

На правах рукописи



**Тизилов Андрей Сергеевич**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОЦЕССАМИ ГОРЕНИЯ В ПОТОКЕ  
АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ**

Специальность 01.04.17 –Химическая физика, горение  
и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара - 2017

Работа выполнена в Научно-образовательном центре «Физика горения энергоёмких материалов» при ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Егоров Александр Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Ассовский Игорь Георгиевич, институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН;  
кандидат технических наук  
Крюков Алексей Юрьевич, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

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

Защита диссертации состоится “23” июня 2017 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.01 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: Россия, 443100, г. Самара ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, аудитория 500.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: Россия, 443100, г. Самара, ул. Первомайская, 18.

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: Россия, 443100, г. Самара ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.01, тел. (846) 242-27-76, e-mail: mtm.samgtu@mail.ru

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2017 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.217.01,  
кандидат технических наук



Д.А. Майдан

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В настоящее время не существует универсального способа сжигания порошкообразного алюминия (Al), удовлетворяющего всем требованиям работы двигательных и технологических установок. В связи с этим использование порошкообразного Al в качестве источника энергии в двигательных и технологических установках основано на решении задач по разработке методов и средств управления процессами горения дисперсных частиц Al распыленных в турбулентном потоке воздуха и организацией эффективных внутрикамерных процессов протекающих в них.

При проектировании двигательных и технологических установок на порошкообразных металлах разработчикам необходимо решить ряд задач, связанных с организацией рабочего процесса в камере сгорания. В первую очередь это - обеспечение надёжного зажигания в потоке металлогазовой смеси, стабилизации фронта пламени и эффективного процесса горения. Новые виды двигательных и технологических установок, в которых порошкообразные металлы являются источником энергии, предусматривают широкий диапазон изменения режимных параметров, (скорости потока аэрозвеси частиц металла, соотношения компонентов в камере сгорания, дисперсности частиц металла и т.д.). Поэтому их влияние на воспламенение, стабилизацию фронта пламени и процесс сгорания необходимо знать для организации эффективного рабочего процесса в камере сгорания.

Существующие на сегодняшний день схемы организации рабочего процесса в прямоточных камерах сгорания двигательных установок и установок газодисперсного синтеза не обладают необходимым

набором методов и средств управления внутрикамерными процессами.

На основании вышеизложенного возникает необходимость поиска новых подходов к организации внутрикамерных процессов в двигательных и технологических установках на основе разработки методов и средств управления процессами горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия.

**Целью работы** является разработка методов и средств управления процессами горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

– Выполнить моделирование структуры течения потока аэровзвеси частиц алюминия в вихревой камере сгорания и установить зависимость времени пребывания частиц алюминия от параметра закрутки.

– Экспериментально исследовать структуру течения и определить локальное время пребывания частиц алюминия в форкамере с внезапным расширением.

– На основе модели очагового теплового зажигания определить критический радиус очага и условия воспламенения аэровзвеси частиц алюминия в зоне рециркуляции.

– Определить границы воспламенения и стабилизации фронта пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха  $\alpha \approx 0,1 \div 3,0$ .

– На основе выявленных особенностей и установленных закономерностей по воспламенению, горению и стабилизации пламени разработать методы и средства управления процессами горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия.

**Методы исследования.** Метод решения данных задач носит экспериментально-теоретический характер, базирующийся на современных представлениях о физических процессах, протекающих как на поверхности частиц алюминия, так и в объёме камеры сгорания. В диссертационной работе также использовались методы математического моделирования.

**Научная новизна.** Научная новизна работы заключается в том, что получены новые знания о скорости распространения пламени в аэровзвеси частиц алюминия. Впервые выявлен второй максимум на кривой зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха. Второе максимальное значение скорости распространения пламени при  $\alpha \approx 1$  соответствует максимальным значениям тепловыделения и температуры горения аэровзвеси частиц алюминия стехиометрического состава, полученные термодинамическими расчетами Малининым В.И. и др.

- Впервые на основе тепловой теории очагового зажигания определён критический радиус начального очага и условия зажигания в потоке аэровзвеси содержащие частицы алюминия АСД-1 и АСД-4;

- Установлены закономерности влияния интенсивности турбулентности на развитие начального очага зажигания и выявлена динамика развития процесса воспламенения в потоке аэровзвеси частиц алюминия;

- Впервые определена область надежного воспламенения в потоке аэровзвеси частиц алюминия и выявлено влияние начальных параметров потока на границы зажигания;

- Определены границы устойчивого горения в высокоскоростном потоке аэровзвеси частиц алюминия и впервые была получена зависимость скорости срыва

пламени от коэффициента избытка воздуха  $U_{cp} = f(\alpha)$  в широком диапазоне изменения состава смеси ( $\alpha \approx 0,1 \div 3,0$ ).

