

Отзыв официального оппонента на диссертацию Е.В. Фората «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

Диссертационная работа Е.В. Фората посвящена актуальной теме исследования процессов лазерного импульсного зажигания порошковых смесей перхлората аммония (ПХА) с наноразмерным алюминием. Актуальность темы обусловлена, с одной стороны, большими перспективами создания инициирующих устройств с использованием импульсного лазерного воздействия, которые обладают уникальными параметрами надежности, быстродействия и помехозащищенности. Известны зарубежные примеры использования таких устройств в артиллерийских системах и в ракетно-космической области. С другой стороны, научное обоснование разработки таких устройств требует изучения механизма взаимодействия излучения с энергетическим веществом и установления основных закономерностей процесса импульсного зажигания исследуемых составов. Поиски составов, обладающих приемлемыми характеристиками с точки зрения безопасности обращения, доступности сырья и умеренного уровня энергетического воздействия, ведутся на протяжении более 70 лет, и смесь перхлората аммония с наноалюминием может служить одним из потенциальных кандидатов для использования в лазерных детонаторах.

Диссертационная работа включает введение, 4 главы и заключение, содержит список литературы их 144 наименований, 12 таблиц и 40 рисунков.

В первой главе приведен литературный обзор сведений о лазерном инициировании взрывчатых веществ двух типов: инициирующих и вторичных, а также о лазерном зажигании смеси ПХА/алюминий. Отмечена аномальная по отношению к вторичным ВВ особенность зажигания этой смеси, когда прижатие к ее поверхности прозрачного диэлектрика (ПММА) повышало энергетический порог инициирования. Исследования, выполненные в рамках диссертационной работы, позволили найти достоверное объяснение причин названной аномалии.

Вторая глава содержит детальное описание методического подхода, технических характеристик использованного оборудования и результатов экспериментов по лазерному зажиганию смесей ПХА/Al различного дисперсного состава в условиях открытой и закрытой поверхности и при замене воздуха на аргон. Следует отметить высокий уровень экспериментальной техники, использованной для получения результатов диссертационной работы. Автором подробно описаны лазерный стенд, средства измерения характеристик импульса, проекционный метод формирования лазерного пучка на поверхности облучаемого образца. Эта техника была использована для определения пороговых плотностей энергии зажигания образцов ПХА(80 мкм)/Al (60:40, масс.) с закрытой и открытой поверхностью, полученных при давлении прессования 800 кг/см^2 . Найдено, что смеси с порошками Al микронных размеров в условиях открытой поверхности не зажигаются при плотностях энергии лазерного импульса $\leq 40 \text{ Дж/см}^2$, а для смеси ПХА/наноAl определена пороговая энергия зажигания, причем для образцов с

открытой поверхностью она оказалась парадоксальным образом ниже, чем в случае закрытой поверхности (0.8 вместо 2.1 Дж/см²). Отметим, что принятое в работе определение зажигания отличается от используемого в литературе по горению твердых топлив, но важно, что оно зафиксировано в тексте и единообразно используется для описания полученных результатов (зажигание как воспламенение с последующим сгоранием половины образца).

Более детальная информация о закономерностях лазерного зажигания получена в последующих экспериментах с варьируемой плотностью прессованных образцов. Показано, что при насыпной плотности (320 кг/м³) пороги зажигания для образцов с открытой и закрытой поверхностью совпадают, а затем они растут с увеличением плотности, причем до значений 1700 кг/м³ пороги для закрытых образцов превышают пороги для открытых. При высоких плотностях образцов зависимость величины порога от плотности для открытых образцов оказывается более крутой, и порог зажигания при плотности 1890 кг/м³ для открытых образцов на 40% превышает порог для закрытых. На стр. 55-56 диссертации приведено правдоподобное объяснение такого поведения наблюдаемых зависимостей порогов, но следует отметить и альтернативные варианты. В частности, обсуждение базируется на предположении о равномерном среднеобъемном распределении металлических частиц в прессованном образце. Простые соображения стереометрии показывают, что при массовом содержании металла 40% должны образовываться цепочки касающихся друг друга частиц, и частицы металла должны оказываться в «карманах» между относительно крупными частицами ПХА. Утверждения на стр. 56, что при первичном разложении отсутствует газовая фаза, и далее, на стр.61, что в момент инициирования преобладают реакции в конденсированной фазе, недостаточно детализированы и не могут быть однозначно интерпретированы. В то же время известно, что чистый ПХА не горит при давлениях ниже 20 атм из-за низкой реакционной способности газообразных продуктов разложения, и эта особенность его поведения может обуславливать закономерности зажигания при вариации условий проведения экспериментов.

