

ОТЗЫВ

дополнительного члена диссертационного совета ДС.ТПУ.06 Заворина
Александра Сергеевича
на диссертацию Фората Егора Викторовича
на тему «Импульсное лазерное зажигание смесей перхлората аммония с
алюминием» по специальности 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика
экстремальных состояний вещества», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.

Актуальность темы диссертационной работы

Двухкомпонентная смесь перхлората аммония (ПХА) и алюминия является энергетическим материалом, обладающим способностью к горению и взрыву, что позволяет использовать его в качестве модельного объекта при изучении свойств металлизированных пиротехнических составов. По этой причине данный энергетический материал является пригодным для оценки перспективных методов инициирования, в частности, лазерного излучения Nd-лазера, задействованного в бортовых исполнительных системах ракетно-космической техники.

Использование в смесях с ПХА наноразмерных порошков алюминия (НПАл), обладающих повышенной химической активностью, предопределило интерес к изучению поведения таких смесей. Вместе с тем их взаимодействие с лазерным излучением остается недостаточно охваченными исследованиями, что диктует необходимость накопления знаний об особенностях лазерного инициирования смесей ПХА с НПАл для реального продвижения импульсного лазерного зажигания этих смесей в практическую сферу.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что тема диссертационной работы Е.В. Фората, направленная на «установление основных закономерностей и характеристик процессов лазерного импульсного зажигания прессованных образцов порошковых смесей ПХА с наноразмерным алюминием излучением первой гармоники Nd-лазера» является несомненно **актуальной**.

Подтверждением актуальности темы диссертации является поддержка выполнявшихся исследований грантом РФФИ «Лазерное инициирование смесевых энергетических материалов на основе нанодисперсных компонентов».

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 144 наименования, изложена на 128 страницах, содержит 40 иллюстраций и 12 таблиц.

Во введении приведены краткие сведения, относящиеся к проблематике инициирования смесей ПХА и порошков алюминия лазерным излучением и связанной с ней актуальности темы диссертационного исследования. Представлены также сведения, которые целиком воспроизведены в автореферате диссертации в разделе «Общая характеристика работы». Сформулированы цель работы и задачи для её достижения, изложены положения о научной новизне, теоретической и практической значимости результатов, а также приведены сведения о связи тематики работы с научными грантами,

подтверждающие её актуальность. Представлены основные положения, выносимые на защиту, которые достаточно согласованы с задачами работы, охарактеризованы методы и объекты исследования, которые в совокупности составили комплексный подход к определению основных зависимостей с помощью экспериментальных и теоретических исследований, приведена аргументированная характеристика достоверности полученных результатов и личного вклада автора в представленные в диссертации исследования. Перечислены сведения об апробации и опубликованности результатов.

Первая глава, посвященная литературному обзору, представляет собой обширное собрание сведений, имеющих отношение к направленности диссертационных исследований в целом, а также к отдельным аспектам, носящим более частный характер в анализируемой проблематике.

Наиболее общий характер носит раздел с основными положениями классической теории горения и взрыва, полезный для интерпретации и обсуждения результатов экспериментов. Выделена особенность лазерного инициирования относительно других, традиционных методов воздействия на энергетические материалы и охарактеризовано состояние исследований в этой области. Применительно к смесям ПХА и алюминия показано влияние дисперсности его порошков на параметры горения и детонации (скорость и температура), усиливающееся в случае наноразмерных порошков алюминия. Отмечено отсутствие представлений о моделях механизмов аномального поведения смеси при лазерном воздействии на прессованные образцы.

Содержание и последовательность изложения материала главы логично подводят к конкретным задачам диссертационного исследования, однако первая глава не завершается их обоснованием, а сами задачи, как было отмечено, приведены предваряющим образом во введении в уже сформулированном виде.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований лазерного воздействия на смеси ПХА и алюминия, вместе с описанием методического обеспечения этих экспериментов. Дано подробное описание экспериментальной установки – лазерного исследовательского стенда, основой которого является импульсный Nd – лазер, и охарактеризованы методические подходы к измерению энергетических порогов и кинетики лазерного зажигания. Изложены состав и процедура подготовки образцов смеси ПХА и алюминия в соотношении 60:40 массовых частей, в том числе с использованием порошков алюминия дисперсных марок АСД - 4, АСД - 8, АСД -10, а также наноразмерного порошка, полученного электровзрывным методом. Из полученных смесей изготавливались образцы прессованием в диапазоне изменения давления от 100 до 4250 кгс/см² с последующим измерением плотности образцов, которая была одним из факторов изменения порогов зажигания в дальнейших экспериментах.

