

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Форат Егор Викторович

**ИМПУЛЬСНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ЗАЖИГАНИЕ
СМЕСЕЙ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ С АЛЮМИНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

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

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

Научный руководитель: **Ципилев Владимир Папилович**
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор-консультант Отделения материаловедения
ИШНПТ ТПУ

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

Лапшин Олег Валентинович
доктор физико-математических наук, федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Томский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук, лаборатория
математического моделирования физико-химических
процессов в гетерогенных системах научно-
исследовательского отдела структурной
макрокинетики, ведущий научный сотрудник

Защита состоится 13 сентября 2023 г. в 14 час. 00 мин. 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 научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Глушков'.

Глушков Дмитрий Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Перхлорат аммония (ПХА) широко применяется в качестве окисляющего компонента твердых ракетных топлив и пиротехнических смесей. В различных составах с ПХА в качестве горючего используются порошки металлов, например, титана, магния, но чаще – бора или алюминия. Как и чистый ПХА, двухкомпонентная смесь ПХА и Al является энергетическим материалом, способным к горению и взрыву. По этой причине стоит рассматривать такой состав в качестве самостоятельного взрывчатого вещества (ВВ), крайне стабильного и безопасного при изготовлении и хранении. Помимо этого, свойства ПХА и порошков Al по отдельности довольно подробно описаны в литературе, что позволяет использовать смеси на их основе в качестве модельных объектов в изучении поведения металлизированных пиротехнических составов.

Лазерный метод инициирования энергетических материалов имеет перспективы использования в ракетно-космической отрасли, в том числе для бортовых исполнительных систем. Наиболее пригодными для такого рода применений являются твердотельные импульсные лазеры, излучающие в видимом и ближнем ИК диапазоне, например, Nd-лазер, работающий на основной гармонике ($\lambda = 1,06$ мкм). Интерес представляет оценка возможности работы таких систем с пиротехническими составами, к которым относится смесь ПХА/Al. Для этого необходимы данные по воздействию основной гармонике Nd-лазера на саму смесь и на отдельные ее компоненты.

Двухкомпонентные смеси ПХА/Al исследуются с 70-х годов XX века (первые работы Д. Прайса, США). В последние годы интерес исследователей был связан с использованием наноразмерного порошка Al (НП Al), который проявляет бóльшую химическую активность при одинаковых условиях в сравнении с более крупными фракциями Al микронных размеров и выше. Известен ряд работ (А.А. Шевченко, А.Ю. Долгобородов, В.Г. Худавердиев ФИЦ ХФ РАН; В.П. Синдицкий, Д.В. Коковихин, РХТУ), описывающих поведение таких смесей, но данные по воздействию лазерным излучением в литературе крайне ограничены (работы В.П. Ципилева, В.В. Медведева, ТПУ). Показано, что смеси ПХА с НП Al имеют особенности при лазерном инициировании в сравнении с составами на основе Al более крупных фракций (марок АСД). Главная особенность заключается в затрудненном инициировании с поверхности, закрытой прозрачным диэлектриком, по сравнению с инициированием с открытой поверхности. Такое поведение кардинально отличается от поведения вторичных ВВ и требует подробного изучения. В этой связи необходимо провести экспериментальные исследования зажигания смесей ПХА/НП Al импульсным лазерным излучением, а именно изучить энергетические пороги и задержки зажигания, оптические характеристики составов и другие параметры. Это позволит сформулировать модельные представления о лазерном импульсном воздействии на смеси ПХА/НП Al.

Целью работы является установление основных закономерностей и характеристик процессов лазерного импульсного зажигания прессованных образцов порошковых смесей ПХА с наноразмерным алюминием излучением первой гармоники Nd-лазера ($\lambda = 1,06$ мкм).

Цель работы достигается путем решения следующих задач:

1. Установить зависимость между характерными размерами частиц компонентов смесей и величиной энергетических порогов зажигания лазерным излучением.

2. Сравнить значения энергетических порогов зажигания образцов смеси ПХА/АІ для случая лазерного воздействия через прижатую к поверхности образца прозрачную пластину и воздействия на открытую поверхность при различной плотности образцов.

3. Определить оптические и теплофизические характеристики смесей ПХА/НП АІ (коэффициент отражения, показатели поглощения и рассеяния, коэффициент температуропроводности).

4. Разработать физическую модель лазерного импульсного зажигания смесей ПХА/НП АІ в условиях открытой и закрытой прозрачной пластиной поверхности в диапазоне плотностей 320–1700 кг/м³.

5. Провести взаимное сравнение температурных профилей, полученных по результатам численного моделирования воздействия лазерного излучения на открытую и закрытую прозрачной пластиной поверхность образца ПХА/НП АІ.

Научная новизна работы. Впервые показано, что при воздействии лазерным излучением на прессованные образцы смеси ПХА/НП АІ с закрытой поверхности прозрачным диэлектриком в значительном диапазоне плотности (от 320 до 1700 кг/м³) сохраняются более высокие пороги зажигания по сравнению с воздействием на открытую поверхность образцов, в то время как для составов с микроразмерным АІ (марок АСД) закрытие поверхности является единственным возможным способом реализации зажигания лазерным импульсом. Установлено, что такое поведение составов связано с особенностями тепловой разгрузки сформированных в приповерхностном слое тепловых очагов различной конфигурации.

Разработаны методики экспериментального и теоретического определения оптических характеристик (показателей поглощения μ и рассеяния β) для образцов ПХА, НП АІ и их смесей. Выявлено, что оптические характеристики смеси ПХА/НП АІ (массовое соотношение компонентов 60:40) аналогичны характеристикам чистого НП АІ, а найденные теплофизические характеристики (коэффициент температуропроводности – α) смеси близки по величине к характеристикам ПХА. Определенные значения констант ($\alpha = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$; $\mu = 10^4 \text{ см}^{-1}$; $\beta = 200 \text{ см}^{-1}$) использованы при численном моделировании задачи разогрева смеси лазерным пучком.

Проведено моделирование и численный расчёт задачи нагрева смеси ПХА/НП АІ (60:40) при пороговых уровнях лазерного воздействия в условиях открытой и закрытой поверхности. Получены распределения температуры по глубине образцов, на основании которых определены основные параметры тепловых очагов (форма, температура в максимуме, размер, глубина залегания). Показано, что повышение порога инициирования в условиях закрытой поверхности в диапазоне плотностей 320–1700 кг/м³ связано со значительным отводом теплоты в накрывающую пластину.

Практическая значимость работы заключается в получении экспериментальных значений энергетических порогов лазерного импульсного (длина волны $\lambda = 1,06$, длительность импульса ~ 1 мс) зажигания смеси ПХА/Al при различной дисперсности компонентов и различных условиях воздействия (облучаемая поверхность открыта или плотно закрыта прозрачным диэлектриком) в широком диапазоне плотностей смеси. Полученные данные необходимы для разработки эффективных систем лазерного инициирования, включая оптоволоконные, в качестве альтернативных электрическим системам по безопасности и помехозащищенности.

