,5 (км/с)
ФИФО				73-12 (км/с)

Рисунок 4 – Результаты наблюдения очагового характера инициирования детонации в смесях на основе тетранитрометана и ФИФО и расчётные скорости роста отдельных очагов V_p (в порядке их изменения со временем).

Исходя из полученных кадров были рассчитаны скорости роста очагов детонации в исследуемых образцах. В чистом тетранитрометане увеличение радиуса пятен на начальных этапах происходит за счёт возникновения новых вспышек на поверхности преднагретой области. Поэтому начальная скорость увеличения размеров детонационного пятна составляет порядка 25 км/с и со временем падает до 8,5 км/с. Добавление ацетона и нитробензола в количестве 15% (мас.) приводит к постепенному увеличению скоростей разрастания отдельных пятен и снижению контрастности, либо полному исчезновению, области преднагрева, что может свидетельствовать об иной кинетике химических реакций в образцах. Скорости роста меняются в диапазоне от 5 до 14,5 км/с в ТНМ/Ац 85/15 и от 7,5 до 15 км/с в ТНМ/НБ 85/15. В смеси тетранитрометана с метанолом область преднагрева также не наблюдается, а скорость роста очагов остаётся постоянной и составляет 4,5 км/с. В ФИФО картина схожа с наблюдаемой в чистом ТНМ, скорость роста вспышки меняется от 73 до 12 км/с.

Очаговый характер ударно-волнового инициирования детонации принципиально меняет поле скоростей в области роста и слияния очагов. Полученные профили массовых скоростей в смеси тетранитрометана с нитробензолом свидетельствуют об отсутствии сверхскоростной детонации (Рисунок 5). Это является следствием высокой скорости роста очагов, в результате чего они настигают фронт инициирующей ударной волны раньше, чем в ударно-сжатом ВВ сформируется сверхскоростная детонация. В итоге детонационный фронт устанавливается уже в исходной, не подверженной ударному сжатию смеси и соответствует пересжатой детонации, которая по мере распространения переходит в режим Чепмена-Жуге.

Таким образом, неустойчивость теплового взрыва ударно-сжатого жидкого ВВ может привести к нарушению одномерности течения при инициировании и развитии детонации, что делает невозможным применение классической модели для интерпретации экспериментально наблюдаемых явлений. Причём очаговый характер инициирования детонации в смесях на основе тетранитрометана приводит к существованию неоднородной структуры детонационной волны в течение достаточно длительного времени несмотря на то, что установившаяся детонация устойчива.

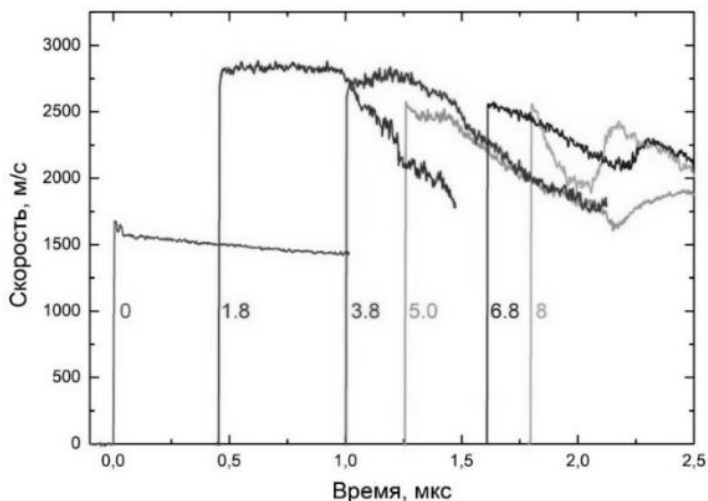


Рисунок 5 – Профили скорости на границе с водой для смеси ТНМ/НБ 76/24. Цифрами указана толщина образца.