На основании результатов, полученных в главе 2, сделано важное предположение об определяющей роли теплоотода в накрывающую поверхность при зажигании закрытых образцов смеси ПХА/наноAl. Для корректного описания ослабления пучка излучения в образцах прессованной смеси потребовалось провести экспериментальное определение оптических характеристик чистого ПХА и смеси ПХА/Al, а также математическое моделирование этой задачи методом Монте-Карло. Эти результаты изложены в главе 3. Здесь автору удалось разработать оригинальные методики определения оптических характеристик чистого ПХА и определения показателя поглощения прессованных образцов наноAl с помощью лазерной абляции. Показано, что при массовой концентрации наноAl свыше 25% оптические характеристики смеси совпадают с характеристиками прессованных образцов наноAl, которые затем используются в оценках нагрева и испарения поверхностного слоя смеси ПХА/наноAl (60:40).

В главе 4 представлены результаты численного решения задачи о нагреве прессованных образцов потоком излучения, поглощаемым в глубине конденсированной фазы. Рассмотрены случаи открытой поверхности образца и при наличии теплового

контакта со слоем прозрачного диэлектрика. Получены распределения температуры в поверхностном слое прессованного образца, демонстрирующие, что присутствие слоя инертного покрытия обуславливает снижение на десятки процентов величины температуры, достигаемой при действии фиксированного теплового потока на поверхности. Соответственно, это ведет к понижению мощности тепловыделения и к увеличению задержки зажигания.

Отметим, что результаты решения инертной задачи контактного нагрева давно известны в литературе (А. В. Лыков - Теория теплопроводности, М., 1967.) и в этом смысле легко предсказуемы. Более детальные постановки с учетом реакции в конденсированной фазе были также опубликованы в серии работ Князевой А.К. (см., например, Физ. гор. и взр., 1989, т. 25, № 3, С.9-16; Физ. гор. и взр., 1990, Т. 26, № 2, С.8-18). Вызывает вопрос правомочность учета слабого теплоотвода в прилегающую газовую среду путем задания нулевой теплопроводности этой среды. Смысл такого приема состоит в оправдании практически нулевого отвода тепла в газ, что равноценно адиабатическому граничному условию (нулевому градиенту температуры на границе раздела сред), сделанному автором нестандартным способом. В целом этот раздел носит вспомогательный характер, и его результаты позволяют правдоподобно объяснить на физическом уровне наблюдаемые закономерности зажигания прессованных смесей ПХА и наноалюминия.

Диссертационная работа изложена в основном грамотным техническим языком, аккуратно оформлена, содержит достаточное количество иллюстрационного материала и впечатляющий список цитированной литературы. По тексту диссертации можно сделать ряд стилистических и содержательных замечаний.

1. Нельзя использовать выражения «атмосфера азота, аргона, инертного газа», поскольку не существует планет с такими названиями.
2. Непонятен смысл утверждения на стр. 30, что не существует значение энергии лазерного импульса, гарантированно обеспечивающее зажигание вещества.
3. Неудачно введен на стр. 83 термин «дисперсность» (вместо классической удельной поверхности) порошка, определенный как «отношение площади поверхности частиц на (?) величину их массы».
4. Неудачно сформулированы выражения на стр.98 – «проницаемость излучением отдельных частиц», «осветление поверхности без значительного заглубления».
5. Результаты измерений параметров зажигания представлены в таблицах 2.1-2.4 в виде суммы средних значений и величин разброса. При этом не указаны значения количества индивидуальных опытов и доверительные вероятности. В главе 3 значения параметров в таблицах 3.1-3.3 приведены только в виде средних величин.

Необходимо отметить, что сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку качества представленной диссертационной работы, в которой получены новые научные результаты в области лазерного инициирования порошкообразных материалов, вносящие вклад в развитие научных представлений о взаимодействии излучения с веществом и в обеспечение технологических решений создания компактных инициирующих устройств с уникальными техническими параметрами. Автор диссертации продемонстрирован высокая квалификация экспериментатора, знание

принципов оптики и техники регистрации параметров излучения и взрывного превращения, способности адекватно формулировать задачи и анализировать результаты исследований. Материалы диссертации изложены в 3 статьях, в том числе в 2 статьях в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Автор многократно докладывал результаты на отечественных и международных конференциях. Автореферат диссертации в целом соответствует материалам диссертации. Достоверность результатов обеспечена использованием апробированных экспериментальных методов проведения опытов по лазерному инициированию прессованных смесей, квалифицированным анализом полученных данных, их хорошей воспроизводимостью и согласием с соответствующими результатами других исследователей.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Е.В. Фората удовлетворяет требованиям пп. 2.1 и 2.2 «Порядка присуждения ученых степеней в Томском политехническом университете», предъявляемым к кандидатским диссертациям», и ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Главный научный сотрудник ИХКГ СО РАН

Д.ф.-м.н., специальность 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества,

профессор

11.05.2023

Зарко Владимир Егорович

Телефон: +7 383 333-22-92, zarko@kinetics.nsc.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН), ул. Институтская, д. 3, Новосибирск 630090, Россия.

Я, Зарко Владимир Егорович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Фората Егора Викторовича, и их дальнейшую обработку.

Подпись Зарко Владимира Егоровича заверяю
Ученый секретарь ИХКГ СО РАН
Кандидат физико-математических наук

Пыряева А.П.