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов подтверждается значительным объемом экспериментальных данных, использованием современных методов измерений и обработки; сопоставлением полученных результатов с результатами, полученными другими авторами, а также известными эмпирическими данными взаимодействия частиц алюминия с окислительными средами.

**Практическая значимость.** Результаты исследований, диссертационной работы внедрены при разработке специальной энергетической установки Федеральным казенным предприятием «Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем».

Теоретические и экспериментальные данные использовались в Тольяттинском государственном университете (ТГУ) при чтении курса лекций и проведении практикумов по дисциплине «Теория горения и взрыва» для студентов, обучающихся по профилю 280705.62 «Пожарная безопасность» и студентов обучающихся по профилю 150100.62 «Материаловедение и технологии наноматериалов и наносистем».

**На защиту выносятся:**

1. Результаты исследований характеристик течения аэрозвеси частиц алюминия в модели вихревой камеры сгорания и прямоточной камере с внезапным расширением.

2. Данные экспериментальных исследований процесса воспламенения потока аэрозвеси частиц алюминия электрическим разрядом.

3. Экспериментальные данные по определению границ воспламенения и стабилизации фронта пламени в потоке аэрозвеси частиц алюминия.

4. Результаты экспериментальных исследований характеристик горения алюминиево-воздушного факела.

5. Методы и средства управления процессами горения в потоке взвеси частиц алюминия.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXXIX Уральском семинаре «Механика и процессы управления» (Миасс, 2009); XXIV научной конференции стран СНГ «Дисперсные системы» (Одесса, 2010); VII Всероссийской научно-технической конференции «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» (Самара, 2010); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2011); VIII Всероссийской научно-технической конференции «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» (Самара, 2012); Международном научно-техническом форуме (Самара, 2012); XI Международной конференции «Забабахинские научные чтения» (Снежинск, 2012); Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки» (Москва, 2013); VIII Международном симпозиуме по фундаментальным и прикладным проблемам науки (Непряхино, Челябинская обл., 2013); Шестой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2014); Всероссийской научно-технической конференции "Энергетика: эффективность, надежность, безопасность" (Томск, 2014); Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки» (Москва, 2015); 7-й международной конференции «Космический вызов XXI века. Новые материалы, технологии и приборы для космической техники (Севастополь, 2015), XXVII международной научной конференции «Дисперсные системы» (Одесса, 2016).

**Публикации.** По результатам диссертации опубликовано 24 научных работы, из них 2 статьи в журнале индексируемом в базе данных Scopus, 1 статья в журнале индексируемом в базе данных Web of science, 6 статей рецензируемых в изданиях рекомендованных ВАК РФ, а также получены 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 117 наименований, приложения. Диссертация изложена на 166 страницах и содержит 72 рисунка и 16 таблиц.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации, постановление №220 по договору №14.В25.31.0011.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** содержит обоснование актуальности работы, формулировку цели работы и основных задач, решаемых в диссертации, содержание работы по главам.

**В первой главе** представлен обзор литературы по воспламенению и горению порошкообразного алюминия. Показано, что увеличение скорости распространения пламени в переобогащенных аэрозвесах частиц алюминия происходит вследствие влияния как особенностей процессов теплообмена в богатых смесях, так и экзотермической реакции азотирования (В.И. Малинин, Д.А. Ягодников, А.В. Сухов и др.).

Из анализа теоретических работ установлено, 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 и анализа состояния вопроса сформулированы задачи исследований.

**Во второй главе** приводится описание экспериментальных установок и инструментальной базы, а также методика проведения испытаний и оценки погрешностей измерений.

Общий вид стенда для проведения огневых испытаний представлен на рисунке 1.

