



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН

академик РАН Маркович Д.М.

«6» декабря 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация Белоусовой Натальи Сергеевны на тему «Горение частиц металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив» на соискание учёной степени кандидата технических наук выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель работал в лаборатории горения конденсированных систем Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН) в должности младшего научного сотрудника и обучался в очной аспирантуре в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

В 2016 году Белоусова Наталья Сергеевна окончила бакалавриат в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по направлению 20.04.01 «Техносферная безопасность».

В 2018 году Белоусова Наталья Сергеевна окончила магистратуру в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по направлению 20.04.01 «Техносферная безопасность».

В 2022 г. Белоусова Наталья Сергеевна окончила очную аспирантуру в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении 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. Справка о сдаче кандидатских экзаменов (английский язык, история и

философия науки) № 630 выдана в 2022 году Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов по направлению 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» № _____ выдана в 2022 году в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Научные руководители:

Гуськов Анатолий Васильевич, доктор технических наук, доцент;

Глотов Олег Григорьевич, кандидат физико-математических наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность:

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.

Диссертация Н. С. Белоусовой посвящена исследованию физических механизмов процессов горения металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив, а также поиску возможных путей повышения полноты сгорания и практического энерговыделения металлических горючих. С использованием комплексного подхода к исследованию процессов горения одиночных частиц металлов и металлизированных смесевых композиций, включающего совокупность экспериментальных методов, определены скорости горения, изучены морфологический, гранулометрический и фазовый состав КПП, проведен химический анализ КПП и определена полнота сгорания металлического горючего. Результаты исследования изложены в научных статьях в международных и отечественных журналах, в том числе в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Полученные экспериментальные результаты и сформулированные выводы обладают единством изложения результатов выполненных исследований. В связи со всем вышеизложенным, актуальность темы диссертации не подлежит сомнению.

Целью работы настоящей работы является 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 (КПП) 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, В, AlB₁₂ в составе смесевых модельных топлив;
- определение морфологического, гранулометрического и химического состава частиц дисперсной фазы смесевых топлив, а также полноты сгорания металлического горючего.

Научная новизна:

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 φ .

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 КПП 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 ± 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 .

Методы исследований: целенаправленное варьирование природы металлических частиц и рецептуры топлив, изготавливаемых из предварительно охарактеризованных компонентов; видеосъемка процесса горения; использование оптимальных методов отбора и анализа КПП (5 вариантов отбора, оптическая и электронная микроскопия, анализ изображений, аналитическая химия).

Теоретическая и практическая значимость.

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).

Достоверность 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.

Личный вклад автора Автор принимал активное участие в планировании, проведении и обработке экспериментов, обсуждении результатов и подготовке

публикаций по теме диссертационной работы. Все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором, если иное не оговорено явным образом.

Апробация работы: 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); 8th 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); 9th 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 - Шерегеш– 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 РАРАН В. В. Калашникова (Самара – 2021, 2022); XI Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск – 2021); 7th 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).

Публикации по теме диссертации.

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 публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Также опубликовано 27 тезисов и статей в сборниках материалов международных и всероссийских конференций.

Связь работы с научными программами и грантами. Результаты диссертационного исследования получены при выполнении плановых научно-исследовательских работ ИХКГ СО РАН по государственному заданию, по гранту

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2020-781, а также по проектам РФФИ № 19-03-00294 и № 20-33-90208 «Аспиранты».

Список основных публикаций по материалам диссертации, опубликованных в рецензируемых научных журналах:

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. Белоусова Н.С., Глотов О. Г. 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
6. Н. С. Белоусова, О. Г. Глотов, И. В. Сорокин. Горение смесевых топлив с титаном // Прикладная механика и техническая физика – 2023, Том 64, №1 (принята в печать).
7. 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.
8. 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.

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация Белоусовой Натальи Сергеевны на тему «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 семинаре, проведенном в рамках заседания Секции 5 "Теплофизические основы энергетики (включая горение)" Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), председатель Секции академик РАН С. В. Алексеенко.

Присутствовало на заседании 13 человек из 22 членов списочного состава Секции 5, в том числе, 1 академик РАН, 1 член-корреспондент РАН, 5 докторов наук, 6 кандидатов наук. Протокол заседания V Секции 09-2022 от 26.12.2022.

Председатель семинара
зам. председателя Секции 5,
д.ф.-м.н., заведующий лабораторией
Шторк Сергей Иванович

Секретарь семинара
к.т.н., заведующий лабораторией
Лукашов Владимир Владимирович

26.12.2022