

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Федерального
исследовательского центра проблем
химической физики и медицинской химии

Российской академии наук

к.ф.-м.н. Голосов Е.В.



1 сентября 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра проблем химической физики и
медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН)
(142432, Московская обл., г.о. Черноголовка, г. Черноголовка, проспект
Академика Семенова, д. 1, адрес сайта: <https://icp-ras.ru/>)

Диссертация «Влияние микросфер на детонационные свойства взрывчатых веществ на основе нитрометана» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества выполнена в лаборатории детонации отдела экстремальных состояний вещества Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель, Шакула Михаил Юрьевич, работал в ФИЦ ПХФ и МХ РАН, в отделе экстремальных состояний вещества, лаборатории детонации в должности инженера. В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника.

Соискатель Шакула М.Ю. окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» в 2022 г.

С 2022 по 2026 гг. соискатель прошел обучение в аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по программе подготовки

научных и научно-педагогических кадров «Физические науки». Аспирантура окончена в июне 2026 г.

Справка об обучении с результатами сдачи кандидатских экзаменов выдана в 2026 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» в качестве подтверждающего документа.

Научный руководитель: Мочалова Валентина Михайловна, кандидат физико-математических наук (01.04.17 – химическая физика, в том числе физика горения и взрыва), ФИЦ ПХФ и МХ РАН, старший научный сотрудник лаборатории детонации отдела экстремальных состояний вещества.

По итогам обсуждения диссертации «Влияние микросфер на детонационные свойства взрывчатых веществ на основе нитрометана» на заседании секции № 7 Ученого совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН принято следующее заключение:

Работа Шакулы М.Ю. посвящена экспериментальному исследованию влияния полых стеклянных микросфер на структуру зоны химической реакции, критический диаметр и параметры детонации гелеобразного нитрометана, а также на характер ударно-волнового инициирования детонации.

Актуальность темы

Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью развития представлений о детонации гетерогенных взрывчатых веществ, кинетика разложения которых определяется очаговым механизмом – формированием горячих точек. Гетерогенные взрывчатые вещества составляют подавляющее большинство составов, применяемых на практике, однако в реальных составах размер, форма и концентрация неоднородностей не контролируются, что затрудняет установление связи между параметрами неоднородностей и характеристиками детонации.

Введение в нитрометан полых стеклянных микросфер позволяет получить гетерогенное взрывчатое вещество, структура детонационного фронта в котором задается размером и концентрацией микросфер, а скорость химического превращения существенно возрастает. Принципиальное достоинство таких смесей состоит в том, что при схлопывании калиброванных микросфер образующиеся очаги имеют одинаковые размер и температуру. Это делает систему нитрометан/микросферы удобной модельной средой для экспериментального исследования, верификации макрокинетических моделей и численного моделирования детонационных процессов.

К началу выполнения работы в литературе практически отсутствовали систематические данные о структуре детонационной волны в таких смесях, тогда как именно эти данные наиболее содержательны для построения

макрокинетических зависимостей. Кроме того, область высоких концентраций микросфер оставалась экспериментально недоступной из-за образования неконтролируемых воздушных полостей при приготовлении смесей. В связи с изложенным полученные в работе результаты представляют как научный, так и практический интерес.

Новизна и практическая значимость результатов работы

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 химпика и размытие фронта импульса сжатия.

Впервые прямой покадровой регистрацией свечения детонационного фронта электронно-оптической камерой НАНОГЕЙТ 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. Показано, что его введение, не нарушая гомогенности вещества, приводит к потере устойчивости детонационного фронта и к росту критического диаметра.

Впервые для смеси нитрометан/полиметилметакрилат/микросферы получены профили массовой скорости с высоким временным разрешением во всем диапазоне концентраций микросфер 0-30 вес.%, включая область плотной упаковки микросфер, ранее не исследованную, и зарегистрирована неоднородность детонационного фронта, характерный размер которой соответствует диаметру микросфер. Установлена зависимость скорости детонации и других детонационных параметров от диаметра оболочки заряда.

