

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора

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

Российской академии наук

Д.х.н. Бадамшина Э.Р.

  
(подпись, М.П.)

« 2024 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. Черноголовка, проспект Академика Семенова, д. 1,

адрес сайта: <https://www.icp.ac.ru/>)

Диссертация «Экспериментальное исследование инициирования и эволюции неустойчивости детонации жидких взрывчатых веществ» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук выполнена в лаборатории детонации отдела экстремальных состояний вещества ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Рапота Даниил Юрьевич работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, в отделе экстремальных состояний вещества, лаборатории детонации в должности инженера. В настоящее время работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, в отделе

экстремальных состояний вещества, лаборатории детонации в должности младшего научного сотрудника.

Соискатель в 2020 г. окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по направлению 03.04.01 «Прикладные математика и физика».

В 2020-2024 гг. соискатель прошёл обучение в очной аспирантуре Факультета фундаментальной физико-химической инженерии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова» по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, специальность 1.3.8 "Физика конденсированного состояния вещества".

Справка об обучении с результатами сдачи кандидатских экзаменов выдана в 2024 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова».

Научный руководитель Сосиков Василий Александрович, ученая степень – кандидат физико-математических наук 01.04.17, полное наименование организации – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, наименование подразделения – отдел экстремальных состояний вещества, лаборатория детонации, должность – старший научный сотрудник.

По итогам обсуждения диссертации «Экспериментальное исследование инициирования и эволюции неустойчивости детонации жидких взрывчатых веществ» на заседании секции № 7 Ученого совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН принято следующее заключение:

Работа Рапота Даниила Юрьевича посвящена детальному исследованию различных типов неустойчивости детонации в жидких взрывчатых веществах и их смесях с инертными разбавителями. К таковым относятся: неустойчивость инициирования гомогенных жидких взрывчатых веществ, волны срыва реакции и ячеистая неустойчивость. Все эти явления могут по-разному влиять на характер течений в детонационных волнах и на макрокинетику химических реакций приводя к возникновению уникальных картин на фронте. В перечень исследованных жидких взрывчатых веществ вошли: тетранитрометан (ТНМ), нитрометан (НМ), бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль (ФИФО) и их смеси с такими инертными разбавителями как: нитробензол (НБ), метанол (М), ацетон (Ац). Основной задачей было обнаружить и проанализировать динамику развития перечисленных неустойчивостей.

### **Актуальность темы**

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

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

### **Новизна и практическая значимость результатов работы**

Впервые получены снимки детонационного фронта с высоким пространственным и временным разрешением для ряда жидких взрывчатых веществ и их смесей с инертными разбавителями. В частности, показана динамика эволюции детонационных волн на различных этапах их развития.

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

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

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



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

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

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

Основные результаты диссертации подвергались многократной независимой положительной экспертизе и опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, индексируемых в Scopus, Web of Science, относящихся к журналам К1 в классификации ВАК Минобрнауки РФ; неоднократно обсуждались на российских и международных конференциях, на семинарах ФИЦ ПХФ и МХ РАН и доступны для широкого круга специалистов:

1. Международная конференция "Физика экстремальных состояний вещества". – Эльбрус, 2017.
2. XVI Всероссийский симпозиум по горению и взрыву. 4-9 сентября 2022, Россия, Суздаль.
3. 10-th International Voevodsky Conference. September 5–9, 2022 / IPC Novosibirsk State University.
4. I Всероссийская школа НЦФМ по газодинамике, физике взрыва и экстремальным состояниям вещества. 13-16 марта 2023, Россия, Саров.
5. Всероссийская конференция «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения». 18-21 сентября 2023, Россия, Новосибирск.
6. XXXV Симпозиум «Современная химическая физика». 18-28 сентября 2023, Россия, Туапсе.

### **Плановый характер работы**

Исследования по теме диссертации выполнены в рамках государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ РАН № АААА-А19–119071190040–5.

## **Полнота опубликования результатов и ценность научных работ соискателя ученой степени**

Всего по материалам диссертации соискателем совместно с соавторами опубликовано 4 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ для защиты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и 5 тезисов докладов на конференциях разного уровня.

Статьи по результатам работы:

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

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., с учетом всех последующих изменений. Результаты, описанные в диссертации, являются оригинальными, заимствованные материалы без ссылки на источник заимствования отсутствуют.

В опубликованных материалах достаточно полно изложены основные результаты работы. Работа [2], содержит результаты приведённые в Главе 3, разделе 3.1 диссертации. Работа [3] содержит результаты, приведенные в Главе 3, разделе 3.2 диссертации. Работы [1, 4] содержат результаты, приведенные в Главе 3, разделе 3.3 диссертации. Работы [1-4] включают: описание методик проведения экспериментов; результаты, полученные в ходе работы над статьями и диссертацией; подход к интерпретации данных, полученных при помощи различных методик; изложенные в различных частях диссертации: Глава 2, разделы 2.2 – 2.5; Глава 3, разделы 3.1 – 3.3.

Ценность научных работ соискателя для специальности «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» обусловлена возможностью



выделить существенные, ранее не наблюдавшиеся, особенности и отличия в развитии детонации в исследованных образцах жидких взрывчатых веществ. В том числе, полученные в ходе работы снимки детонационного фронта и проведённый анализ, позволяют по-новому взглянуть на процессы, протекающие в этих веществах при ударно-волновом инициировании. Что, в свою очередь, может стать толчком к дальнейшему развитию теории детонации.

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

#### **Личный вклад автора**

Выполнено соискателем лично: теоретический анализ литературы по теме диссертации; часть экспериментальной работы, не касающаяся личного контакта со взрывчатыми веществами; обработка, анализ и интерпретация данных, полученных при помощи фотометодик; формулировка выводов.

Выполнено совместно с научным руководителем: определение целей и задач; выбор методов исследования; часть экспериментальной работы, касающаяся личного контакта со взрывчатыми веществами; подготовка публикаций.

Публикации по материалам, изложенным в диссертации, выполнены в соавторстве. В работах [№1]-[№4] соискателем выполнено: часть экспериментальной работы, связанная с применением фотометодик и не касающаяся личного контакта со взрывчатыми веществами; обработка, анализ и интерпретация данных, полученных при помощи фотометодик. В работе [№2] соискателем также была написана первичная версия статьи. В работе [№4], выполнено редактирование.

#### **Соответствие диссертации научным специальностям, отрасли науки**

Диссертация Рапота Даниила Юрьевича на тему: «Экспериментальное исследование инициирования и эволюции неустойчивости детонации жидких взрывчатых веществ» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена задача исследования особенностей проявления различных типов неустойчивости детонации жидких взрывчатых веществ (тетранитрометан, нитрометан, бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль) и их смесей с инертными разбавителями (нитробензол, метанол, ацетон).

Работа соответствует паспорту специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

### Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация Рапота Даниила Юрьевича «Экспериментальное исследование инициирования и эволюции неустойчивости детонации жидких взрывчатых веществ» 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 № 3 от 22.03.2024 г). Присутствовало на заседании 17 членов совета из 20.

Результаты

голосования: «за» - 17, «против» - 0, «воздержались» - 0.

Председатель секции №7  
Ученого совета  
ФИЦ ПХФ и МХ РАН  
чл.-кор. В.Б. Минцев

Секретарь секции №7  
Ученого совета  
ФИЦ ПХФ и МХ РАН  
к.ф.-м.н. В.М. Мочалова