

На правах рукописи



Нурмухаметов Денис Рамильевич

**ВЗРЫВЧАТОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ
ТЕТРАНИТРАТА ПЕНТАЭРИТРИТА И
ЦИКЛОТРИМЕТИЛЕНТРИНИТРАМИНА
С ВКЛЮЧЕНИЯМИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ
ПАССИВИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (Институт углехимии и химического материаловедения, лаборатория энергетических соединений и нанокompозитов).

Научный консультант:

Адуев Борис Петрович, доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Михайлов Анатолий Леонидович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», заместитель научного руководителя.

Зарко Владимир Егорович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории горения конденсированных систем.

Архипов Владимир Афанасьевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий отделом газовой динамики и физики взрыва Научно-исследовательского института прикладной математики и механики ТГУ.

Защита состоится «03» ноября 2021 г. в 10.00 часов
на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.06 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru.

Автореферат разослан «14» июля 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н.

Глушков Дмитрий Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С момента создания лазера неизменный интерес исследователей вызывает изучение инициирования конденсированных взрывчатых веществ, пиротехнических составов на их основе и твердых ракетных топлив лазерным излучением [1]. В настоящее время интерес увеличился в связи с возросшими возможностями современной аппаратуры для регистрации и получения информации о быстропротекающих процессах, происходящих в энергетических материалах. Эти данные необходимы для разработки механизма инициирования энергетических материалов, для изучения гидродинамики разлета образующейся продуктов взрыва.

Лазерное инициирование взрывчатых веществ (ВВ), как научное направление, возникло в СССР во ВНИИА им. Н.Л. Духова (г. Москва) [2, 3]. В России исследования проблем лазерного инициирования ВВ в настоящее время ведутся в ТПУ (г. Томск) [4], КемГУ (г. Кемерово) [5], РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) [6], РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск) [7], ФИЦ УУХ СО РАН (г. Кемерово), СПбГТИ(ТУ) (г. Санкт-Петербург) [8] и других организациях.

Лазеры стали применять для детонации взрывчатых веществ в так называемых светодетонаторах, помехозащищенность которых намного больше, чем у электродетонаторов. Например, в США светодетонаторы используются в системах пироматериалов ракетно-космических комплексов [9] и системах инициирования артиллерийских снарядов [10].

В качестве материалов для светодетонаторов перспективно применение бризантных ВВ с включениями светопоглощающих добавок. Одним из перспективных материалов включения являются металлы ультрадисперсных размеров. Как следует из литературных данных, пороги лазерного инициирования взрывчатого разложения ВВ зависят от ряда факторов [11], например, таких как, длина волны лазерного излучения, длительность лазерного импульса, масса и плотность образца, начальная температура образца, наличие в образце поглощающих неоднородностей, материал включений, дисперсность включений, условия газодинамической разгрузки образца. Исследования, в которых бы производился учет действия этих факторов в комплексе в настоящее время отсутствуют. Для получения композитных материалов с оптимальными характеристиками назрела необходимость проведения комплексных исследований по инициированию взрывчатого разложения ВВ с включениями поглощающих лазерное излучение добавок с учетом выше перечисленных факторов. В этом случае возможна разработка научных основ и модели взрывчатого разложения для слабопоглощающих излучение бризантных ВВ со светопоглощающими включениями при лазерном инициировании. Установление научных основ даст возможность целенаправленного нахождения составов композитных материалов с оптимальными характеристиками для лазерного инициирования взрыва.

В настоящей работе проведено систематическое экспериментальное исследование лазерного инициирования композитных материалов на основе слабопоглощающих излучение ВВ (тетранитрат пентаэритрита (тэн), циклотриметилен-тринитрамин (гексоген, RDX)) с включениями ультрадисперсных пассивирован-

ных металлических частиц с учетом выше перечисленных факторов, влияющих на порог взрывчатого разложения. В результате проделанной работы предложена модель взрывчатого разложения таких материалов при лазерном инициировании. На базе полученных научных результатов выработан алгоритм получения композитов на основе бризантных взрывчатых веществ и металлических включений с оптимальными характеристиками для лазерного инициирования взрыва. Это определяет актуальность представленной работы.

Работа выполнялась по плану базового бюджетного финансирования СО РАН: приоритетное направление V.49. «Фундаментальные исследования в области химии и материаловедения в интересах обороны и безопасности страны» в рамках проектов V.40.1.4. «Модификация свойств взрывчатых веществ добавками наноразмерных энергоемких частиц» и V49.1.5. «Изучение механизмов преобразования энергии электронно-пучкового и лазерного излучения в высокоэнергетических материалах и углях для создания материалов для компонентов и устройств специального назначения»; поддерживалась грантами РФФИ: №№ 07-02-96009-а, 13-03-98032_r_sibir_a, 16-33-00510_мол_a, 18-03-00421-а. Результаты работы использованы в соответствующих отчетах по НИР.

Цель работы. Разработка научных основ и модели взрывчатого разложения слабопоглощающих излучение бризантных ВВ с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц при лазерном инициировании с учетом факторов, влияющих на порог инициирования взрыва.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Установить роль включений ультрадисперсных пассивированных металлических частиц на изменение оптических характеристик слабопоглощающих излучение бризантных ВВ (тэн, RDX) методами фотометрического шара и оптико-акустики с использованием лазерного излучения различных плотностей энергии.

2. Изучить влияние массовой доли включений ультрадисперсных пассивированных металлических частиц (Al, Ni, Fe) в образце на порог взрывчатого разложения ВВ (тэн, RDX) при лазерном инициировании в различных условиях газодинамической разгрузки образцов.

3. Изучить влияние размера включений ультрадисперсных пассивированных металлических частиц на порог взрывчатого разложения ВВ (тэна, RDX) при лазерном инициировании.

4. Изучить влияние длины волны лазерного излучения на порог взрывчатого разложения тэна и тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц.

5. Установить роль начальной температуры образцов тэна и тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц металлов на порог взрывчатого разложения при лазерном инициировании.

6. Установить роль изменения плотности образцов тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц алюминия на его взрывчатые характеристики при лазерном инициировании.

7. Изучить спектрально-кинетические характеристики свечения, возникающего при лазерном инициировании взрыва ВВ (тэна, RDX) с включениями ультра-

традисперсных пассивированных металлических частиц в режиме реального времени. Установить природу свечения первичных продуктов взрыва.

8. Установить общие закономерности влияния исследованных в работе факторов на порог взрывчатого разложения изучаемых материалов. На базе установленных закономерностей сформулировать модель, позволяющую прогнозировать регулирование чувствительности композитных материалов к лазерному воздействию.

Научная новизна. На основе проведенных комплексных экспериментальных исследований предложена модель взрывчатого разложения композитных материалов на основе слабопоглощающих излучение бризантных ВВ (тэн, RDX) с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц (алюминия, никеля, железа) при импульсном лазерном воздействии, учитывающая совокупность факторов влияющих на порог инициирования взрыва ВВ.

1. Впервые установлено, что в композитах на основе слабопоглощающих излучение бризантных ВВ (тэн, RDX) с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц (алюминия, никеля, железа) поглощение излучения происходит непосредственно включениями. В результате, во время импульса излучения происходит нагрев включения и окружающей его оболочки ВВ (тэн, RDX). Включение и нагретая оболочка образуют «горячую точку».

2. Впервые установлены закономерности изменения критических плотностей энергий лазерного инициирования взрывчатого разложения слабопоглощающих излучение бризантных ВВ (тэн, RDX) с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц алюминия, никеля и железа в зависимости от массовой доли включений в образце. В различных условиях газодинамической разгрузки образцов тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц алюминия определено значение оптимальной массовой доли этих включений, при которой критическая плотность энергии лазерного инициирования взрывчатого разложения минимальна.

3. Впервые установлено, что влияние размера включений ультрадисперсных пассивированных металлических частиц на порог лазерного инициирования взрыва слабопоглощающих излучение бризантных ВВ (тэн, RDX) связано с зависимостью показателя поглощения излучения от размера частиц.

4. Впервые показано, что немонотонная зависимость критической плотности энергии лазерного инициирования взрывчатого разложения слабопоглощающих излучение бризантных ВВ (тэн, RDX) с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц алюминия, никеля и железа от массовой доли и размеров включений в образцах коррелирует с оптико-акустическими характеристиками образцов.

5. Впервые показано, что зависимость критической плотности энергии лазерного инициирования взрывчатого разложения тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц алюминия от длины волны излучения связана с зависимостью эффективности поглощения света $Q_{\text{abs}}(\lambda)$.

6. Впервые показано, что при лазерном инициировании взрывчатого разложения тонких образцов (1 мм) тэна с включениями ультрадисперсных пассивиро-

ванных частиц алюминия с уменьшением плотности образцов увеличиваются пороги лазерного инициирования взрыва, скорость и давление ударных волн в воздухе.

7. Впервые установлено, что во время воздействия лазерного импульса происходит диссоциация молекул слабопоглощающих излучение бризантных ВВ (тэн, RDX) с образованием $\text{NO}_2^\bullet$ – радикала.

8. Впервые методом спектральной пирометрии установлено, что спектры свечения слабопоглощающих излучение бризантных ВВ (тэн, RDX) с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц на стадии взрывчатого разложения образцов при лазерном инициировании имеют тепловой характер.

9. Впервые показано, что критическая плотность энергии лазерного инициирования взрывчатого разложения тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц алюминия первой и второй гармониками лазерного излучения с ростом начальной температуры образцов в интервале 300–450 К описывается одинаковыми закономерностями. Количественное различие связано с различной эффективностью поглощения излучения Q_{abs} первой и второй гармоник.

10. Впервые на основе проведенных комплексных экспериментальных исследований и разработанной модели процесса установлен алгоритм получения материалов на основе слабопоглощающих излучение ВВ с включениями ультрадисперсных частиц металлов с оптимальными характеристиками для лазерного инициирования взрыва.

Защищаемые положения:

1. Роль ультрадисперсных пассивированных металлических включений в ВВ состоит в изменении его оптических характеристик в результате поглощения лазерного излучения металлическим ядром включений, с последующим нагревом ядра. При превышении критической плотности энергии излучения в окружающей включение оболочке ВВ происходит инициирование экзотермической химической реакции.

2. Характер зависимости порога лазерного инициирования взрыва слабопоглощающих излучение бризантных ВВ от массовой доли ультрадисперсных пассивированных металлических частиц связан с характером изменения давления в слое поглощения энергии, которое определяется условиями газодинамической разгрузки.

3. Зависимость порога лазерного инициирования взрыва слабопоглощающих излучение бризантных ВВ от размеров включений ультрадисперсных пассивированных металлических частиц связана с зависимостью показателя поглощения излучения от размера частиц.

4. Зависимость порога лазерного инициирования взрывчатого разложения поликристаллических образцов тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц металлов от длины волны связана с коэффициентами эффективности поглощения излучения Q_{abs} , которые зависят от длины волны излучения. При одинаковых значениях показателя экстинкции k_{eff} пороги H_{cr} при воздействии различными длинами волн одинаковы.

5. В тонких (1 мм) поликристаллических образцах тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц алюминия при лазерном воздействии проявляются закономерности взрывчатого разложения, отличающиеся от закономерностей при нормальной детонации. С уменьшением плотности образцов увеличиваются пороги лазерного инициирования взрыва $H_{ст}$, скорости и давление ударных волн, образующихся при взрыве образцов в воздухе.

6. Первичным продуктом при лазерном инициировании взрыва ВВ (тэн, RDX) с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц алюминия, никеля и железа является $\text{NO}_2^\bullet$ – радикалы, образующиеся в «горячих точках» в результате диссоциации молекулы ВВ. Спектры свечения на стадии взрыва имеют тепловой характер и связаны с химической реакцией в остоле молекул ВВ.

7. Модель взрывчатого разложения слабопоглощающих излучение бризантных ВВ с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц при лазерном инициировании, учитывающая совокупность факторов влияющих на порог взрывчатого разложения ВВ:

а) поглощение лазерного излучения металлическими частицами, нагрев частиц и прилегающих слоев ВВ до температуры выше температуры плавления ВВ. Частица и ее нагретое окружение ВВ представляют собой «горячую точку»;

б) при превышении плотности энергии порогового значения происходит диссоциация молекулы ВВ (тэн, RDX) на возбужденный радикал $\text{NO}_2^\bullet$ и остаточный радикал $\text{R}^\bullet$;

в) радикал $\text{NO}_2^\bullet$ флюоресцирует за время ~ 60 нс. В остаточном радикале $\text{R}^\bullet$ протекает экзотермическая химическая реакция, приводящая к превращению образца в газообразные продукты и взрыву. Процесс происходит в микросекундном временном интервале и сопровождается тепловым свечением с температурой $T \sim 3400$ К;

г) для каждого типа включений в образце существуют оптимальная массовая доля и оптимальный размер, при которых порог инициирования взрыва минимален;

д) необходимым условием взрыва является блокирование газодинамической разгрузки образца. Во время импульса поглощение энергии излучения при оптимальной массовой доле включений происходит в поверхностном слое образца глубиной $d \approx 50$ мкм. В результате развития химической реакции в «горячих точках» происходит повышение температуры и давления в облученном слое, что приводит к возникновению ударной волны и распространению ее в необлученную часть образца. Развитие взрывчатого разложения в необлученном слое образца происходит по ударно-волновому механизму.

Научная и практическая значимость. Диссертация посвящена решению научной задачи, имеющей значение для развития отрасли знаний, изучающей воздействие лазерного излучения на взрывчатые вещества.

Научное направление, разрабатываемое в данной работе – это изучение механизмов взрывчатого разложения тонких (1 мм) поликристаллов слабопоглощающих излучение бризантных взрывчатых веществ с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц при воздействии импульсного ла-

зерного излучения. Результаты работы позволили установить модель взрывчатого разложения указанных материалов (на примере тэна и RDX) с учетом факторов, влияющих на порог взрыва ВВ и определить условия целенаправленного регулирования их чувствительности к импульсам лазерного излучения.

