

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Тизилова Андрея Сергеевича по теме

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

Выполненная Тизиловым А.С. диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, посвященную изучению и обоснованию новых эффективных схем и способов реализации сжигания порошковых металлических горючих в камерах сгорания технологических и энергетических установок, разработке и совершенствованию технических решений, позволяющих осуществлять управление процессами горения с целью обеспечения их устойчивости в пределах заданного состава и рабочих параметров алюминиевоздушных смесей.

Тема диссертации является актуальной для исследования внутрикамерных процессов, создания и развития современных высокоэффективных технических устройств, основу функционирования которых составляет горение распылённых в активных газах (в частности, в воздухе) металлических порошков – технологических реакторов получения ультра- и нанодисперсных оксидов металлов и реактивных двигательных установок на порошкообразных металлических горючих. Моделирование и экспериментальные исследования воспламенения и сгорания аэровзвесей порошков металлов представляют востребованное и актуальное направление науки и техники, имеющее большое прикладное значение для анализа внутрикамерных процессов в указанных устройствах и привлекающее большой интерес российских и зарубежных учёных и инженеров.

Научная новизна работы состоит в том, что экспериментальными исследованиями подтверждены теоретические положения, описывающие зависимость скорости распространения пламени в аэровзвеси алюминия от коэффициента избытка воздуха, разработаны и обоснованы методы управления процессами горения на основе анализа границ воспламенения и возможностей стабилизации пламени в камере сгорания, предложены и обоснованы технические решения, позволяющие эти методы реализовать.

В результате решения научных задач выявлен второй максимум на кривой зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха: установлено, что второе максимальное значение скорости распространения пламени достигается при $\alpha \approx 1$ и совпадает с максимальными значениями тепловыделения и температуры горения аэровзвеси частиц алюминия стехиометрического состава, полученными ранее термодинамическими расчетами другими авторами. Также проведено компьютерное моделирование течения в камере сгорания с применением закрутки потока и установлены оптимальные значения параметра закрутки $S \approx 1,8 \dots 2,0$, при которых время пребывания частиц алюминия в камере сгорания максимально. Установлено, влияние на границы зажигания в потоке аэровзвеси промышленных порошков алюминия марок АСД-1 и АСД-4 диаметра камеры сгорания, среднего размера частиц и скорости потока. Выявлено, что границы расширяются при уменьшении диаметра камеры сгорания, среднего размера частиц, и сужаются при увеличении скорости потока.

Экспериментально определены значения периода индукции теплового взрыва для

аэровзвеси частиц АСД-1 и АСД-4, которые хорошо согласуются со значениями этих величин, полученными другими авторами. Определены критические радиусы начального очага зажигания для порошков алюминия АСД-4 и условие воспламенения, а также критический радиус начального очага зажигания и условие воспламенения для порошка алюминия АСД-1.

При исследовании процесса стабилизации фронта пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия в камере с внезапным расширением получена формула для расчета времени контакта частиц алюминия с зоной рециркуляции, корректность которой подтверждена сопоставлением с экспериментальными исследованиями других авторов. Предложен критерий срыва пламени по модели, основанной на балансе теплообмена рециркуляционной зоны с основным потоком аэровзвеси, который в логарифмических координатах хорошо описывает экспериментальные данные линейной функцией. Таким образом, выявлены закономерности и особенности развития начального очага, важные с точки зрения обеспечения надёжного зажигания и стабильного горения аэровзвеси.

Разработаны методы управления процессами горения, основанные на применении вдува дискретных струй воздуха в слой смешения зоны рециркуляции и основного потока аэровзвеси. Выявлены диапазоны частот псевдотурбулентных пульсаций накладываемых на дискретные струи воздуха, соответствующие положительному и отрицательному влиянию на характеристики горения аэровзвеси, в частности, на полноту сгорания и устойчивость горения в каналах с внезапным расширением. Экспериментально исследован метод управления геометрическими параметрами факела в аэровзвеси алюминия, основанный на закрутке воздушного потока посредством кольцевого лопаточного завихрителя, установленного в плоскости выходного сечения форкамеры (с параметром закрутки $S=1,8 \dots 2,0$), и обоснована возможность сокращения длины факела 5 раз по сравнению с факелом без закрутки с одновременным увеличением температуры на оси.