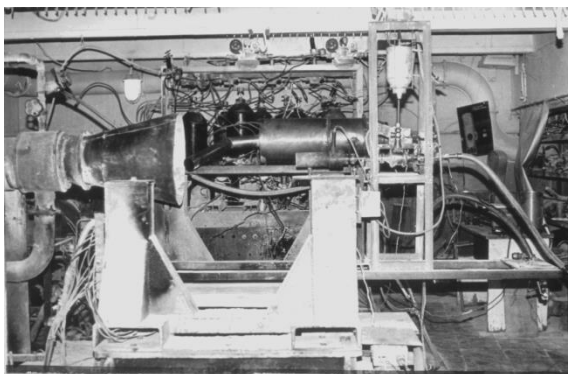


Рисунок 1 - Общий вид стенда

В экспериментах использовались алюминиевые порошки марок АСД-4 и АСД-1, выпускаемые отечественной промышленностью и соответствующие отраслевому стандарту и техническим условиям на их дисперсный состав.

Для зажигания потока аэрозвеси использовалась система зажигания со свечой поверхностного разряда СПН-4-3Т.

Измерения температурного поля алюминиево-воздушного факела производились с помощью термоизмерительного комплекса АГА-720. Температура продуктов сгорания в камере измерялась вольфрам-

рениевыми термопарами ИС-629 с рабочим диапазоном 573...2773 К и толщиной сая 0,2 мм.

Визуализация внутрикамерных процессов производилась на прозрачных моделях камер сгорания из жаропрочного стекла «Пирекс» посредством высокоскоростной киносъемки.

Применение микропроцессорной техники при обработке, получаемой в эксперименте информации, позволило повысить его точность и информативность.

**В третьей главе** представлены результаты расчетных исследований 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  $S = 1,8 \div 2,0$  при котором время пребывания частиц в камере сгорания максимально.

Получена зависимость влияния параметра закрутки  $S$  на время пребывания частиц алюминия в камере сгорания  $\tau_n = f(S)$ .

На рисунке 2 представлена структура течения аэрозвеси частиц алюминия в вихревой камере сгорания

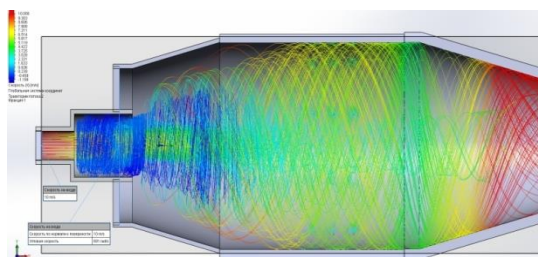


Рисунок 2 - Структура течения алюминиево-воздушного потока:  $d_{32} = 7,4\text{мкм}$ ;  $S = 1,8$ ;  $U_0 = 10\text{м/с}$

Экспериментальные исследования, методом скоростной киносъёмки, структуры течения потока аэровзвеси в форкамере 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 (рисунок 3).

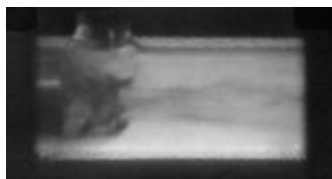


Рисунок 3 - Течение потока аэровзвеси в форкамере порошок марки АСД-1:  $d_{32} = 17,4\text{мкм}$ ;  $D_K = 0,042\text{м}$ :

$$U_0 = 50\text{м/с}; \alpha = 0,1; \varepsilon_0 = 5 \%; 700 \text{ кадр/с}$$

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований процесса воспламенения аэровзвеси частиц алюминия в форкамере с внезапным расширением.

На рисунке 4 представлены варианты развития начального очага зажигания для порошка марки АСД-4, полученные методом скоростной киносъёмки.

Определен критический радиус начального очага зажигания  $R_{кр} \geq 1\text{мм}$  для порошка алюминия АСД – 4 и условие воспламенения  $R_{кр} \geq 0,5b_n$ , а также критический радиус начального очага зажигания  $R_{кр} \geq 5\text{мм}$  для порошка алюминия АСД – 1 и условие воспламенения  $R_{кр} \geq 2,5b_n$ , где  $b_n$  – ширина фронта ламинарного пламени

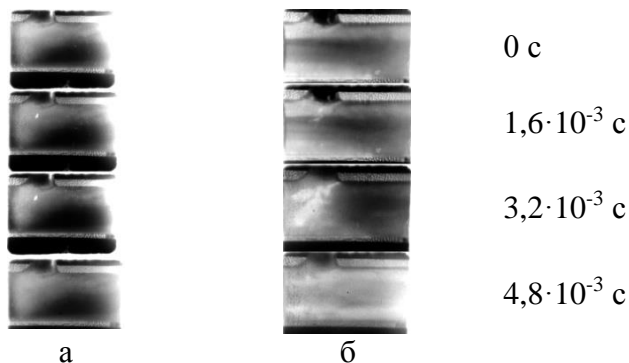


Рисунок 4 - Развитие начального очага зажигания для затухающего (а) и распространяющегося (б) пламени (направление потока слева направо) АСД- 4:  $d_{32} = 7,4\text{мкм}$ ;  $U_0 = 50\text{м/с}$ ;  $T_0 = 293\text{K}$ ;  $D_K = 0,04\text{м}$ ;  $\alpha = 1,1$ ; 600 кадр/с

На рисунке 5 представлена зависимость  $R_0 = f(\tau)$ .