Теоретическая значимость работы заключается в существенном расширении представлений о механизмах лазерного импульсного воздействия на металлизированные двухосновные энергетические материалы в условиях объемного сжатия. Разработанные методические подходы и математические модели могут быть применены для исследования свойств и поведения двухосновных энергетических материалов, в которых концентрация поглощающих излучение добавок изменяется в широких пределах (от долей до десятков процентов).

Положения, выносимые на защиту:

1. При пороговых уровнях лазерного импульсного воздействия миллисекундной длительности с длиной волны 1,06 мкм на прессованные образцы смеси ПХА/НП Al в приповерхностной области образуется тепловой очаг плоской конфигурации, разгрузка которого носит теплопроводностный характер.

2. На длине волны 1,06 мкм оптические характеристики прессованных образцов смеси ПХА/НП Al определяются характеристиками наноразмерного порошка Al, а коэффициент температуропроводности – характеристиками ПХА.

3. В диапазоне плотности образцов смеси ПХА/НП Al от 320 до 1700 кг/м³ закрытие облучаемой поверхности прозрачным диэлектриком приводит к повышению порога зажигания по причине уменьшения максимальной температуры очага в пределе до $1+K_E$ раз при идеальном тепловом контакте, где K_E – это отношение тепловых активностей смеси и диэлектрика.

Методы и объекты исследования. В работе использовался комплексный подход к определению основных зависимостей с помощью экспериментальных и теоретических исследований. Объектами исследования в работе являются прессованные порошки различной дисперсности ПХА, Al и их смесей.

Поскольку лазерное зажигание энергетических материалов носит вероятностный характер, в работе использовалась специальная методика определения порогов зажигания. Для этого строилась вероятностная кривая зажигания (кривая частоты) для каждого условия проведения опыта. По кривой частоты определялся энергетический порог зажигания (по уровню 50 % вероятности) и область вероятностного зажигания.

Для проведения экспериментальных исследований порогов зажигания требуется лазерное излучение высокого качества и одновременный контроль энергии импульса, кинетики лазерного излучения и свечения продуктов реакции. Для этого был модернизирован лазерный экспериментальный комплекс.

Оптические характеристики ПХА и смесей ПХА/НП Al были получены путем измерения коэффициентов отражения в интегрирующей сфере и коэффициентов

пропускания коллимированного пучка. Помимо этого, была разработана методика измерения показателя поглощения для прессованных порошков НП А1.

Теоретические исследования проводились с помощью стохастического моделирования распространения света в веществе методом Монте-Карло и численного решения задачи разогрева в рамках метода конечных разностей.

Достоверность полученных результатов основана на использовании многократно апробированных методик проведения экспериментов по лазерному инициированию и подготовке образцов, анализе экспериментальных данных в рамках классических представлений о тепловом взрыве, воспроизводимостью результатов опытов при идентичных начальных условиях, сравнении полученных результатов с результатами других авторов.

Личный вклад автора состоит в постановке задач, разработке методик измерения оптических характеристик, проведении экспериментов и измерений, подготовке образцов исследуемых составов, разработке математических моделей и проведении численного моделирования, обработке и анализе результатов исследований, подготовке материалов к публикации статей, разработке экспериментальной установки в соответствии с поставленными задачами. Постановка цели, обсуждение методов решения задач, итоговая проверка научных статей перед публикацией проводились совместно с научным руководителем, д.ф.-м.н., профессором Ципилевым В.П. Измерение теплофизических характеристик исследуемых образцов проводилось совместно с коллективом НПЛ «Тепловой контроль», ТПУ.

Апробация работы. Результаты исследований, обобщенные в настоящей работе, докладывались на шести конференциях: 2nd International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2016): International Congress (г. Томск, 2016 г.); III-я Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Орбита молодежи» и перспективы развития российской космонавтики» (г. Томск, 2017 г.); The 6th International Symposium on Energetic Materials and their Applications, (г. Сендай, Япония, 2017 г.); Двадцать четвертая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых, (г. Томск, 2018 г.); XIV Международная конференция «Высокоэнергетические и специальные материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение» (HEMs 2018) (Томск, 2018 г.); 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022) (г. Томск, 2022 г.).

Связь работы с научными грантами. Диссертационные исследования лазерного импульсного зажигания смесей ПХА с алюминием различной дисперсности выполнены при поддержке гранта РФФИ «Лазерное инициирование смесевых энергетических материалов на основе нанодисперсных компонентов», № 15-03-05385.

Публикации по теме работы. Результаты исследований изложены в 16 печатных работах, в том числе 2 – в международном рецензируемом научном журнале, индексируемом базами данных Scopus и Web of Science: «Propellants, Explosives, Pyrotechnics». Одна статья опубликована в журнале, рекомендованном ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций: «Известия вузов. Физика». Доля авторского участия соискателя в публикациях составляет не менее 50 %.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 144 наименований. Работа изложена на 128 страницах, содержит 12 таблиц и 40 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлена цель и задачи работы, описана научная новизна, сформулированы защищаемые положения, описан личный вклад автора.

В первой главе приведены основные положения классической теории горения и взрыва. Показана особенность лазерного воздействия по отношению к традиционным методам инициирования энергетических материалов. Проанализировано современное состояние теоретических и экспериментальных исследований лазерного воздействия на иницирующие и вторичные ВВ. Особенностью поведения вторичных ВВ является затрудненное газодинамической разгрузкой инициирование с открытой поверхности. Закрытие поверхности прозрачным диэлектриком снижает пороги инициирования на несколько порядков. Увеличение давления прижатия образцов к накрывающей пластине приводит к дальнейшему снижению порогов. При исследовании смесей ПХА/А1 обнаружено, что уменьшение дисперсности порошков А1 приводит к увеличению скорости горения, температуры горения и скорости детонации, что особенно заметно при добавлении НП А1. При лазерном воздействии на прессованные образцы смеси ПХА/НП А1 в области прозрачности ПХА было обнаружено аномальное поведение по отношению к вторичным ВВ – прижатие к поверхности прозрачного диэлектрика повышало пороги инициирования. Причины такого поведения до сих пор не выявлены, поскольку отсутствуют модельные представления о механизмах и процессах лазерного зажигания смеси ПХА/НП А1. В рамках решения этой проблемы сформулированы цели и задачи данного исследования.

Во второй главе представлена методика и результаты экспериментальных исследований по воздействию лазерного излучения на смеси ПХА/А1.

За критерий чувствительности исследуемых составов принят порог зажигания, равный 50 % вероятности зажигания. Для создания и контроля лазерного воздействия была модернизирована лазерная установка на основе первой гармоники (1060 нм) Nd-лазера (рис. 1), который излучал в режиме свободной генерации импульсы длительностью ~1 мс.

Установка обладает высокой стабильностью выходной энергии, позволяет одновременно регистрировать кинетики излучения лазера и свечения с образца, а также определять величину энергии лазерного импульса, поступающую на поверхность образца при каждом испытании. Для получения однородного пучка на поверхности образца с резким контрастом на границах использовалась проекционная схема, включающая формирующую диафрагму 10, объектив 16, строящий её изображение на поверхности образца 18. Кинетические характеристики процесса зажигания определялись по свечению продуктов реакции у поверхности образца 18, излучение которого доставлялось по оптическому волокну к ФЭУ 19, сигнал с которого поступал на осциллограф 20.

