

ОТЗЫВ

Официального оппонента АССОВСКОГО Игоря Георгиевича.

на диссертацию ТИЗИЛОВА Андрея Сергеевича

«Методы и средства управления процессами горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.17 - Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Алюминий широко используется в качестве горючей компоненты во многих энергоемких материалах, таких как ракетные топлива, пиротехнические составы и др. В последнее время большой интерес вызывает применение аэрозвесей порошков алюминия и других энергоемких металлов в двигателях для летательных аппаратов, в энергетических и технологических установках. По сравнению с углеводородными топливами применение порошков алюминия имеет ряд преимуществ, среди которых способность гореть в условиях и средах, в которых не реагируют углеводородные топлива (например, в смесях водяного пара, азота и оксидов углерода). Это позволяет создавать двигатели, способные функционировать в воздушных средах с изменяющимся составом среды. Вместе с тем широкое применение горения аэрозвесей алюминия сдерживается затрудненным воспламенением частиц алюминия. Поэтому диссертация А.С. Тизилова, посвященная разработке методов и средств управления процессами зажигания и горения аэрозвеси частиц алюминия в камерах сгорания реактивных двигателей и энергетических установок, является весьма актуальной и полезной как для теории горения аэрозвесей, так и для ее многочисленных приложений.

Отличительной особенностью диссертации А.С. Тизилова является комплексное экспериментально-теоретическое изучение физикохимических явлений, сопровождающих воспламенение и горение частиц алюминия, распыленных в турбулентном высокоскоростном потоке, характерном для условий работы прямоточных воздушно-реактивных двигателей.

Диссертация изложена на 166 страницах, содержит 72 рисунка, 16 таблиц и состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы из 117 наименований и приложения. Во введении автор обосновывает актуальность темы исследования, формулирует цели и основные задачи работы, кратко излагает структуру и основное содержание диссертации, научную новизну и практическую значимость полученных результатов.

В первой главе представлен аналитический обзор многочисленных публикаций в отечественной и зарубежной литературе по воспламенению и горению одиночных частиц и аэрозвесей порошков алюминия, а также по способам интенсификации зажигания и стабилизации пламени в высокоскоростном потоке аэрозвеси. Отмечается, что увеличение скорости распространения пламени в переобогащенных аэрозвесах частиц алюминия обусловлено особенностями тепло-массо-обмена в богатых смесях, а также

экзотермической реакцией азотирования (В.И. Малинин, Д.А. Ягодников, А.В. Сухов и др.). Из анализа теоретических работ следует, что модель горения частицы алюминия должна рассматривать механизм и кинетику образования частиц конденсированной окиси алюминия как процесс, определяющий механизм сгорания частицы алюминия. На основе обзора литературы сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе содержится описание экспериментальных установок и инструментальной базы, а также методика проведения испытаний и оценки погрешностей измерений. Комплекс установок включает модельные камеры для изучения динамики течения аэрозвеси без горения алюминия, а также испытательный стенд для изучения зажигания и горения порошка алюминия в турбулизованном потоке воздуха. Визуализация внутрикамерных процессов производилась с помощью прозрачных моделей камер сгорания из жаропрочного стекла «Пирекс» посредством высокоскоростной киносъемки. Применение микропроцессорной техники при обработке, получаемой в эксперименте информации, позволило повысить точность и информативность регистрируемых характеристик. Следует отметить детальный анализ точности выполненных автором измерений различных характеристик потока аэрозвеси.

В третьей главе автор рассматривает вопросы математического моделирования течения аэрозвеси алюминия в камерах сгорания с внезапным расширением, а также обсуждает результаты экспериментально-теоретических исследований течения и горения аэрозвеси. Представлены результаты расчетов характеристик течения воздушных и алюминиево-воздушных потоков в вихревой камере сгорания, а также экспериментальных исследований течения потока аэрозвеси частиц алюминия в форкамере с внезапным расширением. В результате проведенного компьютерного моделирования и расчетов течения в камере сгорания, установлены значения параметра закрутки S потока, при котором время пребывания частиц в камере сгорания максимально. Установлена функциональная зависимость времени пребывания частиц алюминия в камере сгорания от параметра закрутки потока $\tau_n = f(S)$, имеющая большое значение для правильной организации процесса горения.

Выполненные автором с помощью скоростной киносъемки экспериментальные исследования структуры течения аэрозвеси в фор-камере с внезапным расширением и обнаруженная область зоны рециркуляции с максимальной концентрацией и временем пребывания частиц алюминия в ней, позволили определить оптимальное место установки свечи зажигания

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса воспламенения аэрозвеси частиц алюминия в форкамере с внезапным расширением, в том числе представлены различные режимы развития начального очага зажигания для аэрозвесей промышленных порошков алюминия марок АСД-1 и АСД-4. Определены критические радиусы начального очага зажигания и условия воспламенения

. Установлены значения периода индукции теплового взрыва для аэрозвесей частиц АСД-1 и АСД-4, которые хорошо согласуются со значениями этих величин, полученными другими авторами (А. Machek и др., В.М. Бойко и др.).

