

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

Актуальность темы диссертации

Твердые ракетные топлива являются основными для почти всех современных ракет-носителей, использующихся для вывода на орбиту космических аппаратов различного назначения (спутников связи, теле – радиовещания, метеорологических, геодезических и др.). До начала двадцать первого века предполагалось, что в результате сгорания таких топлив при работе как основных, так и вспомогательных двигателей на твердом топливе ущерб окружающей среде наносится много меньших масштабов по сравнению с жидкостными ракетными двигателями. После отработки последних остается часто горючее, которое (в зависимости от условий движения ракеты-носителя составляет несколько процентов от массы топлива на старте) может достигать поверхности земли и оказывать значимое негативное воздействие на окружающую среду. Но в последние годы появилось достаточно много достоверных сведений, о том, что запуски твердотопливных ракет-носителей наносят большой вред окружающей среде. В результате сгорания зарядов металлизированных смесевых топлив в атмосферу Земли после каждого запуска выбрасываются сотни килограмм порошка оксидов алюминия микронных размеров частиц. Такие частицы дрейфуют в нижних слоях атмосферы, не выпадая, в отличие от капель гептила, которые после разделения разгонной ступени и основного блока в значительной части выпадают на землю или испаряются в приземных слоях атмосферы, на поверхность земли.

Сотни и даже тысячи килограмм мелкодисперсного порошка оксидов алюминия не могут существенно изменить свойства атмосферы. Но пусков твердотопливных ракет-носителей становится все больше и больше. В результате в атмосфере Земли накапливаются такие частицы – твердые продукты сгорания (точнее неполного сгорания) смесевых ракетных топлив. Частицы оксидов алюминия в атмосфере при их некоторой пороговой концентрации аккумулируют в дневное время энергию солнца, а в ночное время остывают с передачей теплоты в воздух, окружающий их. В связи с тем, что эти, образно говоря, «облака» малых по размерам частиц алюминия (в основном, хотя во многих топливах есть и другие металлы) формируются в атмосфере Земли не равномерно, а только в районах вывода космических аппаратов на их орбиты, в атмосфере возникают локальные «стоки» теплоты в дневное время и «источники» теплоты в ночное время. Вследствие локальных стоков и притоков энергии в атмосфере возникают термогравитационные течения, трансформирующиеся в вихревые структуры. Последние в определенных условиях могут приводить к непрогнозируемым современной метеорологией изменениям погоды, в том числе к крупномасштабным.

По мнению ряда специалистов проблемы с достоверностью прогноза погоды во всех регионах планеты обусловлены влиянием «облаков» оксидов алюминия на

теплоассоуперенос в атмосфере Земли. Проблема непрогнозируемых негативных (часто с катастрофическими последствиями) изменений погоды с каждым годом становится все более и более актуальной. По этой причине актуальной становится задача обеспечения полного сгорания частиц металлов твердых топлив ракет-носителей.

Следует отметить, что эта задача стала очевидной достаточно давно, но пока нет сведений о том, что найдено ее решение. Скорее всего, для ее решения необходимо проведение фундаментальных экспериментальных исследований процессов горения одиночных частиц металлов в условиях камер сгорания ракетных двигателей, сопловых трактов и за их пределами с визуализацией (прямой или опосредованной) процессов убыли массы частиц, их трансформации и фрагментации. В этой связи диссертационное исследование Н.С. Белоусовой, целью которой 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», безусловно актуальна.

Вторая часть цели диссертации не противоречит первой, т.к. речь здесь идет о своеобразном управлении процессом горения частиц металлов с остановкой (прекращением) этого процесса на стадии, которая является целесообразной для определенной отрасли промышленности (возможны различные варианты постановок задач).

Общая характеристика диссертации.

Диссертационная работа Н.С. Белоусовой состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы (184 источника). Рукопись включает 145 страниц текста (включая 41 рисунок и 11 таблиц).

Во введении обосновывается актуальность запланированного диссертационного исследования, характеризуется степень проработки проблемы, сформулированной в диссертации, формируются цель и задача исследования. Также во введении сформулированы выносимые на защиту положения.

В первой главе приведены выделенные автором диссертации, представляющие по ее мнению основные достижения в области науки о горении частиц металлов, литературные данные. Также кратко освещено современное состояние теории и эксперимента в области зажигания и горения металлизированных смесевых топлив.

