

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Белоусовой Натальи Сергеевны «Горение частиц металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа, выполненная Белоусовой Натальей Сергеевной, посвящена экспериментальному изучению физических механизмов процессов горения частиц металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив.

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), которые обеспечивают прирост удельного импульса двигателя, по сравнению с безметалльными топливами, за счет увеличения температуры и общей теплоты сгорания. Массовое содержание МГ в топливах составляет 15–70 %, в роли металлического горючего 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. Несмотря на множество исследований в данной области, имеется практическая потребность в улучшении характеристик горения металлизированных топлив. Это требует продолжения исследований горения металлов как в форме индивидуальных частиц, так и в составе топлив с использованием принципиально новых методов и материалов и обуславливает актуальность диссертационной работы.

Работа направлена на исследование физических механизмов процессов горения металлического горючего в воздухе и в волне горения 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.

В работе решен ряд задач по экспериментальному определению времен горения и фрагментации одиночных частиц Ti и Al, изучены характеристики морфологического и гранулометрического состава конденсированных продуктов горения (КПГ) частиц Ti в воздухе, а также исследованы закономерности движения горящих частиц Ti в воздухе и определен эффективный коэффициент аэродинамического сопротивления; экспериментально исследованы механизмы горения частиц Ti, B, AlB_{12} в составе смесевых модельных топлив и определен морфологический, гранулометрический и химический состав частиц дисперсной фазы смесового топлива, а также полнота сгорания металлического горючего. Для решения поставленных задач в работе применено варьирование природы металлических частиц и рецептуры топлив, использованы оптимальные методы отбора и анализа конденсированных продуктов горения. Пять вариантов отбора частиц, применение оптической и электронной микроскопии, методов анализа изображений и аналитической химии позволили получить существенно новые результаты.

Научная и практическая значимость диссертационной работы Белоусовой Н.С. обусловлена тем, что установленные закономерности и характеристики горения металлических горючих могут быть использованы для развития теории горения гетерогенных конденсированных систем, содержащих металлические частицы, а также для решения ряда практических задач, связанных с повышением эффективности процессов в энергоустановках и устройствах специального назначения (ракетные двигатели на твердом топливе, газогенераторы, пиротехнические устройства).

Общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка используемой литературы. Полный объем диссертации составляет 145 страниц с 41 рисунками и 11 таблицами. Список литературы содержит 184 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость выбранного направления.

В первой главе приведены сведения об основных компонентах смесевых топлив для ракетных двигателей, в том числе металлических горючих.

Рассмотрены методы повышения потребительских качеств металлических горючих применительно к их горению в составе смесевых топлив. Представлен обзор и анализ литературных данных о горении частиц металлов, зажигании и горении топлив, содержащих различные металлические горючие.

Во второй главе описана методика получения горящих частиц контролируемого размера; результаты экспериментального исследования горения индивидуальных модельных агломератов алюминия в воздухе при атмосферном давлении. Экспериментально подтверждено предположение об идентичности процесса горения монолитных частиц и агломератов указанных размеров.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования горения монолитных (120 – 540 мкм) и пористых осференных частиц титана (100 – 400 мкм) в свободном падении в воздухе при атмосферном давлении. На основе экспериментальных данных получена новая информация о механизме горения крупных частиц титана в воздухе, в зависимости от размера материнской частицы. Описаны два режима фрагментации: однократный звездообразный взрыв («звезда») и «еловая ветвь», в этом случае фотографическое изображение трека горящей частицы с отлетающими фрагментами по форме напоминает еловую ветвь. Определены условия реализации того или иного режима фрагментации.

В четвертой главе представлена математическая процедура обработки и осреднения экспериментальных траекторий движения частиц, разработанная для получения эмпирических закономерностей движения крупных (200–540 мкм) горящих частиц титана в свободном падении в воздухе. Показано, что используя выражение $C_d = 61/Re$ и вязкость воздуха $\mu = 5.07 \cdot 10^{-5}$ Па·с, движение горящих частиц Ti можно рассчитывать по известному аналитическому решению задачи о движении сферической частицы под действием сил тяжести и аэродинамического сопротивления с той же точностью, какую дают эмпирические зависимости.

В пятой главе описаны методики отбора и анализа конденсированных продуктов горения титана в воздухе при атмосферном давлении, а также титановых агломератов при горении смесевых топлив. Представлены детальные данные о гранулометрическом, морфологическом и фазовом составе КПП и о штучном количестве частиц, производимых одной горящей материнской частицей титана.

В шестой главе исследовано влияние добавок на характеристики горения смесевых топлив с бором и додекаборидом алюминия. Представлены две применяемые методики (установки) для отбора КПП при повышенных давлениях. Методики нацелены на имитацию горения топлива в прямоточном воздушно-реактивном двигателе (ПВРД) газогенераторной схемы. Эксперименты включали в себя определение скорости горения при давлениях 1.2 и 2.4 МПа, массы шлаков (остатки в стаканчике в виде каркаса), неполноты сгорания горючего по массовым и химическим критериям и вычисление параметра интегральной эффективности энерговыделения. Измерения неполноты сгорания проведены цериметрическим методом.

В заключении изложены основные результаты диссертационного исследования и сформулированы выводы.

Наиболее значимыми **научными результатами** диссертации являются:

1. С использованием подхода «модельных монодисперсных агломератов» впервые 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 (отношение массы оксида, аккумулированного на горячей частице, к общей массе образованного оксида,). Проведено сравнение полученных данных с литературными. Установлено, что времена горения монолитных частиц (литературные данные) и агломератов диаметром 400–780 мкм (наши данные) практически совпадают. Для агломератов получены зависимости $t_b(D_{Al}) = 3.79 \times 10^{-5} \cdot D^{1.63}$ и $\varphi(D_{Al}) = 8.916 \times 10^{-2} (D_{Al}/928)$. Экспериментально подтверждено предположение об идентичности процесса горения монолитных частиц и агломератов с размером до 780 мкм.

2. 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. Выделены и охарактеризованы 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). Показано, что закономерности

фрагментации и характерные времена для титановых агломератов и монолитных частиц указанных размеров отличаются незначительно.

3. Представлены детальные данные о гранулометрическом, морфологическом и фазовом составе КПП и о штучном количестве частиц, производимых одной горячей материнской частицей Ti. Выделены следующие морфологические типы частиц КПП: компактные сферы и аэрогелевые объекты круглой и продолговатой кометообразной формы. Аэрогелевые объекты состоят из первичных наночастиц – сферул. По соотношению атомов O/Ti все типы частиц КПП – оксидные. Массовая доля аэрогелевых объектов в КПП составляет 0.52 – 0.98, их физическая плотность около 0.8 г/см^3 . Характерные размеры компактных сфер 20– 410 мкм, круглых аэрогелевых объектов 11 – 470 мкм, длина кометообразных аэрогелевых объектов может достигать 13 мм. Типичные размеры сферул 25 – 100 нм. Крупные компактные сферы с размером 200 – 400 мкм имеют внутри газовый пузырь и плотность около 0.9 г/см^3 .

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 $C_d = A/\text{Re}$. Установлено, что для частиц исследованного диапазона размеров при $1 < \text{Re} < 10$ величина параметра A слабо зависит от диаметра частицы и в среднем составляет 61 ± 2 .

5. Представлены результаты экспериментального исследования горения топлив на основе ПХА, активного горючего-связующего МПВТ и порошка титана с размером частиц 32 – 500 мкм. Установлено, что для исследуемых смесевых композиций агломераты наименьших размеров образуются при использовании порошков титана наименьших размеров. В проведенных экспериментах – это порошок титана марки ПТМ фракции < 32 мкм и пористого титана фракции < 71 мкм.

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 $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$, $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ и MgF_2 . Диапазон регулирования скорости горения для топлив с В выше, чем для топлив с

AlB_{12} . При давлении 2.4 МПа введение в топливо с бором добавки $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ позволяет повысить скорость горения в 1.4 раза, а введение MgF_2 – понизить в 1.2 раза. В случае топлива с AlB_{12} добавка MgF_2 позволяет повысить скорость в 1.1 раза, но ни одна добавка не понижает скорость горения. Добавка $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ дает повышение эффективности энерговыделения E топлива с бором при давлении 1.2 МПа в 2.4 раза, добавка MgF_2 повышает E топлива с AlB_{12} при 2.4 МПа в 1.4 раза. Это максимальные достигнутые эффекты для исследованных горючих и добавок.

По работе имеется ряд замечаний и вопросов

1. В автореферате и во введении диссертации в явном виде отсутствует раздел научная новизна работы.

2. В описании методики получения горящих частиц алюминия контролируемого размера (п.2.2) не совсем понятна суть двух вариантов сбора остатков горения: поддон и чашка Петри (рис. 2.1). Сообщается, что «в первом варианте...каждое включение превращается в горящую частицу-агломерат», а «во втором варианте размер горящей частицы задан изначально». С какой целью в первом варианте использовался поддон, а во втором – чашка Петри?

3. В работе времена горения металлических частиц определялись методом высокоскоростной визуализации (фото- и видеосъемка до 1000 кадров/с). Желательно было бы дополнить эти данные результатами, полученными с помощью методов электронно-оптического регистрирования, например, с использованием фотоэлектронного умножителя или фотодиодов.

4. Определялась ли химическая совместимость частиц алюминия, титана, бора и боридов с компонентами топлива?

5. В работе получен большой массив экспериментальных данных, которые обрабатывались с использованием статистических методов и соответствующим программам обеспечением. Однако по представлению экспериментальных данных имеются следующие замечания:

а) В п.3.4. на стр. 59 (последняя строка) представлено уравнение аппроксимации данных для пористых частиц титана. Диапазон значений масштабного множителя может приводить время горения частицы в отрицательное значение. Каков физический смысл данной аппроксимации?

б) На рис. 4.2 в момент времени $t = 0$ с указано отрицательное значение координаты x . Поясните, пожалуйста. Также на этом рисунке представлена аппроксимация осредненной траектории полиномом третьей степени. Каков физический смысл данной аппроксимации?

в) На рис. 4.2 и 4.3. кривые обозначены цифрами 4, 5, 7, 8, 9. Однако в подписи к рисунку и в тексте диссертации нет расшифровки этих обозначений.

г) В таблице 4.1. представлены параметры полиномов аппроксимации с погрешностями излишней точности.

д) В работе не указаны методы, и аппаратура для элементного анализа, результаты которого представлены, например, в табл. 5.1, 5.5

6. В работе часто используются аббревиатуры, например, СТТ, КПП, CS, ARO и т.д, поэтому желательно было привести список сокращений и обозначений.

Приведенные замечания не затрагивают основных результатов и выводов диссертации и не снижают общего положительного впечатления от рассматриваемой диссертации, как о законченной научно-исследовательской работе, выполненной на современном научно-техническом уровне.

Указанные выше замечания ни в коей мере не снижают высокой оценки представленной работы. Диссертационная работа Белоусовой Н.С. является законченным научным трудом и содержит ценные результаты, которые могут быть использованы для развития теории горения гетерогенных конденсированных систем, а также для решения ряда практических задач, связанных с повышением эффективности процессов в энергоустановках и устройствах специального назначения.

Автореферат и опубликованные статьи достаточно полно отражают содержание диссертации. Материалы диссертации опубликованы в 7 статьях в журналах, входящих в список ВАК РФ и международные системы цитирования Scopus и Web of Science, а также в периодических изданиях и сборниках материалов международных и всероссийских конференций и семинаров.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа «Горение частиц металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив» соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе отвечает критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней,

утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в действующей редакции), а ее автор, Белоусова Наталья Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. Направление исследований – «Экспериментальные и теоретические исследования процессов совместного переноса тепла и массы в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси».

Официальный оппонент

Нурмухаметов Денис Рамильевич
доктор физико-математических наук
специальность – 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества
Ведущий научный сотрудник, Институт углеродов и химического материаловедения, лаборатория энергетических соединений и нанокompозитов Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углеродов Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН)
Российская Федерация, 650000, г. Кемерово, пр. Советский, д. 18
Электронная почта: ndr999@gmail.com
Телефон: +7-923-500-20-42

«27» марта 2023 г.

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись Нурмухаметова Д.Р. удостоверяю.

Заместитель директора ФИЦ УУХ СО РАН
по научно-административной работе



В.В. Зиновьев /