

На правах рукописи



Шакула Михаил Юрьевич

**ВЛИЯНИЕ МИКРОСФЕР НА ДЕТОНАЦИОННЫЕ
СВОЙСТВА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ
НИТРОМЕТАНА**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Черноголовка-2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии РАН.

Научный руководитель: **Мочалова Валентина Михайловна**, кандидат физико-математических наук, ФГБУН ФИЦ ПХФ и МХ РАН, г. Черноголовка, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты: **Сатонкина Наталья Петровна**, доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник.

Ананьев Сергей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, ФГБУН Объединённый институт высоких температур РАН, г. Москва, старший научный сотрудник.

Ведущая организация: ФГБУН Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН.

Защита состоится «15» декабря 2026 г. в ____ на заседании диссертационного совета 24.1.108.02 при Федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии РАН по адресу: 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Проспект академика Семёнова д.7, зал заседаний, корпус 1/2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФИЦ ПХФ и МХ РАН: <https://icp-gas.ru>

Автореферат диссертации разослан «__» октября 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-
математических наук



Подлесный
Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Подавляющее большинство взрывчатых составов, применяемых на практике, являются гетерогенными. Кинетика их разложения определяется не однородным прогревом вещества за фронтом ударной волны, а локальными очагами ускоренного разложения – горячими точками, возникающими на неоднородностях структуры [1]. Именно образование и развитие горячих точек задаёт макрокинетику реакции, а тем самым чувствительность состава к ударно-волновому воздействию, критический диаметр детонации и пределы её распространения. Вместе с тем в реальных гетерогенных составах размер, форма и концентрация неоднородностей не контролируются, что затрудняет установление количественной связи между параметрами неоднородностей и характеристиками детонации.

Введение в жидкое взрывчатое вещество полых стеклянных микросфер (МС) снимает это ограничение. Микросферы задают неоднородности известного размера и концентрации, при схлопывании которых образуются горячие точки одинакового масштаба, а смесь остаётся пригодной для интерферометрических измерений. Система нитрометан (НМ) – микросферы представляет собой модельное гетерогенное взрывчатое вещество, на котором влияние контролируемой гетерогенности на структуру зоны реакции, параметры детонации и критический диаметр может быть исследовано количественно. Такие данные необходимы для построения макрокинетических соотношений и для верификации численных моделей детонации гетерогенных составов, развитие которых в последние годы опережает накопление экспериментальной базы.

Дополнительную значимость теме придаёт то, что полые микросферы широко применяются как сенсibiliзирующая добавка в промышленных взрывчатых составах. Сведения о пороге ударно-волнового инициирования, о критическом диаметре и о влиянии дополнительных воздушных полостей на детонационную способность смеси непосредственно относятся к вопросам безопасности обращения с такими составами.

Степень разработанности темы исследования. К настоящему времени сложилось представление о двух принципиально различных способах управления детонационной способностью нитрометана. Первый – химический: введение малых количеств аминов, изменяющих кинетику разложения на молекулярном уровне [2]. Второй –

физический: введение механических включений, при схлопывании которых образуются горячие точки, изменяющие макрокинетику реакции [3]. Оба подхода приводят к существенному снижению критического диаметра и давления инициирования, однако механизмы их действия различны.

Ранние работы показали, что добавление небольшого количества микросфер в нитрометан приводит к резкому уменьшению критического диаметра [4]. Также было изучено влияние размера, формы, материала и концентрации включений на скорость детонации и критический диаметр. Наибольший интерес представляют смеси с калиброванными микросферами: при схлопывании они дают горячие точки одинакового размера и температуры. Для смесей нитрометан/полиметилметакрилат (НМ/ПММА) с микросферами трёх калиброванных размеров установлено, что критический диаметр определяется не только объёмной долей микросфер, но и расстоянием между ними, а данные для всех размеров ложатся на единую зависимость, в которой критический диаметр обратно пропорционален удельной поверхности микросфер в единице объёма [5]. Механизм образования горячих точек при схлопывании микросферы за фронтом ударной волны рассмотрен в [6]: реакция инициируется в тонком слое взрывчатого вещества, окружающем микросферу, тогда как основная масса остаётся холодной.

Вместе с тем в перечисленных работах измерялась преимущественно скорость детонации, тогда как данные о структуре волнового профиля – наличии и длительности химического пика, амплитуде массовой скорости, времени реакции – представлены крайне ограниченно. Не исследована и область высоких концентраций микросфер: авторы [5] прямо указывают, что при объёмной доле включений выше 40-45 % в процессе приготовления смеси образуются дополнительные воздушные полости, и соответствующие точки были исключены из анализа. Между тем предельная объёмная доля, при которой монодисперсные сферы образуют неупорядоченную плотную упаковку, составляет около 0,64 [7], то есть качественное изменение взаимного расположения включений происходит именно в той области, которая осталась за пределами эксперимента. Недостаточно изучено и влияние самого загустителя, необходимого для удержания микросфер во взвеси, на течение в зоне реакции и на устойчивость детонационных волн.

Цель работы: установить влияние полых стеклянных микросфер на структуру зоны химической реакции детонационной волны,

критический диаметр и параметры детонации гелеобразного нитрометана во всём диапазоне концентраций микросфер вплоть до предельно достижимых, а также на характер ударно-волнового инициирования детонации.