Вторая глава посвящена описанию методики «получения горящих частиц контролируемого размера» и результатов экспериментов по определению зависимости времен горения крупных частиц алюминия от их начального диаметра, полученной в воздухе при атмосферном давлении. Эксперименты показали, что времена горения монолитных частиц алюминия, установленные другими исследователями, и агломератов диаметром от 400 мкм до 780 мкм (результаты автора диссертации) практически совпадают.

В третьей главе приведены результаты экспериментов по определению времен горения монолитных и пористых частиц титана в условиях свободного падения в

воздухе. Зарегистрированы два режима фрагментации. Первый – однократный «звездообразный» взрыв, второй – отделение в «течение некоторого интервала времени от исходной частицы металла большого числа мелких частиц – фрагментов» (по определению автора – режим «еловая ветвь»). Установлено, что зависимости времен горения пористых частиц от диаметра практически совпадают с аналогичной зависимостью для монолитных в начальной стадии частиц идентичных размеров.

В четвертой главе приведено описание методики и результатов определения скоростей движения горящих частиц металла, а также результаты определения коэффициентов аэродинамического сопротивления горящих частиц. Показана возможность вычисления характеристик движения частиц с использованием известного аналитического решения задачи движения сферической частицы под действием сил тяжести и аэродинамического сопротивления.

Пятая глава посвящена описанию результатов анализа конденсированных продуктов сгорания частиц титана в воздухе, полученных в результате выполненных автором диссертации экспериментов, а также продуктов горения титановых агломератов при горении смесевых топлив. Этот раздел диссертации ориентирован на анализ процессов получения диоксида титана как конечного продукта при горении в воздухе и в азоте при давлениях 0,1 Мпа и 0,35 Мпа, соответственно. Определены скорости горения топлив при разных размерах частиц титана.

В шестой главе представлены результаты исследований процессов горения смесевых топлив с добавками и анализа конденсированных продуктов горения таких топлив. Также в этой главе проведен анализ эффективности энерговыделения исследовавшихся топлив.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационного исследования Н.С. Белоусовой.

Общая методология и методика исследования

Автором диссертации выполнен комплекс экспериментальных исследований, которые можно квалифицировать как фундаментальные. Используются современные методики регистрации основных характеристик процессов горения частиц металлов и смесевых топлив: скоростная видеосъемка, оптическая и электронная микроскопия, аналитическая химия. Основные результаты экспериментов систематизированы в виде математических моделей, связывающих основные характеристики процессов с значениями факторов, варьируемых в экспериментах. Проведен анализ погрешностей средств измерений и случайных ошибок (неопределенностей по новой терминологии). Анализ результатов выполненных экспериментов проведен в соответствии с современными представлениями о процессах горения частиц металлов и металлизированных смесевых топлив.

Научная новизна полученных результатов.

Н.С. Белоусова получила группу результатов, соответствующих современному критерию новизны, что подтверждается несколькими публикациями в журналах РАН. Наиболее значимыми, скорее всего, являются следующие.

1. Экспериментально определены времена горения частиц и агломератов исследовавшихся металлов и установлена идентичность процессов горения монолитных алюминиевых одиночных частиц и агломератов при горении в воздухе в условиях свободного падения.

2. Установлены основные закономерности процессов горения монолитных частиц титана в свободном падении в воздухе при атмосферном давлении, в том числе характерные времена фрагментации. Выделены два режима фрагментации, достаточно существенно отличающиеся. Определен граничный размер частиц, разделяющих режимы.

3. По результатам экспериментов определены гранулометрический, морфологический и фазовый состав конденсированных продуктов горения и число мелких по размерам частиц, генерируемых одной исходной частицей титана. Выделены морфологические типы частиц конденсированных продуктов горения.

4. Определены в экспериментах скорости движения горящих частиц титана при свободном падении в воздухе для достаточно представительного диапазона изменения размеров частиц. Вычислены значения коэффициента аэродинамического сопротивления горящих частиц при движении в воздухе.

5. Экспериментально обоснована возможность модификации характеристик горения топлив на основе бора и додекаборида алюминия в результате введения в топливо специальных добавок.

