

УТВЕРЖДАЮ:  
Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт химической кинетики и горения  
им. В.В. Воеводского  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
доктор химических наук  
Андрей Александрович Онищук



« 14 ноября » 2022 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН)  
о диссертации Белоусовой Натальи Сергеевны на тему *«Горение частиц металлического  
горючего в воздухе и в составе смесевых топлив»*.

Диссертация выполнена в лаборатории горения конденсированных систем в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Новосибирский государственный технический университет.

В период подготовки диссертации соискатель работала в должности младшего научного сотрудника лаборатории и обучалась в очной аспирантуре в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ).

В 2022 г. Белоусова Н. С. окончила очную аспирантуру НГТУ по направлению 01.06.01 – «Математика и механика» (профиль: «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»), на кафедре газодинамических импульсных устройств.

Научный руководитель: Гуськов Анатолий Васильевич, доктор технических наук, доцент, НГТУ.

Научный консультант: Глотов Олег Григорьевич, кандидат физико-математических наук, ИХКГ СО РАН.

Материалы диссертации заслушаны и обсуждены на физико-химическом семинаре ИХКГ СО РАН. По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**Актуальность работы:**

Исследование направлено на решение актуальной проблемы, связанной с изучением физических механизмов процессов горения металлического горючего, а также поиска путей повышения полноты его сгорания и практического энерговооружения.

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 частицы металлического горючего (МГ). Массовое содержание МГ в топливах составляет 15–70 %, в роли МГ выступают алюминий, бор, титан и иные высококалорийные элементы. При этом каждый металл характеризуется своеобразным поведением в процессе горения, вследствие различия в свойствах металлов и их оксидов. Вместе с тем, имеется постоянная потребность улучшить воспламеняемость металла, понизить агломерацию, увеличить полноту сгорания, модифицировать иные потребительские свойства МГ. Необходимость улучшения характеристик горения металлизированных топлив требует продолжения исследований горения металлов как в форме отдельных частиц, так и в волне горения топлив с использованием принципиально новых методов и материалов. Работы по данной тематике проводятся как в России, так и за рубежом.

### Научная новизна работы:

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 параметра  $\varphi$ , характеризующего накопление оксида на частице в процессе ее горения. 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 горящей частицы. Выделены и охарактеризованы два режима фрагментации; установлено, что реализация того или иного режима зависит от диаметра частицы. Определен граничный размер частицы ~280 мкм, разделяющий режимы фрагментации.
3. Представлены детальные данные о гранулометрическом, морфологическом и фазовом составе конденсированных продуктов горения и о штучном количестве частиц, производимых одной горящей материнской частицей Ti диаметром 120 – 540 мкм. Наноразмерные оксидные частицы в виде сферул с размерами 40–200 нм образуют макроскопические аэрогелевые объекты миллиметровых размеров.
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. Определен эффективный коэффициент аэродинамического сопротивления горящих частиц в форме  $C_d = A/Re$ . Для частиц исследованного диапазона размеров при  $1 < Re < 10$  величина параметра  $A = 61 \pm 2$  и слабо зависит от диаметра частицы.
5. Экспериментально доказано влияние малых (~1 %) добавок  $(NH_4)_2TiF_6$ ,  $(C_2F_4)_n$  и  $MgF_2$  на основные характеристики горения топлив на основе бора и додекаборида алюминия (около 37 %), ПХА и связующего МПВТ. Имеется возможность регулирования скорости горения и повышения эффективности горения металлического горючего.

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований.**

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 соискателя.**

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.

### **Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов.**

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

### **Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.**

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.

*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, и в изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science (статьи 2–5):*

1. Н. С. Белоусова, О. Г. Глотов, А. В. Гуськов Исследование горения частиц титана с целью генерации наночастиц  $\text{TiO}_2$  = The study of titanium particles combustion with the aim of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles generation // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018, № 11, С. 90–99.
2. О. Г. Глотов, Н. С. Белоусова, Г. С. Сурудин. Горение крупных монолитных 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. Сурудин. Горение крупных монолитных частиц титана в воздухе. II. Характеристики конденсированных продуктов горения// Физика горения и взрыва = Combustion, Explosion, and Shock Waves –

2022, Т. 58, № 6, С 51 – 65.

5. О. Г. Глотов, В. В. Замащиков, 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. 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.

**Соответствие содержания диссертации избранной специальности.**

Диссертационная работа Белоусовой Н. С. является существенным вкладом в исследование физических механизмов процессов горения металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив и способствует поиску возможных путей повышения полноты сгорания и практического энерговыделения металлических горючих. Материалы диссертации соответствуют специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

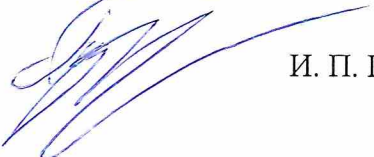
Диссертация «Горение частиц металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив» Белоусовой Натальи Сергеевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Заключение принято на заседании физико-химического семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук.

Присутствовало на заседании – 25 чел. Результаты голосования: «за» – 25 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 1915 от 3 ноября 2022 г.

Председатель физико-химического семинара  
д.ф.-м.н., главный научный сотрудник  
лаборатории горения конденсированных систем  
ИХКГ СО РАН

Секретарь физико-химического семинара  
ИХКГ СО РАН, к.х.н.

 В. Е. Зарко  
 И. П. Поздняков