Впервые подробно исследована зависимость критического диаметра детонации от пористости смеси гелеобразного нитрометана с микросферами, обнаружена ее немонотонность с двумя локальными минимумами и локальным максимумом и предложено 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 значимость работы состоит в том, что полученные данные дают комплексное описание поведения гетерогенного жидкого взрывчатого вещества при варьировании концентрации микросфер, диаметра оболочки и условий инициирования. Установленное соответствие структуры

зоны реакции теории Зельдовича-Неймана-Дёринга во всем исследованном диапазоне концентраций, а также количественные данные по критическому диаметру и параметрам детонации служат основой для построения и верификации кинетических моделей детонации гетерогенных ВВ и для калибровки численных расчетов.

Практическая значимость определяется тем, что полые микросферы используются как сенсibiliзирующая добавка в промышленных взрывчатых составах, а смесь нитрометана с калиброванными микросферами позволяет управляемо задавать детонационные параметры – скорость детонации, давление, чувствительность к инициированию – через концентрацию микросфер. Полученные данные о пороге ударно-волнового инициирования, о критическом диаметре и о влиянии дополнительных воздушных полостей на детонационную способность смеси должны учитываться при оценке безопасности обращения с такими составами. Кроме того, разработанная методика определения критического диаметра и скорости детонации в одном эксперименте применима к широкому классу гетерогенных конденсированных взрывчатых веществ.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

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

Результаты работы подвергались независимой экспертизе и опубликованы в рецензируемых изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, относящихся к журналам категории K1 в классификации ВАК Минобрнауки РФ. Основные результаты диссертации обсуждались на российских и международных конференциях: X Международная Воеводская конференция (г. Новосибирск, 2022), XVI Всероссийский симпозиум по горению и взрыву (г. Суздаль, 2022), Всероссийская конференция «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения» (г. Новосибирск, 2023), XVIII International Workshop on High Energy and Special Materials HEMs-2023 (Pune, India, 2023), XVII Всероссийский симпозиум по горению и взрыву (г. Суздаль, 2024), II Всероссийская школа Национального центра физики и математики по газодинамике, физике взрыва и экстремальным состояниям вещества (г. Саров, 2025), 2025 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics (Beijing, China, 2025), X Всероссийская конференция «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (г. Новосибирск, 2025), XXXVII Симпозиум «Современная химическая физика» (г. Туапсе, 2025),

XLI Fortov International Conference on Equations of State for Matter, ELBRUS-2026 (Эльбрус, 2026), Международная научная конференция «Современная химическая физика – на стыке физики, химии и биологии» (г. Черноголовка, 2026), а также на семинарах ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

Полнота опубликования результатов и ценность научных работ соискателя ученой степени

Всего по материалам диссертации соискателем совместно с соавторами опубликовано 6 статей в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ для защиты диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 1 статья в трудах международной конференции и 11 тезисов докладов на конференциях разного уровня.

Статьи по результатам работы:

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. V. 33. № 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. V. 35. № 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. V. 36. № 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. № 2. С. 68–75. doi: 10.15372/FGV2023.9394.

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. V. 38. doi: 10.1063/5.0351017.

Статья в трудах конференции:

7. Mochalova V., Utkin A., Shakula M. Detonation properties of the mixture of nitromethane/polymethylmethacrylate with microballoons // *Proceedings of the 23rd Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials*. Pardubice, April 1–3, 2020. P. 197–201.

Все статьи, выполненные в соавторстве, процитированы в диссертации в соответствии с п. 14 критериев Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.04.2013 г. (в текущей редакции). Результаты, описанные в диссертации, являются оригинальными, заимствованные материалы без ссылки на источник заимствования отсутствуют.

В опубликованных материалах довольно полно изложены основные результаты работы. В работе [1] рассматриваются структура зоны реакции и параметры детонации смесей нитрометан/полиметилметакрилат и их смесей с микросферами (главы 3 и 4 диссертации). В работе [2] исследуется влияние диаметра заряда на параметры детонации смеси гелеобразного нитрометана с микросферами (глава 4). В работе [3] приведены параметры детонации и критический диаметр смеси гелеобразного нитрометана с микросферами при высокой пористости (глава 4). В работе [4] исследуется неустойчивость течения на границе заряда при детонации смеси нитрометан/полиметилметакрилат (глава 3). В работе [5] исследуется ударно-волновое инициирование детонации в смеси гелеобразного нитрометана с микросферами (глава 5). В работе [6] рассмотрено совместное действие микросфер и диэтилентриаминa на детонационные характеристики нитрометана; часть этих результатов вошла в главу 4 диссертации. В работе [7] приведены результаты экспериментального исследования детонационных свойств смеси гелеобразного нитрометана с микросферами. В работах [1-7] описаны также состав и способ приготовления исследуемых смесей и методы регистрации ударно-волновых процессов, изложенные в главе 2 диссертации.

Ценность научных работ соискателя для химической физики обусловлена тем, что смесь нитрометан/микросферы представляет собой удобную модельную среду с контролируемыми горячими точками для экспериментального исследования и верификации макрокинетических моделей детонации гетерогенных взрывчатых веществ. Полученные количественные данные по структуре зоны реакции, критическому диаметру и параметрам детонации служат основой для построения и калибровки кинетических моделей детонации и численного моделирования детонационных процессов. Возможность управляемо задавать детонационные параметры – скорость детонации, давление, чувствительность к инициированию – через концентрацию калиброванных микросфер представляет интерес для разработки взрывчатых веществ с заранее заданными характеристиками, что относится к современным задачам химической физики, горения и взрыва.

Личный вклад автора

В диссертации представлены результаты исследований, выполненных с 2019 г. по 2026 г. в лаборатории детонации отдела экстремальных состояний вещества ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

Экспериментальные исследования, в том числе приготовление исследуемых смесей и заполнение зарядов, создание и модернизация экспериментальных сборок, настройка диагностической аппаратуры, проведение измерений, регистрация и анализ волновых профилей, проведены автором лично или при его непосредственном участии. Регистрация профилей массовой скорости интерферометром VISAR и измерение скорости детонации электроконтактными датчиками выполнены автором; эксперименты с применением сверхскоростной фоторегистрации и электронно-оптической камеры НАНОГЕЙТ-22/16 проведены при его участии. Автором выполнены анализ литературы по теме работы, обработка, анализ и интерпретация полученных данных, формулировка выводов, подготовка докладов на конференциях.

Публикации по материалам, изложенным в диссертации, выполнены в соавторстве. В работах [1-7] соискателем выполнены подготовка экспериментальных сборок, регистрация волновых профилей, обработка и интерпретация результатов, написание первичных версий, редактирование переработанных версий.

Соответствие диссертации научным специальностям, отрасли науки

Диссертация Шакулы М.Ю. на тему «Влияние микросфер на детонационные свойства взрывчатых веществ на основе нитрометана» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена задача по установлению закономерностей влияния полых стеклянных микросфер на структуру зоны химической реакции, критический диаметр и параметры детонации нитрометана, а также по исследованию устойчивости детонационного фронта в гомогенных и гетерогенных смесях на его основе.

Работа соответствует паспорту специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества (физико-математические науки) в п.7 (Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения, детонации, взрывных и ударных волн; связь химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками термического разложения, горения, взрывчатого превращения; термодинамика, термохимия и макрокинетика процессов горения и взрывчатого превращения), в п.8 (<...>взаимодействие волн горения и взрывчатого превращения со средой, объектами и веществами; управление процессами горения и взрывчатого превращения.).

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация Шакулы Михаила Юрьевича «Влияние микросфер на детонационные свойства взрывчатых веществ на основе нитрометана» соответствует всем критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.04.2013 г., с учетом всех последующих изменений, применительно к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества (физико-математические науки).

Заключение принято на заседании секции № 7 Ученого совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН (протокол № 7 от 8 июля 2026 г.). Присутствовало на заседании 21 членов совета из 25. Результаты голосования: «за» – 21, «против» – 0, «воздержались» – 0.

Председатель секции № 7
Ученого совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН
доктор физ.-мат. наук,
член-корреспондент РАН



Минцев В.Б.

Секретарь секции № 7
Ученого совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН
кандидат физ.-мат. наук



Мочалова В.М.