Для подготовки смесей были выбраны порошки А1 марок АСД-4, АСД-8, АСД-10 и НП А1, полученный электровзрывным методом. Порошки ПХА

подготавливались измельчением в ступке и просеиванием через сито диаметром ячейки 80 и 40 мкм (далее ПХА80 и ПХА40, соответственно). Порошки смешивались в массовом соотношении 60:40 ПХА и Al, соответственно. Образцы смесей прессовались на ручном гидравлическом прессе.

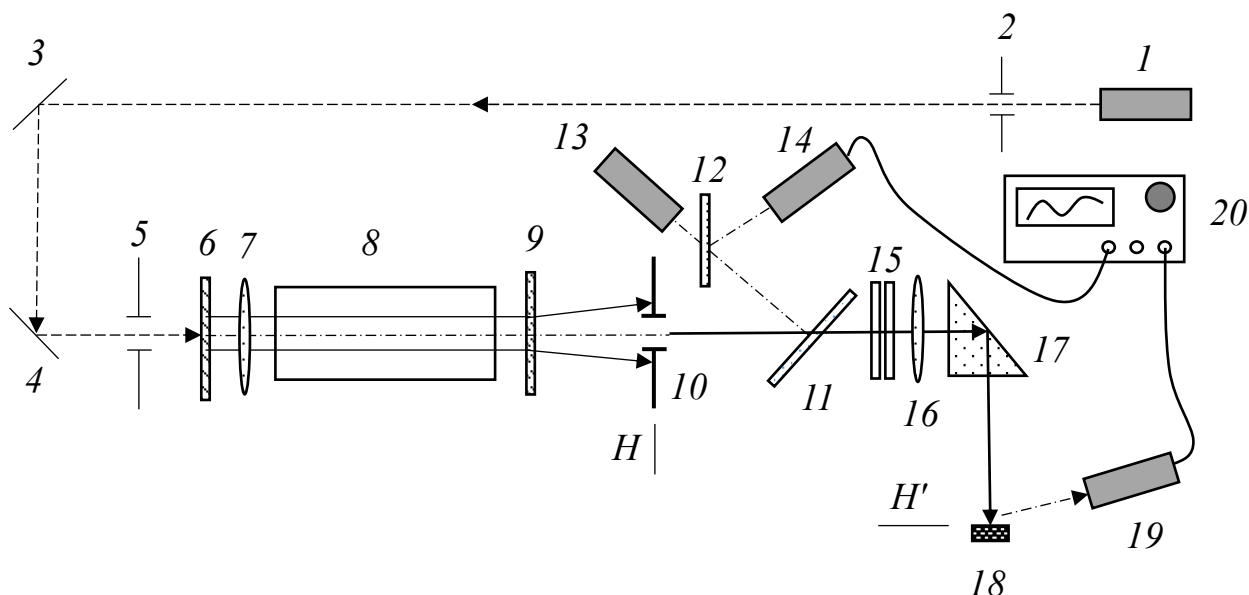


Рисунок 1 – Схема исследовательского лазерного стенда: 1 – полупроводниковый лазер; 2, 5, 10 – диафрагмы; 3, 4 – поворотные зеркала, 6 – заднее зеркало лазера; 7 – внутрирезонаторная линза; 8 – квантрон (стеклянный Nd стержень ГЛС-8, корпус с отражающим покрытием и лампы-вспышки); 9 – выходное зеркало; 11, 12 – светоделительные пластинки; 13 – измеритель энергии (ИКТ-1Н); 14 – фотоэлемент коаксиальный (ФК19КМ); 15 – ослабляющие фильтры; 16 – собирающая линза; 17 – поворотная призма; 18 – образец; 19 – ФЭУ (Hamamatsu); 20 – осциллограф (Tektronix TDS 2024C); H и H' – сопряженные плоскости

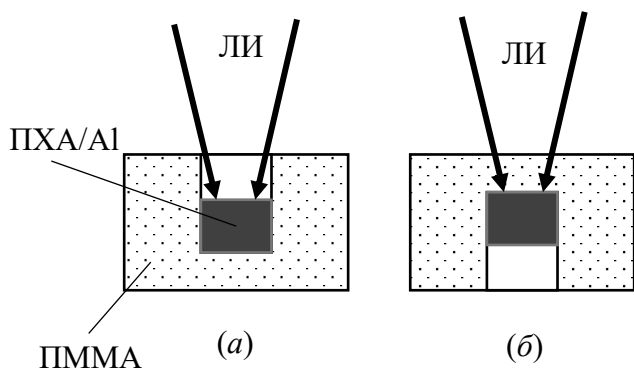


Рисунок 2 – Схема зажигания образцов в ПММА капсуле с (а) открытой и (б) закрытой поверхностью

Поскольку из литературных данных известно о повышении порогов инициирования состава с НП Al при закрытии поверхности, было решено в первую очередь провести опыты по зажиганию составов с открытой и закрытой пластиной полиметилметакрилата (ПММА) поверхностью (табл. 1). Для этого зажигание проводилось в специальной капсуле из ПММА (рис. 2).

По результатам испытаний были подтверждены данные о повышении порогов зажигания для состава с НП Al с закрытой прозрачным диэлектриком поверхности, по сравнению с зажиганием с открытой поверхностью. Такое поведение является уникальной особенностью данного состава из сравнения с поведением составов с АСД, которые не способны к инициированию с открытой поверхности лазерным импульсом плотностью энергии вплоть до 40 Дж/см^2 . В это же время видно, что с уменьшением характерных размеров частиц Al пороги снижаются.

Для определения влияния размера частиц ПХА были проведены испытания для составов с ПХА, просеянным через сито с ячейкой 40 мкм (табл. 2). Ожидалось, что уменьшение размеров частиц ПХА приведёт к увеличению рассеяния лазерного излучения и к повышению локальной плотности энергии в образце, что отразится на снижении порогов инициирования.

Таблица 1 – Пороги лазерного зажигания смесей ПХА80/А1 с открытой и закрытой поверхности (давление прессования $P = 800 \text{ кгс/см}^2$)

Состав	Характерный размер частиц А1, мкм	Порог зажигания с закрытой поверхности, Дж/см ²	Порог зажигания с открытой поверхности, Дж/см ²
ПХА/АСД-4	10	16,9±0,9	не зажигается
ПХА/АСД-8	4	11,8±0,7	не зажигается
ПХА/АСД-10	2	8,3±0,2	не зажигается
ПХА/НП А1	0,15	2,10±0,07	0,80±0,05

Таблица 2 – Пороги лазерного зажигания смесей ПХА /А1 различной дисперсности

Состав	Порог зажигания (состав с ПХА80), Дж/см ²	Порог зажигания (состав с ПХА40), Дж/см ²
ПХА/АСД-4	16,9±0,9	8,3±0,2
ПХА/АСД-8	11,8±0,7	6,54±0,12
ПХА/АСД-10	8,3±0,2	6,52±0,07
ПХА/НП А1	2,10±0,07	2,12±0,05

Из табл. 2 видно, что снижение размера частиц ПХА привело к очувствлению составов с АСД, в то время как состав с НП А1 имеет практически тот же порог.