Изучение волн срыва реакции

В смесях на основе тетранитрометана и ФИФО был обнаружен неклассический характер течений на поверхности детонационных волн, связанный с влиянием границ заряда и приближением концентраций разбавителей к критическим. Известно, что увеличение содержания разбавителя в смеси напрямую связано с ростом критического диаметра, а следовательно, и со всеми краевыми эффектами, которые начинают появляться на границах заряда.

В смесях на основе тетранитрометана волны срыва реакции появляются при меньших концентрациях разбавителя, чем требуется для возникновения ячеистой неустойчивости. При этом, в отличие от классических представлений, они не представляют собой симметричные кольцеобразные возмущения, распространяющиеся от краёв заряда к его центру. Срыв реакции и последующая тепловая вспышка проявляются преимущественно в виде ассиметричных тёмных областей, курсирующих вдоль границы заряда со скоростями ~ 2 км/с (или 0,11 рад./мкс) (для НМ/Ац 50/50) (Рисунок 6).

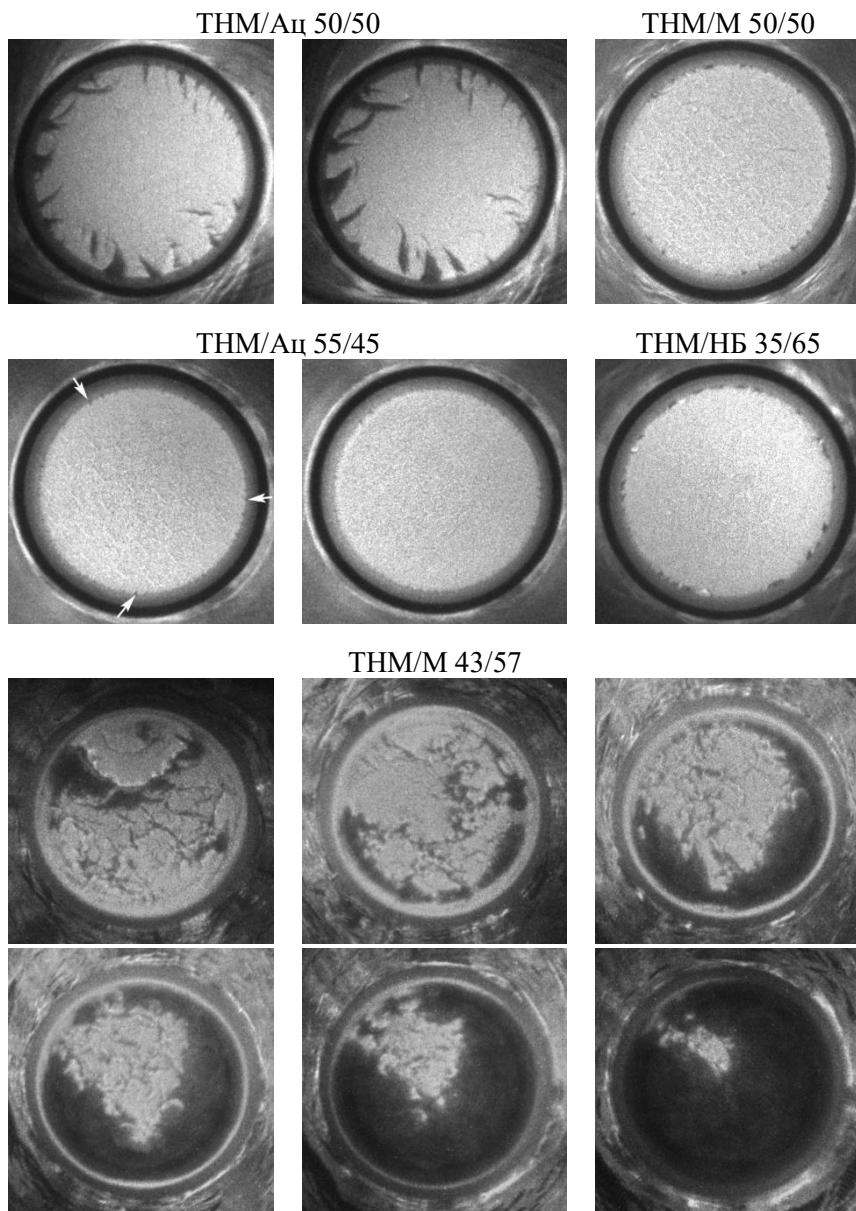
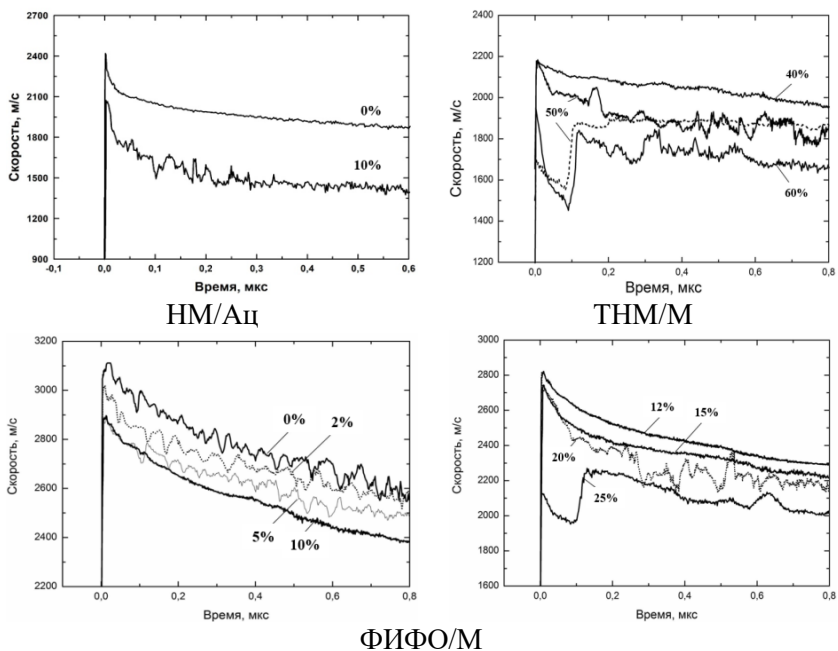