Опыты по зажиганию смесей проводились в специальной капсуле из прозрачного диэлектрика (полиметилметакрилата), что позволило получить данные как при открытой, так и при закрытой поверхности образцов. Зажигание образцов с открытой облучаемой поверхностью выполнялось в атмосфере воздуха и в среде инертного газа (аргона), а для образцов с нанодисперсным порошком алюминия проведено испытание серией лазерных импульсов.

Особенностью представления материала данной главы является то, что получаемые на каждом этапе результаты использовались для дополнения и уточнения методики и задач

на последующие этапы в развитие тех задач, которые были сформулированы в начале работы.

Глава завершается разделом с основными выводами, которые обоснованно подводят к необходимости изучения оптических характеристик смеси ПХА с нанодисперсным алюминием, знание которых позволит разработать модель зажигания под воздействием лазерного излучения.

В третьей главе представлены результаты и методические приемы определения оптических характеристик смесей и формирующих её компонентов в связи с влиянием оптических свойств на температуру очага зажигания под воздействием лазерного излучения.

Экспериментальным путем установлено уменьшение коэффициента отражения порошков ПХА по мере увеличения давления прессования и размеров кристаллов, что является типичным свойством диффузно – рассеивающих сред. Установлена связь увеличения коэффициента отражения прессованных образцов, включающих наноразмерный порошок алюминия, при увеличении давления прессования с изменением структуры поверхности образцов, а именно с переходом от взаимодействия с отдельными частицами к взаимодействию с квазисплошным металлическим слоем. Обоснована возможность использования таких оптических характеристик как коэффициент отражения, глубина проникновения излучения в образец, показатель поглощения наноразмерного порошка алюминия для смеси ПХА и НПА1 в соотношении 60:40 при оценках нагрева и испарения слоя.

Разработаны и проверены в экспериментах методические положения определения показателей рассеяния и поглощения образцов из чистого ПХА с использованием сравнительно легко измеряемых параметров – коэффициента диффузного отражения и коэффициента пропускания по полному пучку, а также определения показателя поглощения прессованных образцов нанопорошка алюминия на основе лазерной абляции.

Проведенное моделирование распространения света в диффузно – рассеивающей среде методом Монте-Карло показало связь величин коэффициента диффузного отражения и показателя ослабления в среде.

Главу завершает раздел с основными выводами, которые, по мнению автора, являются наиболее важными для физического обоснования модели лазерного импульсного зажигания смесей ПХА и нанодисперсного порошка алюминия.

Четвертая глава содержит численное решение задачи разогрева смеси ПХА с наноразмерным порошком алюминия импульсами лазерного излучения. Задача решалась в одномерном приближении, исходя из того, что величина теплового пробега за период действия импульса значительно меньше диаметра лазерного пятна. Использован метод конечных разностей. Системы уравнений математической постановки задачи решалась численно по явной разностной схеме для заданного значения показателя поглощения материала капсулы 10^4 см^{-1} . Получены температурные профили нагрева смеси при открытой поверхности образца и при закрытой поверхности пластиной из полиметилметакрилата, которые показали, что во втором случае при идеальном тепловом контакте порог зажигания увеличивается за счет теплоотвода в диэлектрик пропорционально тепловой активности покрытия.

На основании полученных результатов предложена феноменологическая модель процесса зажигания смеси импульсом излучения неодимового лазера, которая объясняет

поведения объекта исследования в условиях открытой и закрытой поверхности. Модель предполагает наличие трех характерных областей реализации процесса зажигания.

В заключении в качестве основных результатов и выводов по работе представлены итоговые положения исследований, позволяющие констатировать достижение поставленной цели диссертационной работы. Заключение завершается выделенным подразделом «Рекомендации и перспективы дальнейшего развития работы», что полностью соответствует требованиям к диссертациям, имеющим теоретическое значение.

Содержание автореферата соответствует в целом рецензируемой диссертационной работе.

Научная новизна диссертации состоит в следующих результатах и положениях.

1. Разработаны методики, подтвержденные теоретически и экспериментально, для определения оптических характеристик ПХА, нанопорошка алюминия и их смесей. Найденные характеристики применимы для численного моделирования разогрева смеси ПХА/НПАІ лазерным пучком, что подтверждено на примере соотношения компонентов 60:40.

2. Установлено, что при пороговых уровнях лазерного импульсного воздействия миллисекундной длительности с длиной волны 1,06 мкм в приповерхностной области прессованного образца смеси ПХА и НПАІ образуется тепловой очаг плоской конфигурации, разгрузка, которого носит теплопроводностный характер.

3. Установлено, что при длине волны лазерного излучения 1,06 мкм оптические характеристики прессованных образцов смеси ПХА+НПАІ (в соотношении компонентов 60:40) определяются характеристиками наноразмерного порошка алюминия, а коэффициент температуропроводности – характеристиками ПХА.