Указанные научные положения основаны на теоретических и экспериментальных исследованиях, выполненных впервые, и составляют основную научную новизну диссертационной работы. В работе исследуются достаточно сложные физико-химические процессы и технические решения, и применение в большей части работы экспериментальных методов исследования является существенным достоинством диссертации.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается значительным объёмом экспериментальных данных, использованием современных положений и результатов теории горения и течения металлических порошков, методов и оборудования измерений и обработки – математического компьютерного моделирования течения закрученных потоков аэровзвесей полифракционных металлических порошков, теории горения и воспламенения частиц металлов, датчиков и систем измерения расходов порошка и воздуха, температуры в камере сгорания. Также достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается их сопоставлением с результатами, полученными другими авторами, и соответствием этим результатам, известными эмпирическими данными взаимодействия частиц алюминия с окислительными средами.

Выводы по главам работы и по диссертации в целом являются итогом представленных исследований и соответствуют содержанию выносимых на защиту положений и результатов.

Разработанные рекомендации соответствуют содержанию работы и выводам и

касаются создания новых технических устройств, позволяющих осуществлять предложенные схемы организации рабочего процесса в прямоточных камерах сгорания двигательных установок и технологических установок. Рекомендован метод обеспечения зажигания высокоскоростного турбулентного потока аэровзвеси в камере сгорания путём создания условий для надёжного воспламенения, возникновения начального очага около свечи зажигания, переброса пламени в зону рециркуляции и воспламенение аэровзвеси в зоне обратных токов с последующим распространением пламени в основной поток аэровзвеси. В качестве основного технического решения разработано и рекомендовано конструктивное сочетание форкамеры, представляющей собой канал с внезапным расширением и кольцевого лопаточного завихрителя с диффузорной насадкой, которое можно использовать в качестве фронтального устройства в камерах сгорания, причём определено также рациональное расположение электрической свечи, инициирующей процесс горения потока аэровзвеси.

Предложенные рекомендации являются актуальными, количественно обоснованными и определёнными и технически осуществимыми, что подтверждено экспериментами, выполненными в ходе диссертационной работы, полученными патентом и авторским свидетельством, ссылки на которые имеются в списке литературы, и актом внедрения результатов на ФКП «ГкНИПАС». Выполнение рекомендаций позволит создавать новые установки, реализующие процессы сжигания аэровзвесей частиц алюминия в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха и скорости потока аэровзвеси частиц алюминия.

Разработанные научные положения и технические решения строго аргументированы, приведены описания и сравнительные оценки других известных решений задачи стабилизации процессов горения металловоздушных смесей в прямоточных камерах сгорания. Особо следует отметить вклад автора в решение задач по изучению зависимостей между коэффициентом избытка воздуха и скоростью распространения пламени по металловоздушным смесям, геометрическими размерами камеры с внезапным расширением и скоростью срыва пламени.

Диссертация изложена на 166 страницах, состоит из введения, шести глав, заключения (содержащего основные результаты исследований и выводы), списка использованных источников и приложения, включающего акты внедрения результатов исследований. Во введении указано 5 задач, решаемых в диссертационной работе, что даже превышает объём задач для кандидатской диссертации. Диссертация содержит 72 рисунка, 16 таблиц, список использованных при написании источников включает 117 наименований. Автореферат верно и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Тем не менее, несмотря на указанные несомненные достоинства, можно отметить следующие замечания к диссертационной работе.