Задачи работы:

1. Разработать методику, позволяющую определять критический диаметр детонации и скорость детонации в одном эксперименте на основе совместного применения лазерного интерферометра VISAR и электроконтактных датчиков.
2. Методом покадровой регистрации свечения детонационного фронта исследовать характер возникновения и эволюцию волн срыва реакции, определяющих критический диаметр гомогенного гелеобразного нитрометана.
3. Определить влияние полиметилметакрилата как загустителя на структуру зоны реакции, устойчивость детонационного фронта и параметры детонации нитрометана и выбрать на этой основе состав смеси с минимальным содержанием загустителя, обеспечивающим устойчивость смеси с микросферами к расслоению.
4. Провести регистрацию профилей массовой скорости и определить параметры детонации в смесях нитрометан/полиметилметакрилат/микросферы в зависимости от концентрации микросфер и диаметра заряда.
5. Установить характер зависимости критического диаметра смеси от пористости во всём диапазоне концентраций микросфер, включая область плотной упаковки, и предложить объяснение наблюдаемого поведения.
6. Исследовать ударно-волновое инициирование детонации в гелеобразном нитрометане и в его смесях с микросферами и определить влияние концентрации микросфер на порог инициирования и на характер развития детонации.

Научная новизна основных результатов:

Предложена и отработана методика, позволяющая в одном эксперименте определять критический диаметр детонации и скорость детонации по профилям массовой скорости. Признаком перехода через критический диаметр служит исчезновение химического пика и размытие фронта импульса сжатия.

Впервые прямой покадровой регистрацией свечения детонационного фронта установлено, что волны срыва реакции, определяющие

критический диаметр гомогенного гелеобразного нитрометана, возникают на границе заряда с оболочкой не одновременно по всему периметру, а локально, в отдельных областях, попеременно сокращающихся и разрастающихся.

Определено влияние полиметилметакрилата как загустителя на структуру зоны реакции и устойчивость детонационного фронта нитрометана и показано, что его введение, не нарушая гомогенности вещества, приводит к потере устойчивости детонационного фронта и к росту критического диаметра.

Получены профили массовой скорости и определены параметры детонации и время реакции в смесях гелеобразного нитрометана с полыми стеклянными микросферами во всём диапазоне концентраций вплоть до предельно достижимых, включая область плотной упаковки микросфер, ранее не исследованную из-за образования неконтролируемых воздушных полостей при приготовлении смесей.

Впервые установлен немонотонный характер зависимости критического диаметра детонации от пористости смеси с двумя локальными минимумами и предложено его объяснение, связывающее положение второго минимума с достижением плотной упаковки микросфер.

Впервые показано, что при высоких концентрациях микросфер характер развития детонации определяется условиями инициирования: в одной и той же смеси может быть реализована как детонация Чепмена - Жуге, так и стационарный низкоскоростной режим.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы. Полученные данные дают комплексное описание поведения гетерогенного жидкого взрывчатого вещества при варьировании концентрации микросфер, диаметра оболочки и условий инициирования и служат основой для построения и верификации кинетических моделей детонации гетерогенных ВВ. Установленная связь между взаимным расположением включений и критическим диаметром применима к широкому классу гетерогенных составов. Сведения о пороге ударно-волнового инициирования, о критическом диаметре и о влиянии дополнительных воздушных полостей должны учитываться при оценке безопасности обращения с промышленными составами, содержащими микросферы. Разработанная методика определения критического диаметра, включающая одновременное измерение скорости детонации и волнового профиля, применима к широкому классу гетерогенных конденсированных взрывчатых веществ.

Методология и методы, использованные в диссертационной работе. Метод исследований основан на регистрации и последующем анализе полных профилей массовой скорости с наносекундным временным разрешением, получаемых многоточечным лазерным доплеровским интерферометром VISAR [8], в сочетании с измерением скорости детонации электроконтактными датчиками. Пространственная структура детонационного фронта изучалась сверхскоростной фоторегистратией в режиме щелевой развёртки на установке СФР и покадровой съёмкой свечения фронта электронно-оптической камерой НАНОГЕЙТ-22/16 с экспозицией 10 нс на кадр. Морфология и распределение микросфер по размерам контролировались методом растровой электронной микроскопии, начальная плотность смесей – взвешиванием.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика одновременного определения критического диаметра детонации и скорости детонации, основанная на совместном применении лазерного интерферометра VISAR и электроконтактных датчиков, позволяющая регистрировать изменение структуры профиля массовой скорости в окрестности критического диаметра.
2. Локальный характер возникновения волн срыва реакции в гомогенном гелеобразном нитрометане, при котором очаги срыва появляются в отдельных областях границы заряда с оболочкой, попеременно сокращаясь и разрастаясь.
3. Потеря устойчивости детонационного фронта нитрометана при введении полиметилметакрилата, сопровождающаяся появлением осцилляций на профилях массовой скорости с формированием характерной ячеистой структуры фронта.
4. Соответствие структуры зоны реакции при детонации смесей нитрометан/ полиметилметакрилат/микросферы теории Зельдовича - Неймана - Дёринга во всём исследованном диапазоне концентраций микросфер.
5. Немонотонный характер зависимости критического диаметра детонации смеси от пористости с двумя локальными минимумами, разделёнными локальным максимумом, и связь этой зависимости с пространственным распределением микросфер.
6. Качественное изменение характера ударно-волнового инициирования при введении микросфер, проявляющееся в исчезновении периода индукции теплового взрыва, снижении порога инициирования и возможности реализации как режима детонации

Чепмена – Жуге, так и низкоскоростного режима в зависимости от амплитуды инициирующей ударной волны.

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

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность обеспечивается воспроизводимостью экспериментальных данных, согласованностью результатов, полученных независимыми методами регистрации, использованием апробированных методик и соответствием полученных для нитрометана значений данным научной литературы.