Практическая значимость работы заключается в том, что подход, предложенный в работе, позволит вести разработку композитных взрывчатых материалов на основе слабопоглощающих лазерное излучение бризантных ВВ (PETN, RDX, HMX и т.п.) с минимальными порогами взрывчатого разложения для применения в светодетонаторах штатных взрывчатых веществ и других технических приложениях, где применяется лазерное инициирование взрыва.

На основе предложенного в работе научно-обоснованного подхода разработаны композитные взрывчатые материалы на основе тэна и RDX с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц (Al, Ni, Fe), обладающих высокой чувствительностью к импульсному лазерному излучению. Предложен алгоритм по оптимизации данных составов при варьировании массовой доли и размеров частиц без проведения взрывных экспериментов, что значительно удешевляет производство этих материалов.

Научная и практическая значимость полученных результатов подтверждена двумя патентами Российской Федерации на изобретения (№№ 2666435, 2586938). Разработанные способы получения и исследования оптических свойств композитных ВВ позволяют целенаправленно снизить порог лазерного инициирования капсюльных составов типа «бризантное взрывчатое вещество-наночастицы металлов».

Результаты комплексного исследования взрывчатого разложения тэна и RDX с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц (алюминия, никеля, железа) при импульсном лазерном воздействии могут быть использованы в научно-исследовательских, проектных, научно-производственных организациях открытого профиля, занимающихся исследованием и производством изделий из высокоэнергетических материалов (НИ ТПУ, НИ ТГУ, ИХФ РАН, ИПХФ РАН, ИХКГ СО РАН, КемГУ, ФИЦ УУХ СО РАН, ИГ СО РАН, ИПХЭТ СО РАН) и на предприятиях оборонного комплекса, занимающихся проектированием, производством, хранением ВВ (РФЯЦ-ВНИИЭФ, ФНПЦ «Алтай», ГРЦ им. акад. В.П. Макеева, ФЦДТ «Союз»).

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается использованием стандартизированных образцов, современных измерительных комплексов, хорошо апробированных методик.

Личный вклад автора. Постановка цели, задач диссертационного исследования и обсуждение результатов выполнены автором совместно с научным консультантом. В совместных публикациях автору принадлежат результаты, сформулированные в выводах и защищаемых положениях диссертации, соавторы публикаций согласны с включением результатов совместных работ в диссертацию. Теоретические расчеты в рамках теории Ми и теории переноса излучения проведены Звековым А.А. в соответствующих публикациях. Результаты диссертации ча-

стично вошли в диссертации Фуреги Р.Ю. и Лискова И.Ю., защищенные при научном руководстве автора.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Международных и российских конференциях: Международной конференции Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» (Саров, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019); Международной конференции Забабахинские научные чтения (Снежинск, 2012, 2014, 2016, 2019); International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (Tomsk, 2012, 2014, 2016, 2018, 2020); XII Международная конференция НЕМs-2016 «Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение» (Томск, 2016); Всероссийской конференции «Химия, технология и применение высокоэнергетических соединений» (Бийск, 2011); VIII Международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (Томск, 2012, 2014); The Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials (Pardubice, Czech Republic, 2013, 2014, 2015), XI Международная научная конференция «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (2015, Ялта), Международный Российско-Казахстанский симпозиум «Углеродная химия и экология Кузбасса» (Кемерово, 2015, 2016); Совместные IX Международный симпозиум «Физика и химия углеродных материалов / наноинженерия» и Международная конференция «Наноэнергетические материалы и нано-энергетика» (Алматы, Казахстан, 2016); Всероссийская школа-конференция «Химия и физика горения и дисперсных систем», посвящённая 110-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР А.А. Ковальского (Новосибирск, 2016); Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики 2017» (Томск, 2017); Всероссийская конференция «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2018).

Публикации. Результаты диссертации изложены в 33 статьях в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертации или приравненных к ним и 2 патентах. Опубликовано 31 статья в международных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных «Web of Science» и «Scopus».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, основных результатов и выводов, заключения. Изложена на 318 страницах машинописного текста, включая 162 рисунков и 22 таблицы. Библиография включает 280 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждены состояние вопроса, сформулированы цели и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, а также приведены защищаемые положения.

В первой главе работы приведены литературные данные по экспериментальным исследованиям воздействия импульсного лазерного излучения на энергетические материалы. Рассмотрены основные модельные представления о природе взрывчатого разложения тэна.

Во второй главе описаны использованные в работе методики эксперимента и характеристики используемых объектов исследования.

Использовался порошок тетранитрата пентаэритрита (тэна) с узким гранулометрическим распределением по размерам с максимумом при 1–2 мкм. В качестве включений использовались порошки алюминия (120 нм), никеля (130, 160 и 280 нм), железа (75 нм).

Проводилась следующая процедура подготовки образцов. В порошок тэна добавлялись соответствующие частицы металла ультрадисперсного размера для получения необходимой массовой концентрации. Смесь помещалась в гексан и перемешивалась в ультразвуковой ванне для получения равномерного распределения частиц в объеме смеси. После этого производилось испарение гексана, сушка смеси и навеска образца. Образцы прессовались с использованием специальной пресс-формы в медной пластине толщиной 1 мм, в центре которой имелось отверстие диаметром 3 мм. Плотность образцов составляла величину $\rho = 1,73 \pm 0,03 \text{ г/см}^3$, за исключением экспериментов, где проводились исследования характеристик взрывчатого разложения в зависимости от плотности образцов.

Инициирование образцов осуществлялось с помощью Nd:YAG^{3+} – лазера, работающего в режиме модулированной добротности (длительностью импульса $\tau = 14 \text{ нс}$, длина волны на основной частоте 1064 нм и на второй гармонике 532 нм).

Для изучения оптических свойств композитных материалов использованы фотометрический шар и оптико-акустический метод [12], в котором в качестве приемника акустического сигнала использовался пьезоакустический детектор на базе керамики ЦТС-19.

Для изучения пороговых характеристик взрыва при лазерном инициировании в большинстве экспериментов образцы помещались на алюминиевую подложку, и облучаемая поверхность экранировалась оптическим стеклом, прозрачным для излучения. В экспериментах для изучения условий газодинамической разгрузки к образцу с помощью специального устройства прикладывалось усилие, создающее статическое давление $\geq 10^7 \text{ Па}$. За факт взрыва образца принимались громкий звуковой сигнал, наличие следа на алюминиевой подложке диаметром, равным диаметру образца и световой сигнал, регистрируемый фотоумножителем в микросекундном временном интервале.

Для измерения спектрально-кинетических характеристик свечения, возникающего при инициировании и последующем взрыве образцов, в составе аппаратного комплекса использовался спектрофотохронограф «СХ-1А». Спектральное

разрешение 10 нм, спектральный интервал 350–750 нм, временное разрешение определяется применяемой разверткой фотохронографа и может достигать 2 нс.

В третьей главе приведены экспериментальные данные по оптическим и оптико-акустическим характеристикам исследуемых объектов в режиме воздействия лазерного излучения.

Многие энергетические материалы прозрачны в области длин волн, доступных для технологического применения наиболее распространенных источников лазерного излучения (видимая и ближняя инфракрасная область спектра). В частности, показатель поглощения излучения в этой области для тэна $k_a < 0,1 \text{ см}^{-1}$ [13]. Инициирование материала лазерным излучением возможно для образцов, спрессованных из порошка до относительно низкой плотности, когда происходит диффузное рассеяние излучения в приповерхностной области. В этом случае поглощение осуществляется в тонком слое, и взрыв осуществляется при относительно высоких пороговых плотностях энергии H_{cr} . Например, для тэна при плотностях образцов $\rho = 1\text{--}1,4 \text{ г/см}^3$ $H_{cr} = 15\text{--}50 \text{ Дж/см}^2$ [14]. Дальнейшее увеличение плотности образцов приводит к запредельным пороговым плотностям энергии инициирования [15]. Для снижения порогов лазерного инициирования многие авторы применяли различные оптически активные добавки в матрицы ВВ, т.е. применяли композитные материалы. Однако, систематического изучения механизмов поглощения лазерного инициирования композитными составами не проводилось.

В данной работе проведена экспериментальная проверка вкладов рассеяния и поглощения лазерного излучения включениями ультрадисперсных частиц в тэне с применением метода фотометрического шара. Для композита тэн-Аl экспериментально определялись доли отраженной, рассеянной R и прошедшей T энергии с использованием стационарного источника света $\lambda = 643 \text{ нм}$.

По результатам измерений R и T рассчитаны показатели экстинкции k_{eff} в зависимости от массовой доли включений и толщины образца, представленные на рисунке 1.

Показатель экстинкции композита получен также независимым оптико-акустическим методом с использованием пьезоакустического преобразователя. При воздействии первой гармоники лазерных импульсов с энергией 5 мДж на образцы композитов с различной массовой долей включений частиц алюминия и регистрировались осциллограммы, из которых определялось время акустической релаксации [12]:

$$\tau_a = (k_{eff} c_0)^{-1}, \quad (1)$$

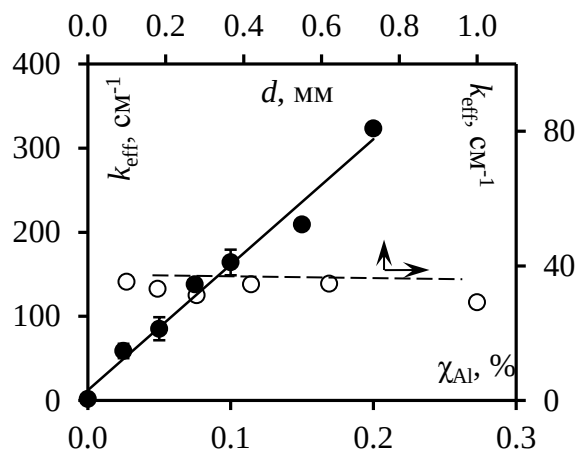


Рисунок 1 – Зависимость показателя экстинкции k_{eff} (●) от массовой доли χ включений алюминия в образце: по вспомогательным осям – зависимость показателя экстинкции k_{eff} (○) от толщины образца при постоянном значении массовой доли включений (0,02 масс.%)

где k_{eff} – показатель экстинкции образца с фиксированным содержанием включений, c_0 – скорость звука в среде, определяемая экспериментально.

Из экспериментально измеренных значений τ_a для различных массовых долей включений рассчитано значение k_{eff} по (1), которое представлено на рисунке 2.

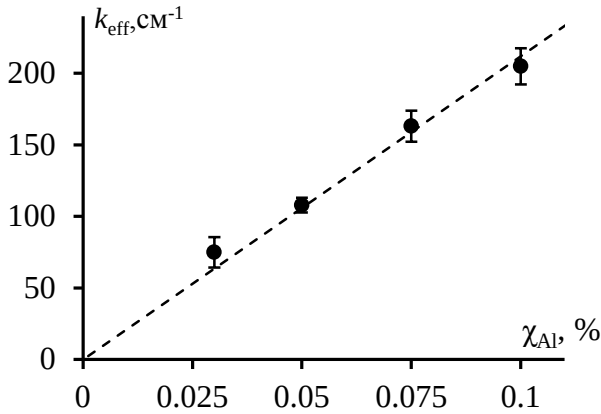


Рисунок 2 – Зависимость показателя экстинкции k_{eff} от массовой доли включений в образце

Как и в случае измерений на фотометрическом шаре зависимость k_{eff} от массовой доли включений χ имеет линейный характер.

В работе [16] показано, что если включения являются только рассеивающими, и увеличивают показатель экстинкции слабопоглощающей среды за счет увеличения пробега фотонов в материале, то $k_{\text{eff}} \sim n^{1/2}$, где n – концентрация рассеивающих включений. Если поглощение излучения в рассеивающей среде происходит непосред-

ственно включениями, то $k_{\text{eff}} \sim n$.

Из рисунков 1 и 2 следует, что в нашем случае излучение поглощается непосредственно включениями, а не матрицей тэна.

Выше описанные эксперименты проводились при невысоких плотностях энергии лазерного излучения $H < 0,1$ Дж/см² когда показатель экстинкции практически совпадал при измерениях на спектрофотометре и лазерном воздействии. При увеличении $H > 0,1$ Дж/см² на поверхности образцов наблюдаются кратеры. При $H > 1$ Дж/см² наблюдаются макроразрушения образцов (в этих экспериментах образцы не накрывались стеклянной пластиной со стороны облучения, поэтому взрыв не осуществлялся).

Амплитуда акустического сигнала в зависимости от плотности энергии при воздействии на образцы первой гармоникой лазера представлены на рисунке 3. При $H > 0,1$ Дж/см² наблюдается сверхлинейная зависимость амплитуды сигнала U от плотности энергии лазерного излучения H .

На рисунке 4 представлены значения k_{eff} рассчитанные по формуле (1) из измеренных τ_a в зависимости от плотности энергии H при фиксированной толщине образца $d = 1$ мм.

Расчетные точки удовлетворительно описываются эмпирической зависимостью (рисунок 4, пунктирная кривая):

$$k_{\text{eff}}(H) = k_{\infty} \left(1 - e^{-H/H_0}\right), \quad (2)$$

где $k_{\infty} = 120 \text{ см}^{-1}$ и $H_0 = 0,08 \text{ Дж/см}^2$. Параметр $H_0 = 0,08 \text{ Дж/см}^2$ в погрешности эксперимента совпадает со значением $H = H_{\text{кр}}$, при котором на поверхности образцов наблюдаются минимальные кратеры.