Данные из приведенные выше таблиц еще раз подтверждают особые свойства составов с НП А1, поэтому далее основное внимание уделяется именно этому составу. Поскольку известно, что у вторичных ВВ существует зависимость порогов от давления прессования (плотности), то и в настоящей работе были проведены измерения порогов зажигания от плотности образцов.

Из представленных на рис. 3 зависимостей видно, что инициирование с закрытой поверхности затруднено в сравнении с инициированием с открытой поверхности. Такое поведение является аномальным по отношению к известному у вторичных (газифицирующихся) ВВ. Выдвинуты предположения, что поведение смеси объясняется одним из трёх возможных факторов: отводом тепла в накрывающий материал;

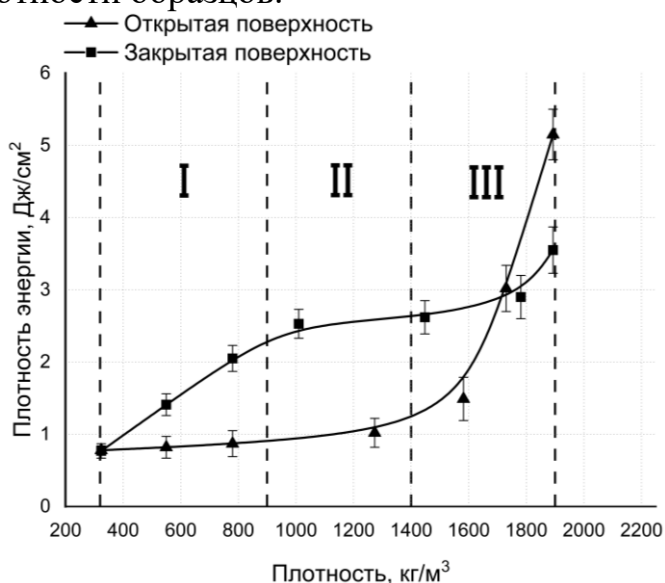


Рисунок 3 – Зависимости порогов зажигания прессованных смесей ПХА/НП А1 от плотности образцов при зажигании через открытую поверхность на воздухе и через закрытую поверхность капсулой ПММА

воздействием атмосферных газов и изменением оптических характеристик смеси с ростом плотности.

В первую очередь были проведены измерения порогов зажигания в аргоне. Показано, что на всем диапазоне плотностей пороги зажигания с открытой поверхности в аргоне и на воздухе практически не отличаются. Данный результат исключает какую-либо роль окружающей атмосферы в момент зажигания смеси.

С увеличением давления прессования на поверхности образцов визуально наблюдается появление металлического блеска. И поскольку предполагалось, что рост порогов зажигания в области плотностей от 1400 до 1900 кг/м³ связан с изменением оптических свойств, а именно с увеличением коэффициента отражения за счет появления зеркальной компоненты, то была предпринята попытка ликвидации зеркальной составляющей за счёт изменения структуры поверхности. Проведен опыт по предварительному разрушению поверхности лазерным импульсом при плотности энергии ниже пороговой и для повторного импульса определялся порог зажигания. Результаты показали, что для плотностей 1780 и 1890 кг/м³ порог зажигания вторым импульсом снизился практически в 2 раза, т.е. полученные данные подтверждают высказанное предположение.

В третьей главе приводятся результаты исследования оптических характеристик как отдельных компонентов, так и самих смесей, поскольку оптические характеристики (в предположении очагового механизма зажигания) определяют температуру очага.

Показано, что наиболее важными для построения модельных представлений распространения света в среде являются показатели поглощения μ и рассеяния β . Эти показатели являются компонентами коэффициента ослабления $k_\lambda = \mu + \beta$. Предполагается, что для типичной диффузно рассеивающей среды (ДРС) ПХА характерно преобладание показателя рассеяния над поглощением (различие на несколько порядков), а для чистого НП Al – наоборот. Отсюда ставилась задача оценки показателя рассеяния для ПХА, показателя поглощения НП Al и определение их соотношения в смеси.

Ослабление света в слаборассеивающих средах довольно точно описывается законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$I(z) = I_0 e^{-k_\lambda z},$$

где z – толщина образца, I_0 – начальный поток на обучаемой поверхности.

Поскольку в порошке ПХА происходит многократное рассеяние излучения, то определение показателя рассеяния по закону Бугера невозможно. Прошедший поток с глубиной отличается от расчетного по закону Бугера за счет вклада рассеивающей компоненты. Другими словами закон Бугера справедлив только для проходящего узко коллимированного пучка. По этой причине нами была реализована методика измерения прохождения прямых лучей через слой ДРС различной толщины, на основании которой получены результаты измерения величины β для ПХА двух фракций от давления прессования (рис. 4). Суть методики заключается в создании оптической схемы, способной выделять из общего потока излучения на выходе образца ДРС только направленный поток вдоль оси падающего на поверхность образца пучка.

Также в работе приводится описание разработанного метода определения показателей поглощения и рассеяния пресованных образцов ДРС на основании наиболее простых измерений пропускания полного потока от толщины образца, коэффициента диффузного отражения и результатов моделирования светорассеяния в объеме образцов методом Монте-Карло. Показана связь между коэффициентом диффузного отражения и показателем ослабления (рис. 5).

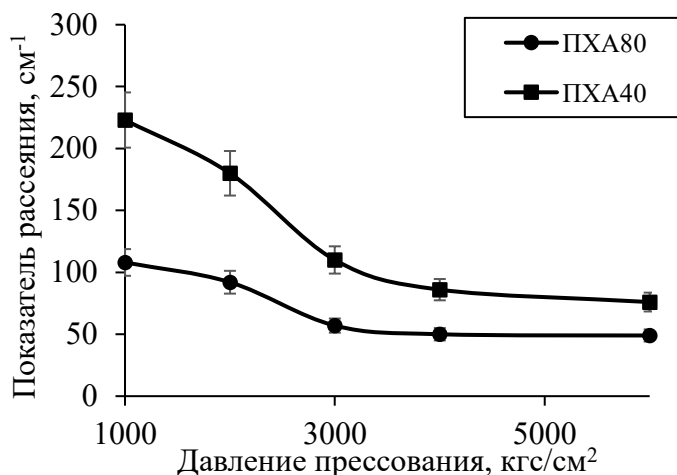


Рисунок 4 – Зависимость показателя рассеяния от давления прессования порошков ПХА различных характерных размеров

