

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе  
Национального исследовательского  
Томского государственного университета,  
доктор физико-математических наук



И.В. Ивонин

«да» мая 2017 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на диссертацию Андрея Сергеевича Тизилова «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

Диссертация А.С. Тизилова посвящена комплексному экспериментально-теоретическому исследованию процессов зажигания, стабилизации фронта пламени и горения аэрозвеси частиц алюминия в потоке. Диссертация состоит из введения, в котором обосновывается актуальность, формулируются цели и задачи исследования, шести глав, заключения. Библиографический список включает 117 источников. В приложении приведены акты о внедрении результатов диссертационной работы.

**В первой главе** проведен обзор классических подходов к моделированию воспламенения и горения порошкообразного алюминия, а также результатов современных исследований в этой области (В.И. Малинин, Д.А. Ягодников, А.В. Сухов, А.Г. Егоров, А.А. Громов и др.). На основе анализа известных работ отмечена необходимость учета механизма и кинетики образования частиц конденсированного оксида алюминия при моделировании процесса горения порошкообразного алюминия. Проведено обоснование выбранного направления, цели и задач исследования.

**Во второй главе** приводится описание испытательного стенда, экспериментальных установок и измерительной аппаратуры, а также излагается методика проведения испытаний и проводится оценка погрешностей измерений. Для исследования внутрикамерных процессов наряду с температурными измерениями используется метод визуализации, поскольку он дает возможность более детально исследовать отдельные стадии процесса горения порошкообразных металлов. Визуализация внутрикамерных процессов проводилась на прозрачных моделях высокоскоростной съемкой кинокамерой СКС 1М с темпом до 5000 кадров в секунду.

**В третьей главе** представлены результаты компьютерного моделирования течения потока аэрозвеси частиц алюминия в вихревой камере сгорания, а также результаты экспериментальных исследований структуры течения в форкамере с внезапным расширением. В результате расчетов установлены оптимальные значения параметра закрутки, при которых время пребывания частиц алюминия в камере сгорания максимально. Установлено, что среднее время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции камеры с внезапным расширением в три раза больше чем в основном потоке. Результаты экспериментального исследования структуры потока аэрозвеси частиц алюминия в форкамере с внезапным расширением позволили определить оптимальное место установки свечи зажигания в зоне рециркуляции.

**Четвертая глава** посвящена исследованию процесса искрового зажигания и определению границ зажигания в потоке аэрозвеси частиц алюминия. Определен критический радиус начального очага зажигания для порошков алюминия марок АСД-4, АСД-1 и условия их воспламенения. Полученные значения размеров очагов зажигания позволяют в первом приближении определить начальную скорость распространения пламени и минимальную энергию искрового разряда. Установлено, что границы зажигания в потоке аэрозвеси частиц алюминия расширяются при уменьшении диаметра камеры сгорания, уменьшении среднего размера частиц алюминия и сужаются при увеличении скорости потока.

**В пятой главе** изложены результаты исследования механизма стабилизации пламени, определены границы устойчивого горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха. 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. Значения времени контакта частиц алюминия с зоной рециркуляции, вычисленные по данной формуле, согласуются со значениями, полученные экспериментально другими авторами. Установленные границы устойчивого горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия позволили выявить характер зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха, который соответствует характеру зависимости тепловыделения и температуры продуктов сгорания, полученных термодинамическими расчетами.

**В шестой главе** представлены методы и средства управления разработанные на основе выявленных особенностей и установленных закономерностей по воспламенению, горению и стабилизации пламени в потоке аэрозвеси частиц алюминия. 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. Выявлен диапазон частот псевдотурбулентных пульсаций, накладываемых на дискретные струи воздуха, при котором происходит снижение полноты сгорания и сужение границ устойчивого горения. Показано, что закрутка 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 пять раз по сравнению с факелом без закрутки, а температура на оси увеличивается на 200 К.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Отметим **актуальность** темы исследования.

Интерес к изучению горения порошков металлов не ослабевает с тех пор, как в начале XX века русские ученые Ф.А. Цандер и Ю.В. Кондратюк предложили использовать металлы в качестве энергетических компонентов ракетных топлив. В настоящее время практически все высокоэнергетические композиции смесевых твердых ракетных топлив содержат порошок алюминия в качестве горючего компонента.

Одной из перспективных схем организации рабочего процесса в двигательной установке является сжигание аэрозвеси порошков металлического горючего в камере сгорания. Такая схема позволяет наряду с высокими энергетическими характеристиками обеспечить глубокое регулирование расходно-тяговых характеристик ракетного двигателя. В отличие от классических схем жидкостных и твердотопливных ракетных двигателей рабочие процессы в этой схеме двигательной установки изучены в гораздо меньшей степени.

Эффективное использование алюминия в качестве источника энергии в двигательных и исходного материала в установках газодисперсного синтеза связано с необходимостью разработки методов и средств управления процессами горения дисперсных частиц алюминия, распыленных в турбулентном потоке воздуха.

С учетом вышесказанного тема диссертации А.С. Тизилова является, несомненно, **актуальной**.