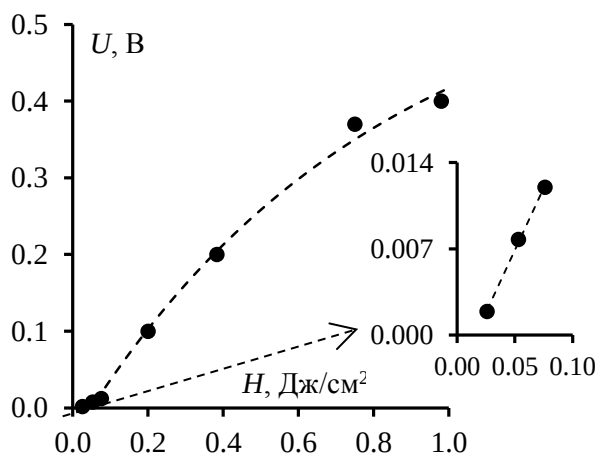


Рисунок 3 – Зависимость амплитуды оптико-акустического сигнала от плотности энергии лазерного импульса: на врезке – зависимость амплитуды в интервале энергий 0–0,1 Дж/см²; образцы тэна с включениями Al $\chi = 0,03$ масс.%

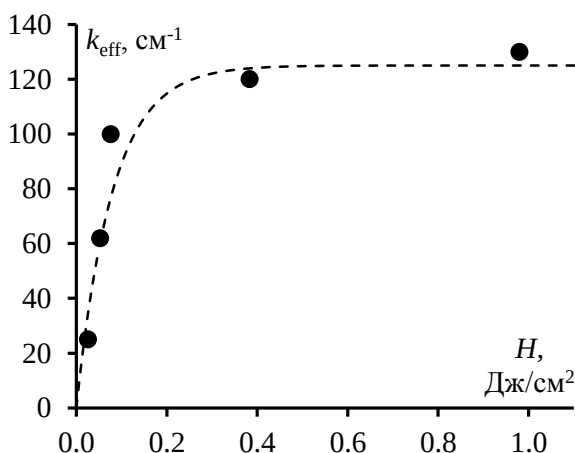


Рисунок 4 – Зависимость показателя экстинкции k_{eff} от плотности энергии лазерных импульсов: образцы тэна с включениями Al $\chi = 0,03$ масс.%

Известно, что с ростом температуры поглощательная способность металлов увеличивается [17]. Данные рисунков 3 и 4 позволяют сделать вывод, что в результате поглощения энергии включениями Al происходит их нагрев и рост k_{eff} при $H > 0,1$ Дж/см². За время лазерного импульса прогревается оболочка тэна, окружающая включения на глубину $L = (\eta\tau_i)^{1/2}$, где η – температуропроводность тэна, τ_i – длительность лазерного импульса. В результате в окрестности включений происходит нагрев молекул тэна до температуры разложения, приводящий к газообразованию и выход газа на поверхность образца, что приводит к образованию кратеров.

Данные рисунков 3 и 4 позволяют построить зависимость амплитуды сигнала пьезоакустического детектора от k_{eff} (рисунок 5). Полученные зависимости удовлетворительно аппроксимируются формулой:

$$U = U_t e^{k_{eff}/k_0}, \quad (3)$$

где $k_0 = 20$ см⁻¹ и совпадает со значением k_{eff} при низких плотностях энергии, полученных при $H < 0,05$ Дж/см² или измерениях на спектрофотометре.

Согласно [12] амплитуда давления в образцах при воздействии лазерных импульсов:

$$P \sim H \cdot k_{eff}. \quad (4)$$

Объемная плотность поглощенной энергии лазерного импульса можно представить следующим образом:

$$Q_v = (1-R) \cdot H \cdot k_{eff}, \quad (5)$$

где $R = 0,15$ – коэффициент отражения. Кроме того, известно, что давление P и объемная плотность поглощенной энергии Q_v связаны соотношением:

$$P = \Gamma Q_v, \quad (6)$$

где Γ – коэффициент Грюнайзена. По формуле (5) можно рассчитать Q_v и построить зависимость амплитуды сигнала пьезоакустического преобразователя U от Q_v (рисунок 6).

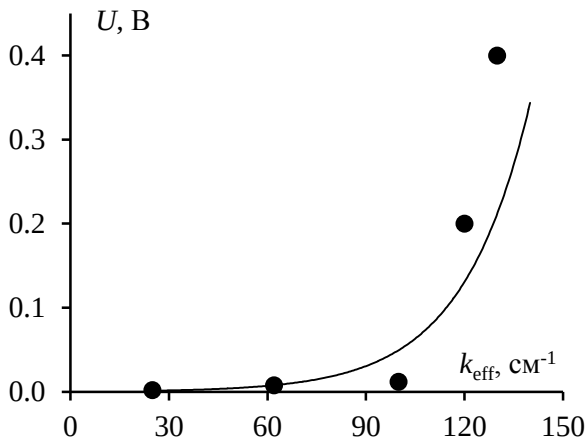


Рисунок 5 – Зависимость амплитуды оптико-акустического сигнала от показателя экстинкции при $\lambda = 1064 \text{ нм}$

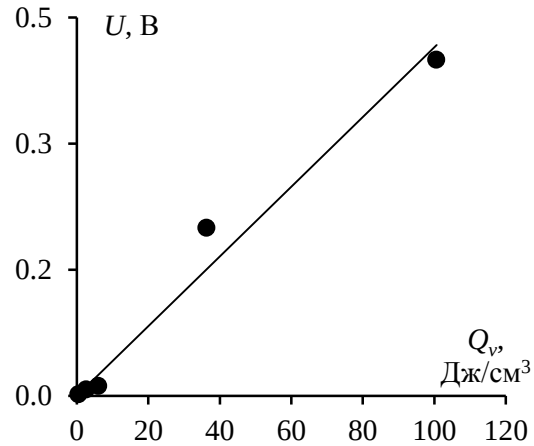


Рисунок 6 – Зависимость амплитуды оптико-акустического сигнала от объемной плотности поглощенной энергии лазерного излучения при $\lambda = 1064 \text{ нм}$

Так как амплитуда сигнала соответствует мгновенному давлению, то линейная зависимость (рисунок 6) в соответствии с выражением (6) свидетельствует о линейном росте давления P с ростом объемной поглощенной энергии Q_v .

В четвертой главе приведены экспериментальные данные по лазерному инициированию взрыва тэна и тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц с учетом многофакторности внешних условий эксперимента (такие как длина волны лазерного излучения, плотность образца, размер включений, условия газодинамической разгрузки экспериментальной ячейки, начальная температура образца), которые необходимо учитывать при исследовании лазерного инициирования ВВ.

В первом разделе проведено экспериментальное исследование вероятности взрыва от плотности энергии инициирующего лазерного импульса и получены значения порогов взрывчатого разложения композитов на основе тэна и ряда включений ультрадисперсных пассивированных металлических частиц, а именно частиц Al, Ni, Fe, в зависимости от массовой доли включений с фиксированными размерами частиц при воздействии излучения первой гармоники лазера. Исследовалась вероятность взрывов образцов с определенным содержанием включений. На рисунке 7 для примера приведены зависимости вероятности взрыва p от плотности энергии излучения H для включений Al с различным содержанием включений.

По кривым $p=f(H)$ определялась критическая энергия инициирования взрыва H_{cr} , соответствующая 50 % вероятности взрыва для образцов с различным содержанием включений Al (рисунок 8), которую в дальнейшем принимали за порог взрыва. Из рисунка 8 следует, что зависимость $H_{cr}(\chi)$ имеет немонотонный характер. Минимальные значения H_{cr} достигаются при некоторой оптимальной массовой доле χ_{opt} включений в образце, которые для различных композитов приведены в таблице 1.

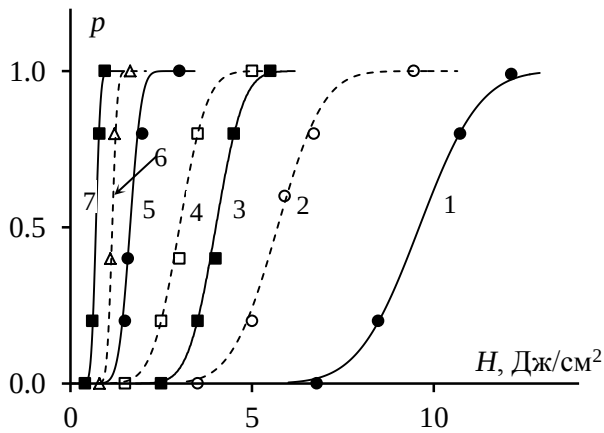


Рисунок 7 – Зависимости вероятности взрыва образцов тэн – Al от плотности энергии лазерного импульса при $\lambda = 1064$ нм: 1 – 0,025; 2 – 1; 3 – 0,05; 4 – 0,5; 5 – 0,3; 6 – 0,1; 7 – 0,2 масс. %

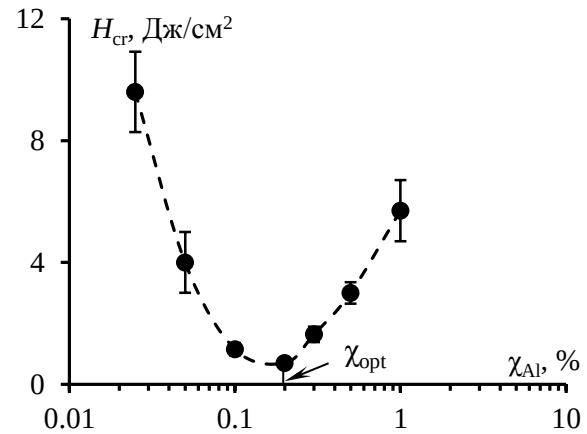


Рисунок 8 – Зависимость критической плотности энергии инициирования взрыва $H_{кр}$ от массовой доли включений Al в образцах

Таблица 1 – Пороги лазерного инициирования взрывчатого разложения тэна с включениями при оптимальных массовых долях

Тип включения	Al	Ni	Fe
$H_{кр}, \text{Дж/см}^2$	0,7	1,4	0,6
$\Delta H_{кр}, \text{Дж/см}^2$	0,1	0,2	0,1
Массовая доля включений $\chi_{опт}, \%$	0,2	0,1	0,4

Таким образом, экспериментально показано, что $H_{кр}$ зависит от массовой доли включений χ . С ростом χ увеличивается показатель экстинкции k_{eff} . На первый взгляд, с ростом k_{eff} , соответственно ростом поглощенной энергии в образце, должен снижаться порог взрывчатого разложения $H_{кр}$. Однако, кривые $H_{кр}(\chi)$ имеют немонотонный характер, что требует более подробного рассмотрения.

При поглощении излучения происходит нагрев включений, что вызывает нагрев окружающей частицу включения оболочки тэна и газообразованию. Если препятствовать выходу газов из образца, например, накрывая облучаемую поверхность стеклянной пластиной, то при достижении $H_{кр}$ происходит взрыв образца. Отсюда очевидно, что для взрывчатого разложения необходимым условием является не только нагрев включений, но и создание критического давления в области поглощения энергии. В связи с выше изложенным с помощью пьезоакустического преобразователя были измерены амплитуды акустических волн, пропорциональных давлению P и распространяющихся из нагретого слоя образца, в котором поглощается энергия излучения, к тыльной поверхности образца. Экспериментальные результаты измерений для композитов тэна с включениями Al в условиях воздействия излучения первой гармоникой лазера представлены на рисунке 9. Аналогичные результаты получены для композитов с включениями Ni и Fe.

Отметим, что максимальная амплитуда сигнала соответствует массовой доле включений $\chi_{опт}$, при которой порог взрывчатого разложения $H_{кр}$ минимален для всех исследованных композитов. При $\chi_{опт}$ показатель экстинкции $k_{eff} > 200 \text{ см}^{-1}$ (рисунок 2), откуда следует, что толщина слоя поглощения энергии $d = k_{eff}^{-1} < 50 \text{ мкм}$. При увеличении $\chi > \chi_{опт}$ давление падает (рисунок 9).

Для качественной интерпретации результатов рисунка 9 проведены расчеты зависимости амплитуды давления в зависимости от показателя поглощения излучения при воздействии лазерных импульсов. При расчетах использована модель оптоакустического эффекта в жидкости со свободной границей [12]. Расчетная зависимость амплитуды давления имеет характер, аналогичный рисунку 9. Зависимость (рисунок 9) можно объяснить следующим образом. При увеличении массовой доли включений χ (соответственно k_{eff}) возрастает объемная плотность поглощенной энергии, что приводит к росту давления. По мере увеличения k_{eff} толщина слоя, в котором поглощается энергия излучения, уменьшается. В результате уменьшается время его акустической релаксации и становится заметным расширение вещества во время действия импульса, что приводит к уменьшению давления.

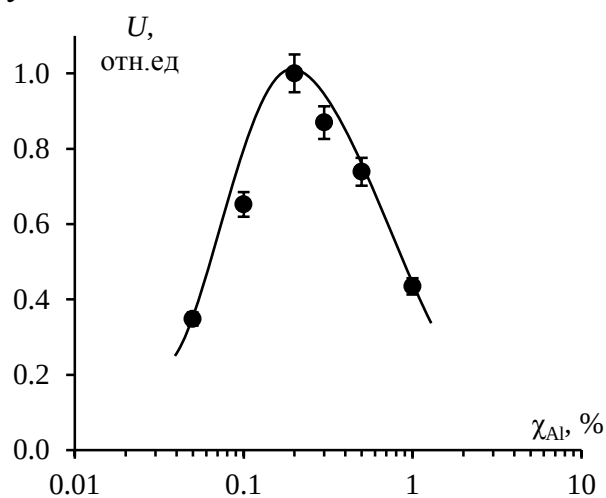


Рисунок 9 – Зависимость амплитуды оптоакустического сигнала от массовой доли включений Al в образцах

В рамках данной работы с учетом модели [12] можно предложить объяснение зависимости $H_{\text{cr}}(\chi)$ (рисунок 8), считая, что для инициирования химической реакции необходимо учитывать не только температуру горячей точки, но и ударные волны, возникающие в результате нагрева и повышения давления. Для левой ветви рисунка 9 давление не успевает релаксировать в течение импульса излучения (адиабатический случай). При этом с ростом массовой доли включений давление растет, а H_{cr} падает (левая ветвь рисунка 8). Для правых ветвей рисунков

8 и 9 характерное время релаксации давления меньше длительности импульса. Для компенсации уменьшения давления в расширяющемся слое вещества и поддержания его на уровне, соответствующем адиабатическому случаю, необходимо увеличение плотности энергии инициирующего импульса, что ведет к увеличению H_{cr} (правая ветвь рисунка 8).