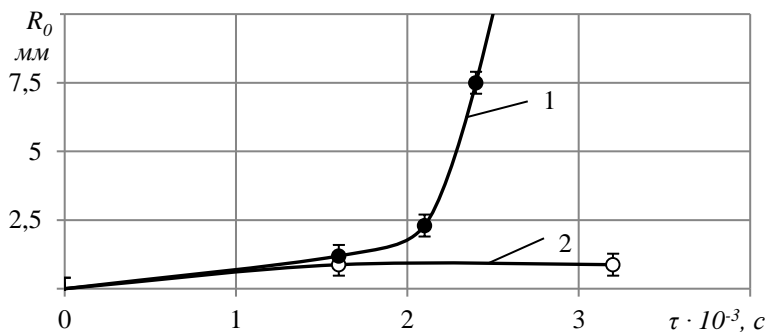


Рисунок 5 - Зависимость  $R_0=f(\tau)$  для порошка марки АСД-4: 1-распространяющееся пламя; 2-затухающее пламя

Получены значения периода индукции теплового взрыва  $\tau_B \approx 12,8 \cdot 10^{-3} \text{ c}$  для аэрозвеси частиц АСД-1 и  $\tau_B \approx 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ c}$  для АСД-4, которые хорошо согласуется со

значениями этих величин, полученными другими авторам (А. Machek и др., В.М. Бойко и др.).

Полученные значения радиусов критического очага зажигания для порошков марки АСД-1 и АСД-4 позволяют в первом приближении определить начальную скорость распространения пламени по формуле Барзыкина В.В.:

$$(dx/dt)_{нач} = (2\div3) \cdot 10^3 \cdot a/d$$

где  $a$  – температуропроводность воздуха;  $d$  – диаметр очага зажигания.

Выявлены закономерности и особенности развития начального очага. Для обеспечения надежного зажигания высокоскоростного турбулентного потока аэровзвеси в камере сгорания необходимо создать условия для возникновения начального очага около свечи, переброса пламени в зону рециркуляции и воспламенение аэровзвеси в зоне обратных токов с последующим распространением пламени в основной поток аэровзвеси.

Определены границы зажигания потока аэровзвеси частиц алюминия и её зависимость от начальных параметров. На рисунке 6 представлено влияние скорости потока на границы зажигания аэровзвеси частиц порошка АСД-1.

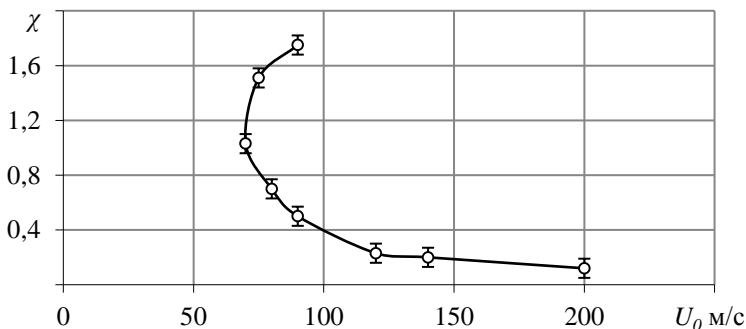


Рисунок 6 - Влияние скорости потока аэровзвеси на границы зажигания:  $D_K = 0,033\text{м}$ ;  $T_0 = 293\text{К}$ ;  $P_0 = 0,1\text{МПа}$

Установлено, что границы зажигания в потоке аэрозвеси частиц алюминия сужаются при увеличении скорости потока и расширяются с увеличением диаметра камеры сгорания, температуры воздуха и уменьшением размера частиц алюминия.