Рисунок 6 – Наблюдение волн срыва реакции в смесях на основе тетранитрометана.

Наблюдаемая асимметричность включений и направление их движения связаны с направлением процесса срыва реакции и следующим за ним фронтом детонационной волны. Тёмные области при этом приобретают форму, напоминающую криволинейный треугольник, одна из сторон которого лежит на границе с оболочкой, а вершина вытянута по направлению к центру заряда. Рёбра треугольника выгнуты в направлении срыва реакции и наплывающей за ним вспышки. Следует заметить, что такая форма возникает постепенно, с увеличением количества разбавителя, на начальных этапах волны срыва представлены тёмными точками вдоль боковой границы заряда, позже – аналогично выгнутыми полосами, но динамика их движения схожа с описанной выше. При достижении критического соотношения компонентов форма наблюдаемых структур становится слишком неоднородна, чтобы можно было её как-то конкретизировать. При этом площадь срыва реакции увеличивается достаточно быстро (средняя скорость схождения волны срыва составляет порядка 3 км/с), чтобы в итоге привести к полному затуханию детонационных процессов.

При исследовании ФИФО и его смесей с метанолом были обнаружены существенные отличия от остальных образцов в характере течений на различных стадиях развития детонационных процессов. Исходя из интерферометрических данных об эволюции массовых скоростей с изменением концентраций составляющих, можно заключить, что на поверхности детонационного фронта в чистом ФИФО изначально присутствуют флуктуации, чего не наблюдается в других образцах (Рисунок 7). Постепенное добавление метанола сперва уменьшает их амплитуду и выравнивает фронт, а после концентрации разбавителя около 20% (мас.) включительно, вновь приводит к искривлению поверхности. Малый размер включений и низкая контрастность фронта делают невозможным их регистрацию при помощи используемых в экспериментах методик до момента выхода фронта на свободную поверхность. С ростом концентрации метанола растёт и критический диаметр для его смесей с ФИФО.