Таким образом, приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что лазерное инициирование композитов не сводится только к нагреву образца до температуры вспышки, но следует включать в рассмотрение и увеличение давления в нагретом слое и связанные с ним ударно-волновые процессы.

Решалась задача исследования количественного влияния условий газодинамической разгрузки на порог взрывчатого разложения тэна и композитов тэн-Al. Газодинамическая разгрузка оказывает весьма существенное влияние на значение порогов взрывчатого разложения энергетических материалов, в которых в результате воздействия, например, лазерного излучения, образуются газообразные продукты.

Для полного блокирования газодинамической разгрузки непосредственно к образцам прикладывалось регулируемое давление с помощью специального

устройства. Инициирование взрыва первой гармоникой лазера осуществлялось в условиях статического давления, приложенного к образцу. Измерение H_{cr} проводилось по методике, применяемой в предыдущих разделах. Результаты экспериментов представлены на рисунке 10.

Как видно из рисунка 10 при непосредственном давлении на образец для каждой кривой с увеличением массовой доли включений уменьшается H_{cr} до постоянной величины.

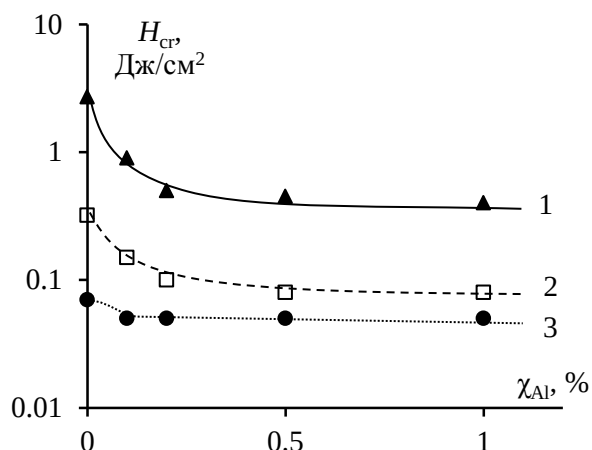


Рисунок 10 – Зависимости H_{cr} для тэна от массовой доли включений алюминия в образце при различных внешних статических давлениях на образец: 1 – 17,5 МПа, 2 – 120 МПа, 3 – 288 МПа

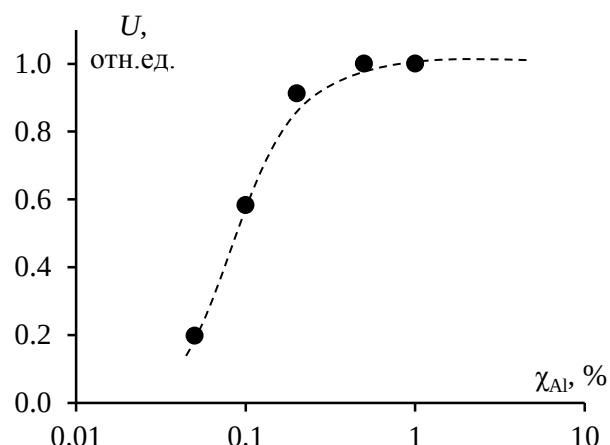


Рисунок 11 – Зависимость амплитуды сигнала пьезопреобразователя (в относительных единицах) от массовой доли включений: облучаемая поверхность образца покрыта стеклянной пластиной и приложена нагрузка $P = 17,5$ МПа

Для объяснения результатов экспериментов были проведены измерения амплитуды акустического сигнала с помощью пьезопреобразователя с приложением нагрузки на стеклянную пластину, накрывающую облучаемую поверхности образца. Пластина прижималась к образцу с помощью специального устройства. Результат представлен на рисунке 11.

С ростом массовой доли включений сигнал пьезоакустического преобразователя растет до значения, стремящегося к максимальному. Для качественной интерпретации полученной зависимости в рамках модели [12] проведены расчеты амплитуды давления P , возникающего при воздействии на вещество с теплофизическими параметрами тэна импульсами лазерного излучения длительностью 14 нс при варьировании показателя экстинкции излучения k_{eff} . При расчетах использовалось граничное условие с жестко закрепленной облучаемой поверхностью. Жестко закрепленная облучаемая поверхность исключает возможность расширения слоя в результате импульсного нагрева, и в решении присутствует только волна сжатия. Результаты расчёта зависимости $P(k_{eff})$ качественно соответствуют данным рисунка 11. Таким образом, условия данного эксперимента соответствуют отсутствию газодинамической разгрузки.

Результаты, приведенные на рисунке 10, позволяют предположить, что в образцах, находящихся под внешним давлением, образуются дефектные места, в окрестности которых возможно инициирование химической реакции. При этом с ростом внешнего давления их концентрация может быть близкой к концентрации

включений алюминия, и последние под воздействием лазерного излучения дают относительно небольшой вклад в развитие химической реакции (кривая 3, рисунок 10). О природе этих центров можно высказать следующее предположение. Во-первых, исходные образцы прессуются до высокой плотности. Они практически прозрачны и представляют собой поликристалл с границами зерен и дислокациями с высокой концентрацией. В работе [18] дается концентрация дислокаций в RDX до $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Это соответствует $\sim 8,5 \cdot 10^{16}$ молекул, расположенных около дислокационного ядра в образце объемом 1 мм^3 [19]. Можно ожидать, что в тэне наблюдается аналогичная ситуация. В экспериментах под давлением число таких дефектов растет. В их окрестностях облегчена ионизация молекул тэна и начало химической реакции. Такой механизм предложен в расчетной работе для RDX [19], где в качестве доминирующего дефекта предложены дислокации.

В следующем разделе экспериментально исследовано влияние размеров включений на порог взрывчатого разложения на примере композита тэна с включениями Ni с размерами 130, 160 и 280 нм. При этом массовая доля включений различных размеров в образцах была одинаковая $\chi = 0,1 \%$ по массе. Как и в предыдущем разделе, измерялась зависимость вероятности взрыва p от плотности энергии в импульсе лазера (1064 нм) и определялись пороги взрывчатого разложения H_{cr} . Зависимость H_{cr} от размеров включений представлена на рисунке 12.

Таким образом, экспериментально обнаружена немонотонная зависимость H_{cr} от размеров включений. При некотором оптимальном размере d_{opt} H_{cr} имеет минимальное значение.

На следующем этапе было проведено измерение показателей экстинкции аналогичных образцов оптико-акустическим методом. Полученные показатели экстинкции k_{eff} для образцов с различными размерами включений частиц никеля представлены на рисунке 13.

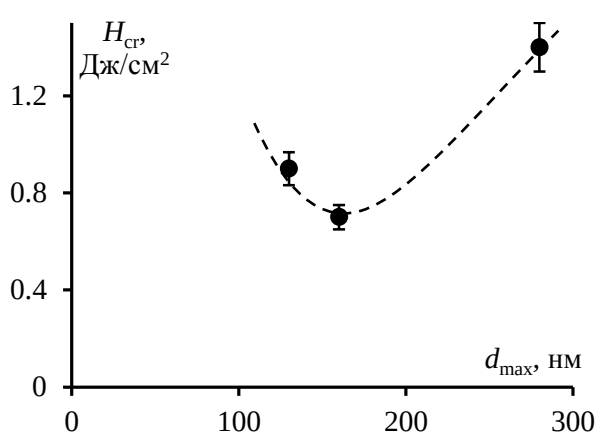


Рисунок 12 – Зависимость порога лазерного инициирования H_{cr} композита тэна-Ni от размера включений d_{max} никеля в образце: $\lambda = 1064 \text{ нм}$; $\chi = 0,1 \text{ масс.}\%$

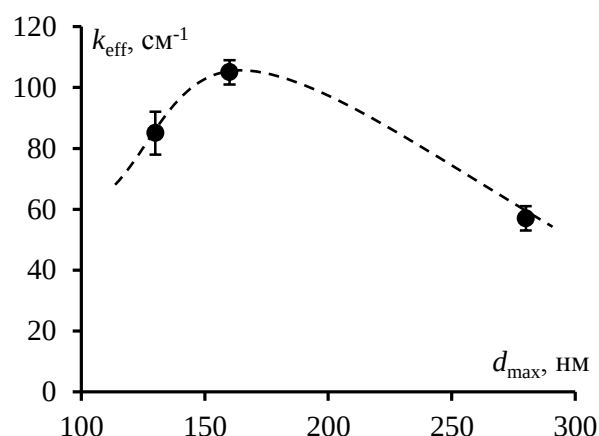


Рисунок 13 – Зависимость показателя экстинкции k_{eff} композита тэна-Ni в зависимости от размера включений d_{max} никеля в образце

Из рисунков 12 и 13 следует, что большему показателю экстинкции соответствует меньший порог инициирования H_{cr} , т.е.

$$k_{\text{eff}}(\text{Ni}(280 \text{ нм})) < k_{\text{eff}}(\text{Ni}(160 \text{ нм})) > k_{\text{eff}}(\text{Ni}(130 \text{ нм})); \quad (7)$$

$$H_{\text{cr}}(\text{Ni}(280 \text{ нм})) > H_{\text{cr}}(\text{Ni}(160 \text{ нм})) < H_{\text{cr}}(\text{Ni}(130 \text{ нм})).$$

Для объяснения результатов экспериментов понадобилось привлечение результатов теоретических расчетов эффективности поглощения лазерного излучения частицами нано и ультрадисперсных размеров.

Первые расчеты такого рода для поглощения излучения первой гармоникой неодимового лазера для включений различных металлов в матрицах PbN_6 , AgN_3 и тэна приведены в работе [20]. В рамках модифицированной теории Ми рассчитывалась эффективность поглощения излучения:

$$Q_{\text{abs}} = \sigma/\sigma_{\text{geo}}, \quad (8)$$

где σ – истинное сечение поглощения, σ_{geo} – геометрическое сечение.

Порог взрывчатого разложения H_{cr} следует связывать не сечением поглощения отдельной частицы, а с показателем поглощения излучения:

$$k_a = \sigma n, \quad (9)$$

где σ – сечение поглощения фотонов включениями металлов, см^2 ; n – концентрация включений в образце см^{-3} .

Из (8) и (9) следует (считаем частицы сферическими):

$$k_a = Q_{\text{abs}} \pi r^2 n. \quad (10)$$

Концентрацию включений n можно рассчитать по формуле, приведенной в [21], которую с учетом малости массовой доли и сферической формы включений можно представить в виде:

$$k_a = \frac{3}{2} \chi \frac{\rho_0}{\rho_d} \frac{Q_{\text{abs}}(d)}{d}, \quad (11)$$

где ρ_0 – плотность образца, ρ_d – плотность частицы включения, χ – массовая доля добавки включения. В наших экспериментах $\chi = 10^{-3}$.

Таким образом, зависимость k_a от размера включений определяется соотношением Q_{abs}/d (рисунок 14).

Как видно из рисунка 14 расчетное значение Q_{abs}/d подчиняется той же закономерности, что и экспериментально измеренные значения k_{eff} (рисунок 13). Более того отношение k_{eff} при 130 и 280 нм к k_{eff} при 160 нм дают значения 0,81 : 1 : 0,54. Аналогичные значения для теоретических расчетов (рисунок 14) дают 0,89 : 1 : 0,51, что указывает на неплохое совпадение эксперимента и теоретических расчетов.

В следующем разделе проведено исследование порога взрывчатого разложения композита тэн-АІ в зависимости от содержания АІ в частице включения.

Путем частичного отжига получали частицы с содержанием металла 77, 60, 47, 30 и 13 % по массе. При этом диаметр частиц не изменялся ($d = 100 \text{ нм}$). Изготавливались композиты с содержанием 0,1 масс.% включений в тэне ($\rho = 1,73 \text{ г/см}^3$) и измерялся порог взрывчатого разложения H_{cr} (рисунок 15).

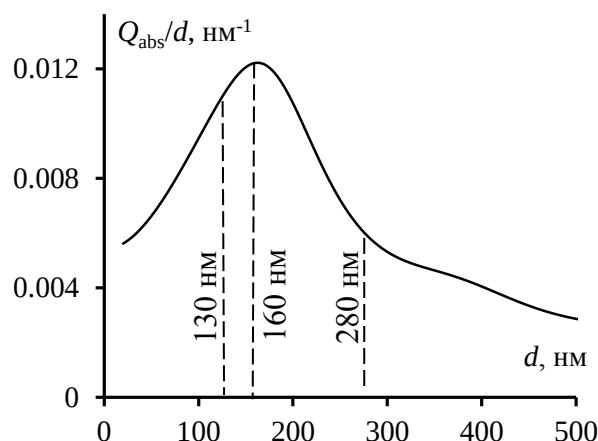


Рисунок 14 – Зависимость Q_{abs}/d от диаметра включений d никеля в матрице тэна: расчетные значения Q_{abs} из работы [20]

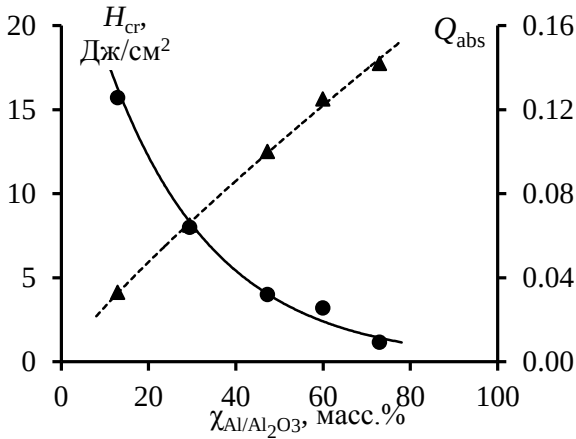


Рисунок 15 – Пороги инициирования взрывчатого разложения (левая ось) и коэффициент эффективности поглощения света Q_{abs} (правая ось) для различных массовых долей алюминия в частице

качественно согласуется с ростом H_{cr} .