**В пятой главе** на основе теории контактной модели исследован процесс стабилизации фронта пламени в потоке аэрозвеси частиц алюминия в камере с внезапным расширением. Получена формула для расчета времени контакта частиц алюминия с зоной рециркуляции.

$$\tau_K = \frac{d_x}{\omega \cdot K} \cdot \left( 1 - \frac{d_0}{D_K} \right)$$

Расчетные значения времени контакта  $\tau_K$ , вычисленные по данной формуле, удовлетворительно согласуются со значениями  $\tau_K$  полученными в экспериментах другими авторами (Шайкин А.П., Русаков М.М. и др.).

Были определены границы устойчивого горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия в широком диапазоне изменения состава  $\alpha = 0,1 \div 3,0$  (рисунок 7).

Было установлено, что кривая зависимости  $U_0 = f(\alpha)$  имеет два максимума один в области «богатых» смесей  $\alpha \approx 0,2$ , второй в области стехиометрических составов  $\alpha \approx 1$

Учитывая тот факт, что скорость потока, при котором происходит срыв пламени, равна скорости распространения пламени, сделан вывод о наличии второго максимума на кривой зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха  $U_f = f(\alpha)$ .

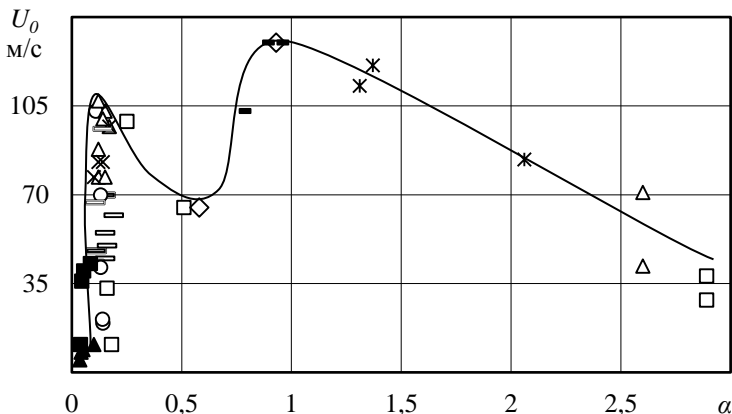


Рисунок 7 - Границы устойчивого горения  
в потоке аэровзвеси частиц алюминия:

$$D_K = 40 \div 80 \text{мм}; \varepsilon_0 = 5 \div 22\%; T_0 = 293 \div 523 \text{К};$$

$d_{32} = 7,4 \div 17,4 \text{мкм}$   $\Delta$ ,  $\square$ ,  $\ast$ ,  $\blacksquare$  - данные настоящей работы;

$\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$  - данные (В.И. Малинин);  $\circ$ ,  $-$ ,  $\square$ ,  $\diamond$ ,  $\times$  - данные  
(А.Г. Егоров, А.П. Шайкин)

**В шестой главе** 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 (рисунок 8).

Установлено, что посредством вдува дискретных стационарных струй воздуха в слой смешения зоны рециркуляции и основного потока можно управлять гидродинамикой течения, а варьируя частотой псевдотурбулентных пульсаций интенсифицировать процесс горения и управлять профилем температуры на выходе из форкамеры.

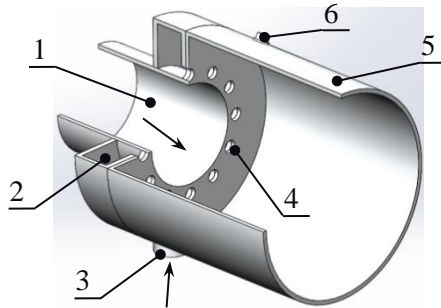


Рисунок 8 - Схема организации вдува пульсирующих струй воздуха в форкамеру:

1 – входное отверстие для алюминиево-воздушного потока; 2 – кольцевой коллектор; 3 – штуцер подвода пульсирующих струй; 4 – отверстия вдува дискретных струй воздуха

На рисунке 9 представлено влияние вдува пульсирующих струй воздуха с  $f = 150\text{Гц}$  на температуру на оси форкамеры.

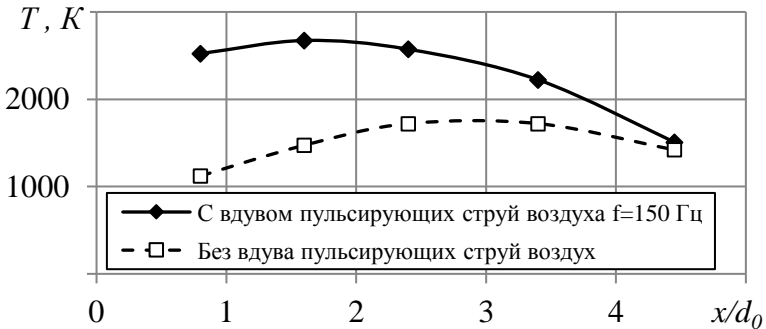


Рисунок 9 - Температура на оси форкамеры:

$$D_{KC} = 0,08 \text{ м}; \alpha = 0,37$$

Разработан метод управления геометрическими параметрами и характеристиками горения алюминиево-



воздушного факела посредством закрутки воздушного потока.

