

## ОТЗЫВ

официального оппонента О.В. Лапшина на диссертацию Фората Егора Викторовича "Импульсное лазерное зажигание смесей перхлората аммония с алюминием", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Перхлорат аммония (ПХА), являясь достаточно сильным окислителем, применяется в твёрдых ракетных топливах и компонентах взрывчатых веществ. Одним из интенсивно развивающихся методов возбуждения в смесях ПХА горения и взрыва можно считать лазерное инициирование (ЛИ). Метод ЛИ, в отличие от других способов инициирования, отличается повышенной экологичностью и безопасностью.

Эффективность применения ЛИ зависит от глубины понимания физических и химических процессов, сопровождающих превращение вещества в волне горения или в условиях теплового взрыва.

Этому вопросу посвящено большое число экспериментальных и теоретических исследований. Вместе с тем, из-за чрезвычайной сложности и многофакторности горения, ряд важных аспектов процесса требует специального системного исследования. К таким аспектам, в частности, относятся закономерности зажигания, энергетические пороги зажигания и влияние на них параметров исходной смеси. Поэтому диссертационная работа Е.В. Фората, посвященная процессу импульсного лазерного зажигания в системе ПХА–Al, является весьма актуальной как в фундаментальном плане, так и для ее многочисленных практических приложений. Используя экспериментальные, численные и аналитические методы математического моделирования, автор впервые установил ряд важных закономерностей процесса зажигания смесей перхлората аммония с алюминием.

Предмет изучения в диссертационной работе – энергетически реагирующая система ПХА–Al, отличающаяся разнообразием масштабов гетерогенности и схем лазерного инициирования в ней зажигания. Важная отличительная черта диссертационной работы Фората Е.В. – это достаточно подробный анализ полученных в ходе выполнения диссертационной работы экспериментальных данных и сравнение с ними проведенных автором теоретических расчетов. Перечисленные факторы характеризуют

научную значимость и новизну представленного в диссертации материала.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и списка литературы, включающего 144 публикации. Во **введении** автор кратко излагает специфические особенности горения и взрыва в составах ПХА с Al, освещает экспериментальные сложности в изучении процесса, перечисляет существующие методы ЛИ, а также формулирует и обосновывает основные цели и задачи диссертационной работы.

В **первой главе** «Литературный обзор» приведены общие сведения о взрыве и процессах горения, даны основные определения и понятия о цепном механизме реакции, ламинарном и турбулентном горении. Рассмотрены особенности горения и его отличие от взрыва, приведен обзор работ, посвященных иницированию взрывчатых веществ лазерным излучением. Отдельными пунктами в главе рассматриваются процессы горения чистого и алюминизированного ПХА, в том числе вызванные лазерным зажиганием. В конце главы делается вывод о необходимости проведения исследований по лазерному иницированию горения в смесях перхлората аммония с алюминием.

Во **второй главе** диссертации «Экспериментальные исследования зажигания смесей ПХА/Al при различных условиях лазерного импульсного воздействия» изложены методики и техника экспериментов, приведена схема исследовательского лазерного стенда. Были изучены процессы лазерного зажигания смесей ПХА+Al с поверхности, закрытой прозрачным диэлектриком и с открытой поверхности в среде газа аргона. При этом варьировались дисперсность частиц алюминия и плотность образцов исходного порошкового состава. Выявлено, что с уменьшением частиц Al возрастает чувствительность составов ПХА+Al к ЛИ, а составы с наноразмерным порошком алюминия (НП Al) в диапазоне плотности 350 – 1700 кг/м<sup>3</sup> менее чувствительны к ЛИ с закрытой поверхности по сравнению с открытой. Также установлено, что пороговая мощность ЛИ-зажигания тех же составов практически не меняется в диапазоне их плотности 300 – 1900 кг/м<sup>3</sup>.

В **третьей главе** диссертации «Определение оптических характеристик смесей ПХА/Al» экспериментальными и теоретическими методами установлена зависимость отражающих свойств образцов ПХА и образцов из нанопорошка Al от их структурных характеристик. Разработаны методики

вычисления показателей рассеяния и поглощения в образцах ПХА и поглощения в образцах НП Al. Показано, что коэффициент отражения в более плотных образцах ПХА увеличивается, а в более плотных образцах НП Al, наоборот, уменьшается. Выявлено, что оптические характеристики прессованных образцов ПХА+25%<sub>масс</sub>НП Al тождественны оптическим характеристикам образцов НП Al.

