

УТВЕРЖДАЮ:

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



И.В.
И.В. Ивонин

«*дв*» мая 2017 г.

О Т З Ы В

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 аэрозвеси 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 аэрозвесей 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 аэрозвеси 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, rector@tsu.ru