Степень обоснованности и достоверности результатов научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Автор диссертации при проведении экспериментальных исследований использовал современное регистрационное оборудование с низким уровнем методических (систематических) неопределенностей при регистрации характеристик исследовавшихся процессов, методы статистической обработки результатов. Также неоднократно выполнялось сопоставление результатов, полученных автором диссертации, с известными экспериментальными данными других исследователей, полученными для близких по свойствам объектов.

Практическая значимость.

Результаты исследований автора диссертации при всей их фундаментальности имеют и достаточно очевидное практическое приложение. Экспериментальные данные по временам горения частиц и агломератов исследовавшихся металлов могут стать базой для проведения опытно-конструкторских работ по снижению выбросов в атмосферу Земли частиц оксидов алюминия в результате работы ракетных двигателей на твердом металлизированном топливе. Также экспериментальные данные, полученные Н.С. Белоусовой по фрагментации горящих частиц титана, могут использоваться при модернизации современных технологий получения частиц диоксида титана, широко использующегося в различных приложениях, и разработке новых технологий получения этого диоксида.

Замечания по диссертационной работе.

1. Выбор переменных для осей координат на рис. 3.7 не соответствует подписи к рисунку («Времена начала фрагментации $t_{\text{вв}}$, окончания фрагментации $t_{\text{ев}}$ и окончания горения (ось абсцисс) в зависимости от размера частиц D (ось ординат)). В традиционной общепринятой интерпретации ось абсцисс всегда соответствует независимой переменной (в данном случае это размер частиц), а ось ординат искомой функции (в данном случае это соответствующие времена).

2. При анализе механизма горения титана в воздухе и причин диспергирования постулируется положение о диффузии газообразного окислителя в слой расплава титана при характерных временах процесса менее одной секунды. Это утверждение было бы обоснованным при оценке характерных времен диффузии кислорода (или воздуха) в расплаве титана при соответствующих температурах и давлениях и сравнении диффузионных времен с временами горения. Таких оценок в рукописи диссертации нет.

3. Недостаточно обоснованным является утверждение на стр. 57 «в начальной стадии горение частицы титана происходит в конденсированной и паровой фазе». Такое сочетание гетерогенных и газофазных реакций не является очевидным. Если титан не испаряется, то: «Что является горючим в паровой фазе?». Если же титан все таки испаряется, то поток его паров будет препятствовать проникновению окислителя (воздуха) в расплав титана.

4. Приведенная на рис. 5.43б зависимость скорости горения топлив от размера частиц титана при давлении 0,35 МПа и атмосферном нет оснований трактовать как зависимость. Отклонения значений τ от средних сопоставимы с доверительными интервалами определения значений τ (приведены на рисунке). Рисунок 5.43а также не является базой для вывода о зависимости $\tau(D)$. Изменения доверительных интервалов определения τ в диапазоне изменения D от 75 мкм до 175 мкм в 2-3 раза иллюстрируют нестабильность результатов экспериментов в этом диапазоне изменения D .

Сделанные замечания не снижают высокой в целом оценки научной и практической значимости результатов диссертации Н.С. Белоусовой.

Тема диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Автореферат по своему содержанию соответствует содержанию рукописи диссертации.

Основные результаты диссертационного исследования Н.С. Белоусовой опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций.

Оформление диссертации в целом соответствует современным требованиям по подготовке рукописей и авторефератов кандидатских диссертаций.

Заключение о соответствии диссертации критериям.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации можно сделать заключение, что диссертация Н.С. Белоусовой «Горение частиц металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив» соответствует требованиям пунктов

9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018), а её автор Белоусова Наталья Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

Профессор Научно-образовательного
центра И. Н. Бутакова, Инженерной
школы энергетики Федерального
государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет»
(адрес организации: 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 30; сайт: <https://tpu.ru/>,
телефон: +7 (3822) 60-63-33, +7 (3822)
60-64-44, e-mail: tpu@tpu.ru)
доктор физико-математических наук
(01.04.14 - Теплофизика и молекулярная
физика), профессор
27.03.2023



Кузнецов Гений Владимирович

Подпись Г.В. Кузнецова заверяю:

Ученый секретарь Национального
исследовательского Томского
политехнического университета
кандидат технических наук

Проректор по науке
Трансферу технологий



Сухих Л. Г.
Кулинич Е. А.