4. Впервые показано, что закрытие поверхности образцов из смеси ПХА с НПАІ прозрачным диэлектриком приводит к повышению порога зажигания при плотности образцов в диапазоне 320 - 1700 кг/м³. Причиной является уменьшение максимальной температуры теплового очага при идеальном контакте в пределе до $1+K_E$ раз, где K_E – отношение тепловых активностей смеси и диэлектрика.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в том, что:

1. Полученные результаты развивают базу знаний и расширяют представления о механизмах лазерного импульсного воздействия на металлизированные энергетические материалы.

2. Методические подходы и физические модели, разработанные в ходе экспериментов, могут быть применены для исследования свойств и поведения смесевых энергетических материалов.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что полученные экспериментальные данные перспективны для разработки эффективных оптоволоконных систем лазерного инициирования, являющихся альтернативой электрическим системам по условиям помехозащищенности и безопасности бортовых исполнительных устройств.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

1. Большим объемом информации, полученной и зарегистрированной различными методами.

2. Использованием многократно апробированных методик подготовки образцов и проведения экспериментов по лазерному инициированию энергетических материалов.

3. Воспроизводимостью результатов экспериментов при идентичных начальных условиях.

4. Согласованием экспериментальных результатов с теоретическими положениями о тепловом взрыве и с результатами численного моделирования задачи о разогреве приповерхностного слоя образцов, а также сравнением с результатами других исследователей.

Личный вклад автора подтверждают приведенные в диссертации сведения о подготовке образцов исследуемых составов, особенностях использования экспериментальной установки и средств регистрации измерений, методическом обеспечении и процедурном сопровождении каждой серии экспериментов, о проведении численного моделирования и условиях использования математической модели, о подходах к анализу результатов исследований. Доля автора в публикациях по теме диссертации составляет не менее 50%.

Апробация и опубликованность результатов диссертационной работы характеризуется достаточным уровнем доведения их до научно – технической общественности. Материалы диссертации были представлены на 6-ти представительных конференциях (2 Всероссийских и 4 Международных, из которых 1 зарубежная) и опубликованы в 16 печатных работах, из которых 2 статьи в международном издании, индексируемом базами данных Scopus и Web of Science, и 1 статья в журнале, рекомендованном ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций.

Анализ содержания рукописи диссертации и автореферата позволяет констатировать **высокий уровень** представленных в ней исследований и наряду с этим сделать следующие замечания:

1. В главе 2 (стр.34) и во введении (стр.10) диссертации, а также на стр.6 автореферата указано, что установка, на которой выполнены исследования, была **разработана**, а в автореферате (стр.5,7) и на стр.9 диссертации – что она была **модернизирована**. В связи с этим возникает вопрос, во-первых, о сути и объеме модернизации, а во-вторых, о корректности вывода 1, утверждающего, что «разработан экспериментальный комплекс».

2. Исследования по зажиганию составов ПХА/Al проведены при соотношении массовых частей компонентов смеси 60:40. При этом в работе отсутствует комментарий о возможности или ограничениях переноса полученных результатов на смеси с другими соотношениями компонентов, которое позволяет предполагать более расширительный смысл наименования диссертации.

3. В описании подготовки образцов отсутствуют сведения о том, каким образом обеспечивались и контролировались соответствие и идентичность заданного соотношения компонентов в отдельных образцах, а также равномерность его распределения по поверхности и толщине образца.

4. В списке литературы приведены недействительные сведения об источниках 19,62,63,69,119, т.к. своё современное название журнал «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» получил с 01.01.2015г., а не ранее, как это указывают вышеперечисленные источники в списке литературы.

5. На стр.70 диссертации приведена ссылка на источник под номером 154, хотя список литературы содержит 144 наименования.

6. В тексте имеются грамматические несоответствия.

Вышеприведенные замечания не умаляют общую положительную оценку рассматриваемой диссертации.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Фората Е.В. «Импульсное лазерное зажигание смесей перхлората аммония с алюминием» соответствует требованиям пп. 2.1, 2.2 «Порядка присуждения ученых степеней в Томском политехническом университете» и является научно – квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, а её автор, Форат Егор Викторович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико – математических наук по специальности 1.3.17 –«Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой- руководитель
научно-образовательного центра
И. Н. Бутакова на правах кафедры
Инженерной школы энергетики,
Федеральное государственное
автономное учреждение высшего
образования «Национальный
Исследовательский Томский
политехнический университет»,
доктор технических наук (специальность
1.3.14-Теплофизика и теоретическая
теплотехника), профессор

А. С. Заворин
25.05.2023г.

Я, Заворин Александр Сергеевич, даю согласие на автоматизированную обработку персональных данных, приведенных в настоящем документе.

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Телефон: +73822-701777 доб. 1612
e-mail: zavorin@tpu.ru

Подпись Заворина А.С. заверяю

Ученый секретарь ФГАОУ ВО НИ ТПУ

Е.А. Кулинич