В следующем разделе исследовалось влияние воздействия первой и второй гармониками лазера на композитные материалы тэн-Al и тэн-Fe, и воздействие второй гармоники лазера на образцы тэна без включений. Измерялись зависимости H_{cr} от массовой доли включений при воздействии первой и второй гармоник лазера. Результаты для композита тэн-Al представлены на рисунке 16.

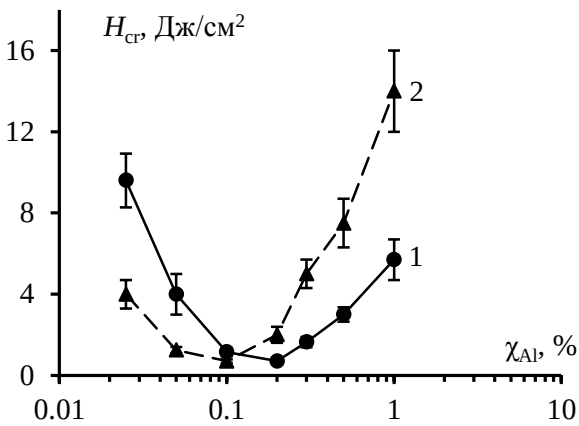


Рисунок 16 – Зависимость критической плотности энергии инициирования взрыва H_{cr} от массовой доли χ включений Al в образцах: 1 – $\lambda = 1064$ нм; 2 – $\lambda = 532$ нм

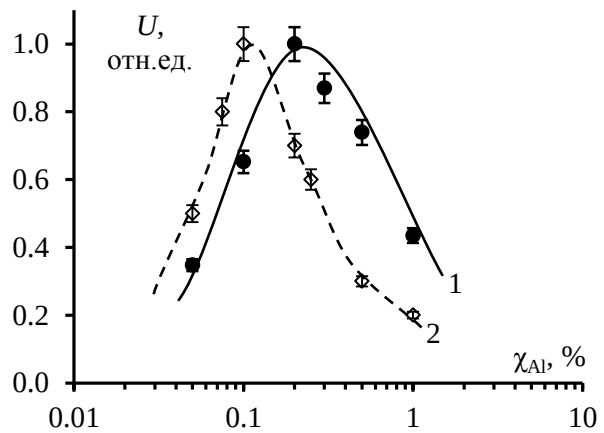


Рисунок 17 – Зависимость амплитуды опико-акустического сигнала от массовой доли включений в образе тэн-Al: 1 – 1064 нм; 2 – 532 нм; результаты нормированы на максимальные значения U

При воздействии первой и второй гармоник в обоих случаях наблюдается немонотонная зависимость $H_{cr}(\chi)$. Минимальные значения $H_{cr} = 0,7 \pm 0,1$ Дж/см² в погрешности эксперимента для композита тэн-Al одинаково при воздействии первой и второй гармониками, но достигается при оптимальных массовых долях включений $\chi_1 = 0,2$ масс.% и $\chi_2 = 0,1$ масс.%. Для композита тэн-Fe $H_{cr} = 0,6 \pm 0,1$ Дж/см² при оптимальных массовых долях 0,4 масс.% и 0,15 масс.% для первой и второй гармоник соответственно.

Объяснение немонотонного хода зависимостей $H_{cr}(\chi)$ дано в предыдущем разделе с привлечением измерений амплитуды акустических сигналов в зависимости от массовой доли включений. Аналогичные измерения приведены при воздействии излучения первой и второй гармоникой лазера на образцах композита тэн-АІ (рисунок 17).

Согласно измерениям максимальные значения $U(\chi)$ соответствуют минимальным значениям $H_{cr}(\chi)$ полученным при воздействии излучения первой и второй гармоник. Следовательно, качественная закономерность зависимости $H_{cr}(\chi)$ при воздействии излучения первой и второй гармоник лазера одинаковы. Останемся на количественном различии.

Для композитов тэн-АІ показатель поглощения излучения описывается формулой (10). В погрешности эксперимента минимальные значения:

$$H_{cr}^1 = H_{cr}^2 \text{ при } \chi_1 = 2 \chi_2, \quad (12)$$

где верхний индекс у критической плотности энергии H_{cr} (и далее коэффициента эффективности поглощения Q_{abs}) показывает номер гармоники лазера. Согласно теоретическим оценкам для наночастиц с диаметром 100 нм [20]:

$$Q_{abs}^2 / Q_{abs}^1 \approx 2. \quad (13)$$

Следовательно, пороги H_{cr}^1 и H_{cr}^2 совпадают при одинаковых значениях показателей поглощения излучения k_a в соответствии с формулой (10).

Таким образом, наблюдаемое различие H_{cr} для разных длин волн лазерного излучения связано с различием эффективности поглощения лазерного излучения Q_{abs} , причем H_{cr} одинаковы при одинаковых коэффициентах поглощения излучения различных длин волн.

Для образцов тэна без включений инициирование образцов с плотностью $1,73 \text{ г/см}^3$ в условиях эксперимента не удалось осуществить вплоть до максимально возможных (в условиях эксперимента) плотностей энергии $H = 35 \text{ Дж/см}^2$ с использованием излучения первой гармоники лазера. Однако инициирование таких образцов при воздействии второй гармоникой лазера оказалось возможным. Измерялась зависимость вероятности взрыва тэна от плотности энергии и определен порог взрыва $H_{cr} = 12,3 \pm 2 \text{ Дж/см}^2$. Зависимость коэффициента пропускания T от плотности энергии излучения второй гармоники лазера оказалась существенно нелинейной (рисунок 18):

$$T = I_p / I_0, \quad (14)$$

где I_0 – интенсивность падающего на образец излучения, I_p – интенсивность прошедшего излучения. Обработка результатов рисунка 18 была проведена в предположении, что в данном эксперименте происходит двухфотонное поглощение излучения второй гармоники лазера молекулами тэна.

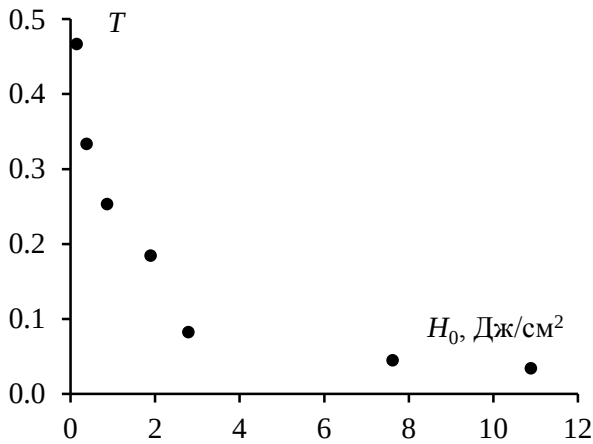


Рисунок 18 – Зависимость коэффициента пропускания тэна ($\rho = 1,73 \text{ г/см}^3$) от плотности энергии импульсов второй гармоники лазерного излучения

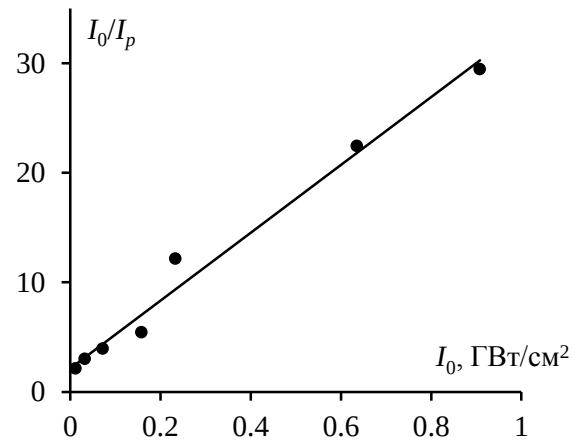


Рисунок 19 – Аппроксимация экспериментальных данных рисунка 18 формулой (15)

В работе показано, что в рамках модели можно получить выражение:

$$\frac{I_0}{I_p} = \frac{1}{1-R} + \beta d I_0, \quad (15)$$

где β – показатель двухфотонного поглощения, R и d – коэффициент отражения и толщина образца, соответственно. Аппроксимация данных рисунка 18 формулой (15) представлена на рисунке 19. Из наклона прямой рисунка 19 определен коэффициент двухфотонного поглощения $\beta = 300 \text{ см/ГВт}$ при толщине образца $d = 1 \text{ мм}$.

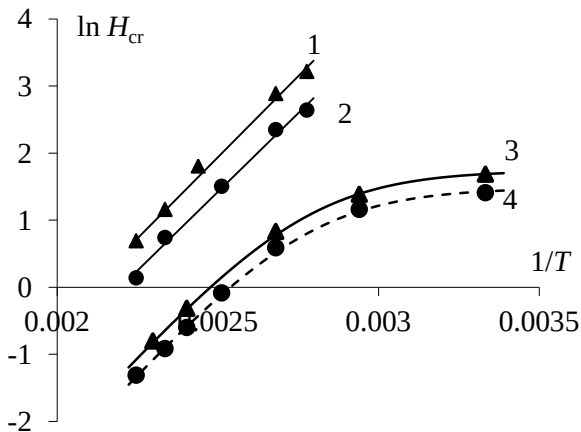


Рисунок 20 – Зависимость пороговой плотности энергии иницирования H_{cr} от начальной температуры в координатах $\ln H_{cr}$ от $1/T$. Прямые – аппроксимация выражением (16). 1 – при иницировании тэна первой гармоникой (1064 нм); 2 – при иницировании тэна второй гармоникой (532 нм); для образцов тэна, содержащих 0,1 % включений Al; пунктирная и штрихпунктирная кривые – аппроксимация выражением (17); 3 – первая гармоника (1064 нм); 4 – вторая гармоника (532 нм)

центрация структурных дефектов, способных поглощать энергию лазерного излу-

В следующем разделе исследована зависимость порога взрывчатого разложения тэна и композита тэн-Al (0,1 масс.%) от начальной температуры образца при воздействии излучения первой и второй гармоник лазера. Результаты представлены на рисунке 20.

Для объяснения результатов зависимости $H_{cr}(T)$ предложена эмпирическая модель и получены формулы для обработки экспериментальных результатов. Для тэна без включений:

$$H_{cr} = -W_0 \frac{\ln(1 - \frac{n_{cr}}{n_1})}{\alpha_1} e^{\frac{E}{kT}} = A e^{\frac{E}{kT}}, \quad (16)$$

где E – эффективная энергия активации образования центра химического разложения, $W_0 e^{\frac{E}{kT}}$ – затраты энергии в единице объема на образование центра химического разложения, n_1 – концентрация структурных дефектов, способных поглощать энергию лазерного излу-

чения, n_{cr} – критическая концентрация очагов химического разложения при которой происходит взрыв, α_1 – показатель поглощения излучения структурными дефектами.

Для образцов тэна с включениями:

$$H_{cr}(T) = \frac{B}{1 + \frac{W_n}{W_0} e^{-E/kT}}, \quad (17)$$

где W_n – энергетические затраты в единице объема не зависящие от температуры, связанные с образованием центров химического разложения в окрестности включений, нагретых в результате поглощения энергии лазерного излучения, B – критическая энергия инициирования, если вклад в образование очагов химического разложения при поглощении излучения структурными дефектами тэна отсутствует.

Экспериментальные результаты рисунка 20 обработаны в рамках эмпирической модели (сплошные кривые) при значениях $A = 4,3 \cdot 10^{-5}$ Дж/см², $E = 0,42 \pm 0,05$ эВ для инициировании первой гармоникой (прямая 1), $A = 3,1 \cdot 10^{-5}$ Дж/см² для инициировании второй гармоникой (прямая 2). Значения эффективной энергии активации $E = 0,42 \pm 0,05$ эВ совпадают для обеих прямых 1 и 2 (рисунок 20). Кривые 3 и 4 (рисунок 20) построены при значениях параметра $B = 5,7$ Дж/см² для инициирования первой гармоникой лазера и $B = 4,2$ Дж/см² – второй гармоникой. Значения $W_n/W_0 = 2 \cdot 10^6$, $E = 0,45$ эВ совпадают для обеих кривых.

Суммируя полученные результаты, можно сделать вывод, что механизмы инициирования химической реакции в композитном материале тэн–алюминий в температурном интервале 300–445 К одинаковы при воздействии, как первой, так и второй гармониками лазера, а различия в порогах инициирования связаны с большей эффективностью поглощения света второй гармоники частицами алюминия.

В следующем разделе исследовано влияние плотности образца на пороговые и динамические характеристики лазерного инициирования взрыва тонких образцов композитов тэн–Al при лазерном воздействии. Измерены пороги H_{cr} взрывчатого разложения тонких (1 мм) образцов композитов тэн–Al в диапазоне плотностей $\rho = 0,9–1,7$ г/см³ и вариации массовой доли включений Al в диапазоне 0,025–1 % при воздействии излучения первой гармоники лазера. Для каждой плотности установлены массовые доли включений χ_{opt} , при которых порог взрывчатого разложения H_{cr} минимален.

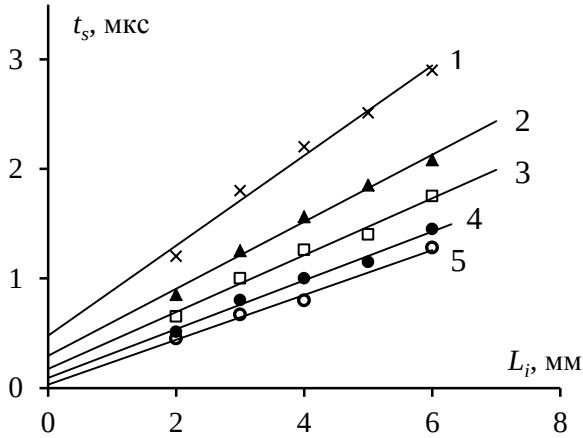


Рисунок 21 – Зависимость времени появления сигнала t_s пьезодетектора от расстояния до образца L_i . Образцы: тэн с включениями частиц алюминия с χ_{opt} при разных плотностях ρ . 1 – 0,2 %, $\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$; 2 – 0,3 %, $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$; 3 – 0,4 %, $\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$; 4 – 0,5 %, $\rho = 1,1 \text{ г/см}^3$; 5 – 0,6 %, $\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$

сечения прямых с осью ординат. Численным интегрированием осциллограмм получили значения: P_{max} – максимальное значение давления (в отн. ед.) УВ в воздухе, t_{max} – время достижения P_{max} .

