

На правах рукописи



Торунов Сергей Иванович

**Экспериментальное исследование неустойчивости детонационного фронта
жидких взрывчатых веществ**

**01.04.17 - химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Черноголовка - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт проблем химической физики Российской академии наук»

Научный руководитель: **Уткин Александр Васильевич**,
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник, ФГБУН «Институт проблем
химической физики РАН», Черноголовка,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Ершов Александр Петрович**,
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГБУН «Институт Гидродинамики им.
Лаврентьева СО РАН», Новосибирск, главный
научный сотрудник

Грязнов Евгений Фёдорович,
кандидат технических наук, заведующий отделом
Научно-Исследовательского Института
Специального Машиностроения Московского
Государственного Технического Университета
им. Н.Э. Баумана, Москва, старший научный
сотрудник

Ведущая организация: ФГБУН «Институт химической физики им.
Н.Н.Семенова РАН», г. Москва

Защита состоится “16” февраля 2017 г. в 12 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета Д 002.082.03 в ФГБУН «Институт проблем
химической физики РАН» по адресу: 142432, Московская область, г.
Черноголовка, ул. Проспект академика Семёнова д.1, тел./факс (496)522-51-34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем
химической физики РАН по адресу: 142432, Московская область, г.
Черноголовка, ул. Проспект академика Семёнова д.1, и на сайте ИПХФ РАН
www.icp.ac.ru.

Автореферат разослан “_____” _____ 2016 г

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор химических наук



Золотухина Екатерина Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В жидких взрывчатых веществах (ЖВВ) детонационные волны (ДВ) распространяются в стационарном и в неустойчивом, пульсирующем режиме. Различают потерю устойчивости одномерного течения при отсутствии влияния границ и неустойчивость на краю заряда [1]. Оба вида неустойчивости обусловлены одними и теми же причинами: взаимным влиянием динамики течения и скорости химической реакции друг на друга. Может показаться, что детонационный фронт (ДФ) должен быть либо устойчивым, либо пульсации фронта и волны срыва реакции проявляются одновременно. Но течение в центре и на краю заряда существенно различаются, и условия потери устойчивости не обязаны выполняться вдоль всего фронта. Меняя кинетику химических реакций посредством разбавления ЖВВ инертными растворителями или сенсibilизаторами, можно получить ДВ, в которых эти два вида неустойчивости проявляются в четырех возможных сочетаниях.

Степень разработанности темы. Эффективным методом изменения химической кинетики реакции жидких взрывчатых веществ в условиях детонации является применение инертных разбавителей. С их помощью удается не только изменять термодинамические параметры, течение в зоне реакции, критические условия инициирования и развития детонации, но и влиять на устойчивость детонационных волн. Исследования структуры стационарных ДВ в смесях нитрометана (НМ) с – диэтилентриамином (ДЭТА) интересны тем, что малые концентрации аминов, оказывая сильное влияние на кинетику разложения НМ, оставляют почти неизменными термодинамические свойства раствора. Появляется возможность, изменяя только кинетику реакции взрывчатого вещества, изучать ее влияние на течение в зоне реакции. В данной работе проведено экспериментальное исследование влияния малых добавок ДЭТА на структуру ДВ в НМ и впервые зарегистрировано течение в зоне реакции стационарной ДВ в смеси НМ-ДЭТА. Обнаружено сильное влияние

ДЭТА на структуру зоны реакции в смеси с НМ, вызванное резким увеличением начальной скорости реакции ВВ. Показано, что для интерпретации экспериментальных данных необходимо учитывать возможность разложения ВВ во фронте ударной волны (УВ).

Ударно-волновые и детонационные свойства ФИФО исследовались в работах [2-4]. Авторами [2, 3] было показано, что в ФИФО детонация является неустойчивой, хотя до этих исследований не было никаких сомнений в гладкости одномерного ДФ такого мощного ЖВВ.

Результаты экспериментальных исследований структуры ДВ в смесях ФИФО с метанолом и нитробензолом (НБ), представленные в главе 4, показывают, что и влияние инертных разбавителей на устойчивость детонации может быть не столь однозначно. Увеличение концентрации метанола в интервале 10 – 15% вместо развития неустойчивости приводит к стабилизации ДФ, что проявляется в исчезновении осцилляций на профилях скорости. И только когда концентрация достигает 20% и более, течение вновь становится неустойчивым. Столь необычный характер изменения структуры зоны реакции при добавлении в ФИФО инертного разбавителя обусловлен частичной реакцией ВВ во фронте УВ. Вариация разбавителей приводит к количественным изменениям, оставляя качественную картину явления неизменной.

Цель работы: доказать, что взаимосвязь двух видов проявления неустойчивости (пульсирующий режим на оси заряда и существование волн срыва реакции на краю заряда) не является строго детерминированной и получить ДВ, в которых эти два вида неустойчивости проявляются в четырех возможных сочетаниях.

Задачами данной работы являются:

1) исследовать сильное влияние малых добавок ДЭТА на детонационные характеристики НМ и с помощью интерпретации экспериментов по

регистрации течения в зоне реакции стационарной ДВ в смесях НМ - ДЭТА предложить объяснение рассматриваемого явления;

2) исследовать необычное влияние инертных добавок (метанола и НБ) на устойчивость одномерного течения и явлений срыва на краю заряда детонации в ФИФО и с помощью интерпретации экспериментов по регистрации течения в зоне реакции стационарной ДВ в смесях ФИФО - метанол и ФИФО - НБ предложить объяснение рассматриваемого явления;

3) доказать, что взаимосвязь двух видов проявления неустойчивости не является строго детерминированной. Основой доказательства являются экспериментальные исследования, в ходе которых, меняя кинетику химических реакций, например, посредством разбавления ЖВВ инертными растворителями или сенсibilизаторами, получены ДВ, в которых два вида неустойчивости проявляются в четырех возможных сочетаниях.

Выбор объектов исследования

При выборе индивидуальных ЖВВ, наряду с их доступностью, важно было взять два ЖВВ, имеющие устойчивый фронт и неустойчивость на краю заряда, и неустойчивый фронт и отсутствие волн срыва реакции. Эта цель достигается при использовании НМ и ФИФО: НМ имеет давление детонации порядка 13 ГПа и устойчивый ДФ, а ФИФО давление около 25 ГПа и неустойчивый ДФ.

При приготовлении смесей индивидуальных ВВ с разбавителями существенны следующие требования:

- необходимо, чтобы ЖВВ и невзрывчатые разбавители были химически устойчивы и достаточно инертны по отношению друг к другу;
- они должны быть как можно менее чувствительными и токсичными (для безопасной работы с ними);
- должны быть технологически доступными в количестве, достаточном для проведения работ.

Диэтилентриамин (ДЭТА) в смеси с НМ и метанол и нитробензол в смесях с ФИФО удовлетворяют перечисленным требованиям.

Научная новизна

Впервые исследована структура зоны реакции и определены детонационные параметры смесей НМ с ДЭТА, а также исследована устойчивость к волнам срыва реакции на краю заряда. Показано, что для интерпретации экспериментальных данных необходимо учитывать возможность разложения ВВ непосредственно во фронте УВ.

Впервые определены время реакции, структура зоны реакции и детонационные параметры смесей ФИФО с метанолом и НБ. Наблюдалось явление подавления неустойчивости течения при разбавлении ФИФО 10-15% метанола и НБ. При дальнейшем увеличении концентрации разбавителей ДФ вновь становится неустойчивым вплоть до критической концентрации.

На основании предположения о возможности реакции ВВ непосредственно во фронте УВ предложено объяснение обнаруженных явлений резкого уменьшения амплитуды химпика в смеси и стабилизации неустойчивой ДВ в ФИФО при добавлении малых концентраций метанола и НБ.

Теоретическая ценность

Доказано, что взаимосвязь двух видов проявления неустойчивости – пульсирующего режима на оси заряда и существования волн срыва реакции на краю заряда - не является строго детерминированной. Меняя кинетику химических реакций, например, посредством разбавления ЖВВ инертными растворителями или сенсibilизаторами, можно получить ДВ, в которых два вида неустойчивости проявляются в четырех возможных сочетаниях.

Практическая ценность

Полученные в работе экспериментальные значения давления и массовой скорости в химпике и точке Чепмена-Жуге, данные о характерном времени реакции и устойчивости ДВ в смесях НМ с ДЭТА и ФИФО с метанолом, а также изученное влияние инертных разбавителей и сенсibilизаторов на

течение в зоне реакции, могут послужить материалом для построения моделей, необходимых при расчетах детонационных и ударно-волновых явлений в реальных изделиях. Результаты исследований представляют самостоятельный научный интерес для химической физики, важны для решения вопросов безопасности производства, транспортировки и применения не только ВВ, но и других веществ, производство, транспортировка и хранение которых может быть взрывоопасным.

Методология и методы диссертационного исследования

Методология исследований основана на комплексном использовании трех методов: 1) непрерывной регистрации скорости на границе ЖВВ с водяным окном посредством лазерного интерферометра VISAR, обладающего наносекундным временным разрешением, 2) регистрация свечения процесса детонации с помощью скоростного фоторегистратора (СФР) в щелевом режиме с торца заряда, 3) регистрация фронта и нестационарных явлений на краю заряда с помощью отечественной высокоскоростной камеры НАНОГЕЙТ 4БП (в покадровом режиме сбоку). Одновременно в каждом из перечисленных пунктов измерялась скорость детонации установившегося детонационного режима с использованием электроконтактной методики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты определения структуры зоны реакции и параметров стационарных ДВ в смесях НМ с ДЭТА и их интерпретация.
2. Результаты определения структуры зоны реакции и параметров стационарных ДВ в смесях ФИФО с метанолом и НБ и их интерпретация.
3. Результаты исследования ширины зоны реакции в смесях ФИФО с метанолом и НБ.
4. Результаты получения ДВ, в которых два вида неустойчивости проявляются в четырех возможных сочетаниях.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Применявшиеся в работе экспериментальные методики и приборы (лазерный интерферометр VISAR, высокоскоростная электронно-оптическая камера, позволяющая получить четыре кадра, высокоскоростная фоторегистрирующая установка СФР) отличаются высоким уровнем разработки и позволили получить надежные количественные и качественные данные. Достоверность полученных результатов и научная новизна не вызывают сомнений. Исследование отличается надежностью; выводы достаточно хорошо аргументированы полученными автором оригинальными экспериментальными результатами. Основные результаты диссертации неоднократно обсуждались на российских и международных конференциях, на семинарах ИПХФ РАН и доступны для широкого круга специалистов.

Результаты диссертации опубликованы в 8 статьях в научных журналах и в 24 сборниках докладов российских и зарубежных конференций.

Личный вклад автора состоит в обсуждении актуальных задач детонации, планировании, подготовке и проведении экспериментов по исследованию ЖВВ методом лазерной интерферометрии и оптическими методами; обработке полученных данных; анализе и интерпретации результатов, формулировке основных научных выводов и написании статей.

Структура работы. Диссертационная работа объемом **95** страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, где сформулированы основные результаты и выводы, и списка цитируемой литературы, состоящего из **58** ссылок. В работе содержится **44** рисунка и **2** таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлены основные сведения из теории детонации, классической гидродинамической теории, модели Зельдовича-Неймана-Дёринга и приведены известные теоретические и экспериментальные данные о влиянии диаметра заряда на структуру ДВ.

Во второй главе приведен обзор основных методов регистрации параметров ДВ. Более подробно описана работа лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR и высокоскоростной камеры НАНОГЕЙТ 4БП.

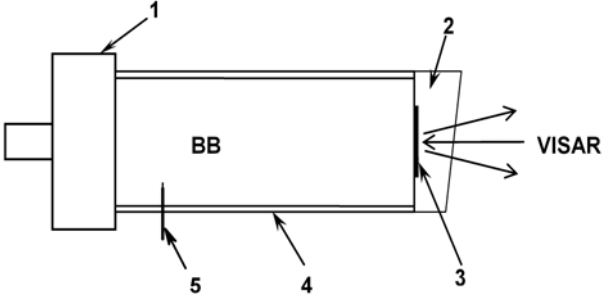
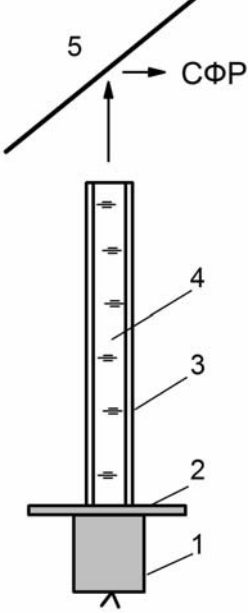
Третья глава посвящена исследованию устойчивости ДВ в НМ, его смесях с инертными разбавителями (ацетон, метанол) и сенсibilизатором ДЭТА.

НМ является одним из наиболее исследованных ЖВВ. Но, вопрос об устойчивости одномерного ДФ в нем долгое время оставался дискуссионным. Пульсации фронта в НМ никогда не наблюдались. Лишь на основании интерпретации опытов по регистрации отражения света от ДФ в работе [1] сделан вывод о его неустойчивости. Также предполагалось, что если существуют волны срыва реакции на краю заряда, то должны быть и пульсации на фронте.

Исследования, выполненные в работе [5] показали, что одномерный ДФ в НМ устойчив. В данной работе для подтверждения этого факта проведена регистрация структуры течения в УВ с использованием лазерного интерферометра VISAR.

Схема экспериментов показана на Рис.1а. Заряд исследуемого ВВ помещался в полиэтиленовую или стальную оболочку с внутренним диаметром от 20 до 50 мм. Длина заряда составляла от 90 до 180 мм. Инициирование детонации осуществлялось прессованными зарядами флегматизированного гексогена АIX–1 или тротила. Иницирующий заряд отделялся от ЖВВ алюминиевым экраном толщиной 3 мм. Зондирующее лазерное излучение отражалось от алюминиевой фольги (3), расположенной между торцом заряда и водяным окном (2). В опытах с НМ использовалась фольга толщиной 7 мкм.

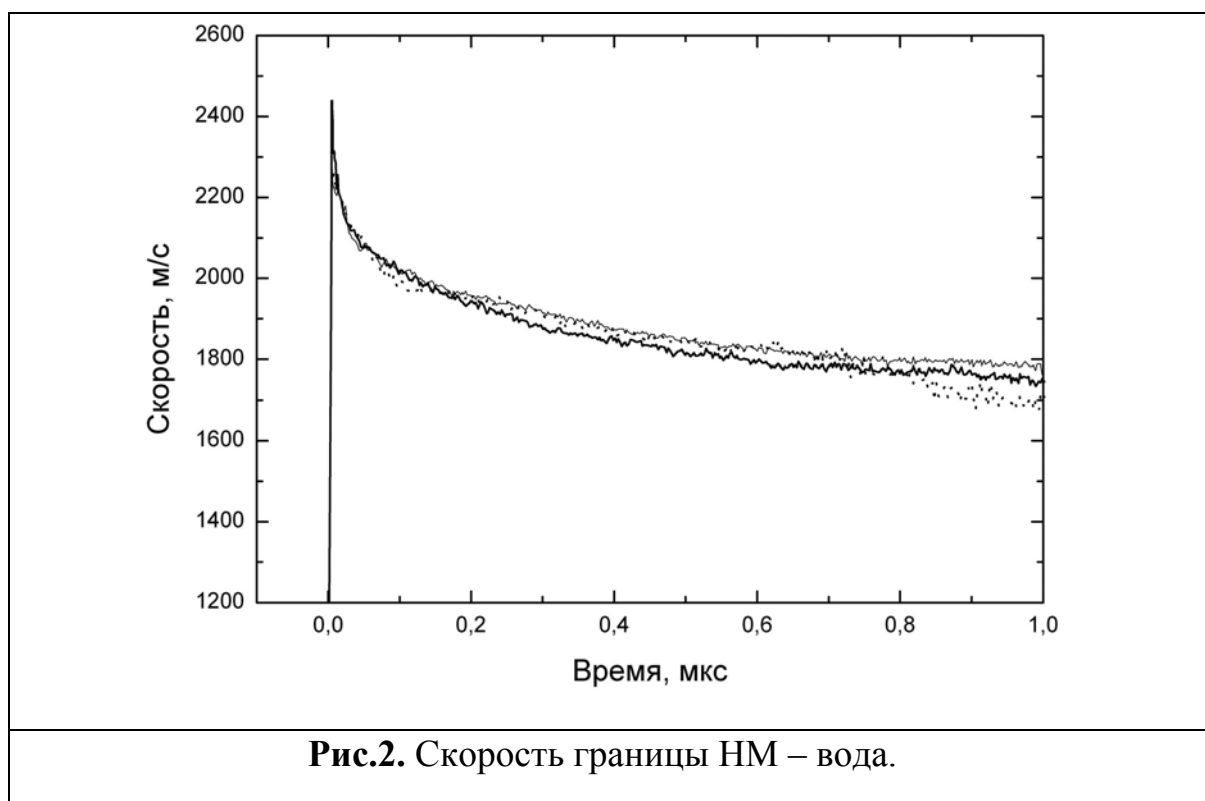
Постоянная интерферометра равнялась 305 м/с. Ионизационный датчик (5) являлся первой меткой времени для измерения скорости детонации. Второй меткой являлся сигнал интерферометра, регистрирующий выход ДВ на границу с окном.

	
<p>Рис.1а. Схема эксперимента по регистрации течения в зоне реакции. 1 – инициирующий заряд ВВ; 2 – водяное окно; 3 – алюминиевая фольга; 4 – оболочка; 5 – ионизационный датчик.</p>	<p>Рис.1б. Схема эксперимента по регистрации свечения ДФ. 1 – инициирующий заряд ВВ; 2 – экран из Al; 3 – оболочка; 4 – исследуемое ВВ; 5 – зеркало.</p>

Результаты экспериментов с НМ приведены на Рис.2. После ударного скачка регистрируется резкий спад скорости, обусловленный формированием химпика в зоне реакции, плавно переходящий в волну разгрузки. На Рис.2 сплошной и пунктирной линиями показаны профили скорости для двух экспериментов с НМ, проведенных в одинаковых условиях. Видно, что наблюдается хорошая воспроизводимость результатов. На Рис.2 приведен и

профиль скорости, полученный при увеличении длины заряда от 100 мм до 150 мм (тонкая сплошная линия). Совпадение результатов является доказательством стационарности исследуемых ДВ.

Зависимости скорости от времени являются гладкими, без осцилляций, которые можно было бы связать с неустойчивостью течения. Поэтому ДФ в НМ либо устойчив, либо амплитуда возмущений значительно меньше толщины фольги, т.е. порядка микрона. Последнее предположение согласуется с интерпретацией опытов по регистрации отражения света от ДФ [1], но против него существует ряд аргументов, основным из которых является тот факт, что диффузное отражения света от фронта волны не является однозначным доказательством его неустойчивости. К аналогичному эффекту может привести, например, резкое увеличение концентрации активных частиц, спектр поглощения которых пересекается со спектром зондирующего излучения. Полученные экспериментальные данные позволяют утверждать, что ДФ в НМ гладкий.



Волны срыва реакции наблюдались по схеме, показанной на Рис.16. В режиме щелевой развертки регистрировалось распространение ДВ в НМ (4), который находился в полипропиленовой оболочке (3) с внутренним диаметром 28 мм и длиной 150 мм. Инициирование осуществлялось плоскоровновым генератором из ТГ 50/50 диаметром 40 мм (1). Регистрировалось свечение ДФ по мере его распространения по заряду. Вид границы ВВ зависит от отсутствия или наличия волн срыва реакции: в первом случае граница ДФ гладкая, во втором – зигзагообразная [1].

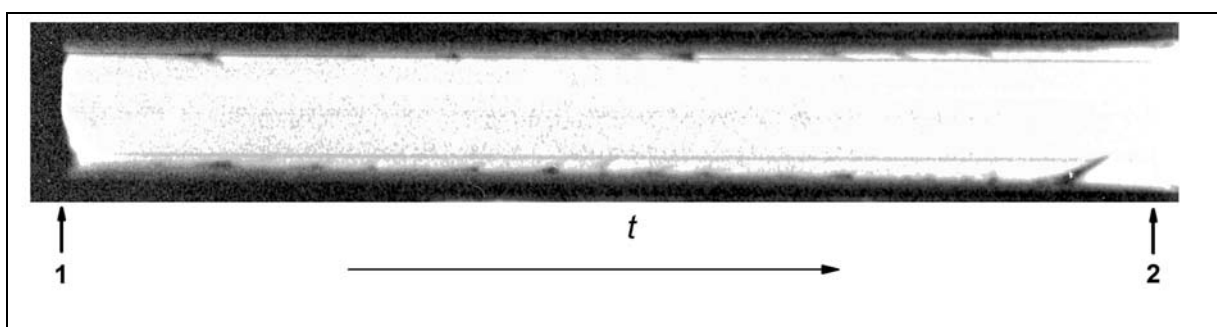


Рис.3. Торцевая развертка свечения фронта ДВ в НМ. Внутренний диаметр полипропиленовой оболочки равен 28 мм. Стрелками 1 и 2 указаны соответственно момент инициирования детонации и время выхода волны на свободный торец заряда.

Торцевая фоторазвертка процесса показана на Рис.3. Видно, что волны срыва реакции регулярно зарождаются на боковой поверхности и распространяются к центру на глубину, достигающую половины радиуса (~7 мм). Их возникновение обусловлено боковыми волнами разрежения, приводящими к срыву реакции и распространению границы области нереагирующего ВВ к центру заряда. При этом накапливается толщина ударно-сжатого слоя ВВ, в котором через время равное периоду индукции происходит адиабатический тепловой взрыв, и ДФ вновь восстанавливается по всему сечению. Детально механизм возникновения волн срыва реакции и их эволюция исследовались в работе [1].

Итак, НМ является примером ЖВВ, в котором неустойчивость проявляется в виде волн срыва реакции на краю заряда, а ДФ на оси устойчив.

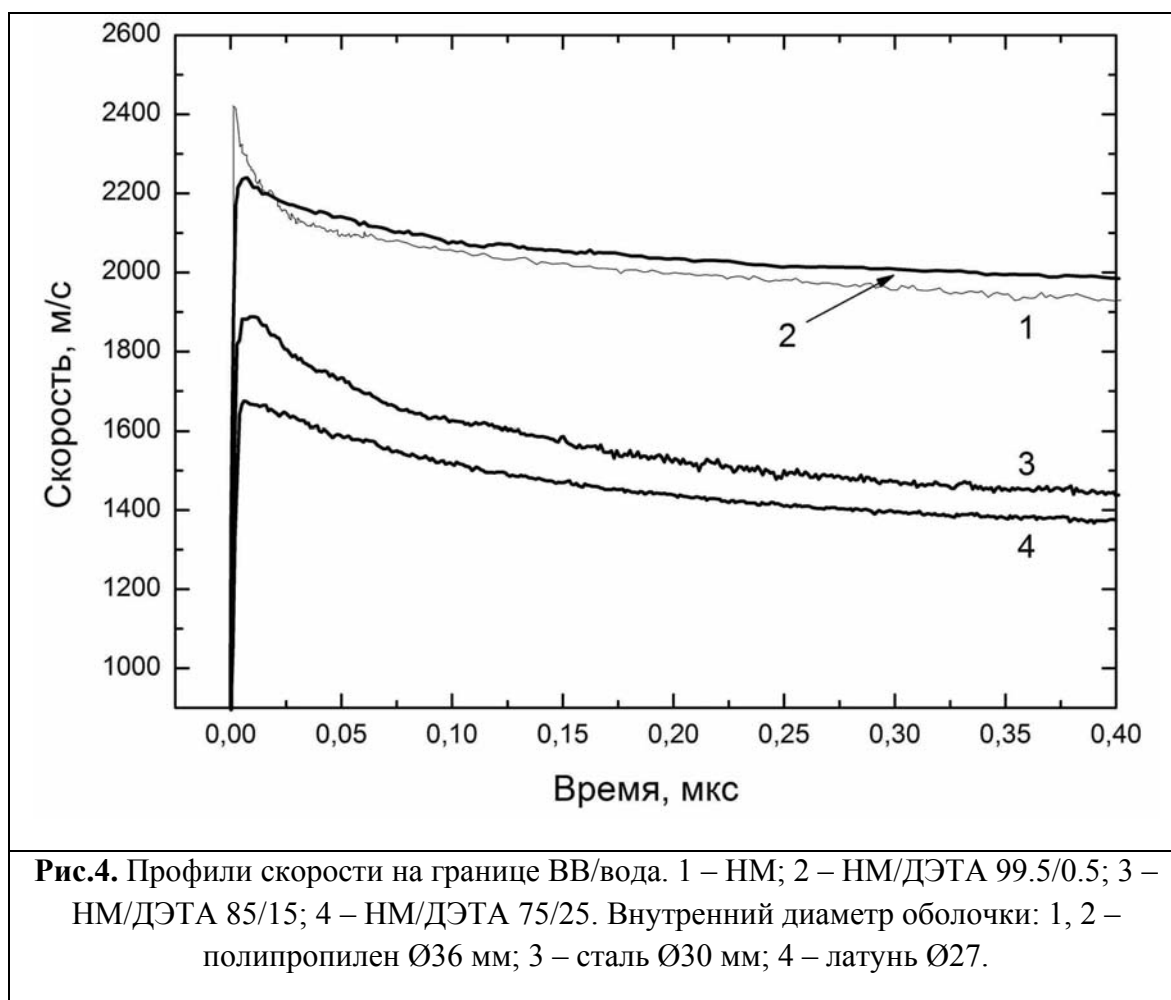
Добавки инертных разбавителей приводят к снижению скорости химической реакции в ЖВВ, что может привести к потере устойчивости ДФ. Например, добавки ацетона и метанола в НМ превращают устойчивый одномерный ДФ в пульсирующий.

Малые добавки аминов существенно влияют на детонационные свойства НМ: уменьшают критический диаметр [6], снижают давление ударно-волнового инициирования, расширяют концентрационный диапазон детонации смесей НМ с инертными разбавителями [7], качественно изменяют характер течения в зоне реакции, приводя к исчезновению хипика [8]. Обусловлено это резким увеличением скорости химической реакции НМ в условиях детонации при добавлении аминов. Возможные причины этого влияния детально анализируются в ряде работ [9-13].

Поскольку речь идет о малых концентрациях сенсibilизаторов, то заметного влияния на термодинамические свойства НМ они не оказывают. В данной работе в качестве амина использовался диэтилентриамин (ДЭТА), плотность которого равнялась 0.954 г/см^3 .

Типичные профили скорости, регистрируемые на границе ВВ/вода для смеси НМ/ДЭТА при использовании 7 микронной фольги, приведены на Рис.4. Изменение скорости во времени для НМ (зависимость 1) соответствует классической модели детонации с устойчивым фронтом. Время реакции составляет 50 нс [5]. Малые добавки ДЭТА принципиально меняют распределение параметров в зоне реакции. Это проявляется в росте скорости после ударного скачка и формировании пологого максимума в окрестности 10 нс (зависимость 2). Детально влияние малых концентраций ДЭТА на особенности детонации НМ исследовалось в [8]. Как видно на Рис.4 такой характер изменения профиля скорости в зоне реакции сохраняется до концентрации ДЭТА 25%. Связано это с реакцией ВВ во фронте УВ, из-за чего максимум давления смещается вглубь зоны реакции и его амплитуда

оказывается ниже значения, соответствующего пересечению прямой Михельсона и ударной адиабаты нереагирующего ВВ [8]. Во всем интервале концентраций профили скорости на Рис.4, являются гладкими, без каких-либо осцилляций, которые можно связать с ячеистой структурой ДФ. Значит, одномерная ДВ в НМ и его смесях с ДЭТА устойчива вплоть до концентрации сенсibilизатора, равной 25%.



Первые признаки неустойчивости детонации НМ/ДЭТА появляются при 30% ДЭТА. Это отражается на профилях скорости в виде характерных осцилляций. Увеличение количества ДЭТА до 40% приводит к росту амплитуды осцилляций. Поскольку неоднородности фронта не сгладились после прохождения УВ по 7 микронной алюминиевой фольге, то их амплитуда порядка толщины фольги.

Возможность существования волн срыва реакции в смеси НМ/ДЭТА

исследовалась по схеме, показанной на Рис.1б. В режиме щелевой развертки регистрировалось распространение ДВ в смеси НМ/ДЭТА 99.5/0.5.

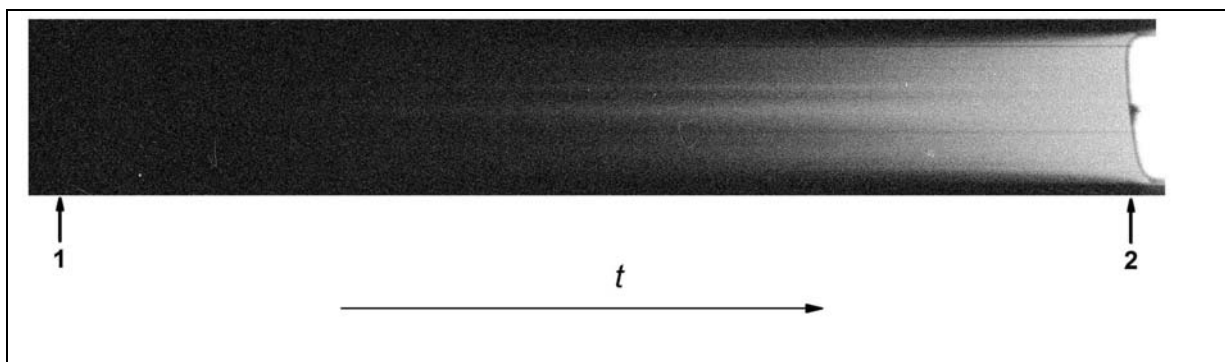


Рис.5. Торцевая развертка свечения фронта ДВ в НМ. Внутренний диаметр полипропиленовой оболочки равен 28 мм. Стрелками 1 и 2 указаны момент инициирования детонации и время выхода волны на свободный торец заряда.

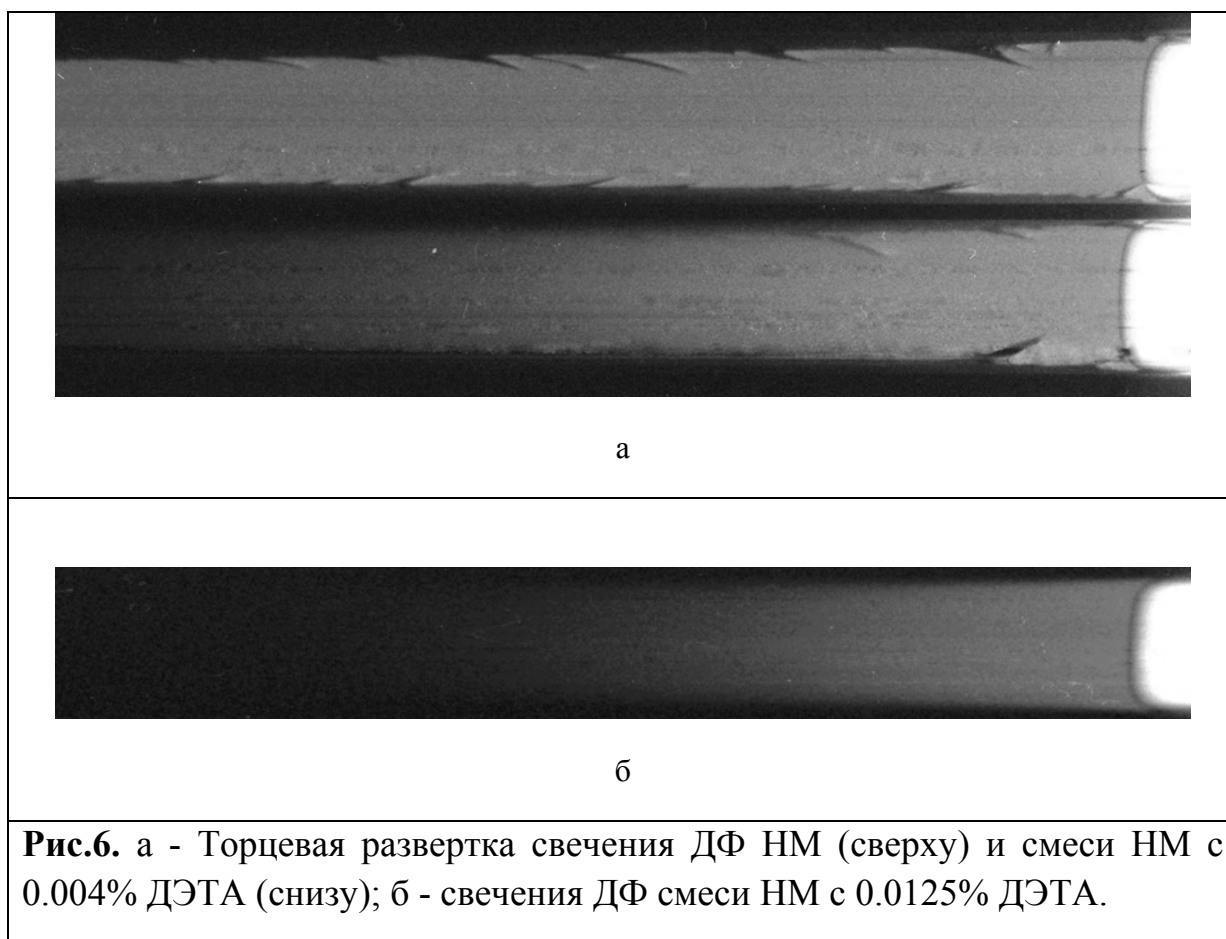


Рис.6. а - Торцевая развертка свечения ДВ НМ (сверху) и смеси НМ с 0.004% ДЭТА (снизу); б - свечения ДВ смеси НМ с 0.0125% ДЭТА.

Полученная торцевая фоторазвертка процесса показана на Рис.5. В

отличие от НМ (Рис.3) граница заряда является гладкой. Это является следствием резкого увеличения скорости химической реакции за счет добавления ДЭТА. Подавление данного вида неустойчивости происходит при очень малых концентрациях сенсibilизатора. На Рис.6а приведена фоторазвертка свечения ДФ в НМ (сверху) и в смеси с 0.004% ДЭТА (снизу), полученная в аналогичной постановке эксперимента. Волны срыва реакции в данной смеси еще наблюдаются и глубина распространения к центру заряда отдельных волн того же порядка, что и в НМ, но частота их появления заметно уменьшилась. Добавление в НМ 0.0125% ДЭТА приводит к полной стабилизации течения на краю заряда, что демонстрирует Рис.6б.

В четвертой главе представлены результаты исследования смесей ФИФО с метанолом и НБ.