По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ, из них 6 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в Scopus и Web of Science, и 11 работ в сборниках докладов конференций.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийской конференции «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения» (г. Новосибирск, 2023), XVIII International Workshop on High Energy and Special Materials HEMs-2023 (Pune, India, 2023), X International Voevodsky Conference (г. Новосибирск, 2022), XVI и XVII Всероссийских симпозиумах по горению и взрыву (г. Суздаль, 2022 и 2024), II Всероссийской школе НЦФМ по газодинамике, физике взрыва и экстремальным состояниям вещества (г. Саров, 2025), 14th International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics (Beijing, China, 2025), X Всероссийской конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (г. Новосибирск, 2025), XXXVII Симпозиуме «Современная химическая физика» (г. Туапсе, 2025), XLI Fortov International Conference on Equations of State for Matter ELBRUS-2026 (Эльбрус, 2026), конференции «Современная химическая физика – на стыке физики, химии и биологии» (г. Черноголовка, 2026).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 137 страницах. Содержит 57 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает 113 библиографических наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе изложены основы классической теории детонации Зельдовича – Неймана – Дёринга [9], представления о механизме образования горячих точек, об ударно-волновом инициировании детонации и о природе критического диаметра. Отдельный раздел посвящён современному состоянию исследований сенсibilизации нитрометана и детонации гетерогенных смесей на его основе; на его основе сформулированы нерешённые вопросы, определившие постановку задачи.

Во второй главе приведено описание экспериментальных методик. Описаны электроконтактные датчики, сверхскоростной фоторегистратор СФР, электронно-оптическая камера НАНОГЕЙТ-22/16 и многоточечный лазерный доплеровский интерферометр VISAR, которые используются при проведении экспериментов в данной работе. Изложены принципы обработки интерферограмм и оценки погрешностей.

Третья, четвёртая и пятая главы содержат основные экспериментальные результаты работы.

Третья глава посвящена детонационным свойствам смеси нитрометана с полиметилметакрилатом (гелеобразный нитрометан), который используется в качестве загустителя для обеспечения однородного распределения микросфер в объеме вещества. Эксперименты проводились на цилиндрических зарядах в стеклянных оболочках различного внутреннего диаметра (Рис. 1). Детонация инициировалась плосковолновым генератором, регистрация волновых профилей осуществлялась интерферометром VISAR с торца заряда через прозрачное окно с отражающей алюминиевой фольгой толщиной 7 мкм.

Для чистого нитрометана плотностью 1,12 г/см³ профили массовой скорости гладкие, что свидетельствует об устойчивости детонационного фронта. Время химической реакции составляет около 50 нс. Для нитрометана массовая скорость и давление в точке Чепмена – Жуге равны $1,85 \pm 0,05$ км/с и $13,1 \pm 0,4$ ГПа, критический диаметр детонации составляет 13,5 мм, что согласуется с литературными данными [10].

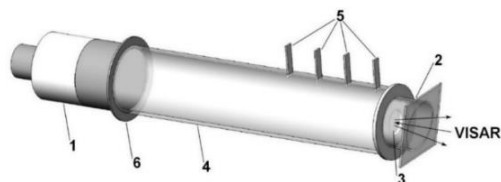


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – генератор плоских волн и прессованный заряд гексогена, 2 – водяное окно, 3 – алюминиевая фольга, 4 – оболочка с исследуемым веществом, 5 – электроконтактные датчики, 6 – стальная пластина.

На Рис. 2 показаны профили массовой скорости, полученные на границе гелеобразного нитрометана с водой с использованием алюминиевой фольги толщиной 7 мкм. Как и в чистом нитрометане, профили скорости соответствуют классической теории детонации: за скачком ударной волны массовая скорость уменьшается, и в зоне реакции формируется химпик. Растворение в нитрометане полиметилметакрилата меняет картину по сравнению с чистым нитрометаном.

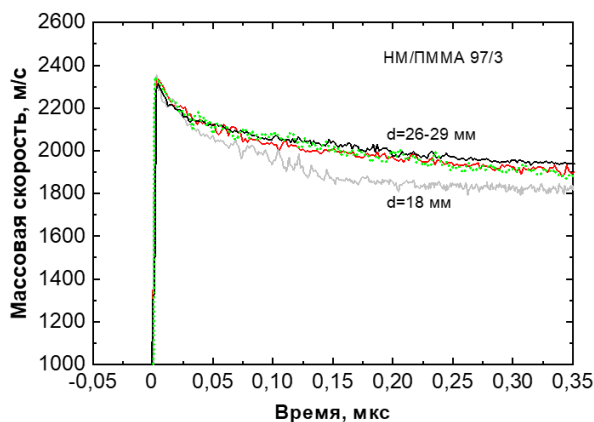


Рис. 2 – Профили массовой скорости для смеси НМ/ПММА 97/3 при различных внутренних диаметрах оболочки.

На профилях скорости появляются осцилляции, нарастающие по мере уменьшения диаметра заряда; их характерный размер составляет 5-10 мкм и сопоставим с толщиной отражающей фольги. Критический диаметр возрастает до 16,5 мм при 3 вес.% ПММА и

примерно до 19 мм при 4 вес.%. Параметры детонации снижаются, что особенно заметно при 4 вес.%. Смесь при этом остаётся гомогенной. Оптимальным оказался состав НМ/ПММА 97/3: он удерживает микросферы во взвеси в течение суток, при этом снижение параметров детонации по сравнению с чистым нитрометаном минимально.

Регистрация свечения детонационного фронта позволила выяснить механизм, определяющий критический диаметр гомогенных составов. Фоторазвёртки СФР и покадровая съёмка камерой НАНОГЕЙТ показали, что волны срыва реакции возникают на границе заряда с оболочкой не одновременно по всему периметру, а локально, в отдельных областях (Рис. 3). Эти области попеременно сокращаются, практически исчезая, и снова разрастаются, достигая при содержании ПММА 3-4 вес.% почти оси заряда. Именно замедление кинетики реакции при введении загустителя приводит к росту области срыва и, как следствие, к увеличению критического диаметра детонации.