Результаты для всех измеренных и рассчитанных величин представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Пороговые и динамические характеристики взрывчатого разложения композитов тэн-алюминий. ρ – плотность образца, $H_{\text{cr}}^{\text{min}}$ – минимальный порог взрывчатого разложения образцов при оптимальной массовой доли включений χ_{opt} , V_i – скорость ударной волны в воздухе, τ_{zi} – момент времени пересечения прямых (18) с осью ординат (рисунок 21), P_{max} – максимальное значение давления (в относительных единицах) УВ в воздухе, t_{max} – время достижения P_{max}

$\rho, \text{ г/см}^3$	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7
$H_{\text{cr}}^{\text{min}}, \text{ Дж/см}^2$	$3,3 \pm 0,3$	$3,2 \pm 0,3$	$2,1 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,2$	$0,7 \pm 0,1$
$\chi_{\text{opt}}, \text{ масс.}\%$	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
$V_i, \text{ км/с}$	$4,8 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,1$	$3,8 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,1$	$2,4 \pm 0,1$
$\tau_{\text{zi}}, \text{ нс}$	40 ± 14	80 ± 14	160 ± 14	280 ± 14	450 ± 14
$P_{\text{max}}, \text{ отн.ед.}$	46	40	30	17	8
$t_{\text{max}}, \text{ мкс}$	4,3	4,6	5,3	5,7	6,1

Из данных таблицы 2 следует, что в тонких образцах композита тэн-Ал наблюдаются следующие закономерности – с ростом плотности образцов уменьшаются пороги лазерного инициирования взрыва H_{cr} , скорости V_i и давление P_{max} ударных волн в воздухе, образующихся при взрыве образцов в воздухе.

Измерены времена появления регистрируемого сигнала t_s в зависимости от расстояния L между тыльной поверхностью образца и пьезопреобразователем.

Зависимости $t_s(L)$ для образцов с различной плотностью представлены на рисунке 21 и аппроксимируются уравнениями прямой:

$$t_s = \tau_{\text{zi}} + \frac{1}{V_i} \cdot L_i, \quad (18)$$

где t_s – время распространения ударной волны (УВ) в воздухе от тыльной поверхности образца до пьезодетектора при соответствующем L_i , V_i – скорость УВ при соответствующих ρ_i , L_i – расстояние от тыльной поверхности образца до пьезодетектора, τ_{zi} – момент времени пере-

Анализ совокупности результатов позволяет объяснить закономерности лазерного инициирования тонких образцов композитов тэн-Аl. Для плотных образцов ($\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$) наблюдаемый низкий порог инициирования можно объяснить хорошим контактом частиц матрицы с включениями Al. Как показано в предыдущих разделах работы, при лазерном облучении образцов с $\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$ с пороговой плотностью энергии показатель экстинкции излучения $k_{\text{eff}} \geq 200 \text{ см}^{-1}$, и, следовательно, инициирование химической реакции происходит преимущественно вблизи поверхности образца до глубины $d = k_{\text{eff}}^{-1} \leq 50 \text{ мкм}$. В этом слое образуются «горячие точки», представляющие собой, нагретые частицы Al и окружающую их оболочку матрицы тэна, которая уже за время лазерного импульса прогревается до расстояния:

$$L = (\eta \tau_i)^{1/2}, \quad (19)$$

где η – температуропроводность тэна, τ_i – длительность лазерного импульса.

В области, непосредственно прилегающей к включению, при превышении H_{cr} инициируется химическая реакция. При этом в облученной области выделяется газ, увеличивается давление, образуется и распространяется в необлученную часть образца ударная волна, что приводит к взрыву. Однако эффективность этого процесса невысока. Поскольку толщина образца мала, химическая реакция не успевает развиваться в полной мере и поддерживать ударную волну для достижения ей детонационной скорости D . Поэтому значительная часть образца разбрасывается, т.е. полнота взрыва не высокая, о чем свидетельствуют минимальные значения V_i , P_{max} .

При уменьшении плотности образцов порог инициирования возрастает из-за ухудшения контакта частиц Al с матрицей тэна. После инициирования, из-за увеличения пористости, уменьшается теплопроводность, однако растет коэффициент теплопередачи за счет роста удельной поверхности. Облегчается воспламенение за счет проникновения в поры горячих продуктов ВВ и горячего воздуха, что может привести к воспламенению глубинных слоев ВВ [21]. В этом случае инициирование реакции в необлученной части образца может опережать ударную волну по механизму взрывного горения, предложенному в [22]. По мере уменьшения плотности образцов этот механизм дает увеличивающийся вклад. При этом, чем ниже ρ , тем лучше динамические характеристики взрыва: растут V_i , P_{max} , уменьшается τ_{zi} (см. таблицу 2). Следовательно, с уменьшением ρ растет полнота взрыва образца, т.е. увеличивается эффективность взрывчатого разложения.

Отметим, что наблюдаемые особенности характерны для тонких образцов. При увеличении толщины образцов до характерной величины (дистанции пробега УВ до детонации) скорость УВ в образце возрастет до детонационной D и будут наблюдаться хорошо известные закономерности характеристик взрыва при нормальной детонации [21], отличающиеся от рассмотренных в данном разделе для тонких образцов.

В пятой главе приведены экспериментальные данные по исследованию спектрально-кинетических характеристик свечения исследуемых объектов в условиях импульсного лазерного воздействия. Информацию о первичных процессах взрывчатого разложения композитов на основе тэна с включениями частиц метал-

лов ультрадисперсных размеров при лазерном инициировании получена из измерения спектрально-кинетических характеристик свечения, возникающего при взрыве образцов. Измерения сделаны в режиме реального времени с использованием в качестве регистрирующей системы спектрофотохронографа на базе электронно-оптического преобразователя с временным разрешением 10 нс и спектральным разрешением 10 нм. Кинетика свечения возникающего при взрыве образца для композита тэн-Fe представлена на рисунке 22. Для композитов тэн-Al и тэн-Ni кинетики взрывчатого свечения имеют аналогичный характер.

Первый пик свечения возникает в момент воздействия лазерного импульса, когда образец находится еще в конденсированной фазе. Интенсивность свечения максимальна на момент окончания лазерного импульса и затухает за время ~ 60 нс во всех исследованных композитах. Форма спектров свечения зависит от плотности энергии лазерного импульса H . По мере увеличения плотности энергии спектры смещаются в ультрафиолетовую область. При достижении $H \geq 2$ Дж/см² спектры свечения не изменяются для всех исследованных композитов (рисунок 23).

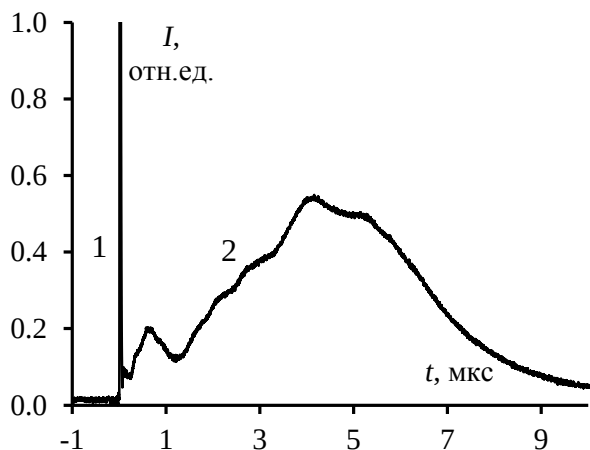


Рисунок 22 – Кинетика свечения, возникающего при взрыве образца

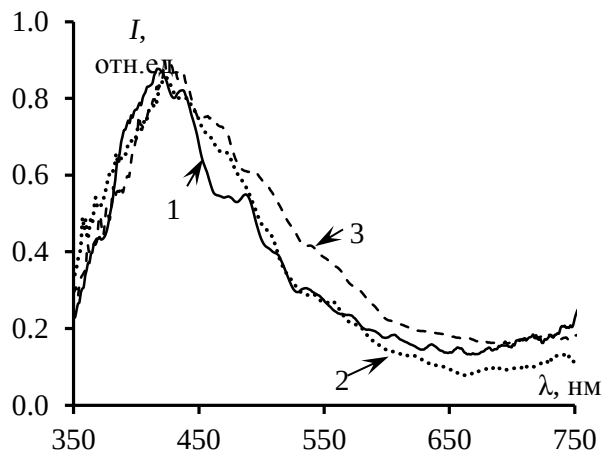


Рисунок 23 – Спектры свечения в момент окончания лазерного импульса: 1 – тэн-Al, 2 – тэн-Fe, 3 – тэн-Ni

Таким образом, из представленного экспериментального материала следует, что спектрально-кинетические характеристики исследуемых композитных материалов имеют близкий характер. Во время воздействия лазерного импульса максимум интенсивности свечения для всех композитов находится при $\lambda = 420$ нм (2,95 эВ). Вид спектра позволяет сделать вывод, что свечение не является тепловым и, следовательно, имеет люминесцентный характер. Наблюдаемое свечение, с нашей точки зрения, связано с возбуждённым радикалом $\text{NO}_2^\bullet$, образующегося при диссоциации молекул тэна во время лазерного импульса. В пользу последнего предположения можно привести следующие доводы.

В работе [23] изучали лазерно-индуцированную флюоресценцию при возбуждении излучением с $\lambda = 460, 532, 560, 584$ и 680 нм. Во всех случаях флюоресценция возникала в диапазоне от длин волн возбуждения до границы спектрального диапазона аппаратуры 830 нм. максимум свечения наблюдали со сдвигом ~ 100 нм от длины волны возбуждения. Отсюда следует, что форма спектра

флюоресценции зависит от степени возбуждения молекулы, т.е. заполнения колебательно-вращательных уровней возбужденного электронного состояния. Эти результаты дают возможность объяснить различие форм спектров флюоресценции в зависимости от плотности энергии инициирования H , которая наблюдалась в данной работе. При поглощении излучения металлической частицей за время импульса происходит нагрев не только частицы, но и окружающей ее оболочки тэна за счет температуропроводности. В результате в оболочке происходит первичный процесс отрыва возбужденного радикала $\text{NO}_2^\bullet$ от молекулы тэна. Чем больше H , тем выше степень возбуждения $\text{NO}_2^\bullet$. При этом в нагретой оболочке тэна инициируется химическая реакция, повышается температура осколков, что приводит также к увеличению степени нагрева и заполнения колебательно-вращательных уровней возбужденного состояния $\text{NO}_2^\bullet$. В результате наблюдается изменение формы спектров со сдвигом максимума свечения в ультрафиолетовую область. Заметим, что максимум спектра при $\lambda = 420$ нм не смещается в коротковолновую область при увеличении $H > 2$ Дж/см². Этот факт свидетельствует о том, что при $H \sim 2$ Дж/см² происходит полное заполнение колебательно-вращательных уровней верхнего возбужденного состояния. При увеличении энергии возбуждения происходит диссоциация молекулы $\text{NO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$ при переданной молекуле энергии $E \geq 3,1$ эВ [24].

Спектр свечения, соответствующий кинетике свечения взрывчатого разложения представлен на рисунке 24. Это свечение также может быть связано как с неравновесным свечением осколков молекулы, образующихся в процессе взрывчатого разложения (люминесценцией), так и квазиравновесным тепловым свечением продуктов взрыва. Для возможности отнесения наблюдаемого свечения к тепловому воспользовались методом спектральной пирометрии с использованием координат Вина [25].

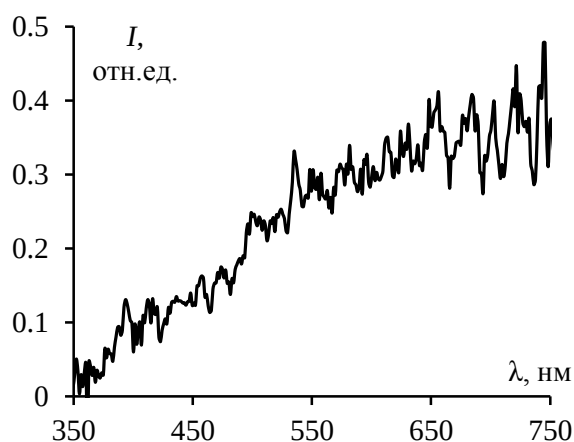


Рисунок 24 – Спектр свечения в момент времени 4 мкс (рисунок 22)

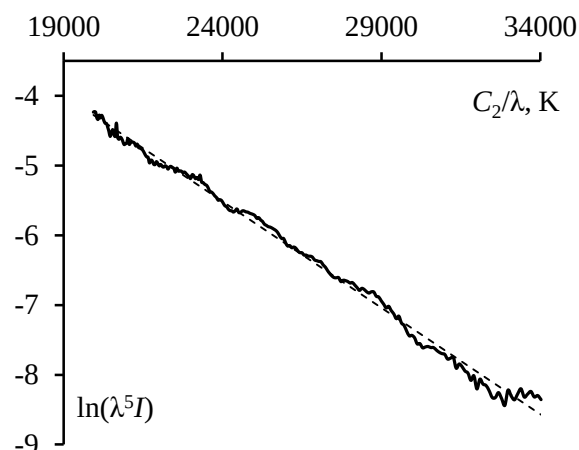


Рисунок 25 – Спектр свечения в координатах Вина: сплошная кривая – эксперимент; пунктир – линейная регрессия

В области Вина формулу Планка можно упростить и получить выражение [25]:

$$\ln(\lambda^5 I) - \ln(\epsilon C_1) = -C_2/(\lambda T), \quad (20)$$

где $C_1 = 37418$ Вт·мкм⁴/см²; $C_2 = 14388$ мкм·К, ϵ – коэффициент излучения.