**Четвертая глава** диссертации «Численное моделирование задачи разогрева смеси ПХА/НП Al импульсом лазерного излучения» посвящена разработке математической модели нагрева порошкового образца при его облучении тепловым потоком. Для этого было записано уравнение теплопроводности для системы, в общем случае состоящей из основного образца и прилегающей к нему пластины полиметилметакрилата (ПММ). Задача решалась в одномерном приближении с соответствующими начальными и граничными условиями. Количественные расчеты осуществлялись с применением явной разностной схемы с ограничениями, для соблюдения условия устойчивости решения, на шаги по времени и пространству. С использованием разработанной модели были проведены теоретические расчеты температурных профилей в системах ПХА/НП Al и ПММ – ПХА/НП Al в зависимости от величины показателя поглощения. Показано, что покрытие поверхности образца пластиной уменьшает температуру на границе раздела ПММ – ПХА/НП Al.

Приведенные в заключении основные выводы диссертации свидетельствуют о высокой значимости для теории и практики горения разработанных диссертантом подходов к анализу эффектов, возникающих при импульсном лазерном зажигании композитных топлив на основе перхлората аммония. В конце диссертации перечислены возможные способы использования полученных результатов и намечены пути их дальнейшего развития.

К недостаткам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. Не приведен анализ на химический состав исходных порошков. Поэтому, в частности, непонятно, подверглись ли они окислению, и как учитывалось влияние возможного окисления порошков алюминия на процесс зажигания?

2. Из диссертации неясно, как перемешивались порошки, особенно с наноразмерной составляющей? Известно, что это достаточно непростая задача – размешать нанопорошок в смеси с другими порошками. Насколько

сохранялся наноразмерный масштаб порошка алюминия после неизбежной агломерации его частиц?

3. В диссертации вместо относительных величин плотности (пористости) образцов приведены размерные величины плотности, что не совсем их удобно использовать для анализа и обобщения полученных результатов. Тем более что в работе изучается проникающая способность лазерного луча внутрь образца, в подобном исследовании использовать понятие пористости было бы очень полезным.

4. В представленной в диссертации тепловой модели некорректно рассматривать химически реагирующую экзотермическую систему ПХА/НП Al в приближении инертного вещества. Изложенная в диссертации постановка задачи позволяла рассмотреть расчетную область не в приближении полубесконечных пространств, а для конкретных линейных размеров порошкового образца и пластины. Тогда теоретический расчет в большей степени соответствовал бы условиям эксперимента.

5. Отсутствует математическая постановка задачи для открытой поверхности образца. В этом случае на границе  $x=0$  вместо равенств тепловых потоков и температур (20) и (21) должно стоять условие неперетекания тепла через торец образца  $\partial T_2/\partial x=0$ .

В целом, диссертационная работа Фората Е.В. является завершенным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Полученные в работе результаты позволяют заключить, что Форатом Е.В. решена важная научная проблема – выявлены закономерности процессов зажигания смесей на основе перхлората аммония при воздействии на них импульсного лазерного излучения. Также разработаны методики (с помощью решения обратной задачи) экспериментального и теоретического определения оптических характеристик для образцов ПХА, НП Al и ПХА/НП Al.

Материал диссертации изложен ясно, хорошо оформлен и содержит достаточное количество иллюстраций.

Достоверность представленных выводов обоснована использованием различных подходов к анализу явлений, а также качественным и количественным сопоставлением теоретических результатов с экспериментальными фактами.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Результаты диссертационной работы Фората Е.В. могут быть рекомендованы для использования при разработке и усовершенствовании

способов управления зажиганием и горением энергоемких систем, а также в учебном процессе при подготовке специалистов в области технологического горения.

Считаю, что диссертационная работа Е.В. Фората соответствует требованиям пп. 2.1, 2.2 «Порядка присуждения ученых степеней в Томском политехническом университете», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам диссертант – Форат Егор Викторович – заслуживает присвоения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Ведущий научный сотрудник

лаборатория математического моделирования физико-химических процессов в гетерогенных системах НИ ОСМ ТНЦ СО РАН

Доктор физико-математических наук (специальность 1.3.17 (01.04.17) – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества),

Лапшин Олег Валентинович

Я, Лапшин Олег Валентинович, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, приведенных в настоящем документе

Подпись Лапшина Олега Валентиновича заверяю

Главный ученый секретарь

ФГБНУ ТНЦ СО РАН

Львов О.В.

подпись, печать организации

17.08.2023

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук (ТНЦ СО РАН), 634055, г. Томск, пр. Академический, д. 10/4, Тел.: +7 (3822) - 491-173 Факс: +7 (3822) - 492-713

E-mail: [ovlap@mail.ru](mailto:ovlap@mail.ru)