

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе НГТУ

доктор технических наук, доцент

Сергей Викторович Брованов



2022 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Новосибирский государственный технический университет»

Диссертация «Горение частиц металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив» выполнена на кафедре Газодинамических импульсных устройств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и в лаборатории горения конденсированных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель Белоусова Наталья Сергеевна обучалась в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по направлению 01.06.01 – «Математика и механика» (профиль: «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»), на кафедре Газодинамических импульсных устройств, нормативный период обучения с 01.09.2018 г. по 31.08.2022 г. Выдан диплом об окончании аспирантуры, присуждена квалификация «Исследователь. Преподаватель - исследователь».

Белоусова Наталья Сергеевна с 2018 года работает в должности ассистента, а с 2022 года старшим преподавателем на кафедре Газодинамических импульсных устройств в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». Также Белоусова Н.С. работает с 2016 года и по настоящее время, по совместительству в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте химической кинетики и горения Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН) в лаборатории Горения конденсированных систем в должности младшего научного сотрудника.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов №630 (английский язык, история и философия науки) выдана в 2022 году Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Справка о сдаче кандидатского экзамена № 2022/10 по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» выдана в 2022 году в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Научный руководитель:

Гуськов Анатолий Васильевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования, «Новосибирский государственный технический университет», кафедра Газодинамических импульсных устройств, должность - заведующий кафедрой.

Научный консультант:

Глотов Олег Григорьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН), лаборатория Горения конденсированных систем, должность – заведующий лабораторией.

По итогам обсуждения принято следующее заключение (выписка из протокола расширенного заседания кафедры Газодинамических импульсных устройств):

#### **1. Актуальность темы диссертационного исследования**

Развитие ракетной техники во многом обеспечивается совершенствованием топливных рецептур. Предназначение ракетного топлива состоит в выделении требуемого количества энергии и рабочего тела с заданной скоростью в процессе горения при определенных условиях. К настоящему времени известно множество эффективных горючих и окислителей, однако особое место занимают смесевые твердые топлива, содержащие в качестве горючего металлические частицы.

Смесевые твердые топлива в своем составе содержат окислитель (обычно перхлорат аммония ПХА), горючие-связующие вещества (ГСВ) на основе бутадиеновых и тетраэольных каучуков и металлические горючие (МГ) – микроразмерные частицы алюминия, магния, бора и др. Массовое содержание МГ составляет 15–70 %. Алюминий имеет высокую реакционную способность и удельную теплоту сгорания  $Q \sim 31$  МДж/кг. Однако наличие оксидного слоя на его частицах может приводить к неполному сгоранию в условиях ограниченного времени. Возможным решением проблемы могут выступать различные покрытия поверхности частиц алюминия, позволяющие снизить влияние оксидного слоя  $Al_2O_3$  (органические покрытия, металлы и их оксиды). Использование добавки других металлов с более высокой химической активностью и/или лучшими характеристиками воспламенения и горения, таких как титан, цирконий, бор, позволит увеличить скорость горения, т. к. эти металлы способствуют воспламенению и горению частиц алюминия, при этом сами являются горючими компонентами топлива. Число высококалорийных металлов и элементов невелико, и среди них своим рекордным значением теплоты сгорания выделяется бор ( $Q \sim 58$  МДж/кг). Однако, применение бора в обычных смесевых топливах ограничено тем, что для его окисления требуется в 2.5 раза больше кислорода по сравнению с алюминием. Также горение частиц бора затруднено из-за присутствия слоя расплавленного оксида на поверхности частицы. Титан применяется в составе пиротехнических композиций, его удельная теплота сгорания составляет  $Q \sim 20$  МДж/кг. Исследуются возможности использования титана в ракетном топливе и во взрывчатых смесях в качестве энергетического компонента, а также модификатора горения смесевых топлив.

Несмотря на более чем полувековую историю изучения горения металлов, необходимость улучшения характеристик горения металлизированных топлив, определяемых поведением металла в волне горения топлива (улучшение воспламеняемости, снижение агломерации, увеличение полноты сгорания и т. п.), требует

продолжения исследований с использованием принципиально новых методов и материалов.

Исследования по данной тематике проводятся в России и за рубежом. В частности, проводятся исследования механизма горения металлических частиц, воспламенения частиц, дисперсных систем биметаллов, металлизированных композиций, а также исследования проблемы регулирования энергетических характеристик топлив.

**Цель работы:** исследование физических механизмов процессов горения металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив, поиск возможных путей повышения полноты сгорания и практического энерговыделения металлических горючих, а также условий организации процесса горения для получения конденсированных продуктов с требуемыми свойствами.

**Основные задачи:**

- экспериментальное определение времен горения и фрагментации одиночных частиц Ti и Al; исследование влияния морфологии и размеров частиц Ti на время горения и процесс фрагментации;
- изучение характеристик морфологического и гранулометрического состава конденсированных продуктов горения (КПГ) частиц Ti в воздухе, в том числе в наноразмерном диапазоне;
- исследование закономерностей движения горящих частиц Ti в воздухе и определение эффективного коэффициента аэродинамического сопротивления;
- исследование механизмов горения частиц Ti, B, AlB<sub>12</sub> в составе смесевых модельных топлив;
- определение морфологического, гранулометрического и химического состава частиц дисперсной фазы смесевоего топлива, а также полноты сгорания металлического горючего.