Если по оси абсцисс взять значение $x = C_2/\lambda$, а по оси ординат $\ln(\lambda^5 I)$, то в случае теплового свечения должен выполняться линейный закон. По наклону прямой можно определить температуру светящегося тела [25]. На рисунке 25 представлен спектр рисунка 24 в координатах Вина. Линейность спектров в координатах Вина позволяет идентифицировать свечение на стадии взрывчатого разложения как тепловое. Определяемая по наклону прямой (рисунок 25) температура для композита тэн-Fe $T = 3400 \pm 100$ К. Аналогичные измерения, проведенные на композитах тэн-Al и тэн-Ni позволили определить температуру продуктов взрывчатого разложения. $T = 3400 \pm 100$ К и $T = 3300 \pm 100$ К, соответственно.

В шестой главе проведен анализ обсуждаемых в литературе моделей лазерного инициирования ВВ и дан анализ факторов, влияющих на порог взрывчатого разложения слабопоглощающих излучение ВВ с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц под действием импульсного лазерного излучения, которые изучены в настоящей работе и сформулирована экспериментально обоснованная модель взрывчатого разложения таких объектов при лазерном инициировании, включающая следующие этапы:

а) поглощение лазерного излучения металлическими частицами, нагрев частиц и прилегающих слоев ВВ до температуры выше температуры плавления ВВ. Частица и ее нагретое окружение ВВ представляют собой «горячую точку»;

б) при превышении плотности энергии порогового значения происходит диссоциация молекулы ВВ (тэн, RDX) на возбужденный радикал $\text{NO}_2^\bullet$ и остаточный радикал $\text{R}^\bullet$;

в) радикал $\text{NO}_2^\bullet$ флуоресцирует за время ~ 60 нс. В остаточном радикале $\text{R}^\bullet$ протекает экзотермическая химическая реакция, приводящая к превращению образца в газообразные продукты и взрыву. Процесс происходит в микросекундном временном интервале и сопровождается тепловым свечением с температурой $T \sim 3400$ К;

г) для каждого типа включений в образце существует оптимальная массовая доля и оптимальный размер, при которых порог лазерного инициирования взрыва минимален;

д) необходимым условием взрыва является блокирование газодинамической разгрузки образца. Во время импульса поглощение энергии излучения при оптимальной массовой доле включений происходит в поверхностном слое образца глубиной $d \approx 50$ мкм. В результате развития химической реакции в «горячих точках» происходит повышение температуры и давления в облученном слое, что приводит к возникновению ударной волны и распространению ее в необлученную часть образца. Развитие взрывчатого разложения в необлученном слое образца происходит по ударно-волновому механизму.

Процесс взрывчатого разложения исследованных материалов определяется всеми факторами, описанными в модели, которые действуют одновременно. Используя результаты, полученные в работе можно целенаправленно влиять на действие того или иного фактора в зависимости от необходимости.

Одним из важных результатов работы, который будет иметь практическое применение – это экспериментальное обнаружение корреляции оптико-акустических и взрывчатых характеристик композитных материалов. Амплитуда оптико-акустических сигналов максимальна при массовых долях включений χ_{opt} . При этих же значениях χ_{opt} порог взрывчатого разложения H_{cr} для исследованных композитов минимален. При фиксированной массовой доле включений амплитуда акустических сигналов максимальна при оптимальных размерах частиц d_{opt} . При таких же d_{opt} порог H_{cr} минимален. Поскольку оптико-акустические эксперименты можно проводить в довзрывном режиме, то это позволит исследовать различные композиты с целью нахождения материала с минимальным H_{cr} при лазерном воздействии без проведения серии взрывчатых испытаний, ограничиваясь теоретическими расчетами и оптико-акустическими измерениями, что резко сократит трудозатраты и стоимость экспериментальных работ.

Обобщение изученных факторов, влияющих на порог взрывчатого разложения H_{cr} в рамках предложенной выше модели позволяет сформулировать научно-обоснованный алгоритм получения материалов на основе слабопоглощающих излучение бризантных ВВ с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц с минимальными плотностями энергии инициирования H_{cr} , не прибегая к взрывным экспериментам:

а) рассчитать коэффициент эффективности поглощения $Q_{\text{abs}}(d)$ в зависимости от размера включений d определенного металла в матрице при заданной плотности определенного бризантного ВВ (PETN, RDX, НМХ и т.д.) на необходимой длине волны лазерного излучения. Методики расчета в рамках модифицированной теории Ми предложены в работах [20, 26];

б) рассчитать зависимость $Q_{\text{abs}}(d)/d$ и определить размер частицы d_{opt} в максимуме полученной зависимости;

в) используя частицы соответствующего металла с размерами d_{opt} изготовить образцы ВВ с различной массовой долей включений χ ;

г) провести оптико-акустические измерения зависимости амплитуды (U) акустического сигнала от массовой доли включений (χ) в образце;

д) из полученной зависимости $U(\chi)$ определить оптимальную массовую долю включений χ_{opt} , соответствующую максимуму зависимости $U(\chi)$;

е) использовать образцы ВВ с включениями металла с оптимальными размерами d_{opt} и оптимальной массовой долей χ_{opt} во взрывчатых экспериментах, которые дадут минимальный порог лазерного инициирования взрыва H_{cr} при выбранной плотности ВВ.

Для проверки предложенной модели и алгоритма получения материалов на основе слабопоглощающих излучение бризантных ВВ с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц с минимальными плотностями энергии инициирования были проведены исследования взрывчатого разложения RDX с включениями металлических частиц. Показано, что закономерности взрывчатого разложения композитов на основе RDX с включениями металлических частиц при воздействии импульсов лазерного излучения полностью аналогичны наблюдаемым закономерностям в композитах на основе тэна с включени-

ями, что свидетельствует об идентичности процессов, протекающих в композитах на основе тэна и RDX с включениями металлов и справедливости предложенной модели.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

Основные результаты и выводы

1. В тэне и RDX с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц поглощение лазерного излучения происходит непосредственно включениями. Увеличение поглощения матрицей ВВ в результате рассеяния излучения на включениях играет второстепенную роль.

2. При плотностях энергии $H > 0,1$ Дж/см² наблюдается нелинейный рост показателя экстинкции k_{eff} тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц алюминия, что приводит к экспоненциальному росту амплитуды оптико-акустического сигнала U , пропорционального давлению P , и линейному росту P с увеличением объемной плотности поглощенной энергии лазерного излучения Q_v .

3. Зависимость порога взрывчатого разложения при лазерном инициировании тэна и RDX с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц Al, Ni, Fe от массовой доли включений χ при частичном блокировании газодинамической разгрузки имеет вид кривой с минимумом при оптимальной массовой доле χ_{opt} . Экспериментально показано, что для χ_{opt} давление P в облученном слое имеет максимальное значение. Модельные расчеты зависимости амплитуды давления в слое поглощения энергии лазерных импульсов в условиях почти свободной облучаемой поверхности от экстинкции k_{eff} объясняет наличие максимума на кривой $P(k_{\text{eff}})$ переходом от режима «мгновенного» адиабатического нагрева без релаксации давления за время действия лазерного импульса к квазистатическому режиму, когда за время импульса облученный слой успевает расшириться. При полном блокировании газодинамической разгрузки образцов, облучаемая поверхность является жесткозакрепленной и при лазерном воздействии возникает только волна сжатия. В этом случае с ростом массовой доли включений давление возрастает до максимальной величины, а порог взрывчатого разложения H_{cr} снижается до постоянного значения.

4. Пороги взрывчатого разложения при лазерном инициировании тэна и RDX с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц зависят от размера включений. Для включений с оптимальными размерами, для которых H_{cr} минимален, показатель экстинкции излучения k_{eff} максимален. Расчеты, проведенные в рамках теории Ми связывают обнаруженный эффект с зависимостью сечения поглощения излучения от размеров частиц.

5. Порог взрывчатого разложения H_{cr} для тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц Al зависит от соотношения Al/Al₂O₃, т.е. от массового содержания активного металла в частице включения. С уменьшением содержания Al растет значение H_{cr} . При этом уменьшается коэффициент эффективности поглощения излучения Q_{abs} .

6. Пороги взрывчатого разложения при лазерном инициировании тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц зависят

от длины волны излучения. Показано, что H_{cr} следует связывать с показателем экстинкции $k_{eff} \sim Q_{abs} \cdot n_{opt}$, при этом значение коэффициента эффективности поглощения излучения Q_{abs} для различных длин волн различно. При одинаковых значениях k_{eff} наблюдается одинаковые значения H_{cr} для различных длин волн.

7. Инициирование взрывчатого разложения тэна без включений при лазерном воздействии в условиях частичного блокирования газодинамической разгрузки возможно излучением второй гармоники лазера по механизму двухфотонного поглощения излучения молекулой тэна. Экспериментально измерен показатель двухфотонного поглощения $\beta = 300$ см/ГВт.

8. Инициирование тонких образцов (1 мм) тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц Al при лазерном воздействии подчиняется следующим закономерностям – с ростом плотности образцов уменьшаются пороги лазерного инициирования взрыва H_{cr} , скорости и давление ударных волн, образующихся при взрыве образцов в воздухе.

9. Исследовано влияние начальной температуры образца на порог H_{cr} . Для тэна без включений H_{cr} уменьшается в интервале температур 400–450 К с эффективной энергией активации $E_a = 0,4$ эВ при воздействии первой и второй гармоник лазера. Обе зависимости описываются одинаковыми закономерностями. Для тэна с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц Al при воздействии первой и второй гармоник лазера H_{cr} слабо зависит от начальной температуры в интервале 295–350 К. В интервале температур 400–450 К, порог взрывчатого разложения снижается с эффективной энергией активации $E_a = 0,4$ эВ. Количественное различие связано с различной эффективностью поглощения Q_{abs} излучения первой и второй гармоник.

10. Кинетики свечения тэна и RDX с включениями ультрадисперсных пассивированных частиц Al, Ni, Fe имеют качественно одинаковый характер: интенсивность свечения растет во время воздействия лазерного импульса с последующим спадом за время ~ 60 нс; свечение в микросекундном временном интервале связано со взрывчатым разложением ВВ.

11. Спектры свечения, наблюдаемые во время воздействия лазерного импульса, связаны с возбужденными радикалами $NO_2^\bullet$, образующимися в «горячей точке» в результате диссоциации молекул ВВ. Спектры свечения на стадии взрывчатого разложения имеют тепловой характер. Определена температура свечения продуктов взрыва образцов тэн-Al $T = 3400 \pm 100$ К, тэн – Fe $T = 3400 \pm 100$ К, тэн-Ni $T = 3300 \pm 100$ К, RDX-Al $T = 3500 \pm 100$ К, RDX-Fe $T = 3500 \pm 100$ К.

12. Предложена экспериментально обоснованная модель взрывчатого разложения композитов на основе слабопоглощающих излучение бризантных ВВ (тэна, RDX) с включениями ультрадисперсных пассивированных металлических частиц при лазерном инициировании.

13. Совокупность результатов работы позволяют сформулировать научно-обоснованный алгоритм получения оптимальных материалов для применения в устройствах с лазерным инициированием взрыва на основе слабопоглощающих излучение ВВ и ультрадисперсных металлов.

Список цитируемой литературы

1. *Kennedy, J. E.* Spark and Laser Ignition / под ред. В. Asay. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. – P. 583–605.
2. *Бриш, А. А.* Возбуждение детонации конденсированных ВВ излучением оптического квантового генератора / *А. А. Бриш, И. А. Галеев, Б. Н. Зайцев, Е. А. Сбитнев, Л. В. Татаринцев* // Физика горения и взрыва. – 1966. – Т. 2, № 3. – С. 132–138.
3. *Бриш, А. А.* О механизме инициирования конденсированных ВВ излучением ОКГ / *А. А. Бриш, И. А. Галеев, Б. Н. Зайцев, Е. А. Сбитнев, Л. В. Татаринцев* // Физика горения и взрыва. – 1969. – Т. 5, № 4. – С. 475–480.
4. *Буркина, Р. С.* Инициирование реакционно-способного вещества потоком излучения при его поглощении оптическими неоднородностями вещества / *Р. С. Буркина, Е. Ю. Морозова, В. П. Ципилев* // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47, № 5. – С. 95–105.
5. *Kuklja, M. M.* Achieving tunable chemical reactivity through photo-initiation of energetic materials at metal oxide surfaces / *M. M. Kuklja, R. Tsyshevsky, A. S. Zverev, A. Mitrofanov, N. Ilyakova, D. R. Nurmukhametov, S. N. Rashkeev* // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2020. – Vol. 22, No. 43. – P. 25284–25296.
6. *Шейков, Ю. В.* О механизме инициирования алюминизированных бризантных взрывчатых веществ лазерным излучением / *Ю. В. Шейков, С. М. Батьянов, О. Н. Калашикова, О. М. Луковкин, Д. В. Мильченко, С. А. Вахмистров, А. Л. Михайлов* // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54, № 5. – С. 57–64.
7. *Таржанов, В. И.* Лазерное инициирование низкоплотных смесей тэна с металлическими добавками / *В. И. Таржанов, В. И. Сдобнов, А. Д. Зинченко, А. И. Погребов* // Физика горения и взрыва. – 2017. – Т. 53, № 2. – С. 118–125.
8. *Илюшин, М. А.* Влияние добавок ультрадисперсных частиц углерода на порог лазерного инициирования полимерсодержащего светочувствительного взрывчатого состава / *М. А. Илюшин, И. В. Целинский, И. А. Угрюмов, А. С. Козлов, В. Ю. Долматов, И. В. Шугалей, А. Н. Головчак, А. В. Веденецкий, Д. В. Королев, В. Б. Остаев* // Химическая физика. – 2005. – Т. 24, № 10. – С. 49–56.
9. *Blachowski, T.* Development of an optical BNCP/HNS detonator for various aircrew escape system applications / *T. Blachowski, P. Ostrowski* // 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. – 2000.
10. *Krupa, T. J.* Optical R&D at the Army Research Laboratory / *T. J. Krupa* // Optics and Photonics News. – 2000. – Vol. 11, No. 6. – P. 16.
11. *Bourne, N. K.* On the laser ignition and initiation of explosives / *N. K. Bourne* // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2001. – Vol. 457, No. 2010. – P. 1401–1426.
12. *Гусев, В. Э.* Лазерная оптоакустика / В. Э. Гусев, А. А. Карабутов – Москва: Наука, 1991.
13. *Aluker, E. D.* Laser Initiation of Energetic Materials: Selective Photoinitiation Regime in Pentaerythritol Tetranitrate / *E. D. Aluker, A. G. Krechetov, A. Y. Mitrofanov,*

D. R. Nurmukhametov, M. M. Kuklja // The Journal of Physical Chemistry C. – 2011. – Vol. 115, No. 14. – P. 6893–6901.

14. *Таржанов, В. И.* Лазерное инициирование тэна / *В. И. Таржанов, А. Д. Зинченко, В. И. Сдобнов, В. В. Токарев, А. И. Погребнов, А. А. Волкова* // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 4. – С. 113–119.