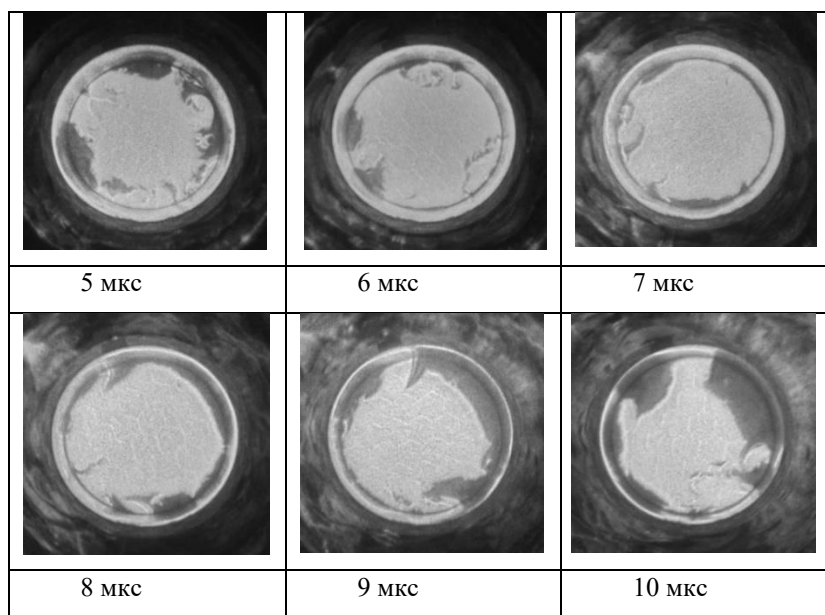


Рис. 3 – Свечение детонационного фронта смеси НМ/ПММА 97/3, зарегистрированное камерой НАНОГЕЙТ-22/16 с экспозицией 10 нс на кадр.

Четвёртая глава посвящена определению детонационных параметров и критического диаметра смесей гелеобразного нитрометана с полыми стеклянными микросферами. Использовались микросферы (C15, 3М Inc.) со средним диаметром 70 ± 20 мкм и толщиной стенки 1 мкм при плотности $0,14$ г/см³; концентрация варьировалась от 0 до 30 вес.%. Пористость смеси ψ определялась как объёмная доля газа, заключённого в микросферах, и рассчитывалась по аддитивной схеме.

Экспериментальные результаты для смеси гелеобразного нитрометана с содержанием МС от 0 до 30 вес.% представлены в Таблице 1. Она включает состав смеси в весовых процентах; плотность ρ_0 , рассчитанную аддитивным методом; критический диаметр детонации $d_{кр}$; идеальную скорость детонации $D_{ид}$ (аппроксимированная скорость детонации при бесконечном диаметре заряда), массовую скорость u и давление P в точке Чепмена – Жуге, соответствующие максимальному диаметру заряда в проведенных экспериментах.

Таблица 1. Параметры смеси гелеобразного НМ с полыми МС.

№	МС, вес.%	ρ_0 , г/см ³	$d_{кр}$, мм	$D_{ид}$, км/с	u , км/с	P , ГПа
1	0,00	1,120	16,5±0,1	6,30±0,02	1,84±0,09	13,0±0,7
2	0,50	1,080	12,5±0,1	6,20±0,02	1,65±0,08	10,8±0,5
3	2,00	0,980	6,0±0,1	5,70±0,02	1,59±0,08	8,7±0,4
4	5,00	0,830	5,0±0,1	4,98±0,02	1,43±0,07	5,8±0,3
5	8,00	0,720	3,5±0,1	4,40±0,02	1,35±0,07	4,1±0,2
6	10,00	0,659	4,5±0,1	4,00±0,02	1,08±0,05	2,8±0,1
7	13,00	0,586	5,0±0,1	3,67±0,02	1,00±0,05	2,1±0,1
8	16,00	0,528	4,7±0,1	3,70±0,02	1,10±0,06	2,1±0,1
9	18,00	0,496	4,3±0,1	4,05±0,02	1,30±0,07	2,5±0,1
10	20,00	0,467	5,1±0,1	3,45±0,02	1,10±0,06	1,8±0,1
11	24,00	0,418	9,0±0,4	2,66±0,03	0,70±0,04	0,80±0,04
12	30,00	0,361	16,0±1,0	2,66±0,03	0,65±0,03	0,60±0,03

Профили скорости, зарегистрированные на границе раздела взрывчатое вещество/вода для гелеобразного нитрометана с 0,5, 5 и 13 вес.% МС в зарядах различного диаметра, представлены на Рис. 4.

Цифры обозначают внутренний диаметр стеклянной оболочки в мм. Профили скорости для смесей с различными концентрациями МС показывают, что добавление микросфер качественно не меняет структуру зоны реакции гелеобразного нитрометана. Это соответствует теории Зельдовича – Неймана – Дёринга, предсказывающей образование химпика – после начального скачка ударной волны наблюдается падение скорости по всей зоне реакции. Резкое увеличение скорости через 100 нс после начального скачка ударной волны (эта особенность отмечена стрелкой на Рис. 4) обусловлено циркуляцией волн сжатия и разрежения в фольге толщиной 400 мкм и не связано со структурой детонационной волны. Использование данной фольги вызвано необходимостью усреднения неоднородностей смеси, обусловленной введением микросфер.

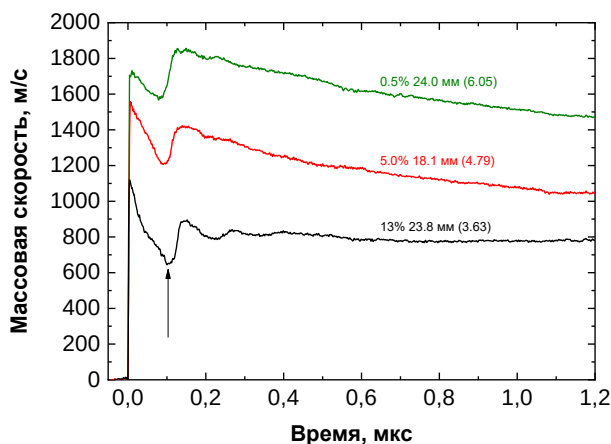


Рис. 4 – Профили массовой скорости для смесей НМ/ПММА/МС при максимальном диаметре заряда и различных концентрациях микросфер. В скобках приведена скорость детонации смеси.

В отличие от гомогенных ВВ параметры детонации смеси существенно зависят от диаметра заряда. При уменьшении внутреннего диаметра оболочки скорость детонации, массовая скорость и давление в точке Чепмена – Жуге падают (Таблица 1, Рис. 5), а вблизи критического диаметра химпик исчезает, и фронт импульса сжатия размывается (Рис. 5). Последнее положено в основу методики определения критического диаметра, позволяющей в одном эксперименте получить и критический диаметр, и скорость детонации.

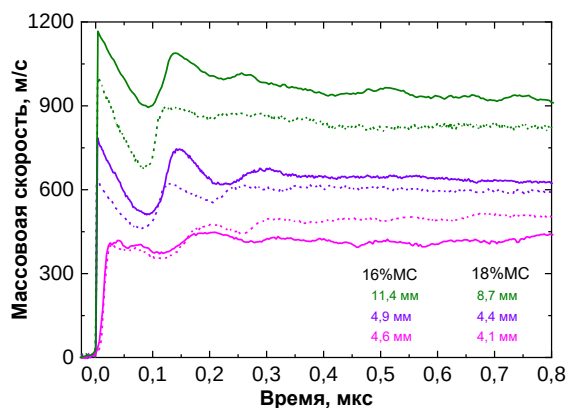


Рис. 5 – Профили массовой скорости для смеси (НМ/ПММА)/МС (97/3)/16 (прерывистая кривая) и (97/3)/18 (сплошная кривая) при различных внутренних диаметрах стеклянной оболочки.

Характер зависимости критического диаметра детонации от пористости смеси приведен на Рис. 6. Общая форма зависимости критического диаметра от пористости U-образная. Добавление микросфер резко снижает критический диаметр нитрометана: уже 2 вес.% уменьшают его с 16,5 до 6,0 мм.

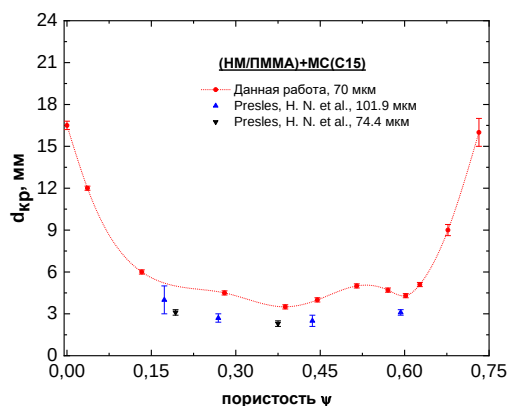


Рис. 6 – Критический диаметр детонации смеси НМ/ПММА/МС в зависимости от пористости смеси.

Одновременно, снижая начальную плотность заряда, микросферы уменьшают параметры в точке Чепмена – Жуге: при 30 вес.% скорость детонации падает с 6,3 до 2,66 км/с, давление – до 0,6 ГПа, и критический диаметр вновь становится сравнимым со значением для гелеобразного нитрометана.

Следует отметить, что эта зависимость немонотонна. Помимо общей U-образной формы она имеет два локальных минимума – при 8 вес.% микросфер ($\psi = 0,388$, $d_{кр} = 3,5$ мм) и при 18 вес.% ($\psi = 0,602$, $d_{кр} = 4,3$ мм), – разделённых локальным максимумом при 13 вес.% ($\psi = 0,515$, $d_{кр} = 5,0$ мм). Переход от 13 к 18 вес.% сопровождается не снижением, а ростом скорости детонации и массовой скорости, что видно также на Рис. 5 и в Таблице 1.

Для интерпретации этого результата следует рассмотреть взаимное расположение микросфер в объёме смеси. Расчёт в приближении простой кубической решётки [5] показывает, что при 2 вес.% ($\psi = 0,133$) микросфер расстояние между их поверхностями составляет около 39 мкм. При концентрации менее 8 вес.% ($\psi < 0,388$) микросферы разделены слоями взрывчатого вещества, толщина которых много больше толщины их стенки (1 мкм). Горячие точки формируются независимо друг от друга, и увеличение их числа сокращает время реакции и резко уменьшает критический диаметр, с 16,5 мм для гелеобразного нитрометана до 3,5 мм при 8 вес.%. Одновременно действует противоположный фактор: микросферы снижают начальную плотность и энергосодержание смеси, уменьшая давление и температуру за фронтом детонационной волны. До 8 вес.% преобладает первый фактор, а выше, соответственно, второй. Конкуренция между ними формирует первый, пологий минимум критического диаметра. Существенно, что именно к этой концентрации зазор между микросферами сокращается до 6 мкм и становится сравним с масштабом области прогрева вокруг схлопывающейся оболочки. Очаги перестают быть независимыми, и дальнейшее увеличение их числа уже не даёт пропорционального прироста суммарной поверхности реагирования. При 12 вес.% микросферы приходят в соприкосновение. Этой концентрации отвечает пористость около 0,50, то есть возникновение контакта соответствует локальному максимуму критического диаметра. Предельная плотность неупорядоченной плотной упаковки монодисперсных сфер, равная 0,64 [7], отвечает пористости 0,605 и достигается при 18,2 вес.% микросфер. С учётом реального распределения микросфер по размерам расчётный интервал составляет 18-20 вес.%. Наблюдаемый второй минимум, приходящийся на $\psi = 0,602$, попадает в этот интервал. Физически это состояние

выделено тем, что каждая микросфера находится в контакте с соседними, но всё пространство между ними по-прежнему заполнено взрывчатым веществом. При схлопывании контактирующих оболочек в точках их соприкосновения формируются кумулятивные микроструи [6]: образующийся очаг оказывается не сферическим, а вытянутым, с существенно большей поверхностью реагирования, чем при схлопывании одиночной изолированной поры. Появление этого дополнительного механизма образования горячих точек компенсирует продолжающееся снижение энергосодержания смеси и приводит к повторному уменьшению критического диаметра.

Таким образом, можно выделить несколько режимов. При малых концентрациях микросферы разделены слоями взрывчатого вещества, горячие точки формируются независимо, и рост их числа сокращает время реакции и критический диаметр. При 10-13 вес.% выигрыш от увеличения числа очагов исчерпывается, тогда как доля инертного стекла продолжает расти, что и формирует локальный максимум. При 18-20 вес.% реализуется описанный выше механизм с кумулятивными микроструями в точках контакта оболочек. При концентрациях выше 20 вес.% плотная упаковка недостижима без деформации оболочек, в смеси появляются дополнительные полости, свободные от взрывчатого вещества.

Немонотонность изменения детонационных свойств смеси проявляется не только в критическом диаметре. На Рис. 7 приведена скорость детонации смесей с содержанием микросфер от 10 до 24 вес.% в зависимости от диаметра оболочки; символами со стрелкой отмечены опыты, в которых детонация срывалась. С ростом концентрации микросфер кривые смещаются вниз, что отражает снижение энергосодержания смеси. Однако при переходе от 16 к 18 вес.% наблюдается обратное: кривая для 18 вес.% ($\psi = 0,602$) лежит выше, а срыв детонации происходит при меньшем диаметре заряда. Это соответствует второму минимуму на зависимости, представленной на Рис. 6. Таким образом, особенность при 18 вес.% согласованно проявляется в трёх независимо измеряемых величинах: в критическом диаметре, в массовой скорости и в скорости детонации.

Предложенная интерпретация допускает прямую проверку: искусственное внесение воздушных пузырьков должно переводить смесь с 18 вес.% микросфер в режим, характерный для больших концентраций. Для этого смесь того же состава помещалась в оболочку того же диаметра без приложения дополнительного внешнего давления, в результате чего в ней оставались воздушные пузырьки, а плотность оказывалась ниже расчётной. Скорость детонации при этом снижается

примерно на 1,1 км/с. Соответствующие профили массовой скорости приведены на Рис. 8.

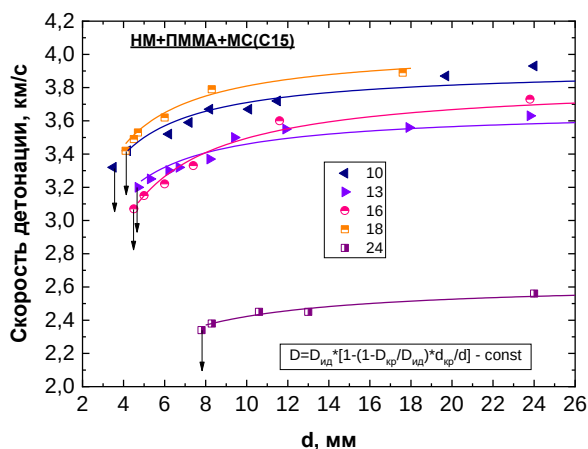


Рис. 7 – Скорость детонации смеси гелеобразного нитрометана с микросферами как функция диаметра заряда при различных концентрациях микросфер.

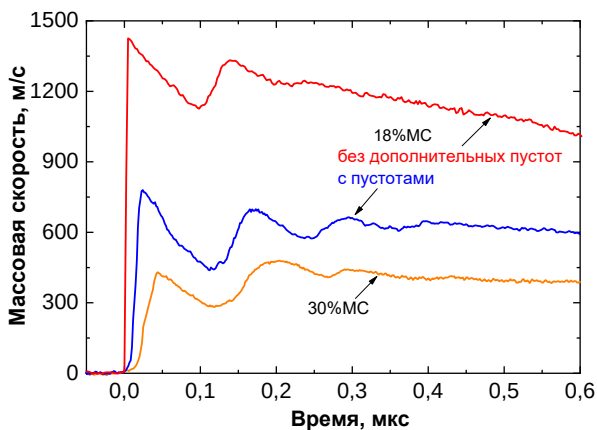


Рис. 8 – Профили массовой скорости для смеси НМ/ПММА/МС (97/3)/18 (с и без воздушных пузырьков) и (97/3)/30 при одинаковом диаметре стеклянной оболочки.

Амплитуда профиля для смеси с 18 вес.% микросфер и воздушными пузырьками оказывается ниже, чем для той же смеси без пузырьков, и ближе к амплитуде для смеси с 30 вес.% микросфер. Кроме того, вместо резкого ударного скачка наблюдается размытый фронт, характерный для высокопористых сред. По этому признаку профиль также ближе к смеси с 30 вес.%. Таким образом, нарушение сплошности матрицы взрывчатого вещества переводит смесь в режим, характерный для области за пределами плотной упаковки, что подтверждает связь второго минимума критического диаметра именно с плотной упаковкой микросфер при сохранении сплошности матрицы.

Пятая глава посвящена ударно-волновому инициированию детонации в нитрометане и его смесях с микросферами. Иницирующая ударная волна формировалась при соударении алюминиевого ударника толщиной 2-10 мм, разогнанного до скорости 1,13-2,5 км/с, с экраном из алюминия или меди (Рис. 9). Амплитуда волны задавалась скоростью ударника и материалом экрана.

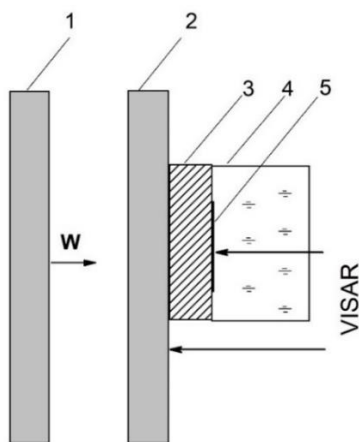


Рис. 9 – Схема экспериментов по ударно-волновому инициированию детонации: 1 – ударник, 2 – экран, 3 – образец, 4 – водяное окно, 5 – отражающая фольга.

В каждом опыте одновременно регистрировались скорость на границе экрана с образцом и скорость на границе образца с водяным окном; изменяя толщину образца, прослеживали эволюцию импульса. Как и при исследовании стационарного режима, при исследовании

ударно-волнового инициирования смесей с микросферами применялась отражающая фольга толщиной 400 мкм, поскольку неоднородность фронта с масштабом порядка 100 мкм не сглаживается тонкой фольгой. Для гомогенного гелеобразного нитрометана при амплитуде инициирующей волны 10,3 ГПа наблюдается классическая картина, характерная для жидких гомогенных ВВ [11]: за фронтом ударной волны следует период индукции теплового взрыва длительностью около 0,3 мкс, после чего в прогретом слое вблизи границы с экраном происходит вспышка и формируется пересжатая детонационная волна, догоняющая ударный фронт.

Введение микросфер качественно меняет картину, что демонстрируют результаты экспериментов, представленных на Рис. 10. Выраженный период индукции отсутствует, реакция начинается непосредственно за фронтом ударной волны, а порог инициирования снижается в несколько раз: для смеси с 5 вес.% микросфер детонация развивается уже при амплитуде 1,1 ГПа. На профилях видно постепенное усиление волны: скорость за фронтом монотонно возрастает, и на расстоянии около 10 мм устанавливается режим со скоростью $4,85 \pm 0,02$ км/с, давлением $5,8 \pm 0,1$ ГПа и массовой скоростью $1,43 \pm 0,02$ км/с, отвечающий детонации Чепмена – Жуге для этой смеси.

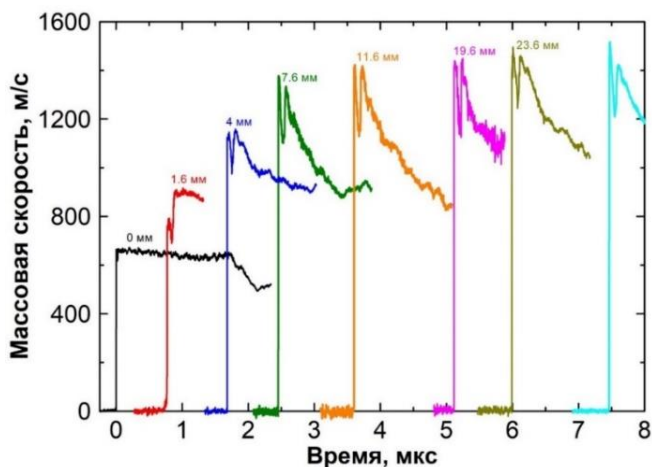


Рис. 10 – Профили массовой скорости на границе с водой для смеси нитрометана с 5 вес.% микросфер на различных расстояниях от экрана.

При концентрации 8 вес.% характер развития детонации оказывается зависящим от условий инициирования. При той же амплитуде 1,1 ГПа начиная с расстояния 4,3 мм устанавливается режим с постоянной скоростью 3,0 км/с (Рис. 11), существенно меньшей скорости детонации Чепмена – Жуге для этой смеси (4,25 км/с), то есть реализуется низкоскоростной режим. При увеличении амплитуды инициирующей волны до 1,7 ГПа в той же смеси на расстоянии 7,6 мм регистрируется скорость 4,2 км/с, практически совпадающая с параметрами Чепмена – Жуге.

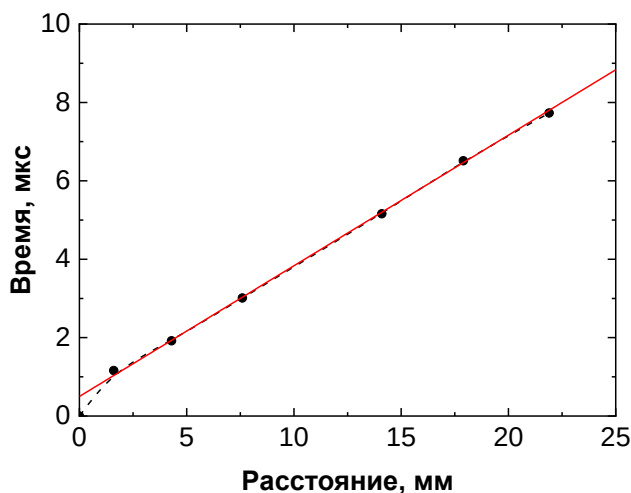


Рис. 11 – Эволюция волнового профиля в координатах t – x для смеси нитрометана с 8 вес.% микросфер при амплитуде инициирующей волны 1,1 ГПа.

Полученные результаты позволяют связать наблюдаемые режимы с механизмом разложения смеси. В гомогенном нитрометане реакция имеет тепловую природу и развивается во всём объёме прогретого за фронтом слоя, чем и определяется период индукции. Введение микросфер меняет не количественные характеристики, а сам механизм: реакция локализована в очагах, температура которых превышает среднее значение по объёму. Этим объясняются и исчезновение периода индукции, и снижение порога инициирования в несколько раз. Возможность реализации двух различных режимов при одном и том же составе связана с тем, что при высоком содержании микросфер энерговыделение в очагах оказывается достаточным для

поддержания самоподдерживающегося фронта, но недостаточным для быстрого выхода на режим Чепмена – Жуге. При слабом инициировании устанавливается стационарный низкоскоростной режим, в котором в зоне реакции реагирует лишь часть вещества, прилегающая к очагам. Увеличение амплитуды инициирующей волны повышает скорость реакции в очагах и долю прореагировавшего вещества, что и обеспечивает выход на режим Чепмена – Жуге. Таким образом, при высоких концентрациях микросфер детонационная способность смеси определяется не только её составом, но и условиями инициирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена исследованию развития детонации в жидких взрывчатых веществах на основе нитрометана с полыми стеклянными микросферами. Определены параметры детонации гелеобразного нитрометана, а также изучены стационарный детонационный режим и инициирование детонации гетерогенной смеси нитрометана с микросферами в широком диапазоне изменения их концентраций. Благодаря применению оптических методов с наносекундным временным разрешением получены надёжные данные о структуре и параметрах детонационных волн исследуемых смесей.

По результатам работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Установлена оптимальная доля загустителя ПММА, при которой детонационные параметры нитрометана снижаются незначительно, а полые стеклянные микросферы удерживаются в смеси в течение суток. Показано, что даже 2 вес.% ПММА приводят к потере устойчивости детонационного фронта, проявляющейся в осцилляциях на профилях массовой скорости, и к росту критического диаметра.
2. Разработана методика определения критического диаметра детонации с помощью лазерного интерферометра при одновременном измерении скорости детонации, позволяющая получать оба параметра в одном эксперименте. Признаком перехода через критический диаметр служит исчезновение химического пика и размытие фронта импульса сжатия.
3. Проведено сопоставление результатов, полученных тремя оптическими методами регистрации – лазерной интерферометрией, сверхскоростной фоторегистацией в режиме щелевой развёртки и покадровой съёмкой. Показана взаимодополняемость и

согласованность методов. Установлено, что волны срыва реакции, определяющие критический диаметр гомогенных составов, возникают локально, в отдельных областях границы заряда с оболочкой, попеременно сокращающихся и разрастающихся.

4. Установлено соответствие структуры зоны реакции теории Зельдовича – Неймана – Дёринга для смесей на основе нитрометана во всём исследованном диапазоне концентраций микросфер 0-30 вес.%. Время реакции при этом возрастает примерно вчетверо по сравнению с чистым нитрометаном, что связано не только с химической реакцией, но и с более длительным процессом схлопывания микросфер.
5. Показана существенная зависимость параметров детонации от диаметра оболочки заряда при любой концентрации микросфер, что характерно для гетерогенных взрывчатых веществ.
6. Экспериментально определены критический диаметр и параметры детонации в гомогенных и гетерогенных смесях на основе нитрометана в диапазоне концентраций микросфер 0-30 вес.%. Обнаружена немонотонность зависимости критического диаметра от пористости с двумя локальными минимумами и локальным максимумом. Положение второго минимума связано с достижением плотной упаковки микросфер.
7. Показано, что при высоких концентрациях микросфер возможно образование дополнительных воздушных полостей, приводящее к снижению скорости детонации, массовой скорости и давления и к росту критического диаметра. Для их исключения необходимо заполнять оболочку смесью под давлением.
8. Получены данные об ударно-волновом инициировании гетерогенной смеси. Выявлено значительное увеличение чувствительности по сравнению с чистым нитрометаном и исчезновение периода индукции теплового взрыва. Установлено, что при концентрации 8 вес.% варьированием условий инициирования возможно получить как стационарную детонацию Чепмена – Жуге, так и низкоскоростную детонацию.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дремин А.Н. и др. Детонационные волны в конденсированных средах / М.: Наука, 1970. 164 с.
- [2] Engelke R. et al. // *Physics of Fluids*. 2005. Vol. 17. p. 096102.
- [3] Dattelbaum D.M. et al. // *AIP Conference Proceedings*. 2009. p. 263.

- [4] Курбангалина Р.Х. // Прикладная механика и техническая физика. 1969. Т. 10. с. 656.
- [5] Presles H.N. et al. // Shock Waves. 1995. Vol. 4. p. 325.
- [6] Khasainov B.A. et al. // 10th International Symposium on Detonation. 1993.
- [7] Torquato S. et al. // Physical Review Letters. 2000. Vol. 84. p. 2064.
- [8] Barker L.M. et al. // Journal of Applied Physics. 1972. Vol. 43. № 11. p. 4669.
- [9] Зельдович Я.Б., Компанеев А.С. Теория детонации / М.: Гостехиздат, 1955. 268 с.
- [10] Campbell A.W. et al. // Physics of Fluids. 1961. Vol. 4. p. 498.
- [11] Дремин А.Н. и др. // Физика горения и взрыва. 1965. Т. 1. № 1.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Mochalova V., Utkin A., Shakula M., Lavrov V., Savchenko A., Yakushev V. Reaction zone structure and detonation parameters of nitromethane/polymethylmethacrylate and its mixture with microballoons // Physics of Fluids. 2021. Vol. 33, No. 4. P. 046108. DOI: 10.1063/5.0048210.
2. Mochalova V., Utkin A., Shakula M., Lavrov V. Effect of charge diameter on detonation parameters in the mixture of gelled nitromethane/microballoons // Physics of Fluids. 2023. Vol. 35, No. 1. P. 017117. DOI: 10.1063/5.0135577.
3. Mochalova V., Utkin A., Shakula M., Lavrov V., Koldunov S., Zhidkov M. Detonation parameters of the mixture of gelled nitromethane/microballoons at high porosity // Physics of Fluids. 2024. Vol. 36, No. 2. P. 026112. DOI: 10.1063/5.0192428.
4. Мочалова В.М., Уткин А.В., Сосиков В.А., Торунов С.И., Рапота Д.Ю., Савченко А.В., Шакула М.Ю., Вилков В.В., Колдунов С.А. Неустойчивость течения на границе заряда при детонации смеси нитрометан/полиметилметакрилат // Физика горения и взрыва. 2025. Т. 61. С. 68-75.
5. Шакула М.Ю., Уткин А.В., Мочалова В.М., Лавров В.В., Савченко А.В., Вилков В.В. Ударно-волновое инициирование детонации в смеси гелеобразного нитрометана с микросферами // Химическая физика. 2025. Т. 44, № 8. С. 87-96. DOI: 10.31857/S0207401X25080098.
6. Mochalova V., Utkin A., Shakula M., Lavrov V., Savchenko A., Sosikov V., Torunov S., Rapota D., Koldunov S. Combined effect of microballoons and diethylenetriamine on the detonation of nitromethane // Physics of Fluids. 2026. Vol. 38. P. 096138. DOI: 10.1063/5.0351017.