К **новым научным результатам** диссертационной работы, полученным лично автором, следует отнести:

- впервые на основе тепловой теории зажигания определен критический радиус начального очага и условия зажигания в потоке аэрозвесей частиц алюминия микронных размеров;

- установлены закономерности влияния интенсивности турбулентности на развитие очага зажигания, а также конкретизирована динамика развития процесса воспламенения аэрозвесей частиц алюминия;

- впервые определена область устойчивого воспламенения аэрозвесей частиц алюминия и выявлено влияние начальных параметров потока на границы зажигания;

- определены границы устойчивого горения в высокоскоростном потоке аэрозвесей частиц алюминия.

- разработан метод управления процессом горения в форкамере с внезапным расширением, основанный на вдуве дискретных струй воздуха в слой смещения зоны рециркуляции и основного потока аэрозвеси.

Новизна полученных результатов подтверждена разработкой способов и устройств, защищенных патентами Российской Федерации на изобретения.

#### **Теоретическая значимость полученных результатов.**

Экспериментально установлены новые закономерности скорости распространения пламени в потоке аэрозвеси частиц алюминия,

являющиеся основой для развития теории зажигания и горения газодисперсных сред.

### **Практическая значимость результатов работы.**

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что результаты исследований и разработанные на их основе методы и средства управления процессами горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия могут быть использованы при разработке и проектировании ракетных двигательных установок на порошкообразном топливе. Результаты исследований по теме диссертационной работы А.С. Тизилова внедрены на отраслевом предприятии при разработке специальной энергетической установки.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается использованием современных методов измерений, применением теории погрешностей при интерпретации экспериментальных данных, а также сопоставлением полученных А.С. Тизиловым данных с известными результатами других авторов в пересекающихся диапазонах параметров.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации и защищаемые положения обсуждены на международных и всероссийских научных конференциях, достаточно полно опубликованы в 24 печатных работах, из них 6 статей – в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования материалов докторских и кандидатских диссертаций.

**Замечания** по содержанию и оформлению диссертации и автореферата.

1. Методика расчета поля течения двухфазного потока в камере сгорания (глава 3) изложена неполно – не приведены принятые допущения, система уравнений и граничные условия.

2. Расчеты структуры течения в вихревой камере проведены без учета горения частиц алюминия. В ряде работ, в частности, в статье В.А. Архипова, О.В. Матвиенко, В.Ф. Трофимова (Горение распыленного жидкого топлива в закрученном потоке, ФГВ, 2005. Т. 41, № 2. С. 26–37.) выявлено существенное влияние эффекта горения частиц конденсированной фазы на динамику течения.

3. В тексте диссертации не приведена формула расчета используемого критерия интенсивности закрутки  $S$  (стр. 61). По-видимому, это интегральный критерий Хигира-Бэра (А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987. 588 с.).

4. На рис. 3.7 представлена картина течения потока взвеси частиц алюминия марки АСД-1 в модели форкамеры с внезапным расширением, полученная скоростной киносъемкой, а расчеты проведены для порошка АСД-4, дисперсность которого существенно отличается от дисперсности порошка АСД-1.

5. В тексте диссертации не приведена методика определения времени пребывания частиц алюминия как в зоне рециркуляции, так и в основном потоке.

6. Следовало бы диссертацию снабдить списком основных обозначений; в тексте диссертации встречаются некорректные формулировки, например, «текучая среда – воздух» (стр. 60) и др.

Сделанные замечания и отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы А.С. Тизилова.

Диссертация А.С. Тизилова содержит решение научной задачи, имеющей значение для развития теоретических основ процессов горения взвесей порошков металлов в турбулентных, в том числе закрученных потоках. Результаты исследования, полученные А.С. Тизиловым, **могут быть использованы** в научно-исследовательских, проектных, научно-производственных организациях и отраслевых предприятиях: Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Институт проблем химической физики РАН, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, Институт химической кинетики и горения СО РАН, Отдел структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН, АО «ФНПЦ «Алтай», ОАО «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева», ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «Союз».

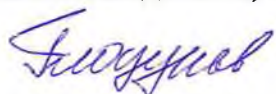
Автореферат полностью **соответствует** содержанию диссертации.

На основании вышесказанного можно сделать обоснованный вывод, что диссертация «Методы и средства управления процессами горения в потоке взвеси частиц алюминия» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, **соответствует** специальности 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества, **отвечает** критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, А.С. Тизиллов, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Отзыв составили заведующий отделом газовой динамики и физики взрыва НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, доктор физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор Владимир Афанасьевич Архипов и ведущий научный сотрудник отдела газовой динамики и физики взрыва НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, доктор физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), старший научный сотрудник Ирина Константиновна Жарова.

Диссертационная работа А.С. Тизилова представлена и обсуждена на заседании научно-технического семинара отдела газовой динамики и физики взрыва НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, протокол № 55 (3) от 12 мая 2017 г.

Директор Научно-исследовательского института  
прикладной математики и механики Томского  
государственного университета,  
доктор физико-математических наук  
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),  
профессор



Глазунов Анатолий Алексеевич

18.05.2017

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский государственный университет»,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, (3822) 529-852,  
[www.tsu.ru](http://www.tsu.ru), [rector@tsu.ru](mailto:rector@tsu.ru)