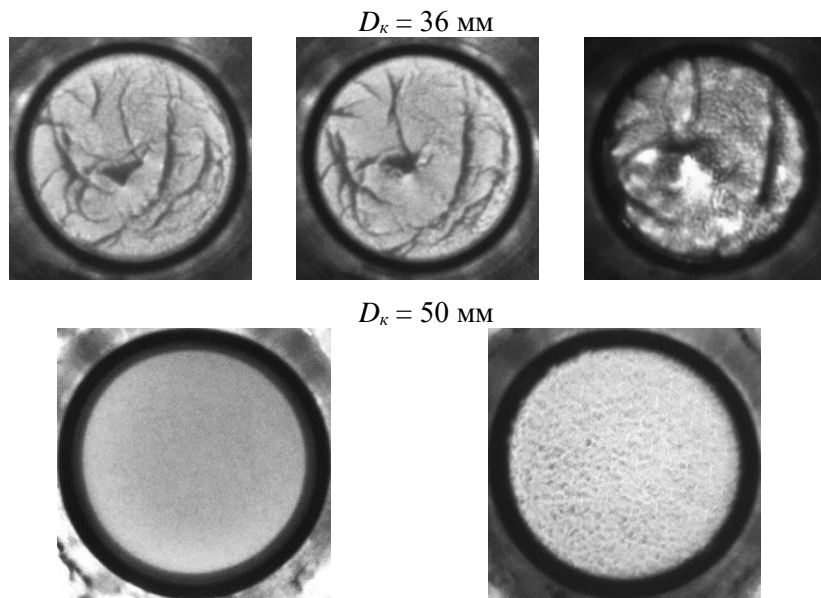


ФИФОМ

Рисунок 7 – Зависимость структуры волновых профилей от концентрации разбавителей в различных образцах [14–16].

Влияние границ заряда тут проявляется в виде дугообразных тёмных полос, выгнутых по направлению их движения по поверхности детонационной волны (Рисунок 8). Самые крупные полосы имеют продольные размеры сопоставимые с диаметром заряда (36 мм), в поперечном направлении их величины варьируются в диапазоне от 0,1 до 5,0 мм. Они свободно перемещаются по всей поверхности фронта со скоростями около 3,7 км/с почти не оказывая влияние друг на друга даже при столкновении. При достижении краёв заряда некоторые полосы «отражаются» от них в обратном направлении, что нехарактерно для волн срыва реакции и ранее никак не описывалось. Увеличение диаметра кюветы приводит к полному исчезновению наблюдаемых тёмных областей всех размеров и форм, из чего можно сделать вывод об их связи с влиянием граничных эффектов, а не с так называемой ячеистой неоднородностью. При выходе фронта на свободную поверхность разлёт продуктов детонации приводит к увеличению площади наблюдаемой поверхности. Кроме того,

увеличивается и разброс параметров в облаке при наличии на поверхности исходного фронта флуктуаций, из-за чего они проявляются в виде тёмных вкраплений округлой формы. Благодаря обнаруженному явлению становится возможным фоторегистрация присутствующих в смеси неоднородностей, не связанных с влиянием оболочки.



Стационарная детонация

Выход на свободную поверхность

Рисунок 8 – Свечение детонационного фронта в смеси ФИФО/М 70/30 в различные моменты времени при разном диаметре кюветы.

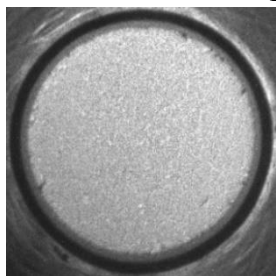
Изучение ячеистой структуры фронта

При изучении ячеистой структуры детонационных волн были исследованы смеси нитрометана с ацетоном, тетранитрометана с метанолом и ФИФО с метанолом.