**2. Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации**

Белоусовой Н.С. в период обучения в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», поставлены цели и задачи диссертационного исследования, проведен обзор и анализ основных компонентов смесевоего твердого топлива. Рассмотрены характеристики и свойства окислителей, горючего-связующего и металлического горючего твердых ракетных топлив (алюминия, бора и боридов, титана, а также комбинированных горючих на их основе), особенности горения и воспламенения металлических частиц и металлизированных композиций. Проведен краткий обзор методов исследования горения металлов.

Выбор методик исследования горения металлических частиц, экспериментальная часть, обработка результатов, а также их описание и обсуждение выполнено в лаборатории горения конденсированных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН).

**3. Степень достоверности результатов проведенных исследований,** представленных в диссертационной работе результатов и заключений обеспечивается статистической обработкой значительного объема экспериментальных данных, подтверждается сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов,

полученными для близких объектов, использованием проверенных методов обработки экспериментов, публикациями в рецензируемых научных журналах.

#### **4. Новизна и практическая значимость результатов проведенных исследований**

1. С использованием подхода «модельных монодисперсных агломератов» исследовано горение крупных алюминиевых агломератов с диаметром 400–780 мкм в свободном падении в воздухе. Определены времена горения агломератов  $t_b$ ; размер, масса и плотность финальных частиц-остатков; величина безразмерного параметра  $\varphi$ . Экспериментально подтверждено предположение об идентичности процесса горения монолитных частиц и агломератов с размером до 780 мкм.

2. Впервые исследовано горение монолитных частиц Ti диаметром 120 – 540 мкм в свободном падении в воздухе при атмосферном давлении. Определены времена горения, а также характерные времена начала и окончания фрагментации в зависимости от диаметра частиц. Описаны два режима фрагментации, установлено, что реализация того или иного режима фрагментации горячей частицы зависит от её диаметра. Определен граничный размер частицы, разделяющий режимы (280 – 300 мкм).

3. Представлены детальные данные о гранулометрическом, морфологическом и фазовом составе КППГ и о штучном количестве частиц, производимых одной горячей материнской частицей Ti диаметром 120 – 540 мкм.

4. Построены обобщенные эмпирические зависимости координаты  $x(t)$  и скорости  $v(t)$  частицы от времени  $t$  для частиц титана размером 200 – 540 мкм в свободном падении в воздухе.

5. Определен эффективный коэффициент аэродинамического сопротивления горящих частиц в форме  $C_d = A/Re$ . Установлено, что для частиц исследованного диапазона размеров при  $1 < Re < 10$  величина параметра  $A$  слабо зависит от диаметра частицы и в среднем составляет  $61 \pm 2$ .

6. Экспериментально доказана возможность модификации характеристик горения топлив на основе бора и додекаборида алюминия (около 37 %), ПХА и связующего МПВТ с помощью малых (1 %) добавок  $(NH_4)_2TiF_6$ ,  $(C_2F_4)_n$  и  $MgF_2$ .

#### **5. Научная специальность, которой соответствует диссертация**

Диссертация «Горение частиц металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив» выполненная Белоусовой Натальей Сергеевной соответствует специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. Направление исследований – п. 7. «Экспериментальные и теоретические исследования процессов совместного переноса тепла и массы в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси».

#### **6. Ценность научных работ соискателя**

Установленные закономерности и характеристики горения металлических горючих дают основу для расширения фундаментальных знаний о горении твердых топлив, содержащих металлические частицы. Результаты экспериментального исследования процессов горения металлических горючих могут быть использованы для развития теории горения гетерогенных конденсированных систем и для решения ряда практических задач, связанных с повышением эффективности процессов в энергоустановках и устройствах специального назначения (ракетные двигатели на твердом топливе, газогенераторы, пиротехнические устройства).

## **7. Полнота изложения материалов по теме диссертации в работах опубликованных соискателем**

По теме диссертации опубликовано 34 работы, из них 7 статей в международных и отечественных журналах, в том числе 5 в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ для публикаций основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Также опубликовано 27 тезисов и статей в сборниках материалов международных и всероссийских конференций.

### **Основные публикации по теме диссертации**

*Статьи, опубликованные в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук:*

1. Н. С. Белоусова, О. Г. Глотов, А. В. Гуськов Исследование горения частиц титана с целью генерации наночастиц  $TiO_2$  = The study of titanium particles combustion with the aim of  $TiO_2$  nanoparticles generation // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018, № 11, С. 90–99.

2. О. Г. Глотов, Н. С. Белоусова, Г. С. Суродин. Горение крупных монокристаллических частиц титана в воздухе. I. Экспериментальные методики, время горения и режимы фрагментации = Combustion of large monolithic titanium particles in air. I. Experimental techniques, burning time and fragmentation modes / - DOI:10.15372/FGV20210603 // Физика горения и взрыва = Combustion, Explosion, and Shock Waves – 2021, Т. 57, № 6, С. 20 – 31.

