

## Сведения о выполненных работах в 2021 году

по проекту **«Образование и горение конденсированных продуктов сгорания борсодержащих высокоэнергетических композиций в прямоточных энергетических установках (ракетно-прямоточных двигателях)»**,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 21-19-00541

Руководитель: Рашковский Сергей Александрович, д-р физ.-мат. наук

За первый год выполнения проекта получены следующие результаты. Используя опубликованные экспериментальные данные, создана база данных, содержащая экспериментальную информацию по горению борсодержащих смесевых композиций, включающую зависимость скорости горения от давления и параметры конденсированных продуктов сгорания, такие как относительная масса, размеры частиц, их форма, химический состав и структура. База данных, позволяет оперативно находить борсодержащие составы с близкими характеристиками, сравнивать различные составы по разным критериям, получать объединенную графическую и табличную информацию по отдельным составам или по выделенной группе составов.

Создан пилотный вариант расчетной программы для реализации метода прямого численного моделирования агломерации частиц бора при горении высокоэнергетических композиций (ВЭК). Работа программы состоит из двух этапов. На первом этапе производится моделирование структуры ВЭК для заданного содержания и дисперсности порошкообразных компонентов; на втором этапе производится расчет процесса горения ВЭК (на данном этапе в упрощенной одномерной постановке) и детальный расчет теплового и механического поведения отдельных частиц бора, алюминия или оксида бора с учетом их плавления, и механического взаимодействия с газообразными продуктами разложения компонентов ВЭК и друг с другом. В упрощенной постановке рассчитывается слияние расплавленных частиц под действием сил поверхностного натяжения. В результате расчета получен спектр размеров частиц, отрывающихся от поверхности горения.

Выполнены расчеты структуры борсодержащих высокоэнергетических композиций, для составов, отобранных в базу данных.

Разработана физико-математическая модель и алгоритм детального численного моделирования движения конденсированных продуктов сгорания с несферическими частицами дисперсных компонентов в равномерном и ускоряющемся потоках. Разработан пилотный вариант комплекса вычислительных программ для реализации метода детального численного моделирования многофазных течений в газодинамических трактах энергетических установок. С этой целью разработан собственный решатель для моделирования сложного движения (поступательного и вращательного) движения конгломерата. Решатель разработан на языке C++ в виде подключаемой библиотеки для использования в прикладных пакетах программ

OpenFOAM, ANSYS Fluent. Проведены тестовые расчеты, которые подтвердили применимость разработанной методики расчета для исследования движения несферических частиц в потоке продуктов сгорания. Проведены параметрические расчеты по исследованию характеристик движения несферических конгломератов в потоке газа. Исследовано влияние на траекторию и характеристики движения конгломератов их формы в случае равномерного и ускоряющегося потоков несущей фазы. Показано, что траектории движения несферических частиц различной формы в равномерном и ускоряющемся потоках газа существенно отличаются. Так, в равномерном потоке траектории частиц отклоняются от оси сопла, а сами частицы приобретают значительные угловые скорости вращения в направлении потока продуктов сгорания. В ускоряющемся потоке траектории частиц практически не отклоняются от оси симметрии, а угловые скорости вращения по главным осям инерции изменяются в колебательном режиме.

Разработаны рецептуры борсодержащих высокоэнергетических композиций, в которых в качестве порошкообразного горючего используется бор, диборид алюминия  $AlB_2$  и полиборид алюминия  $AlB_{12}$ . Изготовлены модельные образцы ВЭК методом проходного прессования и экспериментально определены зависимости стационарной скорости горения от давления. Дополнительно изготовлены образцы бинарных композиций СКДМ-80+ $AlB_{12}$  и образцы бинарной композиции углерод+ $AlB_{12}$ . Образцы указанных бинарных композиций использовались в экспериментах, целью которых было определение механизма и закономерностей образования карбида бора при горении борсодержащих ВЭК. Отработана методика проведения испытаний на установке УРАН-1. Проведено более 500 опытов. Для образцов бинарных композиций СКДМ-80+ $AlB_{12}$  определены зависимости средней массовой скорости пиролиза от плотности теплового потока. Проведен анализ экспериментальных данных по горению борсодержащих ВЭК, существенно отличающихся по составу, в камере сгорания модельного газогенератора. Определено содержание в КПС бора, карбида бора, нитрида бора и углерода. Проведено сравнение экспериментально определенных температуры в камере сгорания и коэффициента истечения продуктов сгорания с соответствующими результатами термодинамических расчетов. Показано, что процесс в камере сгорания является существенно неравновесным. Определены размеры частиц КПС борсодержащих ВЭК на выходе из сопла газогенератора и проведено их сравнение с данными по размерам КПС, покидающих поверхность горения. Установлено, что в сопле газогенератора происходит интенсивное дробление КПС, результат которого зависит от состава борсодержащей ВЭК.