Экспериментально установлено, что полученное в результате компьютерного моделирования значение параметра закрутки  $S \approx 1,8 \div 2,0$ , является наиболее эффективным для формирования минимальных геометрических параметров и максимальных характеристик горения алюминиево-воздушного факела.

Фронтное устройство с лопаточным завихрителем и диффузорной насадкой показано на рисунке 10.

Влияние закрутки потока воздуха на параметры алюминиево-воздушного факела представлено на рисунке 11.

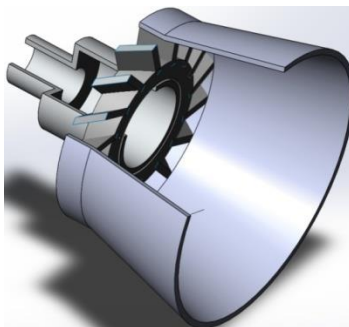


Рисунок 10 - Фронтное устройство с диффузорной насадкой

Из рисунка видно, что длина факела за фронтным устройством с закруткой спутного потока воздуха по сравнению без закрутки уменьшается в  $\approx 5$  раза, т.е. выгорание аэровзвеси происходит на более коротком расстоянии.

Установлено, что конструктивные особенности фронтного устройства влияют на характеристики горения алюминиево-воздушного факела в спутном потоке воздуха (рисунок 12).

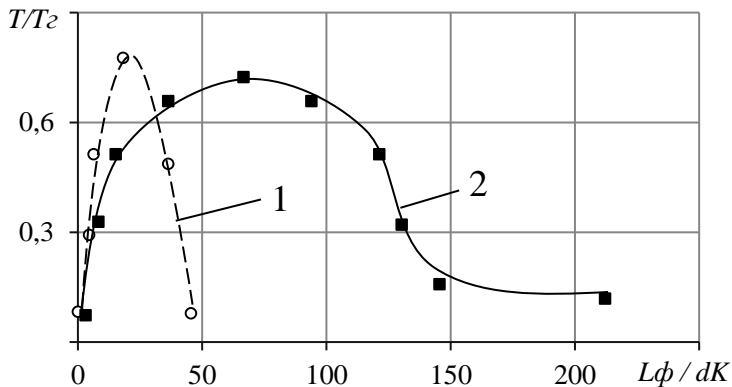


Рисунок 11 - Изменение температуры на оси факела:  
горючее - АСД-4;  $\alpha = 2,4$ ;  $M = 0,4$ ;  
1 – с закруткой  $S = 2,0$ ; 2 – без закрутки

Из рисунка видно, что длина факела в опытах с диффузорной насадкой, по сравнению с цилиндрической уменьшается, что свидетельствует об интенсификации процесса и сокращении длины выгорания факела.

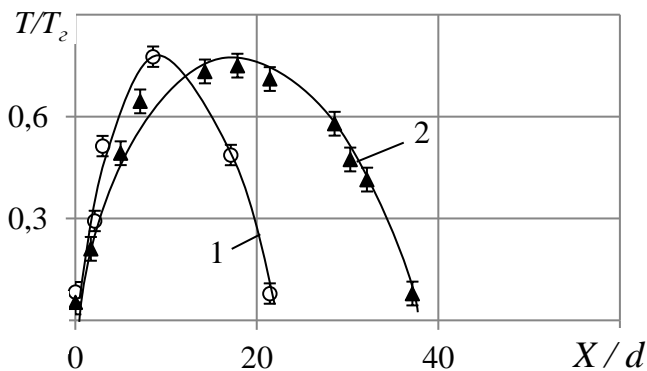


Рисунок 12 - Зависимость температуры на оси факела  
от формы насадки;  $\alpha = 2,4$ ;  $M = 0,4$ ;  $S = 2,0$   
1 - диффузорная насадка; 2 - цилиндрическая насадка

Результаты проведенных исследований показали, что геометрическими параметрами и характеристиками горения алюминиево-воздушного факела можно управлять посредством закрутки обтекающего воздушного потока с помощью кольцевого лопаточного завихрителя установленного в плоскости выходного сечения форкамеры с внезапным расширением.