3. Н.С. Белоусова, О. Г. Глотов Закономерности движения и коэффициент аэродинамического сопротивления крупных горящих частиц титана в воздухе = Laws of motion and aerodynamic drag coefficient for large titanium particles burning in air/DOI: 10.1134/S0869864322040084 // Теплофизика и аэромеханика = Thermophysics and Aeromechanics – 2022, № 4, С. 587 – 595.

4. О. Г. Глотов, Н. С. Белоусова, Г. С. Суродин. Горение крупных монокристаллических частиц титана в воздухе. II. Характеристики конденсированных продуктов горения// Физика горения и взрыва – 2022, Т. 58, № 6, С 51 – 65.

5. О. Г. Глотов, В. В. Замашников, Г. С. Суродин, Н. С. Белоусова. Влияние фторсодержащих добавок на характеристики горения смесевых топлив с бором и додекаборидом алюминия // Инженерно-физический журнал = Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 2022, Том 95, №7, С 1764 – 1771.

*Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science:*

6. N. S. Belousova, O. G. Glotov, A. V. Guskov. Study of the free falling particles trajectory at the burning monolithic titanium particles // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. - Vol. 1214. – Art. 012010 (7 p.). - DOI: 10.1088/1742-6596/1214/1/012010.

7. N. S. Belousova, O. G. Glotov, A. V. Guskov. Features of titanium and aluminum particles combustion. Journal of Physics: Conference Series. "X All-Russian Scientific Conference "Current Issues of Continuum mechanics and Celestial Mechanics", CICMCM 2020" – 2020 – С. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1709/1/012010.

Личный вклад в совокупности в опубликованных в соавторстве работах составляет не менее 60 %.

*Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:*

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: Energetic Materials – 49, 50 International Annual Conference of the Fraunhofer ICT (Karlsruhe, Germany – 2018, 2019); 8<sup>th</sup> European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS) (Madrid, Spain – 2019); International Workshop High– Energetic Materials: Demilitarization, Antiterrorism and Civil Applications (HEMs): (Tomsk – 2018, Monaco – 2019); 9<sup>th</sup> International Symposium on Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena (NEPCAP) (Sochi, Russia – 2020); Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии. Всероссийская конференция молодых ученых (Новосибирск - Шереметьево – 2018, 2019, 2020, 2021, 2022); Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона» (Новосибирск – 2018, 2019, 2020, 2021, 2022); Молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск – 2018, 2019, 2020, 2021); V Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных «Материалы и технологии XXI века» (Бийск – 2019); Всероссийская научная конференция молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (Новосибирск – 2019, 2020, 2021); Всероссийская конференция молодых ученых-механиков (YSM) (Сочи – 2020, 2021); IX Международная конференция, посвященная 120-летию со дня рождения академика М. А. Лаврентьева "Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике" (Новосибирск – 2020); Международная конференция по методам аэрофизических исследований (ICMAR) (Новосибирск – 2020, 2021, 2022); XVII Всероссийский семинар с международным участием «Динамика многофазных сред» (ДМС) (Новосибирск – 2021); Всероссийская научно-техническая конференция «Боеприпасы. Конструкция, технология, испытания», посвящённой памяти академика РАН В. В. Калашникова (Самара – 2021, 2022); XI Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск – 2021); 7<sup>th</sup> International Symposium on Energetic Materials and their Applications (ISEM 2021) (Tokyo, Japan – 2021); XI Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск – 2022); X International Voevodsky Conference "Physics and Chemistry of Elementary Chemical Processes" (VVV-2022) (Новосибирск – 2022).

## **8. Общее заключение**

Диссертационная работа «Горение частиц металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив» соответствует требованиям п. 9 - 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 26.09.2022), предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям и является законченной научно-квалификационной работой.

Диссертация Белоусовой Натальи Сергеевны «Горение частиц металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив», рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

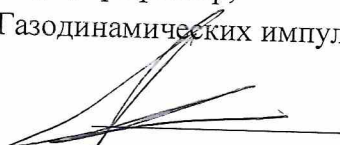
Заключение принято на расширенном заседании кафедры Газодинамических импульсных устройств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Присутствовало на заседании 19 человек, в том числе 10 докторов наук, 7 кандидатов наук. Из них сторонние представители: д.ф –м. н. Зарко В.Е., д.ф –м. н Штерцер А.А., д.ф –м. н Ждан С.А., д.т.н. Матвеев К.А., к.ф –м. н Прууэл Э.Р.

Результаты голосования: «за» - 19 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел., протокол расширенного заседания кафедры Газодинамических импульсных устройств №5 от 9 декабря 2022 г.

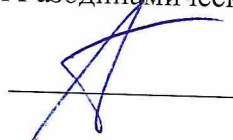
Председатель расширенного заседания кафедры Газодинамических импульсных устройств:

Доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры Газодинамических импульсных устройств

 Игорь Андреевич Балаганский

Секретарь расширенного заседания кафедры Газодинамических импульсных устройств:

Ученый секретарь кафедры Газодинамических импульсных устройств

 Виноградов Алексей Валерьевич