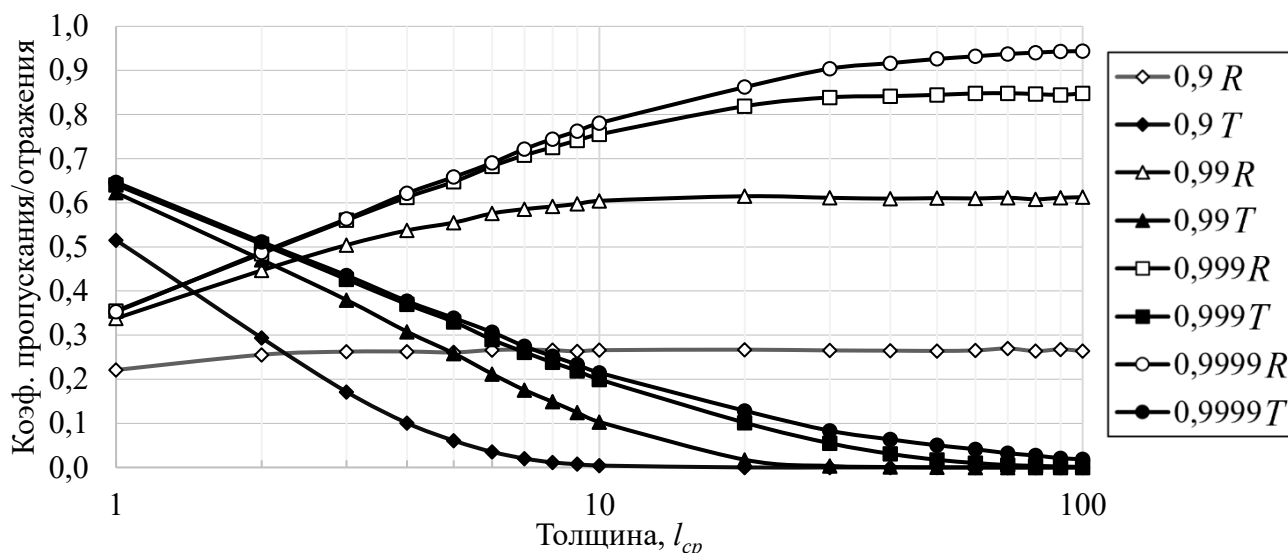


Рисунок 5 – Зависимости коэффициента пропускания (T) и отражения (R) чистого ПХА от толщины слоя вещества (в единицах среднего свободного пробега фотона l_{cp}) для разной выживаемости кванта A

С помощью представленных на рис. 5 кривых можно определить величину выживаемости кванта $A = \beta/(\mu + \beta)$ и длину свободного пробега фотона в среде $l_{cp} = 1/(\mu + \beta)$ по полученной простыми измерениями зависимости коэффициента отражения и пропускания от толщины слоя ДРС. В итоге рассчитываются показатели поглощения и рассеяния. Для образцов ПХА пресованных давлением 600 кгс/см² описанным выше образом определены показатель рассеяния $\beta \approx 195 \text{ см}^{-1}$ и показатель поглощения $\mu = 0,15 \text{ см}^{-1}$, что согласуется с вышеуказанными результатами измерений.

Помимо этого, приводится сравнение полученных данных с оценками по предложенной в работе А. Д. Зинченко¹ формуле:

¹ Зинченко, А. Д. Оптические характеристики некоторых порошкообразных ВВ / А. Д. Зинченко, А. И. Погребов, В. И. Таржанов, Б. Б. Токарев // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28, № 5. – С. 80–87.

$$\sigma \left(\frac{1}{\text{см}} \right) \approx 0,35 \cdot S \left(\frac{\text{см}^2}{\text{г}} \right),$$

где S – дисперсность, которая определяется как отношение площади поверхности частиц на величину массы.

По результатам такой оценки для порошка ПХА80 с характерным размером частиц 80 мкм показатель рассеяния составляет $\beta \approx 100 \text{ см}^{-1}$, что соответствует вышеописанным результатам.

Оптические характеристики порошков Al ожидаемо зависят от размера частиц. Показано, что по результатам расчета по теории Ми частицы менее 300 нм резко меняют свои оптические свойства на длине волны 1060 нм. Взаимодействие с такими частицами носит объемный характер и отдельная частица не оказывает сколько-нибудь значимого влияния на распространение излучения (относительное сечение рассеяния $Q_{sca} \approx 0,1$, относительное сечение поглощения $Q_{abs} \approx 0,05$). Однако сближение частиц может привести к групповому типу взаимодействия. Это наблюдается в переходе от преимущественного поглощения насыпным порошком к зеркальному отражению прессованными образцами. Стоит также добавить, что по теории Ми частицы больше 300 нм в диаметре взаимодействуют с излучением примерно одинаково – как сплошная металлическая среда ($Q_{sca} \approx 2$, $Q_{abs} \approx 0,07$), что соотносится с визуально наблюдаемым одинаковым светлым оттенком порошков АСД.

Поскольку измерение пропускания света образцами прессованного порошка Al осложнено необходимостью изготавливать слои в несколько десятков мкм, а теория Ми работает исключительно при низких концентрациях частиц Al (ед. %), в работе приводится оригинальная методика измерения значения показателя μ для НП Al. Суть методики заключается в испарении серией лазерных наносекундных импульсов слоя образца до сквозного отверстия, затем исходя из количества импульсов и известной толщины рассчитывается съём слоя за 1 импульс. Исходя из предположения, что глубина испаренного слоя в таком случае ограничена глубиной проникновения света, поскольку величиной теплового пробега ($\sqrt{\alpha\tau}$, где α – коэффициент температуропроводности и τ – длительность воздействия) можно пренебречь. Результат эксперимента показал, что в диапазоне давлений прессования от 1000 до 3000 кгс/см² $\mu \approx 10^4 \text{ см}^{-1}$.

Для того, чтобы соотнести оптические свойства компонентов и самой смеси в работе приведены результаты измерений коэффициента отражения смеси ПХА/НП Al от массового содержания Al (рис. 6). Видно, что с увеличением содержания Al всего на несколько процентов происходит резкое падение коэффициента отражения. После чего происходит резкий рост металлического отражения с выходом на постоянную величину уже при 10–30 %, которая соответствует коэффициенту отражения чистого НП Al. Уточнить эту зависимость удалось, измерив коэффициент отражения от давления прессования для нескольких составов.