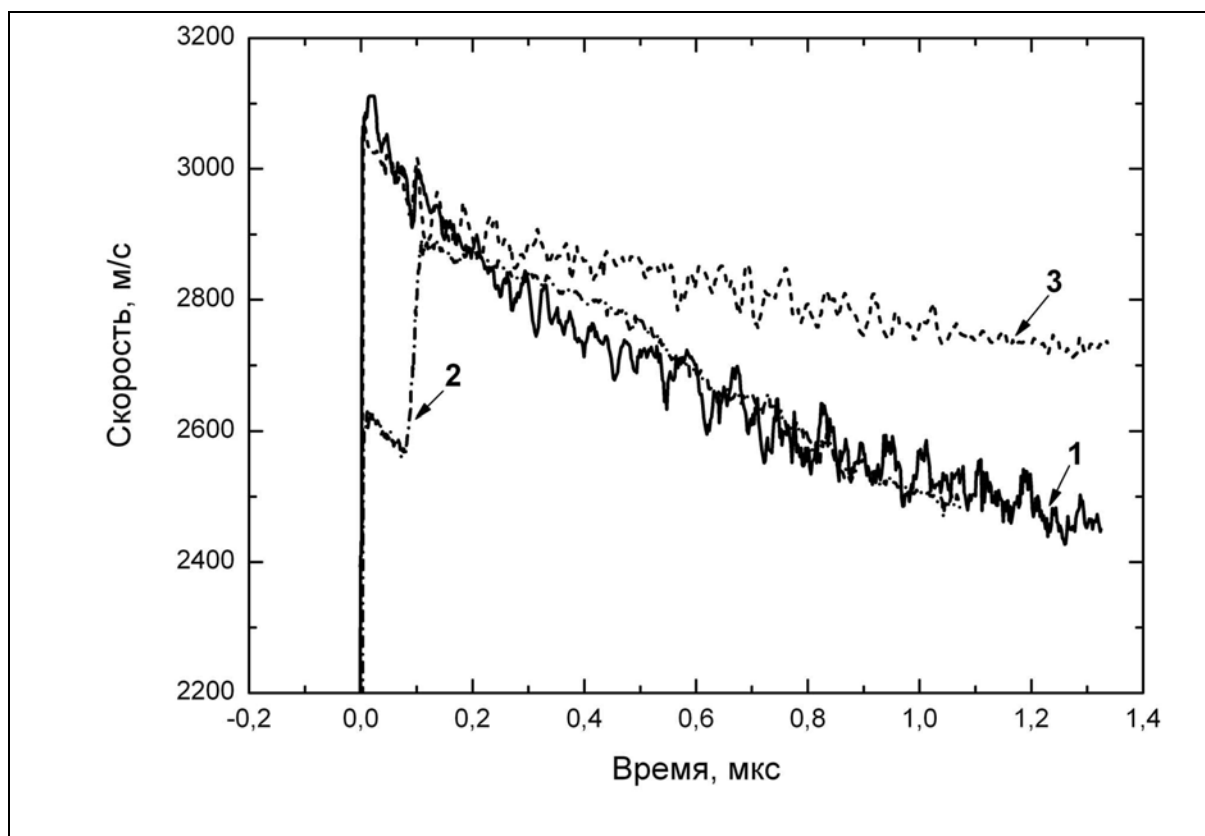
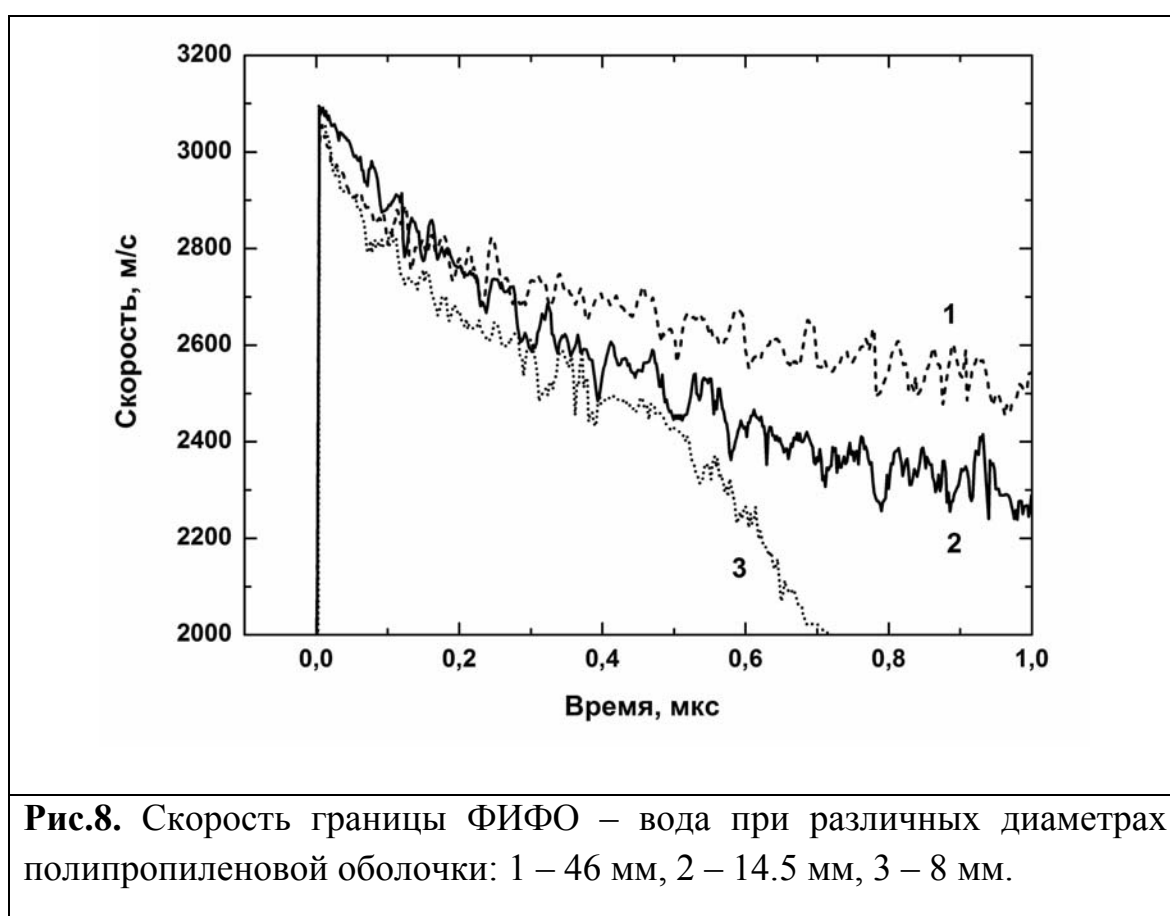


Рис 7. Профили скорости на границе ФИФО – водяное окно. 1, 2 – полиэтиленовая оболочка с внутренним диаметром 36 мм; 3 – стальная оболочка с внутренним диаметром 50 мм.

Измеренные профили скорости для ФИФО показаны на Рис.7, 8. Предполагалось, что в ФИФО ДФ устойчив, поэтому опыты были проведены с использованием тонкой алюминиевой фольги толщиной 7 мкм. Результат оказался иным, что отчетливо демонстрируют зависимости 1 и 3 на Рис.7. Профили массовой скорости в зоне химической реакции и в волне разгрузки являются сильно осциллирующими с амплитудой осцилляций около 50 м/с. Отчетливо выраженный период колебаний отсутствует, но порядок величины составляет 50 нс. Значит, ДФ неустойчив и размер неоднородностей сопоставим с толщиной фольги, то есть порядка 10 мкм.



Использование более толстой фольги должно приводить к сглаживанию осцилляций на фронте. Зависимость 2 на Рис.7 получена в опыте с 400 мкм фольгой при той же постановке, что и зависимость 1. Этот результат хорошо согласуется с предположением о неустойчивости ДФ в ФИФО и приведенной

выше оценкой характерного размера неоднородностей. Поскольку толщина алюминиевой фольги на порядок превышает размер неоднородностей, то фронт УВ сглаживается к моменту выхода на границу с водяным окном.

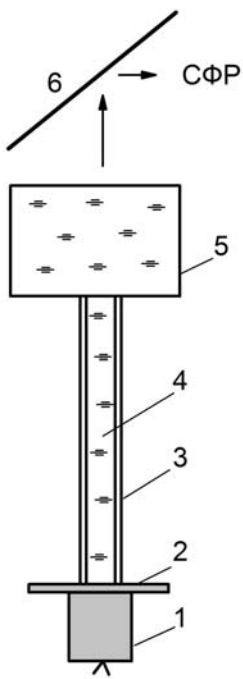
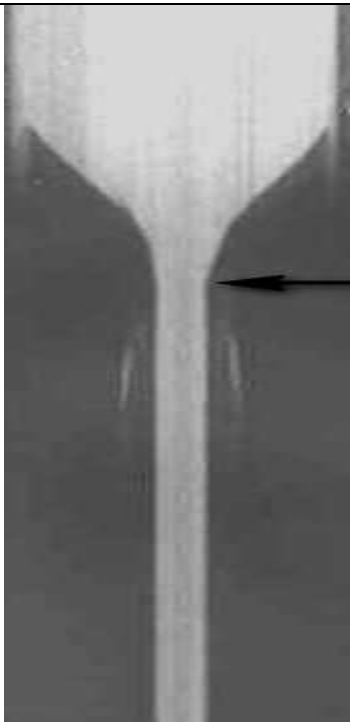
Следует отметить, что характер неустойчивости никак не связан с влиянием границы заряда, что подтверждается неизменностью качественного вида профилей скорости при изменении диаметра оболочки более чем в пять раз (Рис.8).

Для исследования наличия волн срыва реакции использовалась схема эксперимента, представленная на Рис.9. ВВ помещалось в стеклянную трубку (3) с внутренним диаметром 11 мм и толщиной стенки 1 мм. При выходе детонации в трубу большего диаметра (5) детонация будет затухать, если диаметр трубы (3) меньше критического диаметра без оболочки, в противном случае, распространится на весь объем трубы (5) [1]. Вид границы, разделяющей ДВ и нереагирующее ВВ, зависит от отсутствия или наличия волн срыва реакции: в первом случае граница ДФ гладкая, во втором – зигзагообразная [1]. Регистрация процесса перехода детонации из трубы в объем осуществлялась СФР в режиме щелевой развертки.

Результат эксперимента представлен на Рис.10. При выходе в трубу большего диаметра детонация заполняет весь объем. Во-первых, это означает, что внутренний диаметр трубы, равный 11 мм превышает критический диаметр ФИФО. Во-вторых, граница распространения ДВ является гладкой, без каких-либо признаков волн срыва реакции. Значит, ФИФО является примером ЖВВ, в котором, при негладком фронте волны срыва реакции на краю заряда отсутствуют.

Разбавление ЖВВ инертными жидкостями снижает детонационные параметры смеси и скорость химической реакции и при некоторой концентрации разбавителя приводит к появлению волн срыва реакции на краю заряда, даже если течение в исходном ВВ устойчиво. В ФИФО ДФ является пульсирующим, поэтому следовало бы ожидать увеличение размера

неоднородностей пропорционально концентрации разбавителя. Результаты экспериментов показывают, что влияние инертных разбавителей на устойчивость детонации в смесях ФИФО с метанолом и НБ может быть не столь однозначно.

 <p>Схема эксперимента по регистрации свечения ДФ в ФИФО при выходе из трубы в объем. 1 – инициирующий заряд ВВ; 2 – экран из ПММА; 3 – стеклянная трубка с внутренним диаметром 11 мм; 4 – ФИФО; 5 – объем; 6 – зеркало.</p>	 <p>Торцевая развертка свечения ДФ в ФИФО в эксперименте, схема которого показана на Рис.4.3. Стрелкой указан момент выхода детонации из трубы в объем.</p>
<p>Рис.9. Схема эксперимента по регистрации свечения ДФ в ФИФО при выходе из трубы в объем. 1 – инициирующий заряд ВВ; 2 – экран из ПММА; 3 – стеклянная трубка с внутренним диаметром 11 мм; 4 – ФИФО; 5 – объем; 6 – зеркало.</p>	<p>Рис.10. Торцевая развертка свечения ДФ в ФИФО в эксперименте, схема которого показана на Рис.4.3. Стрелкой указан момент выхода детонации из трубы в объем.</p>

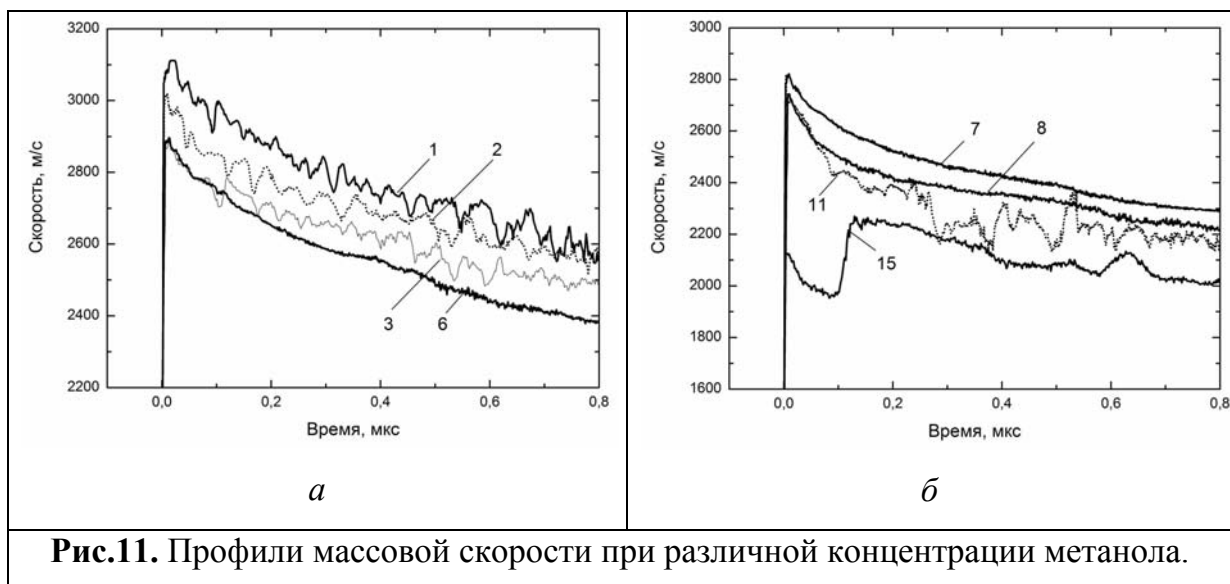
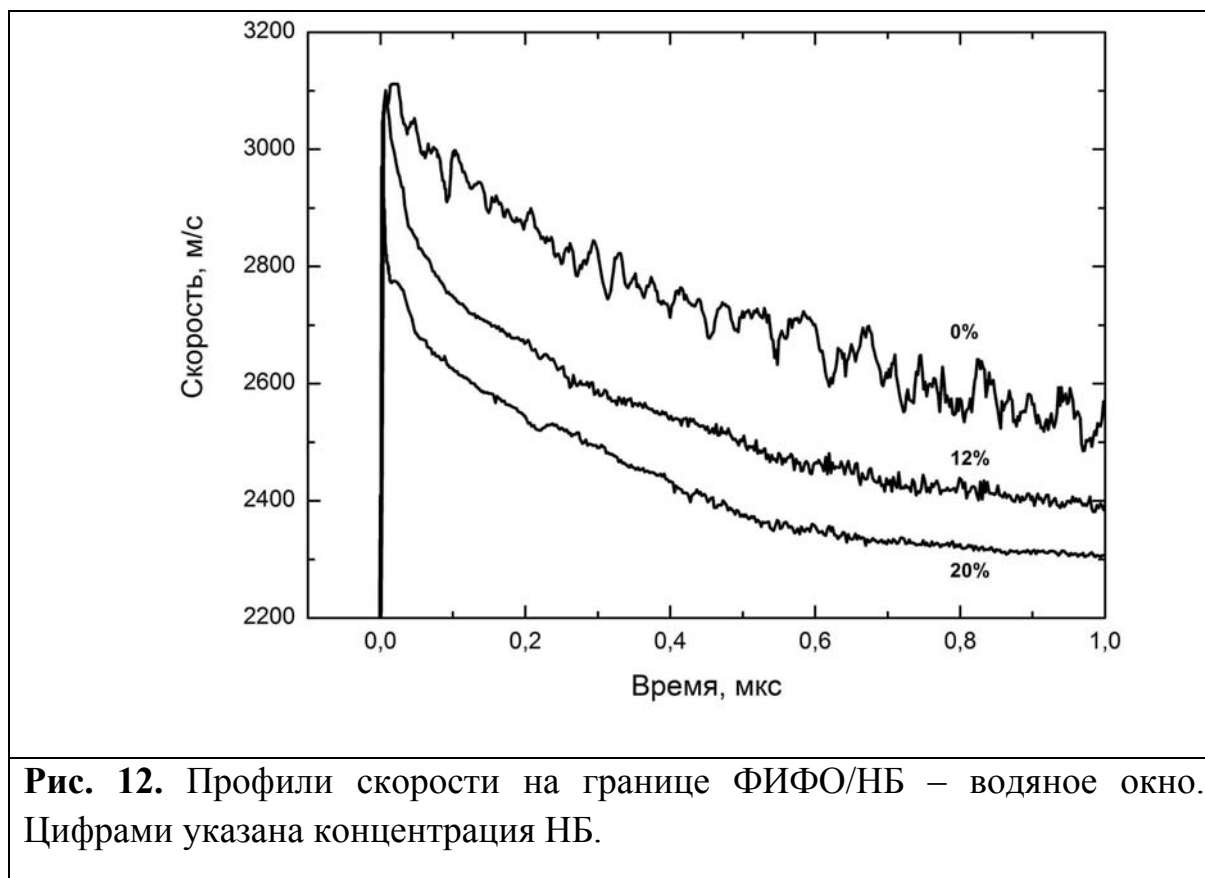


Рис.11. Профили массовой скорости при различной концентрации метанола.

Разбавление ФИФО метанолом снижает детонационные параметры смеси, поэтому следовало бы ожидать развитие неустойчивости ДФ. Но наблюдается более сложный характер влияния метанола на устойчивость. При концентрациях менее 10% течение остается практически неизменным: характер осцилляций, их частота и амплитуда такие же, как и в ФИФО (Рис.11а, зависимости 2,3).

Увеличение концентрации метанола в интервале 10 – 15% приводит к стабилизации ДФ (зависимости 6,7,8 на Рис.11). Когда концентрация достигает 20% (зависимость 11 на Рис.11б) и более, течение вновь становится неустойчивым.

Аналогичное явление стабилизации ДВ наблюдается в смеси ФИФО/НБ при массовой концентрации разбавителя от 10 до 20 %. Следует отметить резкое увеличение амплитуды химпика примерно в два раза при концентрации НБ 12%, по сравнению с ФИФО (Рис.12).



Возрастает также градиент скорости в зоне реакции, причем наиболее резкое падение скорости происходит за первые 10 нс. Высокая начальная скорость реакции за ударным скачком приводит к стабилизации фронта. Необычный характер изменения структуры зоны реакции при добавлении в ФИФО инертного разбавителя обусловлен частичной реакцией ВВ во фронте УВ. При добавлении НБ начальная скорость реакции и количество прореагировавшего во фронте ВВ уменьшается, и быстрая стадия реакции перемещается в химпик, что приводит к повышению его параметров в связи с приближением к ударной адиабате ВВ. Разбавление ФИФО НБ снижает давление в точке Чепмена-Жуге, это также приводит к увеличению амплитуды химпика.

Примеры торцевой развертки свечения фронта ДВ в смеси ФИФО/метанол приведены на Рис.13. Боковая граница ДВ гладкая (Рис.13а),

т.е. волны срыва реакции отсутствуют. Итак, ФИФО является примером ЖВВ с неустойчивым ДФ и отсутствием волн срыва реакции на краю заряда.

Разбавление ФИФО метанолом не приводит к возникновению волн срыва реакции при концентрации растворителя меньше 10%. Неустойчивость появляется в смеси ФИФО/метанол 90/10 (Рис.13б). При концентрации метанола 12% волны срыва реакции видны отчетливо, а при концентрации 15% волны срыва реакции распространяются до оси заряда (Рис.13в), что приводит к затуханию детонации.

Результаты аналогичных исследований по регистрации волн срыва реакции в смеси ФИФО/НБ приведены на Рис.14. При концентрации НБ 12% и ниже волны срыва реакции отсутствуют и течение на краю заряда является гладким. Но уже при 15% появляются волны срыва реакции. Глубина их распространения к центру заряда не велика, но факт существования регистрируется отчетливо.

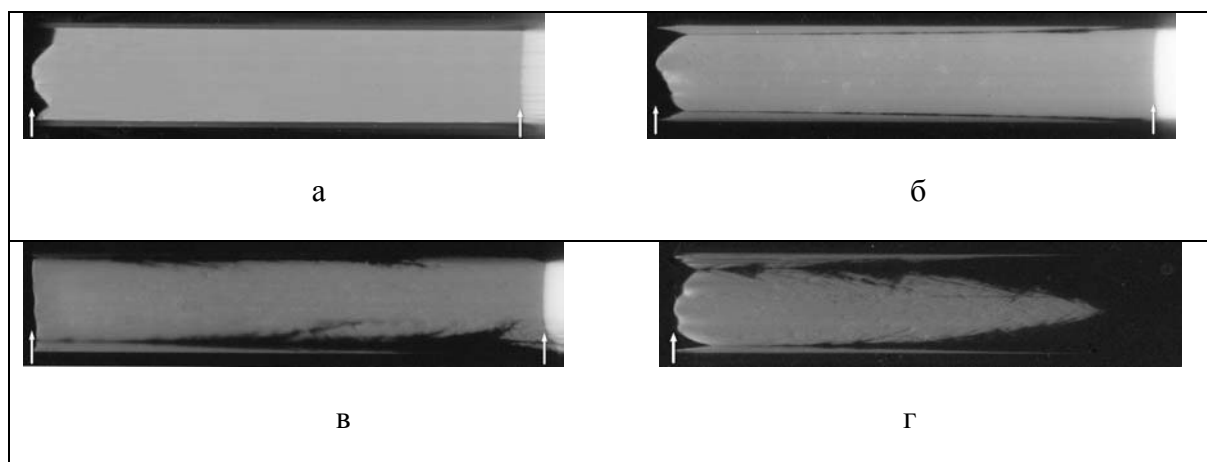
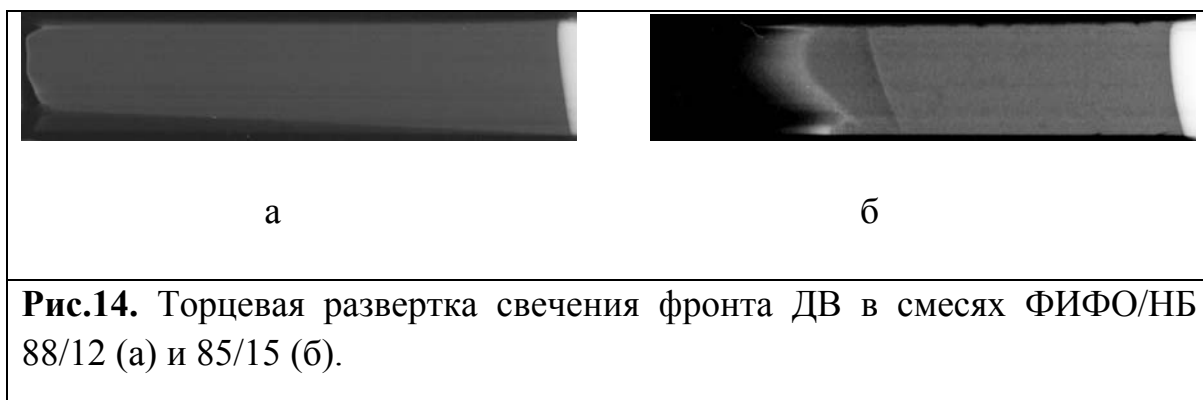


Рис.13 Торцевая развертка свечения фронта ДВ в ФИФО (а) и смесях ФИФО/метанол 90/10 (б) и 85/15 (в, г). Вертикальными стрелками указаны соответственно момент инициирования детонации и время выхода волны на свободный торец заряда.



ОСНОВНЫЕ ВЫВООДЫ

1. Исследованы структура зоны реакции, определены детонационные параметры смесей НМ с ДЭТА, а также исследована устойчивость к волнам срыва реакции на краю заряда. Показано, что для интерпретации экспериментальных данных необходимо учитывать возможность разложения ВВ непосредственно во фронте УВ. Определена критическая концентрация ДЭТА, равная 60%, при превышении которой детонация смеси невозможна.
2. Определены структура зоны реакции, детонационные параметры смесей ФИФО с метанолом и время реакции, равное 300 ± 50 нс. Установлено явление подавления неустойчивости течения при разбавлении ФИФО 10-15% метанола. При этом амплитуда химпика увеличилась примерно в два раза, а градиент скорости за ударным скачком вырос на порядок. Показано, что при увеличении концентрации метанола до 20 % и более процентов ДФ вновь становится неустойчивым вплоть до критической концентрации, равной 32%.
3. На основании предположения о возможности реакции ВВ непосредственно во фронте УВ предложено объяснение обнаруженных явлений резкого уменьшения амплитуды химпика в смеси и стабилизации неустойчивой ДВ в ФИФО при добавлении малых концентраций метанола.
4. Впервые доказано существование ДВ, в которых два вида неустойчивости проявляются в четырех возможных сочетаниях. Ранее же считалось

естественным, что если детонационный фронт устойчив, то отсутствуют явления срыва на краю заряда; либо пульсации фронта и волны срыва реакции должны проявляться одновременно.

Список цитируемой литературы

1. Дремин, А.Н. ДВ в конденсированных средах/ А.Н. Дремин [и др.] - М.: Наука, 1970. - 172с.
2. Finger M., Lee E., Helm F.H., Hayes B., Hornig H., McGuire R., Kahara M., Guidry M.. // Proceedings Sixth Symposium (International) on Detonation, , Coronado, California. August 24-27, 1976. - P.710-722.
3. Торунов С. И., Уткин А. В., Мочалова В. М., Гаранин В. А. Параметры стационарных ДВ в растворе ФИФО/НБ // Физика горения и взрыва, 2010, № 5, т. 46, с. 119-123.
4. Уткин А. В., Мочалова В. М., Торунов С. И., Колдунов С.А.. Неустойчивость ДВ в НМ и ФИФО // Физика горения и взрыва, 2015, т. 51, № 4, с. 87-93.
5. Уткин А.В., Мочалова В.М., Гаранин В.А. Исследование структуры ДВ в НМ и смеси НМ/метанол // Физика горения и взрыва. - 2012. - Т.48, № 3. - С. 115-121.
6. Engelke R.. Effect of a chemical inhomogeneity on steady-state detonation velocity// Phys.Fluids. 1980, V.23, pp.785-880.
7. Кондриков Б.Н., Козак Г.Д., Райкова В.М., Старшинов А.В.. О детонации НМ// ДАН СССР. 1977. Т.233, №3, с.402-405.
8. Уткин А.В., Мочалова В.М., Логвиненко А.А.. Влияние диэтилентриамин на структуру ДВ в НМ// Физика горения и взрыва, 2013, Т.49, №4, С.107-113.
9. Sheffield S.F., Dattelbaum D.M., Engelke R., Alcon R.A., Crouzet B., Robbins D.L., Stahl D.B., and Gustavsen R.L.. Homogeneous shock initiation process in neat and chemically sensitized nitromethane. 13-th International Detonation Symposium. Norfolk, Virginia, USA, 2006, pp.401-407.
10. Старшинов А.В., Кондриков Б.Н., Козак Г.Д., Райкова В.М. Гомогенный катализ при детонации НМ // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, ОИХФ АН СССР. 1977. С.73-76.
11. Engelke R., Schiferl D., Storm C.B., Earl W.L. Production of the Nitromethane Aci Ion by Static High Pressure // J.Phys.Chem. 1988. V.92. P.6815-6819.
12. Constantinou C.P., Winey J.M., Gupta Y.M. UV/Visible Absorption Spectra of Shocked Nitromethane-Amine Mixtures up to a Pressure of 14 GPa // J.Phys.Chem. 1994. V.98. P.7767-7776.

13. Gruzdkov Y.A., Gupta Y.M.. Mechanism of Amine Sensitization in Shocked Nitromethane // J.Phys.Chem. A. 1998. V.102, №13. P.2322-2331.
14. Gogulya M.F., Dolgoborodov A.Yu., Brazhnikov M.A., and Dushenok S.A.. Shock wave initiation of liquid explosives / Shock Compression of Condensed Matter – 1999, edited by M.D.Furnish, L.C.Chhabildas, and R.S.Hixson. 2000. American Institute of Physics, 1-56396923-8/00. p.903-906.

Основные результаты диссертации опубликованы в российских и международных журналах и сборниках трудов:

Статьи

1. Мочалова В.М., Уткин А.В., Гаранин В.А., **Торунов С.И.** Исследование структуры ДВ в ТНМ и его смесях с метанолом// Физика горения и взрыва, 2009, № 3, т. 45, с. 95-100.
2. Koldunov S.A., Ananin A.V., Garanin V.A., Sosikov V.A., **Torunov S.I.** Detonation parameters of nitromethane/methanol mixtures // Central European Journal of Energetic Materials, 2009, 6(1), pp. 7-14.
3. **Торунов С. И.**, Уткин А. В., Мочалова В. М., Гаранин В. А.. Параметры стационарных ДВ в растворе ФИФО/НБ// Физика горения и взрыва, 2010, № 5, т. 46, с. 119-123.
4. Уткин А.В., Мочалова В.М., **Торунов С.И.** Определение детонационных параметров ЖВВ // Химическая физика, 2011, Т.30, №6, С.72-77.
5. **Торунов С. И.**, Кулиш М. И., Мочалова В. М., Уткин А. В., Якушев В. В.. Экспериментальное исследование рельефа фронта стационарной детонации ЖВВ // Химическая физика, 2013, Т.32, №12, стр. 32-37.
6. Ananin A.V., Koldunov S.A., Garanin V.A., Sosikov V.A., **Torunov S.I.** Shock wave sensitivity of nitromethane mixtures with non-explosive liquids //International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. 2013, V1 I1.
7. Уткин А.В., Мочалова В.М., **Торунов С.И.**, Колдунов С.А.. Неустойчивость ДВ в НМ и ФИФО // Физика горения и взрыва, 2015. Т.51, № 4, С. 87-93.
8. Utkin A.V., Koldunov S.A., Mochalova V.M., **Torunov S.I.**, Lapin S.M.. The stabilization of unstable detonation waves for the mixture of nitromethane/methanol // Journal of Physics: Conference Series, 2015. V. 653, 012053.

Труды конференций

1. Уткин А.В., Мочалова В.М., Гаранин В.А., **Торунов С.И.** Параметры стационарных ДВ в растворе ФИФО/НБ// Международная конференция XI Харитоновские тематические научные чтения. Сборник тезисов докладов. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009, с.24-25.
2. Уткин А.В., Мочалова В.М., Гаранин В.А., **Торунов С.И.** Параметры стационарных ДВ в растворе ФИФО/НБ// Труды Международной конференции

XI Харитоновские тематические научные чтения. Под ред. А.Л.Михайлова. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009, с.37-42.

3. Mochalova V., Utkin A., Garanin V., **Torunov S.** Detonation wave parameters for FEFO/nitrobenzene solution// 16-th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. June 28-July 3, 2009, Nashville, Tennessee, USA. Bulletin of the American Physical Society, Vol.54, No.8, June 2009, P.44.

4. Mochalova V.M., Utkin A.V., Garanin V.A., **Torunov S.I.** Detonation wave parameters for FEFO/nitrobenzene solution// Proceedings of the Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. June 28-July 3, 2009, Nashville, Tennessee, USA, P.121-124.

5. Ананьин А.В., Колдунов С.А., Гаранин В.А., Сосиков В.А., **Торунов С.И.** Параметры детонации смесей НМ с НБ. // «Экстремальные состояния вещества. Детонация. УВ». Сборник тезисов докладов международной конференции XI Харитоновские тематические научные чтения 16 – 20 марта 2009 г., г. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 110-111.

6. Ananin A.V., Koldunov S.A., Garanin V.A., Sosikov V.A., **Torunov S.I.** Shock wave sensitivity of nitromethane mixtures with non-explosives liquids // “Advancements in Energetic Materials and Chemical Propulsion”, Book of Abstracts, p.174. Eighth International Symposium on Special topics in Chemical Propulsion, Nov. 2-6, 2009, Cape Town, South Africa.

7. Мочалова В.М., **Торунов С.И.**, Уткин А.В., Гаранин В.А. Экспериментальное определение параметров в точке Чепмена-Жуге для ЖВВ// Забабахинские научные чтения: сборник материалов X Международной конференции 15-19 марта 2010. – Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010. С.69-70.

8. Mochalova Valentina M., **Torunov Sergey I.**, Utkin Alexander V., Garanin Victor A. Detonation Wave Parameters in Nitromethane/Methanol and FEFO/Nitrobenzene// 14-th International Detonation Symposium. April 11-16, 2010, Coeur d’Alene, Idaho, USA. Office of Naval Research, Arlington Virginia, ONR-351-10-185, P. 327-332.

9. Уткин А. В., Мочалова В. М., **Торунов С. И.**, Гаранин В. А. Влияние диаметра заряда на детонационные параметры в ЖВВ// Shock waves in condensed matter, Saint-Petersburg – Novgorod, Russia, 5-10 September, 2010, с. 71-75.

10. Уткин А.В., Мочалова В.М., **Торунов С.И.** Определение детонационных параметров в ЖВВ// Международная конференция XIII Харитоновские тематические научные чтения. Сборник тезисов докладов. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ 2011, с.52-53.

11. Уткин А.В., Мочалова В.М., **Торунов С.И.** Определение параметров точки Чепмена-Жуге в ЖВВ// Международная конференция XIII Харитоновские тематические научные чтения. Сборник докладов. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ 2011, с.92-97.

12. Уткин А.В., Мочалова В.М., **Торунов С.И.** Влияние диэтилентриамина на структуру ДВ в НМ // Забобахинские научные чтения: сборник материалов XI Международной конференции. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. 2012. С.92-93.
13. **Торунов С.И.**, Кулиш М.И., Мочалова В.М., Уткин А.В., Якушев В.В. Экспериментальные методы исследования рельефа фронта стационарной детонации ЖВВ // Забобахинские научные чтения: сборник материалов XI Международной конференции. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. 2012. С.92-93.
14. Utkin A.V., Mochalova V.M., **Torunov S.I.** Influence of Diethylenetriamine on the Detonation Wave Structure in Nitromethane // Proceedings of the 9-th Conference on New models and hydrocodes for shock wave processes in condensed matter, 23-27 April 2012, Imperial College, London, GB, p. 105.
15. Utkin A.V., **Torunov S.I.**, Kulish M.I., Mochalova V.M., Yakushev V.V.. Experimental investigation of detonation wave instability for liquid HE // Proceedings of the 9-th Conference on New models and hydrocodes for shock wave processes in condensed matter, 23-27 April 2012, Imperial College, London, GB.
16. Колдунов С.А., Ананьин А.В., **Торунов С.И.**, Уткин А.В.. Влияние диэтилентриамина на распространение детонации в НМ и его смесях с невзрывчатыми жидкостями// Международная конференция XV Харитоновские тематические научные чтения. Сборник тезисов докладов. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ 2013, с.74-75.
17. Мочалова В.М., Уткин А.В., **Торунов С.И.** Влияние малых добавок ДЭТА на устойчивость ДВ в смеси НМ/инертный разбавитель// Международная конференция XV Харитоновские тематические научные чтения. Сборник тезисов докладов. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ 2013, с.24-25.
18. Мочалова В.М., Уткин А.В., **Торунов С.И.** Влияние малых добавок ДЭТА на устойчивость ДВ в смеси НМ/ацетон// Сборник тезисов докладов на II Всероссийской молодежной конференции «Успехи Химической Физики», 2013, с.24.
19. Уткин А.В., Мочалова В.М., **Торунов С.И.**, Колдунов С.А. Неклассические режимы детонации конденсированных ВВ// Тезисы докладов Всероссийской конференции «Взрыв в физическом эксперименте», Новосибирск, 16-20 сентября 2013, с.14-15.
20. Мочалова В.М., Уткин А.В., **Торунов С.И.** Влияние малых добавок ДЭТА на устойчивость ДВ в смеси НМ/инертный разбавитель// Сб. докладов на Международной конференции XV Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. УВ». – Саров, 2013, с.31-35.
21. Колдунов С.А., Ананьин А.В., **Торунов С.И.**, Уткин А.В.. Влияние диэтилентриамина на распространение детонации в НМ и его смесях с невзрывчатыми жидкостями// Экстремальные состояния вещества. Детонация.

- УВ. Международная конференция XV Харитоновские тематические научные чтения. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013. С.141-146.
22. Mochalova V., Utkin A., **Torunov S.**, Koldunov S. The instability of detonation waves for nitromethane and FEFO// 15-th International Detonation Symposium. July 13-18, 2014, San Francisco, California, USA. P.
23. Mochalova V., Utkin A., **Torunov S.**, Koldunov S.. The instability of detonation waves for nitrometane and FEFO// Fifteenth International Detonation Symposium. San Francisco, CA, July 13-18, 2014. ONR-43-280-15. P.852-858.
24. Utkin A.V., Mochalova V.M., **Torunov S.I.**, Koldunov S.A., Instability of detonation waves in FEFO/methanol mixtures// Books of Abstracts XXXI International Conference on “Equations of State for Matter”, March 1-6 2016, Elbrus, Russia, p.170.