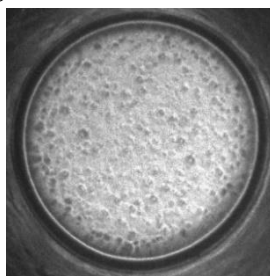
В тетранитрометане неоднородности представлены в виде тонких продолговатых тёмных областей, за динамикой развития которых довольно сложно проследить. Их продольные размеры лежат в диапазоне от 1 до 5 мм, а ширина менее 0,5 мм. Увеличение концентрации разбавителя приводит к незначительному

увеличению размеров полос. Для сопоставления кадров со сверхскоростной фоторазвёрткой необходимо уменьшить временные промежутки между ними. При малых концентрациях разбавителя возможна фоторегистрация присутствия на фронте неоднородностей только при его выходе на свободную поверхность. По аналогии с описанным выше для ФИФО, резкое падение параметров при разлёте продуктов детонации приводит к увеличению контрастности и размеров областей, в пределах которых ещё на поверхности фронта присутствовали провалы (Рисунки 8, 9).

ТНМ/М 50/50

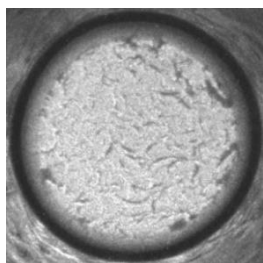


Стационарное течение

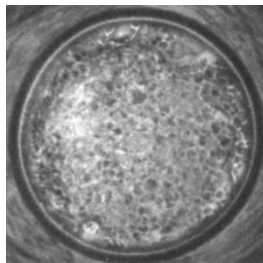


Выход на свободную поверхность

ТНМ/М 45/55



Стационарное течение



Выход на свободную поверхность

Рисунок 9 – Неоднородности на фронте детонационной волны в смесях тетранитрометана с метанолом в разные моменты времени.

В нитрометане добавление ацетона приводит к разбиению детонационного фронта на множество светящихся областей, преимущественно отделённых друг от друга тёмной сеткой. Более

детальное рассмотрение позволяет проследить за эволюцией составляющих по-отдельности. Картина сложно интерпретируется и лишь частично сходится с теоретическими описаниями ячеистой неустойчивости. В частности – светлые участки фронта представляют собой отдельные поперечные детонационные волны, бегущие вдоль поверхности фронта со скоростями около 7,3 км/с. Размеры неоднородностей, а именно поперечные размеры тёмных областей, изменяются в диапазоне от 0,3 до 1,5 мм. Причём эту величину следует считать оценкой сверху, поскольку структура светлых областей также неоднородна. Течение по большей части турбулентно. Попытка сопоставления с методикой сверхскоростной фоторегистрации приводит к образованию развёртки, схожей с получаемыми на плёнках. Из чего можно сделать вывод о возможности выделения преимущественных направлений роста и затухания отдельных вспышек, приводящих к формированию наблюдаемых структур (Рисунок 10).

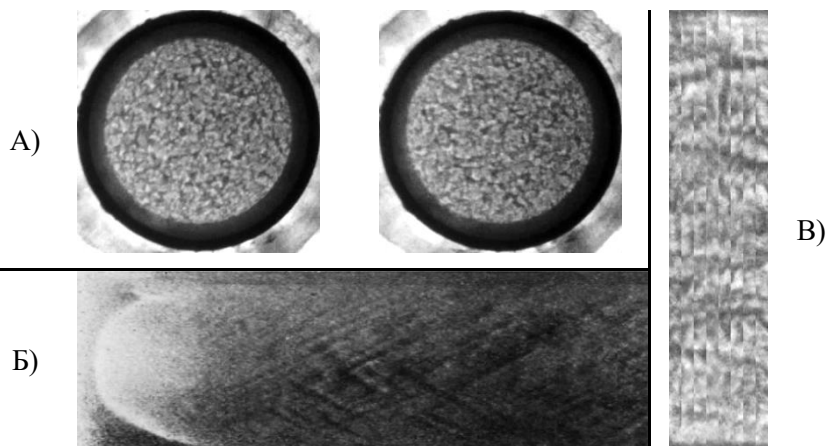


Рисунок 10 – Свечение детонационного фронта в смесях нитрометана с ацетоном:

А) кадры свечения детонационного фронта полученные при помощи сверхскоростной фотокамеры;

Б) фоторазвёртка свечения детонационного фронта в смеси НМ/Ац 72/28 [4];

В) формирование полос в результате совмещения изображений, полученных при вырезании вертикальной щелью центральной части из первых восьми кадров для смеси НМ/Ац 80/20.

Присутствующие неоднородности поверхности фронта в смесях ФИФО с метанолом неразрешимы в рамках используемой методики (до момента выхода детонационной волны на свободную поверхность). Их регистрация возможна только при помощи интерферометра (Рисунок 7). Следует заметить, что сопоставление кадров, на которых наблюдаются последствия влияния краевых эффектов, с методикой СФР, даёт картину схожую с теми, которые ранее интерпретировались как проявление ячеистой структуры фронта (Рисунок 11).

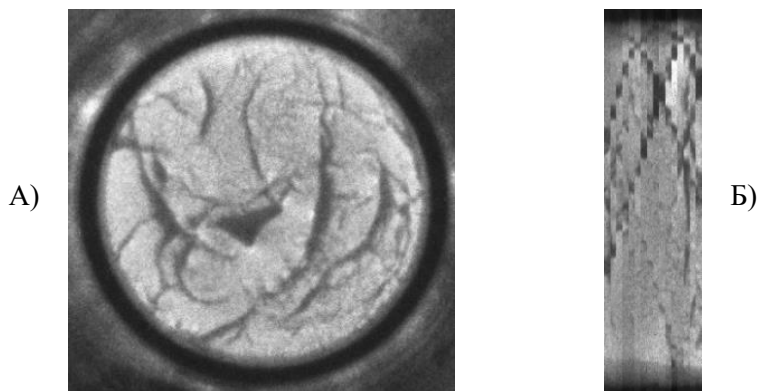


Рисунок 11 – Свечение детонационного фронта в смесях ФИФО с метанолом 70/30:

- А) кадры свечения детонационного фронта полученные при помощи сверхскоростной фотокамеры;
- Б) формирование полос в результате совмещения изображений, полученных при вырезании вертикальной щелью центральной части из 16 кадров для смеси ФИФО/М 70/30.

Как следует из вышеописанного, для всех исследованных образцов не наблюдалось классического, теоретически описанного разделения фронта детонационной волны на отдельные ячейки и формирования упорядоченных структур. Кинетика реакций для каждой смеси уникальна, что приводит к формированию таких же уникальных картин. Стоит отметить, что составы смесей подбирались исходя из прогнозов возможности наблюдения в них неустойчивости различного типа. Сами прогнозы строились на основе ранее проведённых исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена изучению развития детонации в жидких взрывчатых веществах и их смесях с инертными разбавителями. Цель и задачи предусматривали проведение комплексного экспериментального исследования детонационных процессов на разных этапах их развития в жидких взрывчатых веществах. В качестве исследуемых образцов выступали смеси на основе тетранитрометана, нитрометана, бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль, с такими разбавителями как: нитробензол, метанол, ацетон. Использование широкого спектра регистрирующего оборудования, обладающего передовыми техническими характеристиками, позволило получить качественные и количественные характеристики структур детонационных волн.