Выявленные особенности и установленные закономерности по воспламенению, горению и стабилизации позволили разработать методы и средства управления процессами горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия.

Результаты исследований настоящей диссертации послужили основой для организации рабочего процесса в камере сгорания энергетической установки разработанной совместно с Федеральным казенным предприятием «Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем».

## ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного компьютерного моделирования течения в вихревой камере сгорания установлены оптимальные значения параметра закрутки  $S = 1,8 \div 2,0$ , при которой время пребывания частиц алюминия в камере сгорания максимально.

2. Экспериментально установлено, что в форкамере с внезапным расширением среднее время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции в 3 раза больше чем в основном потоке аэровзвеси.

3. Полученные результаты экспериментальных исследований структуры течения потока аэровзвеси частиц алюминия в форкамере с внезапным расширением позволили определить оптимальное место установки свечи зажигания  $L_{св} = (0,5 \dots 1,2) \cdot H$  в зоне рециркуляции.

4. Определен критический радиус начального очага зажигания  $R_{кр} \geq 1$  мм для порошка алюминия АСД – 4 и условие воспламенения  $R_{кр} \geq 0,5b_n$ , а также критический радиус начального очага зажигания  $R_{кр} \geq 5$  мм для порошка алюминия АСД – 1 и условие воспламенения  $R_{кр} \geq 2,5b_n$

5. Установлено, что границы зажигания в потоке аэрозвеси расширяются при уменьшении диаметра камеры сгорания, уменьшении среднего размера частиц алюминия и сужаются при увеличении скорости потока. С увеличением начальной турбулентности границы зажигания в потоке аэрозвеси с частицами АСД-4 сужаются и расширяются - с частицами АСД-1.

6. Определены границы устойчивого горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия в широком диапазоне изменения состава  $\alpha = 0,01 \div 3,0$ . Установлено, что кривая зависимости  $U_0 = f(\alpha)$  имеет два максимума один в области «богатых» смесей, второй - в области стехиометрических составов.

7. Предложен критерий срыва пламени по модели, основанной на балансе теплообмена рециркуляционной зоны с основным потоком аэрозвеси в виде  $S = A_1 (Re_{кр})^n$   $n = 0,4$  и  $A_1 = 1,2$  и которое в логарифмических координатах хорошо описывает экспериментальные данные прямой линией.

8. Разработан метод управления процессом горения в форкамере с внезапным расширением основанный на вдуве дискретных струй воздуха в слой смешения зоны рециркуляции и основного потока аэрозвеси, который позволяет изменять гидродинамику течения; варьируя частотой псевдотурбулентных пульсаций в диапазоне  $f = 0 \div 500$  Гц, можно управлять характеристиками горения.

9. Выявлен диапазон частот псевдотурбулентных пульсаций накладываемых на дискретные струи воздуха

$f = 250 \div 450$ Гц, при котором происходит снижение полноты сгорания и сужение границ устойчивого горения. Отрицательное влияние на характеристики горения аэрозвеси частиц алюминия обусловлено совпадением частоты вдува пульсирующих струй воздуха с дискретной частотой когерентных структур, возникающих в каналах с внезапным расширением.

10. Метод, основанный на закрутке воздушного потока, посредством кольцевого лопаточного завихрителя установленного в плоскости выходного сечения форкамеры позволяет управлять геометрическими параметрами и характеристиками горения алюминиево-воздушного факела. Длина выгорания алюминиево-воздушного факела с закруткой воздушного потока сокращается в 5 раз по сравнению с факелом без закрутки, а температура на оси увеличивается на 200К.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*В изданиях, индексируемых в базах данных  
Web of science и Scopus:*

1. Тизилев А.С. О пределах распространения пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров // Химическая физика. Москва, 2013. Т. 32, № 3. С. 35–38.

2. Тизилев А.С. Исследование влияния закрутки спутного высокоскоростного потока воздуха на геометрические параметры алюминиево-воздушного факела [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров, В.Я. Ниязов, В.А. Архипов, О.В. Матвиенко // Химическая физика. Москва. 2014. Т. 33. № 10. С. 58–61.

3. Тизилев А.С. Определение границ зажигания аэрозвеси частиц алюминия в высокоскоростном потоке воздуха [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров // Вестник

Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. КОРОЛЁВА (национального исследовательского университета). Самара. 2015. Т. 14, № 2. С. 70–77.