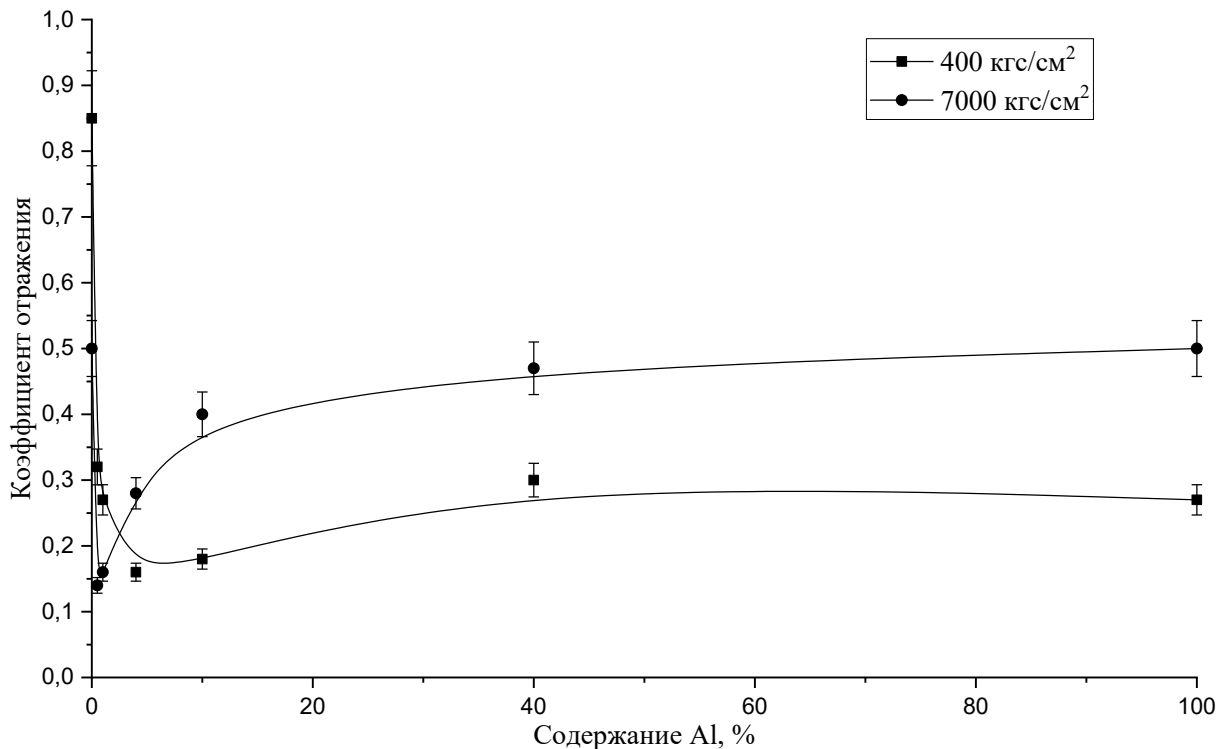


Рисунок 6 – Зависимости коэффициентов отражения смесей ПХА/НП Al от концентрации Al при давлении прессования 400 кгс/см² и 7000 кгс/см²

Как видно из рис. 7, с увеличением давления прессования чистого порошка ПХА коэффициент отражения снижается, что соответствует представлениям о поведении порошковых ДРС. Однако для составов ПХА/НП Al наблюдается противоположное поведение – рост коэффициента отражения. При этом зависимости для смесей ПХА/НП Al практически не отличаются от зависимости для чистого НП Al.

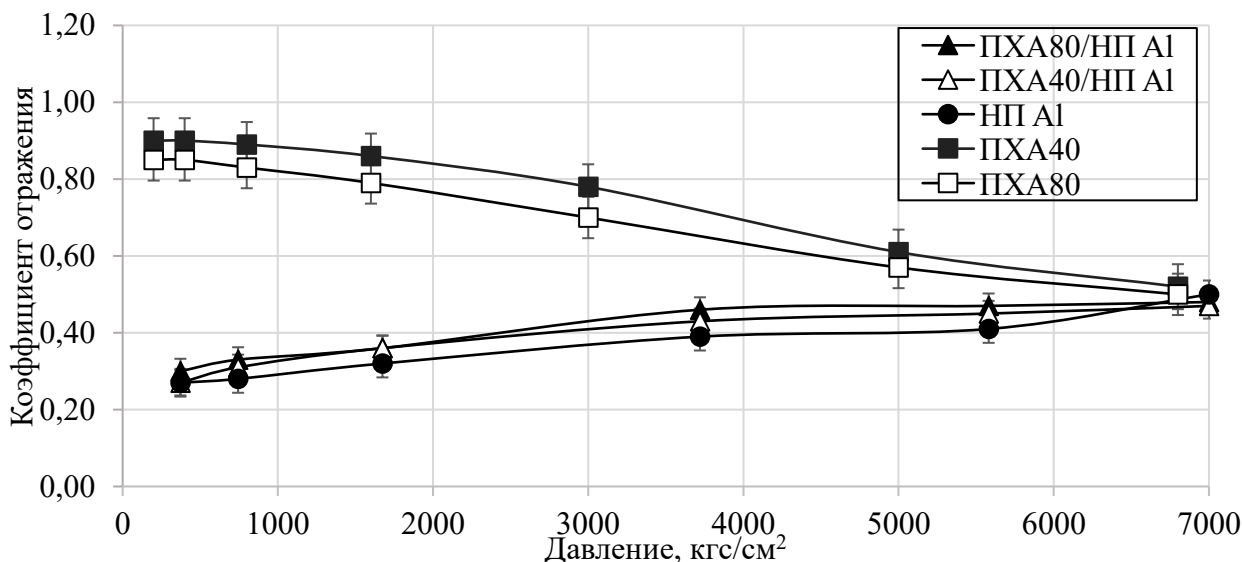


Рисунок 7 – Зависимости коэффициента отражения от давления прессования для образцов чистого ПХА80 и ПХА40; чистого НП Al и двух смесей 60:40 ПХА/НП Al, в которых взят ПХА80 и ПХА40

Помимо этого, приведены результаты измерений коэффициента температуропроводности α смеси ПХА/НП Al и отдельных компонентов. Показано,

что значение коэффициента температуропроводности смеси практически не отличается от значения для чистого ПХА и в то же время меньше коэффициента температуропроводности чистого НП А1 в 5 раз.

На основании вышеизложенного, а также полученных в предыдущей главе значений показателей $\mu \approx 10^4 \text{ см}^{-1}$ для НП А1 и $\beta \approx 200 \text{ см}^{-1}$ ПХА можно заключить, что оптические свойства смеси в большей степени определяются свойствами НП А1. Что в свою очередь позволяет использовать значение показателя поглощения μ НП А1 в качестве показателя поглощения смеси ПХА/НП А1, и в то же время пренебречь показателем рассеяния ПХА.

Таким образом, инициирование смеси ПХА/НП А1 происходит из плоского приповерхностного очага, толщина которого определена глубиной проникновения света порядка 1 мкм и величиной теплового пробега за время импульса ($\sqrt{\alpha\tau}$) порядка 17 мкм. Разогрев происходит на частицах А1 с последующей теплопередачей кристаллам ПХА.

Четвёртая глава посвящена численному решению задачи разогрева поверхности образца ПХА/НП А1 методом конечных разностей.