1. В обосновании необходимости обеспечения коэффициента избытка воздуха $\alpha=1$ в форкамере установки приводится то, что нужно избежать образования нитрида алюминия AlN (с. 44 главы 1, с. глава 2). Однако, это положение неактуально для ракетных двигателей, поскольку в энергоустановках нитрид является всего лишь одним из продуктов сгорания, и в этом случае нужно основываться на его влиянии на удельный импульс. Кроме того, образование нитрида существенно лишь в пределах изменения $0,05 \leq \alpha \leq 0,3$, и после форкамеры в камере сгорания происходит дожигание аэровзвеси при α существенно больше 1. В

установках же получения ультрадисперсного оксида Al_2O_3 достаточно выдерживать α больше 0,4 для исключения AlN из продуктов реакции, а для образования нитрида нужно выдерживать низкий α в течение всего времени протекания процесса (например, указанное отражено в публикациях Ягодников Д.А., Сухов А.В., Малинин В.И., Кирьянов И.М. Роль реакции азотирования в распространении пламени по переобогащенным металловоздушным смесям //Вестник МГТУ им. НЭ. Баумана. Сер. Машиностроение. 1990. №1. С. 121-124., А.Ю. Крюков, В.И. Малинин. Математическая модель горения полифракционной аэрозвеси алюминия с учётом реакции азотирования //Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2014, №36 (1). – С. 95-118).

2. Не систематизированы и не проанализированы подробно результаты влияния начального подогрева воздуха на характеристики процессов горения в экспериментах. Кроме того, следует учитывать разные требования к двигательным установкам, где процесс предварительного подогрева может оказать влияние на выходные параметры, и технологическим установкам получения дисперсного оксида алюминия, где предварительный подогрев, в принципе, не требуется.

3. В исследовании методов управления процессами горения (п. 6.2 главы 6 диссертации) эксперименты по влиянию вдува стационарных и пульсирующих струй воздуха на профиль температур, полноту сгорания и устойчивость горения в форкамере проведены для достаточно низких коэффициентов избытка воздуха $0,23 \leq \alpha \leq 0,4$. В то же время, в работе в целом подчёркивается актуальность и возможность обеспечения значения α в форкамере, близкое к 1 для обеспечения парофазного режима, максимальной температуры и высокой полноты сгорания. Поэтому целесообразность проведения указанных исследований именно в этом диапазоне значений коэффициента избытка воздуха желательно было дополнительно обосновать.

4. Количество глав в диссертации можно было бы сократить на одну, поскольку содержание второй главы имеет описательный характер, и представление экспериментального оборудования и методик проведения исследований логично включить в первую главу отдельным пунктом (при этом включить этот пункт в название главы).

Однако, отмеченные в замечаниях недостатки не изменяют общей положительной оценки диссертации. Поставленные задачи работы решены в полном объёме на высоком уровне. Диссертационная работа содержит совокупность новых научных результатов и положений, выдвинутых на публичную защиту, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Автором указаны все случаи заимствования, приведены ссылки на источники использованных в исследовательских целях материалов.

Основные научные результаты опубликованы в изданиях, входящих в базы «Scopus» и «Web of Science», журналах перечня ВАК и других изданиях, в том числе, в большом количестве трудов международных и всероссийских конференций, что очень важно для апробации работы. Также по итогам работы получен 1 патент РФ и 1 авторское свидетельство.

В диссертационной работе Тизилова А.С. выполнено решение задач, имеющих существенное значение для развития знаний в области горения потоков аэрозвесей металлов, увеличения эффективности использования внутрикамерных процессов и элементов конструкции энергоустановок на порошковом металлическом горючем и

технологических установок получения ультрадисперсных оксидов с заданными свойствами методом сжигания металлических порошков, изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, представляющие значение для проектирования двигательных и технологических установок на порошковом алюминиевом горючем.

Диссертация правильно структурирована, соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, критериям научно-квалификационной работы на соискание ученой степени кандидата наук, указанным в требованиях п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции постановления Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335), и формуле специальности 01.04.17.

Автор диссертационной работы «Методы и средства управления процессами горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия» Тизилев Андрей Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

Официальный оппонент:

доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения»
аэрокосмического факультета ФГБОУ ВО
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»,
кандидат технических наук

 Крюков Алексей Юрьевич

Подпись кандидата технических наук, доцента кафедры
«Инновационные технологии машиностроения»
аэрокосмического факультета, заверяю:

Учёный секретарь ФГБОУ ВО
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»,
кандидат исторических наук

 Макаревич Владимир Иванович

25 мая 2017 г.

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Адрес: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29
Телефон/факс: +7 (342) 219-82-49, 239-15-08
E-mail: ayukryukov@pstu.ru