Установленные значения радиусов критического очага зажигания для порошков марки АСД-1 и АСД-4 позволяют в первом приближении определить начальную скорость распространения пламени, пользуясь формулой Барзыкина В.В.

Выявлены закономерности и особенности развития начального очага. Для обеспечения устойчивого зажигания высокоскоростного турбулентного потока аэрозвеси в камере сгорания необходимо создать условия для возникновения начального очага около свечи, переброса пламени в зону рециркуляции и воспламенение аэрозвеси в зоне

обратных токов с последующим распространением пламени в ядро основного потока аэровзвеси.

Определены границы области зажигания потока аэровзвеси частиц алюминия и их зависимость от скорости потока и других характеристик системы. Установлено, что область зажигания в потоке аэровзвеси частиц алюминия сужается при увеличении скорости потока и расширяется с увеличением диаметра камеры сгорания, температуры воздуха и уменьшением размера частиц алюминия.

В **пятой** главе исследован процесс стабилизации фронта пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия в камере с внезапным расширением. Получена формула для расчета времени пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции потока. Значения времен пребывания, вычисленные по предложенной формуле, удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями полученными другими авторами (Шайкин А.П., Русаков М.М. и др.).

Следует особо отметить научную и практическую ценность установленных в диссертации зависимостей пределов устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия от изменения состава окисляющей среды $\alpha = 0,1 \div 3,0$. Установлено также, что зависимости скорости распространения пламени от относительной концентрации окислителя $U_0 = f(\alpha)$ имеет два максимума один в области «богатых» смесей $\alpha \approx 0,2$, второй в области стехиометрических составов $\alpha \approx 1$.

Украшением диссертации является заключительная **шестая** глава, в которой представлены методы и средства управления процессом горения аэровзвеси частиц алюминия в потоке воздуха. Разработан метод управления процессом горения в форкамере с внезапным расширением, основанный на вдуве дискретных пульсирующих струй воздуха в слой смешения зоны рециркуляции с основным потоком аэровзвеси частиц алюминия. Установлено, что посредством вдува дискретных стационарных струй воздуха в слой смешения зоны рециркуляции и основного потока можно управлять гидродинамикой течения, а варьируя частотой псевдо-турбулентных пульсаций интенсифицировать процесс горения и управлять профилем температуры на выходе из форкамеры.

Отмеченные выше многочисленные экспериментальные и теоретические результаты свидетельствуют о многоплановости и завершенности выполненной А.С. Тизиловым диссертационной работы.

В числе замечаний по содержанию диссертации можно отметить следующее:

1. В обзоре литературы не отражены работы по влиянию гравитации на механизм горения свободной одиночной частицы алюминия, выполненные в ИХФ РАН. Результаты этих работ имеют прямое отношение к горению аэровзвесей, поскольку при управлении потоком горящие частицы движутся в условиях переменного обдува газом.

2. В списке публикаций автора отсутствует статья: А.Г. Егоров, А.С. Тизилов, Г.М. Гаглоев «Вихревая камера сгорания для установки газодисперсного синтеза», опубликованная в 2016 г. в 5м томе периодического издания «Космический вызов XXI века», сс.247-254. Эта статья указывает на прикладное значение рецензируемой диссертационной работы для технологии получения наноструктурных керамических материалов.

В целом, диссертационная работа А.С. Тизилова выполнена на высоком экспериментальном и теоретическом уровне. Полученные в работе фундаментальные результаты позволяют заключить, что А.С. Тизиловым решена важная научно-техническая задача – разработаны методы и средства управления процессом горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия.

Диссертационная работа А.С. Тизилова соответствует «Перечню критических технологий Российской Федерации»: 24. Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения. Материал диссертации изложен достаточно четко и хорошо иллюстрирован. Достоверность представленных результатов и выводов достаточно обоснована.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Результаты диссертационной работы А.С. Тизилова могут быть рекомендованы для использования в учебном процессе при подготовке специалистов в области разработки двигателей и энергетических установок для летательных аппаратов. Кроме того, результаты диссертации будут полезны при разработке и усовершенствовании систем для предотвращения пожаровзрывоопасных инцидентов при производстве высокодисперсных металлических порошков.

Высокий научный уровень выполненного исследования и прикладная значимость полученных научных результатов позволяют сделать вывод, что диссертация А.С. Тизилова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. (в редакции Постановления Правительства РФ от 21.04.2016, № 335) и формуле специальности 01.04.17, а ее автор Тизилев Андрей Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией 1312
«Физики горения твердых топлив»,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт химической физики
им. Н.Н. Семенова Российской академии наук
(ИХФ РАН)
ул. Косыгина 4 Москва 119991 РФ
www.chph.ras.ru, т. 7-495-9397267;
e-mail: assov@chph.ras.ru
факс: +7 495 651-21-91



Ассовский И.Г.

Собственноручную подпись
сотрудника Ассовского И.Г.
удостоверяю
Секретарь 