На рис. 8 представлена модель разогрева образца, накрытого пластиной из ПММА. При разработке модели принимались следующие допущения: поглощение теплового потока пластиной ПММА не происходит (поскольку показатель поглощения ПММА $\mu < 0,1 \text{ см}^{-1}$), в ходе нагрева вещества химически инертны, тепловой контакт на границе двух сред идеальный, толщина слоев веществ бесконечна (поскольку за время воздействия величина теплового пробега $\sqrt{\alpha\tau}$ много меньше толщины образцов). Для случая воздействия на образец с открытой поверхности величина температуропроводности α воздуха принималась равной нулю. Начальная температура до воздействия равна $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

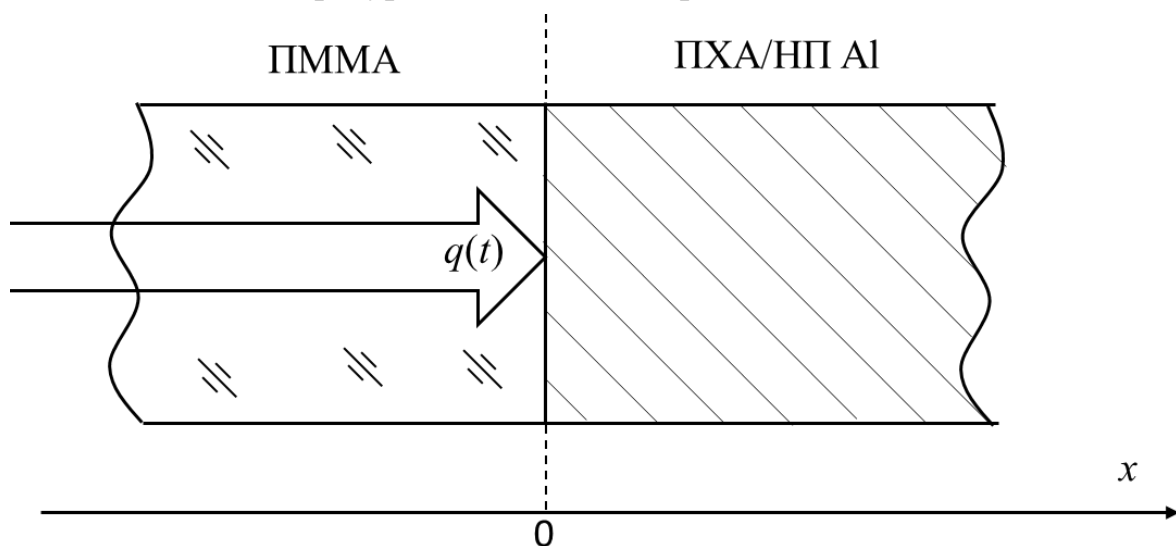


Рисунок 8 – Модель нагрева прессованного образца смеси ПХА/НП А1 в тепловом контакте с пластиной ПММА при облучении тепловым потоком $q(t)$

Решение задачи в одномерном приближении обосновано тем, что величина теплового пробега за время воздействия много меньше диаметра лазерного пятна.

Математическая постановка задачи с учетом вышеизложенных допущений имеет вид:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, -\infty < x < 0, t > 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{q(t)\mu}{c_2\rho_2} e^{-\mu x}, 0 < x < \infty, t > 0, \quad (2)$$

$$T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = T_0, \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(0, t)}{\partial x}, \quad (4)$$

$$T_1(0, t) = T_2(0, t), \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_1(-\infty, t)}{\partial x} = \frac{\partial T_2(\infty, t)}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

где T – температура; x – координата оси, проходящей через оба слоя, перпендикулярно поверхностям; α – коэффициент температуропроводности; q – тепловой поток; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; μ – показатель поглощения, индекс 1 соответствует ПММА, 2 – ПХА/НП А1.

Система уравнений (1) – (6) решалась численно по явной разностной схеме для значения $\mu = 10^4 \text{ см}^{-1}$. Шаг по координате h выбирался равным $0,1 \sqrt{\alpha\tau}$, а по времени l_t из соотношения $\alpha_2 \cdot l_t/h^2 \leq 0,1$. Длительность импульса воздействия $\tau_u = 10^{-3} \text{ с}$ соответствовала условиям эксперимента. Коэффициент температуропроводности для смеси α_2 определялся с помощью тепловизионного оборудования. Другие теплофизические константы взяты из литературы. $\alpha_1 = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\alpha_2 = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $c_2 = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $\rho_2 = 1400 \text{ кг}/\text{м}^3$; $c_1 = 1420 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $\rho_1 = 1188 \text{ кг}/\text{м}^3$. Плотность энергии лазерного излучения на поверхности смеси $H_n = 2,5 \text{ Дж}/\text{см}^2$ (плотность мощности $q_n = 2,5 \cdot 10^3 \text{ Вт}/\text{см}^2$) соответствовали экспериментальным значениям области II рис. 3. Результаты расчета приведены на рис. 9.

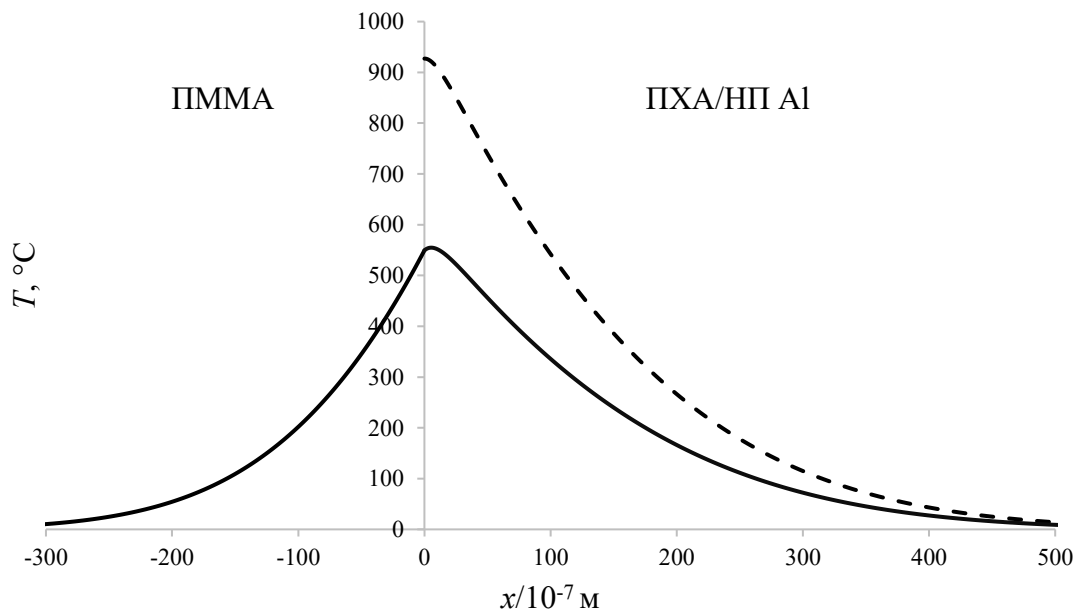


Рисунок 9 – Температурные профили нагрева открытой поверхности (пунктирная линия) и накрытой ПММА (сплошная линия) для $\mu = 10\,000 \text{ см}^{-1}$

Из данных рис. 9 следует, что прижатие к поверхности образца пластины ПММА приводит к понижению температуры на поверхности в 1,72 раза. Этот результат согласуется с представленными в работе Е.Ю. Морозовой² оценками разогрева двухслойной системы, где установлено, что температура на границе раздела двух сред должна уменьшаться в $1+K_E$ раз в прижатия прозрачной пластины, где $K_E = \frac{\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1}}{\sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2}}$; $\sqrt{\lambda \rho c}$ – тепловая активность среды; индекс 1 относится к ПММА, индекс 2 – к ПХА/НП А1. Приближенная оценка для $\mu \rightarrow \infty$ дает $1+K_E = 1,9$. Этот результат соответствует случаю идеального теплового контакта, который очевидно не реализуется при малых давлениях прижатия пластины ПММА. Понижение температуры очага пропорционально тепловой активности накрывающей пластины подтверждается контрольным экспериментом, в котором ПММА заменён на стекло М4, имеющее практически в два раза большую тепловую активность (590 Дж/(м²·К·с^{0,5}) для ПММА и 1049 Дж/(м²·К·с^{0,5}) для М4), что должно приводить к падению температуры на границе раздела сред до уровня ~ 360 °С. Установлено, что порог зажигания в этом случае при плотности образцов 1400 кг/м³ вырос на 22 %. Нелинейный характер зависимости увеличения порогов от величины падения температуры вполне объясняется с позиции классических представлений о тепловом взрыве, а именно критическим параметром Франк-Каменецкого, в котором достижимость критических условий теплового очага определяется не только его температурой, но и размером.

