

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Фората Егора Викторовича «Импульсное лазерное зажигание смесей перхлората аммония с алюминием», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Диссертация Фората Е.В. посвящена исследованию закономерностей импульсного лазерного зажигания прессованных смесей перхлората аммония с нанопорошками алюминия (ПХА/Al) излучением твердотельного неодимового лазера с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм. Традиционные методы инициирования горения и взрыва в различных технических устройствах связаны с использованием электрических систем подвода энергии, уязвимых к воздействию несанкционированных электромагнитных импульсов. Оптические методы инициирования представляются более перспективными для использования, в частности, в бортовых системах ракетно-космической техники. Выбор объекта исследования (ПХА/Al) обусловлен достаточной степенью изученности компонентов смеси, а также безопасностью изготовления и изучения образцов. Поскольку смесь ПХА/Al по многим параметрам схожа с другими композициями высокоэнергетических материалов (ВЭМ), то выявленные механизмы воздействия лазерного излучения на смесь ПХА/Al могут быть применены и к другим ВЭМ. Таким образом, тематика диссертационной работы Фората Е.В. является **актуальной** как с точки зрения уточнения механизма лучистого зажигания ВЭМ, так и с точки зрения перспективы практического применения.

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, в котором обобщаются основные результаты диссертационной работы. Список литературы включает 144 наименования. Работа изложена на 128 страницах, содержит 12 таблиц и 40 рисунков.

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, проведен анализ современного состояния проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна, практическая значимость, защищаемые положения.

**В первой главе** рассмотрены современные представления о процессах горения порошков ПХА и Al, а также их смесей. Проанализированы сходство и основные отличия лазерного инициирования смеси (ПХА/Al) по сравнению с инициирующими и вторичными ВВ. Показано, что выявленная проблема снижения чувствительности смеси (ПХА/Al) к лазерному импульсу при закрытии поверхности прозрачной пластиной требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

**Вторая глава** содержит результаты экспериментального определения чувствительности смесей (ПХА/Al) в различных условиях. Приведены описание экспериментального оборудования и методики исследования. Показано что зажигание смесей (ПХА/Al) носит вероятностный характер. Пороговая плотность энергии зажигания определяется рядом факторов (дисперсность компонентов, плотность образцов, наличие/отсутствие накрывающей поверхность образца прозрачной пластины). Подтверждено выявленное из литературных данных особое поведение состава с наноразмерным порошком алюминия. Особенности поведения таких составов автор связывает с теплоотводом в накрывающую пластину и изменением оптических характеристик при увеличении давления прессования образцов.

**Третья глава** посвящена определению оптических характеристик как отдельных компонентов, так и смеси (ПХА/Al). Для определения оптических характеристик применялись несколько экспериментальных методов (пропускание излучения слоем различной толщины, измерение коэффициента диффузного отражения в светоинтегрирующей сфере, метод лазерной абляции), так и теоретический метод, основанный на алгоритме Монте-Карло численного моделирования распространения в дисперсной среде. Показано, что при массовой доле порошка Al в смеси более 5%, величина показателя поглощения алюминия превышает величину показателя рассеяния ПХА. При массовой доле

алюминия в смеси более 20% содержащийся в смеси порошок ПХА не оказывает значимого влияния на оптические свойства образцов.

**В четвертой главе** сформулирована задача и проведено численное решение задачи разогрева образца смеси с открытой и закрытой прозрачной пластиной поверхностью. Представлена феноменологическая модель взаимодействия (ПХА/НП Al) с импульсом лазерного излучения.

**Научная новизна** полученных соискателем результатов заключается в том, что в ней впервые на основе проведенных комплексных экспериментальных исследований определена роль тепловой разгрузки накрывающей пластиной в ходе формирования очага разогрева под действием лазерного излучения. Впервые показано, что при воздействии лазерным излучением на прессованные образцы смеси с наноразмерным порошком алюминия (ПХА/Al) с закрытой прозрачным диэлектриком поверхностью в диапазоне плотности от 320 до 1700 кг/м<sup>3</sup> сохраняются более высокие пороги зажигания по сравнению с воздействием на открытую поверхность образцов.

Установлено, что для составов с (ПХА/Al) микроразмерным порошком алюминия промышленных марок АСД закрытие поверхности образца является единственно возможным способом реализации его зажигания лазерным импульсом.

**Достоверность полученных результатов** основано на использовании многократно апробированных лазерной установки и методики проведения экспериментов по лазерному зажиганию ВЭМ, воспроизводимостью полученных экспериментальных данных и сравнением полученных данных с результатами других авторов в пересекающихся диапазонах исследований.

Результаты исследований изложены в 16 печатных работах, докладывались и обсуждались на 6 научных конференциях различного уровня.

**По диссертации имеется ряд замечаний:**

1. При расчете методом Монте-Карло распространение излучения в исследуемых смесях не указаны принятые упрощающие допущения.

2. Порошки алюминия и перхлората аммония являются, как правило, полидисперсными. Следовало бы провести оценку влияния вклада частиц разных размеров на ослабление излучения и индикатрису рассеяния.

3. При математическом моделировании процесса нагрева прессованного образца смеси (ПХА/Al) требуется оценка корректности исключения источникового члена (с законом Аррениуса) в уравнении (18).

4. В главе 4 не сформулирован четко критерий зажигания исследуемых смесей.

5. На стр. 104 диссертации указано, что коэффициент температуропроводности смеси определялся с помощью тепловизионного оборудования. Целесообразно было бы описать кратко суть методики и погрешность определения коэффициента.

6. В диссертации отсутствует список обозначений (используемых величин), что затрудняет ее чтение (на стр. 112 диссертации приведен только список сокращений).

Указанные замечания не снижают высокой оценки полученных автором работы результатов и значимости диссертационной работы в целом.

#### **Заключение.**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию и методикам исследования **соответствует** паспорту специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Содержание автореферата соответствует диссертации. Основные положения диссертации опубликованных соискателем в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

С учетом сказанного выше считаю, что диссертация **«Импульсное лазерное зажигание смесей перхлората аммония с алюминием»** является законченной научно-исследовательской работой, удовлетворяющей требованиям п. 2.1, 2.2 «Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете»,

предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, **Форот Егор Викторович**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

доктор физико-математических наук  
(специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор, заведующий отделом газовой динамики и физики взрыва Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета

Архипов Владимир Афанасьевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д.36.

Тел.: 8 (3822) 529 852

E-mail: rector@tsu.ru

17.08.2023

Я, Архипов Владимир Афанасьевич, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, приведенных в настоящем документе

\_\_\_\_\_ В.А. Архипов

два