1. Обнаружен не упоминавшийся ранее очаговый характер инициирования гомогенных жидких ВВ и показаны индивидуальные особенности его проявления для различных смесей ВВ/разбавитель.
2. Установлено влияние очагов на поле скоростей в области их возникновения и слияния.
3. Показан неклассический, локальный характер возникновения волн срыва реакции на краю заряда в смесях на основе тетранитрометана.
4. Обнаружено уникальное проявление влияния краевых эффектов на структуру фронта в смесях на основе ФИФО, не интерпретируемое в рамках волн срыва реакции.
5. Впервые зарегистрировано существование различных типов ячеистой неустойчивости детонационного фронта в смесях жидких ВВ с инертными разбавителями на основе нитрометана, тетранитрометана и ФИФО.
6. Установлено, что неустойчивость детонационного фронта не образует ячеек в их классическом представлении, а проявляется в виде более сложных течений.
7. Описан метод сопоставления результатов, полученных при помощи сверхскоростной фоторегистрации и сверхскоростной фотосъёмки, и с его помощью показана корреляция результатов СФР/камера для смесей НМ/Ац 80/20, ФИФО/МЕ 70/30 и ТНМ/МЕ 43/57.

Подводя итоги, можно заключить, что динамика развития детонационных волн гораздо сложнее, чем теории, предложенные для их описания. Необычность снятых при помощи сверхскоростной фотокамеры картин и их уникальность для каждой смеси существенно расширяет рамки представлений о процессах детонации в жидких ВВ. Дальнейшее развитие темы диссертационной работы предусматривает как расширение перечня исследуемых веществ, так и более детальное и углублённое изучение регистрируемых явлений с упором на поиск причин их возникновения. А сопоставление всех результатов, полученных в ходе исследования, в перспективе может стать отправной точкой если не для создания отдельных теорий, то для существенных корректировок имеющихся.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комиссаров П.В. и др. Смесевые составы для подводных взрывов с усиленным действием за счет включения воды как внешнего окислителя и их взрывные характеристики // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2011. – Т. 12. – № 1. – С. 5-5.
2. Борисов А.А. и др. Оценка характеристик одноктного импульсного детонационного двигателя, работающего на гетерогенном топливе // Химическая физика. – 2003. – Т. 22. – № 8. – С. 68-74.
3. Бестужева В.В. и др. Полимерные связующие энергетических конденсированных систем // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2013. – № 21 (47). – С. 093-101.
4. Дрёмин А.Н. и др. Детонационные волны в конденсированных средах. – Наука, 1970.
5. Utkin A.V., Pershin S.V., Fortov V.E. Change in structure of a detonation wave in 2',2',2'-trinitroethyl-4,4,4-trinitrobutyrate with initial density increase // Doklady Physics. – 2000. – Vol. 45. – Dokl. Phys. – No. 10. – P. 520-522.
6. Utkin A.V., Mochalova V.M., Torunov S.I. Determination of detonation parameters of liquid high explosives // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2011. – Vol. 5. – Russ. J. Phys. Chem. B. – No. 3. – P. 513-518.