15. *Быхало, А. И.* Инициирование тэна мощным лазерным излучением / *А. И. Быхало, Е. В. Жужукало, И. Г. Ковальский, А. Н. Коломийский, В. В. Коробов, А. Д. Рожков, А. И. Юдин* // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т. 21, № 4. – С. 54–58.

16. *Карабутов, А. А.* Измерение оптических характеристик рассеивающих сред лазерным оптико-акустическим методом / *А. А. Карабутов, И. М. Пеливанов, Н. Б. Подымова, С. Е. Скипетров* // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 29, № 3. – С. 215–220.

17. *Делоне, Н. Б.* Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Курс лекций. Учебное руководство / *Н. Б. Делоне* – Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.

18. *Sharma, J.* Atomic Force Microscopy of Hot Spot Reaction Sites in Impacted RDX and Laser Heated AP / *J. Sharma, C. S. Coffey, A. L. Ramaswamy, R. W. Armstrong* // MRS Proceedings. – 1995. – Vol. 418, No. 1. – P. 215–220.

19. *Kuklja, M. M.* An excitonic mechanism of detonation initiation in explosives / *M. M. Kuklja, E. V. Stefanovich, A. B. Kunz* // Journal of Chemical Physics. – 2000. – Vol. 112, No. 7. – P. 3417–3423.

20. *Кригер, В. Г.* Влияние эффективности поглощения лазерного излучения на температуру разогрева включений в прозрачных средах / *В. Г. Кригер, А. В. Каленский, А. А. Звеков, И. Ю. Зыков, Б. П. Адуев* // Физика горения и взрыва. – 2012. – Т. 48, № 6. – С. 54–58.

21. *Орленко, Л. П.* Физика взрыва / *Л. П. Орленко* – Москва: ФИЗМАТЛИТ, Т. 1, 2004.

22. *Апин, А. Я.* О детонации и взрывном горении взрывчатых веществ / *А. Я. Апин* // Доклады АН СССР. – 1945. – Т. 50. – С. 285–288.

23. *Oh, D.* Nitrogen dioxide fluorescence from N₂O₅ photolysis / *D. Oh, S. Sisk, A. Young, H. Johnston* // Journal of Chemical Physics. – 1986. – Vol. 85, No. 12. – P. 7176–7181.

24. *Окабе, Х.* Фотохимия малых молекул / *Х. Окабе*. – М.: Мир, 1981. – 504 с.

25. *Магунов, А. Н.* Спектральная пирометрия (обзор) / *А. Н. Магунов* // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 4. – С. 5–28.

26. *Звеков, А. А.* Методика расчета оптических характеристик композитов на основе прозрачной матрицы с остаточной пористостью и наночастиц металлов / *А. А. Звеков, М. В. Ананьева, А. В. Каленский, Б. П. Адуев, Е. В. Галкина* // Журнал прикладной спектроскопии. – 2019. – Т. 86, № 3. – С. 438–446.

Основные публикации по теме диссертации

1. Aduев, B. P. RDX-Al and PETN-Al composites' glow spectral kinetics at the explosion initiated with laser pulse / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, I. Y. Liskov, A. A. Zvekov // *Combustion and Flame*. – 2021. – Vol. 223. – P. 376–381.
2. Aduев, B. P. Laser pulse initiation of RDX-Al and PETN-Al composites explosion / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, I. Y. Liskov, A. V. Tupitsyn, G. M. Belokurov // *Combustion and Flame*. – 2020. – Vol. 216. – P. 468–471.
3. Aduев, B. P. Effect of the density of PETN-aluminum composites on the threshold of laser initiated explosive decomposition / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, N. V. Nelyubina // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2019. – Vol. 55, No 6. – P. 718–722.
4. Aduев, B. P. Laser initiation of PETN with inclusions of aluminum nanoparticles under static pressure / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, G. M. Belokurov, A. A. Zvekov, N. V. Nelyubina // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2019. – Vol. 55, No. 2. – P. 237–243.
5. Aduев, B. P. Initiation thresholds and dynamic characteristics of an explosion for thin samples of PETN-Al composites under laser irradiation / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, N. V. Nelyubina, I. Y. Liskov // *Technical Physics*. – 2019. – Vol. 64, No 6. – P. 858–864.
6. Aduев, B. P. Effect of variations in the gas-dynamic unloading on the laser initiation of the PETN–aluminum composite / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, A. A. Zvekov, I. Y. Liskov, G. M. Belokurov, N. V. Nelyubina // *Technical Physics*. – 2019. – Vol. 64, No. 2. – P. 143–147.
7. Aduев, B. P. optoacoustic effects in pentaerythritol tetranitrate with ultrafine aluminum-particle inclusions under pulsed-laser action / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, G. M. Belokurov, N. V. Nelyubina, A. V. Tupitsyn // *Optics and Spectroscopy*. – 2018. – Vol. 124, No. 3. – P. 412–417.
8. Aduев, B. P. Spectrokinetic characteristics of light emission at the early stages of the laser-initiated explosive decomposition of PETN-based composites containing metal nanoparticle inclusions / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, G. M. Belokurov, N. V. Nelyubina, A. V. Kalenskii, N. L. Aluker // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. – 2017. – Vol. 11, No. 3. – P. 460–465.
9. Aduев, B. P. Measuring the temperature of PETN explosion products with iron inclusions / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, I. Y. Liskov, R. Y. Kovalev, Y. V. Kraft // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2017. – Vol. 53, No. 3. – P. 349–352.
10. Aduев, B. P. Spectral-kinetic characteristics of luminescence of pentaerythritol tetranitrate with inclusions of iron nanoparticles upon explosion induced by laser pulses / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, G. M. Belokurov, N. V. Nelyubina, A. V. Gudilin // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 122, No. 3. – P. 504–509.
11. Aduев, B. P. Laser initiation of PETN-based composites with additives of ultrafine aluminium particles / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, A. A. Zvekov, A. P. Nikitin, A. V. Kalenskii // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2016. – Vol. 52, No. 6. – P. 713–718.

12. Aduев, B. P. Explosive decomposition of pentaerythritol tetranitrate pellets containing nickel nanoparticles with various radii / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, R. P. Kolmykov, A. P. Nikitin, M. V. Anan'eva, A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2016. – Vol. 10, No. 4. – P. 621–627.

13. Aduев, B. P. Laser initiation of PETN–iron nanoparticle composites / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, A. A. Zvekov, A. P. Nikitin, R. Y. Kovalev // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2016. – Vol. 10, No. 4. – P. 615–620.

14. Aduев, B. P. Determining the optical properties of light-diffusing systems using a photometric sphere / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, A. A. Zvekov, A. P. Nikitin, N. V. Nelyubina, G. M. Belokurov, A. V. Kalenskii // Instruments and Experimental Techniques. – 2015. – Vol. 58, No. 6. – P. 765–770.

15. Aduев, B. P. Influence of the size of inclusions of ultrafine nickel particles on the laser initiation threshold of PETN / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, A. A. Zvekov, I. Y. Liskov // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2015. – Vol. 51, No. 4. – P. 472–475.

16. Aduев, B. P. Characteristics of the initiation of the explosive decomposition of PETN by the second-harmonic pulsed radiation of a neodymium laser / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, I. Y. Liskov, A. V. Kalenskii, M. V. Anan'eva, A. A. Zvekov // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2015. – Vol. 9, No. 6. – P. 915–920.

17. Адуев, Б. П. Модификация свойств взрывчатых материалов добавками нанодисперсных энергоемких металлических частиц / Б. П. Адуев, **Д. Р. Нурмухаметов**, А. А. Звеков, А. В. Каленский, А. П. Никитин // Химия в интересах устойчивого развития. – 2015. – Т. 23, № 2. – С. 183–192.

18. Aduев, B. P. Temperature dependence of the threshold of initiation of pentaerythritol tetranitrate–aluminum composite by second-harmonic radiation of a neodymium laser / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, I. Y. Liskov, A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2015. – Vol. 9, No. 4. – P. 644–647.

19. Aduев, B. P. Studies of the contribution of light scattering and absorption by inclusions of aluminum nanoparticlese in PETN / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, G. M. Belokurov, R. I. Furega // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2015. – Vol. 51, No. 3. – P. 347–352.

20. Aduев, B. P. Light absorption by formulations based on PETN and aluminum nanoparticles during pulsed laser irradiation / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, R. I. Furega, I. Y. Liskov // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2014. – Vol. 8, No. 6. – P. 852–855.

21. Aduев, B. P. Initiation of PETN explosion by the second harmonic pulse of a neodymium laser / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, I. Y. Liskov, R. I. Furega // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2014. – Vol. 50, No. 1. – P. 113–117.

22. Aduев, B. P. Influence of the mass fraction of oxide in aluminum nanoparticles on the explosive decomposition threshold and light absorption efficiency in PETN-based compounds / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, A. A. Zvekov, N. V. Nelyubina // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2014. – Vol. 50, No. 5. – P. 578–581.

23. Aduев, B. P. Integrating sphere study of the optical properties of aluminum nanoparticles in tetranitropentaerythrite / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, G. M. Belokurov, A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii, A. P. Nikitin, I. Y. Liskov // Technical Physics. – 2014. – Vol. 59, No. 9. – P. 1387–1392.

24. Aduев, B. P. Controlling pentaerythrite tetranitrate sensitivity to the laser effect through the addition of nickel and aluminum nanoparticles / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, R. I. Furega, A. A. Zvekov // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2014. – Vol. 8, No. 3. – P. 352–355.

25. Aduев, B. P. Explosive decomposition of PETN with nanoaluminum additives under the influence of pulsed laser radiation at different wavelengths / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, R. I. Furega, A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2013. – Vol. 7, No. 4. – P. 453–456.

26. Aduев, B. P. Photosensitive material based on PETN mixtures with aluminum nanoparticles / B. P. Aduев, G. M. Belokurov, **D. R. Nurmukhametov**, N. V. Nelyubina // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2012. – Vol. 48, No. 3. – P. 361–366.

27. Aduев, B. P. Effect of the initial temperature on the threshold of laser initiation of pentaerythritol tetranitrate seeded with aluminum nanoparticles / B. P. Aduев, G. M. Belokurov, **D. R. Nurmukhametov** // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2012. – Vol. 6, No. 4. – P. 511–516.

28. Aduев, B. P. Initiation of the explosive decomposition of pentaerythritol tetranitrate with ultradispersed particle additives by laser pulses / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, R. V. Furega // Solid Fuel Chemistry. – 2012. – Vol. 46, No. 6. – P. 371–374.

29. Aduев, B. P. The influence of added aluminum nanoparticles on the sensitivity of pentaerythritol tetranitrate to laser irradiation / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov** // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2011. – Vol. 5, No. 2. – P. 290–292.

30. Адуев, Б. П. Применение наночастиц алюминия для регулирования взрывных характеристик тетранитропентаэритрита при импульсном лазерном воздействии / Б. П. Адуев, **Д. Р. Нурмухаметов** // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2010. – Т. 7, № 1. – С. 112–116.

31. Aduев, B. P. Studying the optical properties of hexogen-aluminum composites / B. P. Aduев, G. M. Belokurov, **D. R. Nurmukhametov**, I. Y. Liskov, N. V. Nelyubina, A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii // Optics and spectroscopy. – 2018. – Vol. 125, No. 5. – P. 632–639.

32. Aduев, B. P. Absorption of pulsed laser radiation by composites based on hexogen and aluminium nanoparticles / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii, I. Y. Liskov // Quantum electronics. – 2019. – Vol. 49, No. 2. – P. 141–143.

33. Aduев, B. P. An optoacoustic study and simulation of the optical properties of cyclotrimethylenetrinitramine-ultrafine nickel particle composites / B. P. Aduев, **D. R. Nurmukhametov**, A. A. Zvekov, N. V. Nelyubina, S. A. Sozinov, A. V. Kalenskii, M. V. Anan'eva, E. V. Galkina // Optics and Spectroscopy. – 2020. – Vol. 128, No. 5. – P. 664–673.

34. Адуев, Б. П. Смесевое светочувствительное взрывчатое вещество для капсуля оптического детонатора / Б. П. Адуев, **Д. Р. Нурмухаметов**, А. А. Звеков, И. Ю. Лисков, А. В. Каленский // Патент на изобретение РФ № 2666435, 14.08.2017.

35. Звеков, А. А. Способ определения оптических свойств наночастиц / А. А. Звеков, **Д. Р. Нурмухаметов**, Б. П. Адуев, А. В. Каленский, А. П. Боровикова // Патент на изобретение РФ № 2586938, 03.12.2014.

Кроме того, опубликовано 52 работы в материалах конференций, перечисленных в разделе апробация работы.