В конце главы описана феноменологическая модель процесса зажигания смеси импульсом излучения неодимового лазера, объясняющая поведение состава ПХА/НП А1 в условиях зажигания с открытой и закрытой поверхности. При пороговых уровнях лазерного воздействия создается плоский очаг, характеризующийся теплопроводностной разгрузкой, как вглубь образца (открытая поверхность), так и в прижатый ПММА (зажигание с закрытой поверхности). На рис. 3 выделены 3 характерных области реализации процесса зажигания. **Область I** соответствует росту теплового контакта от минимального (насыпной порошок 320 кг/м³) до близкого к идеальному (~900 кг/м³) с увеличением плотности. Для насыпной плотности отвод тепла в накрывающую поверхность пренебрежимо мал, что приводит к одинаковым условиям создания теплового очага и одинаковым порогам инициирования. **В области II** рост теплового контакта отсутствует, что сказывается на слабом росте порогов, который в свою очередь объясняется увеличением отвода тепла вглубь образца, что подтверждается тепловизионными измерениями коэффициента температуропроводности. **Область III** соответствует изменениям структуры поверхности состава, что подтверждается ростом коэффициента отражения открытых образцов и опытами по разрушению поверхности.

С уменьшением значения показателя поглощения μ максимум температуры, представленной на рис. 8 зависимости, снижается и сдвигается вглубь. Это объясняет поведение составов с АСД, для которых с увеличением характерного

² Морозова, Е. Ю. Анализ разогрева двухслойной системы импульсом излучения / Е. Ю. Морозова, Р. С. Буркина, В. П. Ципилев // Известия вузов. Физика. – 2009. – Т. 52, № 8/2. – С. 303–306.

размера частиц Al растёт коэффициент отражения, снижается показатель поглощения, что свидетельствует об увеличении глубины проникновения и, следовательно, о снижении максимально достижимой температуры разогрева очага за импульс воздействия, что в свою очередь выражается в росте порогов зажигания.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика экспериментальных и теоретических исследований, а также разработан экспериментальный комплекс в соответствии с поставленными задачами и целью работы. Показано, что ключевым параметром для построения модельных представлений о процессе зажигания является энергетический порог зажигания.

2. Экспериментально определены энергетические пороги зажигания (открытая поверхность образцов) и пороги взрывного разложения (закрытая поверхность), а также кинетические характеристики процесса химического разложения смесевых составов ПХА/Al в широком диапазоне давлений прессования (от насыпной плотности 320 кг/м^3 до 1900 кг/м^3).

3. Экспериментально установлено, что пороги зажигания возрастают с увеличением плотности смеси ПХА/НП Al, причем в диапазоне плотности от 320 до 1700 кг/м^3 в условиях закрытой поверхности пороги значительно выше, чем в условиях открытой поверхности, а при плотностях свыше 1700 кг/м^3 наблюдается обратная ситуация. Установлено, что состав газа окружающей образец атмосферы не оказывает влияния на пороги зажигания. На основании обобщения результатов экспериментальных и теоретических исследований разработан механизм процесса зажигания, объясняющий такое поведение состава ПХА/НП Al, а именно: повышение порога зажигания при закрытии облучаемой поверхности пластиной ПММА связан со значительным оттоком тепла из приповерхностной зоны; при плотностях свыше 1700 кг/м^3 повышение порога с увеличением плотности образцов в условиях зажигания с открытой поверхности связано с повышением коэффициента отражения поверхности образцов по отношению к лазерному излучению в связи со структурной перестройкой приповерхностного слоя в процессе прессования.

4. Определены оптические и теплофизические характеристики прессованных порошков ПХА, Al и их смесей (различной дисперсности) при различных давлениях прессования. Разработана методика и экспериментальная установка для определения показателей рассеяния β для ПХА ($\sim 100\text{--}200 \text{ см}^{-1}$). Было установлено, что оптические характеристики прессованного порошка НП Al аналогичны характеристикам смеси ПХА/НП Al (60:40). Основываясь на этом, разработана методика определения показателя поглощения μ для порошков НП Al путем испарения слоя вещества лазерными импульсами в близком к адиабатическому режиму ($\mu \approx 10^4 \text{ см}^{-1}$).

5. На основании проведенного численного моделирования задачи распространения света в среде методом Монте-Карло и экспериментальных исследований выявлена связь между показателем рассеяния β и коэффициентом диффузного отражения прессованных образцов порошка ПХА с различной концентрацией добавок Al. Разработана методика определения величины μ и β для

ДРС по легко измеряемым экспериментально величинам коэффициента отражения и пропускания.

6. С учетом определенных в работе значений μ и β для смеси ПХА/НП А1 проведено моделирование и численный расчет профилей нагрева приповерхностного слоя в условиях открытой и закрытой поверхности. Показано, что покрытие поверхности, при идеальном тепловом контакте, уменьшает температуру нагрева на границе раздела в $1+K_E$ раз ($K_E = \frac{\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1}}{\sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2}}$ – отношение тепловых активностей двух сред). При этом максимум нагрева смещается в глубь с уменьшением величины μ .

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Medvedev, V. V. Effect of ammonium perchlorate and aluminum composition density on characteristics of laser ignition / V. V. Medvedev, V. P. Tsipilev, **E. V. Forat** // **Propellants, Explosives, Pyrotechnics**. – 2018. – Vol. 43, Issue 2. – P. 122–125. – 0,46 / 0,36 а.л.
2. Tsipilev, V. P. Laser ignition of ammonium perchlorate/aluminum composition confined into PMMA capsule / V. P. Tsipilev, **E. V. Forat**, V. V. Medvedev, V. P. Vavilov, V. V. Shiryaev, A. N. Yakovlev // **Propellants, Explosives, Pyrotechnics**. – 2022. – Vol. 47, Issue 3. – Article number e202100184. – 0,58 / 0,48 а.л.
3. Медведев, В. В. Влияние перхлората аммония на активность порошков алюминия различной дисперсности / В. В. Медведев, А. А. Решетов, С. В. Змановский, А. П. Ильин, Л. О. Роот, А. В. Мостовщиков, **Е. В. Форат** // **Известия высших учебных заведений. Физика**. – 2016. – Т. 59, № 9-3. – С. 181–183. – 0,35 / 0,24 а.л.