7. Utkin A.V., Mochalova V.M., Garanin V.A. Structure of detonation waves in nitromethane and a nitromethane/methanol mixture // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2012. – Vol. 48. – No. 3. – P. 350-355.
8. Utkin A.V. et al. Instability of a detonation waves in nitromethane and FEFO // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2015. – Vol. 51. – No. 4. – P. 476-481.
9. Utkin A.V. et al. Instability of detonation waves in FEFO/methanol solutions // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2017. – Vol. 53. – No. 1. – P. 74-81.
10. Зельдович Я.Б. К теории распространения детонации в газообразных системах // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 1940. – Т. 10. – № 5. – С. 542-568.
11. Кобылкин И.Ф., Соловьев В.С., Бойко М.М. Природа критического диаметра стационарной детонации в конденсированных ВВ // *Труды МВТУ*. – 1982. – № № 387. – С. 13-22.
12. Brown K.E. et al. Ultrafast chemical reactions in shocked nitromethane probed with dynamic ellipsometry and transient absorption spectroscopy // *The Journal of Physical Chemistry A*. – 2014. – Т. 118. – № 14. – С. 2559-2567.
13. Nissen E.J., Bhowmick M., Dlott D.D. Ethylenediamine Catalyzes Nitromethane Shock-to-Detonation in Two Distinct Ways // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2021. – Vol. 125. – No. 29. – P. 8185-8192.
14. Мочалова В.М., Уткин А.В. Стабилизация неустойчивых детонационных волн в смесях нитрометана с инертными разбавителями // *Физика горения и взрыва*. – 2016. – Т. 52. – № 2. – С. 130-137.
15. Уткин А.В. и др. Структура детонационных волн в смесях тетранитрометана с нитробензолом и метанолом // *Физика горения и взрыва*. – 2020. – Т. 56. – № 5. – С. 69-79.
16. Уткин А.В. и др. Неустойчивость детонационных волн в растворах фифо/метанол // *Физика горения и взрыва*. – 2017. – Т. 53. – № 1. – С. 84-91.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи

1. Sosikov V.A., Torunov S.I., Utkin A.V., Mochalova V.M., **Rapota D.Yu.** Experimental investigation of detonation waves instabilities in liquid high explosives // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 946. – №. 1. – С. 012058.
2. **Рапота Д.Ю.**, Уткин А.В., Мочалова В.М., Торунов С.И., Сосиков В.А. Особенности ударно-волнового инициирования детонации в жидких взрывчатых веществах // Физика горения и взрыва. – 2023. – Т. 59. – №. 4. – С. 111-121.
3. Уткин А.В., Мочалова В.М., Астахов А.М., Рыкова В.Е., Сосиков В.А., **Рапота Д.Ю.**, Торунов С.И. Структура детонационных волн в смесях тетранитрометана с ацетоном // Физика горения и взрыва. – 2023. – Т. 59. – №. 4. – С. 122-130.
4. Сосиков В.А., Торунов С.И., **Рапота Д.Ю.**, Мочалова В.М., Уткин А.В., Колдунов С.А. Структура неустойчивого детонационного фронта в жидких ВВ // Физика горения и взрыва. – 2024.

Труды конференций

1. Sosikov V.A., Torunov S.I., Utkin A.V., Mochalova V.M. and **Rapota D.Yu.** Experimental investigation of detonation waves instabilities in liquid high explosives // Тезисы международной конференции "Физика экстремальных состояний вещества". – Эльбрус – 2017.
2. **Рапота Д.Ю.**, Уткин А.В., Мочалова В.М., Торунов С.И., Сосиков В.А. Особенности ударно-волнового инициирования детонационного фронта в жидких взрывчатых веществах // Тезисы XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву. – Институт проблем химической физики РАН – Черноголовка – 2022. – С. 145–146.
3. Utkin A.V., Mochalova V.M., **Rapota D.Yu.**, Sosikov V.A., Torunov S.I. Instability of detonation waves in mixtures of tetranitromethane with methanol and nitrobenzene // Physics and Chemistry of Elementary Chemical Processes: Proceedings of the 10-th International Voevodsky Conference. September 5–9, 2022 / IPC Novosibirsk State University – Novosibirsk – 2022. – P. 118.

4. Уткин А.В., Мочалова В.М., **Рапога Д.Ю.**, Сосиков В.А., Торунов С.И. Структура неустойчивого детонационного фронта в жидких ВВ // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения». – Новосибирск – 2023. – С. 96.
5. **Рапога Д.Ю.**, Сосиков В.А., Торунов С.И., Уткин А.В., Мочалова В.М. Сравнительный анализ развития ячеистых неоднородностей на поверхности детонационного фронта в различных смесях жидких взрывчатых веществ // Сборник тезисов XXXV симпозиума «Современная химическая физика». – Туапсе – 2023. – С. 141.