*В изданиях, рекомендованных ВАК:*

4. Тизилев А.С. Исследование теплового взрыва в потоке псевдожидкого топлива [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров, А.И. Сафронов, С.В. Иванов // ВЕСТНИК СГАУ им. академика С.П. Королева. Самара, 2011. №5 (29). С. 88–93.

5. Тизилев А.С. Перспективы и проблемы создания двигательных и энергетических установок на порошкообразном металлическом горючем [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров // ВЕСТНИК СГАУ им. академика С.П. Королева. Самара, 2011. № 3 (27). Ч.2. С. 277–281.

6. Тизилев А.С. О пределах стабилизации пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров // ВЕСТНИК СГАУ им. академика С.П. Королёва. Самара, 2012. – №3 (34). Ч.1. С. 270 – 274.

7. Тизилев А.С. Исследование механизма стабилизации пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров // ВЕСТНИК СГАУ им. академика С.П. Королёва. Самара. 2013. №3 (41). Ч.1. С. 98–102.

8. Тизилев А.С. Воспламенение турбулентного потока аэрозвеси частиц алюминия электрической искрой [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Самара. 2014. № 2 (42). С. 130–134.

9. Тизилев А.С. Воспламенение турбулентного потока аэрозвеси электрической искрой [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров, А.И. Сафронов // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 2. С. 61–64.

*В других изданиях:*

10. Тизилев А.С. Методы управления процессом горения дисперсного алюминия в потоке воздуха [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров // Механика и процессы управления. Труды XXXIX Уральского семинара, посвященного 85-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. Екатеринбург. 2009. С. 115–122.

11. Тизилев А.С. Получение ультрадисперсных порошков [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров // Материалы XIII Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс». Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2011. С. 396.

12. Тизилев А.С. Зажигание дисперсного алюминия в турбулентном потоке воздуха [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров // Итоги науки. Избранные труды Международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. М.: РАН, 2013. Т. 1. С. 52–72.

13. Тизилев А.С. Вихревая камера сгорания для установки газодисперсного синтеза [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров, Д.М. Гаглов // Новые материалы, технологии и приборы для космической техники [Под ред. Ассовского И.Г., Берлина А.А.] М.: Черноголовка: ИХФ РАН. 2015. С. 109–111.

14. Тизилев А.С. Численное исследование гидродинамики течения псевдожидкого топлива в вихревой камере сгорания [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров, Д.М. Гаглов, А.В. Чуваткин // Ракетно-космические двигательные установки: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции (Москва, октябрь 2015г.) / Моск. гос. ун-т им. Н.Э. Баумана. М.: ИИУ МГОУ, 2015. 132 с.

15. Тизилев А.С. Модель камеры сгорания реактора газодисперсного синтеза [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров, Д.М. Гаглов, О.Н. Ермаков // Дисперсные

системы: материалы XXVII Международной научной конференции (Одесса, 19-23 сентября 2016г.) / «Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова», 2016. С. 61-62.

16. Тизилев А.С. Влияние нестационарных воздействий на горение псевдожидкого топлива [Текст] / А.С. Тизилев, А.Г. Егоров, Д.М. Гаглоев // Journal of Dynamics and Vibroacoustics. 2015. Т. 2(2). pp.35-42.

### АВТОРСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА

17. Пат. **2462332 Российская Федерация, МПК В 22 F 9/16, В 82 В 3/00**. Способ получения нанодисперсных порошков и устройство для его осуществления [Текст] / Егоров А.Г., Малинин В.И., Сафронов А.И., Иванин С.В., Тизилев А.С. ; заявитель и патентообладатель Гос. Обр. уч. Выс. Проф. Обр. "Тольяттинский гос. Ун-т. – № 2010152403/02; заявл. 21.12.2010; опубл. 27.09.12, Бюл. № 27.: ил.

18. А. с. **112348 Российская Федерация, МПК F 23 R 3/20**. Фронтное устройство камеры сгорания реактивного двигателя на порошкообразном металлическом горючем [Текст] / Егоров А.Г., Ниязов В.Я., Иванин С.В., Тизилев А.С. – № 2011132005/06; заявл. 29.07.11; опубл. 10.01.12, Бюл. № 1.: ил.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.01 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (протокол № 2 от 13.04.2017 г.)

Заказ № \_\_\_\_ Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе. ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». Отдел типографии и оперативной полиграфии. 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус.