

ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Белоусовой Натальи Сергеевны «Горение частиц металлического горючего в воздухе и в составе смесевых топлив», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа Белоусовой Натальи Сергеевны посвящена исследованию горения крупных микроразмерных алюминиевых, титановых и борсодержащих частиц в окислительных средах, изучению характеристик конденсированных продуктов горения (КПГ), образующихся при высокотемпературном окислении частиц металла и бора, особенностей фрагментации частиц титана, а также решению актуальной задачи, связанной со снижением агломерации и обеспечением полноты сгорания высокоэнергетического дисперсного металлического горючего в камере горения твёрдотопливного ракетного и/или прямоточного воздушно-реактивного двигателей. Известно, что микроразмерные порошки алюминия, магния и бора широко используются в компонентном составе твёрдых топлив, благодаря их высокой реакционной способности и выделяемой при горении удельной тепловой энергии. Эффективность горения металлических частиц в потоке газообразных продуктов горения топлива зависит от состава окислительной среды, теплофизических и гидродинамических характеристик рабочего процесса двигательной установки, природы, диаметра частиц металла и пассивирующей оболочки на поверхности активного металла или бора, влияющих на их механизм и скорость горения. В настоящее время в России и за рубежом интенсивно проводятся экспериментальные и теоретические исследования горения как одиночных частиц, так и дисперсных металлов (в основном, алюминия, магния, циркония и бора) в различных окислительных газовых средах, изучаются закономерности, механизмы и характеристики их движения и горения, влияние природы металла, модифицирующих добавок, диаметра частиц, пассивирующего покрытия и внешних условий на их интенсивность воспламенения, горения, агломерацию на реакционной поверхности топлива и дробление потоком. Присутствие крупных частиц-агломератов металла в камере сгорания приводит к двухфазным потерям импульса в сопле двигательной установки.

В данной работе представлена оригинальная методика изготовления и исследования горения крупных композитных частиц (моделирующие агломераты диаметром от 400 до 780 мкм) на основе метилполивинилтетразольного (МПВТ) полимера с нитроэфир-нитроаминным пластификатором и микроразмерного порошка алюминия с размером частиц 0.5–1.5 мкм, частиц-пластин титана (моделирующие агломераты диаметром от 120 до 540 мкм) и пористых частиц титана (диаметром от 100 до 400 мкм) на воздухе при атмосферном давлении. Изучены механизм, временные характеристики фрагментации (для титана) и горения крупных частиц металлов, установлены закономерности движения и коэффициент аэродинамического сопротивления горящих частиц титана на воздухе, обобщенные зависимости времени горения алюминиевых и титановых частиц от их начального диаметра, эмпирические зависимости координаты и скорости движения частицы титана от времени до начала её фрагментации, а также основные характеристики (структура поверхности, размер, масса, плотность и элементный состав частиц) формирующихся КПГ. Показано, что применение мелкодисперсного порошка титана (фракцией менее 32 мкм) в модельной твёрдотопливной композиции на основе перхлората аммония (ПХА) и МПВТ снижает размер образующихся частиц КПГ. Введение около 1 масс.% фторсодержащей добавки $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$, $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ или MgF_2 в компонентный состав высокоэнергетической твёрдотопливной композиции, содержащей около 37 масс.% порошка бора В (среднемассовый диаметр частиц 3.0 мкм) или додекаборида алюминия AlB_{12} (среднемассовый диаметр частиц 5.8 мкм), способствует повышению эффективности энерговыделения (до 240 % – с В и $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$) и скорости горения топлива (до 40 % – с В и $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$) при постоянных давлениях в камере 1.2 МПа и 2.4 МПа.

Научная новизна исследования обусловлена тем, что получены экспериментальные данные скорости горения твёрдотопливной композиции, содержащей окислитель ПХА двух фракций (мелкой и крупной), горючее-связующее вещество МПВТ и микропорошки В и AlB_{12} с добавками фторсодержащих веществ, установлены дисперсные характеристики и полнота

горения формирующихся частиц КПП при избыточных давлениях в проточной камере горения. Показана возможность регулирования скорости горения борсодержащих твёрдотопливных композиций при использовании не более 1 масс.% гексафтортитаната аммония $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$, фторида магния MgF_2 или политетрафторэтилена $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$.

Полученные результаты исследования обсуждались на Всероссийских и международных научных конференциях. По теме диссертации опубликовано 34 научные работы, в том числе 5 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени кандидата наук.

В качестве замечаний к автореферату и диссертационной работе можно указать следующее. Для сравнительной оценки представленных результатов хотелось бы видеть экспериментальные данные о горении крупных частиц-агломератов на основе бора и борида алюминия на воздухе. Установленный коэффициент сопротивления (входящий в уравнение движения частицы) для падающей на воздухе горячей частицы титана, возможно, имеет ограничение по температуре и составу газовой среды, температуре на поверхности частицы, благодаря изменению плотности и вязкости обтекающего потока. Применяемая энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDS) в установлении элементного состава отобранных КПП не позволяет установить образующиеся при горении металла кристаллические фазы оксидов, карбидов, нитридов, поэтому лучше бы EDS-анализ дополнить данными рентгеноструктурного анализа (RDX). В тексте следовало бы пояснить влияние используемых в твёрдотопливных композициях фторсодержащих добавок на полноту сгорания частиц бора и AlB_{12} , скорость горения топлива и дисперсность КПП. Указанные замечания существенно не влияют на положительную оценку работы, представляющую собой законченное научное исследование.

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 учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в действующей редакции), а её автор, Белоусова Наталья Сергеевна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Коротких Александр Геннадьевич
доктор физико-математических наук, доцент
специальность 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

профессор научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, ТПУ, ИШЭ

Сайт организации: <https://tpu.ru/>

Тел.: 8 (3822) 701-777, доп. 1680

E-mail: korotkikh@tpu.ru

31.03.2023 г.

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

Подпись А.Г. Коротких заверяю

Учёный секретарь Национального исследовательского Томского политехнического университета

К.т.в.

Кулинич Екатерина Александровна

