

Сведения о выполненных работах в 2023 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

На основе верификации уточнена модель окисления частиц В4С. Выявлены основные стадии процесса окисления В4С. Окисление В4С сопровождается обеднением поверхностного слоя образца углеродом и накоплением избытка бора, а процесс контролируется диффузией через слой оксида бора. Получены расчетные зависимости изменения массы В4С и количества выделившегося CO₂ в процессе окисления. Разработанная модель добавлена в математическую модель и программу расчета агломерации частиц бора и алюминия. Проведены параметрические расчеты и анализ структуры слоя конденсированных продуктов сгорания над поверхностью горения твердого борсодержащего топлива. Разработана математическая модель и программа расчета течения смеси воздуха с продуктами сгорания борсодержащего ВЭЖ в камере дожигания РПД (КД) с учетом химических реакций между частицами бора, алюминия и В4С с кислородом воздуха. Используя модели горения и окисления частиц бора, В4С и углерода проведены параметрические исследования процессов в КД для разных составов ВЭЖ, разных расходов воздуха и продуктов сгорания твердого топлива и разных конфигураций КД. Определена полнота сгорания топлива в КД для разных составов конденсированных продуктов, разных температур и давлений. Проведен сравнительный анализ горения частиц бора, углерода, В4С и нитрида бора одинаковых размеров в одинаковых условиях. Анализ проведен в широком диапазоне размеров частиц и условий горения. Сравнительный анализ горения частиц бора, В4С, BN и углерода в пропорциях, характерных для КПС борсодержащих топлив, показал, что наименьшее влияние на полноту сгорания КПС оказывает горение BN. Это связано с его низкой теплотворной способностью и малым содержанием в КПС. При прочих равных условиях быстрее всего сгорают частицы углерода, однако их вклад в полноту сгорания КПС меньше, чем у бора и В4С вследствие более низкой теплотворной способности. Проведенные параметрические исследования демонстрируют положительное влияние высокой температуры и малых размеров частиц на полноту сгорания КПС борсодержащих топлив в условиях КД. При низких температурах в КД (менее 2000 К) бор и углерод, содержащиеся в КПС, сгорают быстрее В4С, что для типичного состава КПС обеспечивает полноту сгорания на уровне 65-75%. Дальнейшее повышение полноты сгорания происходит медленно за счет догорания частиц В4С. При высоких температурах в КД (более 2500 К) процесс горения КПС интенсифицируется. Это приводит к тому, что бор и В4С вносят примерно одинаковый вклад в полноту сгорания КПС, при этом на начальном этапе горения КПС В4С может вносить даже больший вклад в полноту сгорания КПС, чем бор. Разработана математическая модель взаимодействия твердых

частиц при наличии на их поверхности слоя расплава. Показано, что при контакте таких частиц расплав собирается в окрестности точки контакта, образуя жидкую перемычку между частицами. Задача растяжения такой системы с жидкой решалась методом SPH. Задавался начальный объем расплава на поверхности частиц и угол смачивания между расплавом и поверхностью частиц. После вычисления равновесной формы расплава, когда твердые частицы контактируют, они квазистатически раздвигались и одновременно вычислялось движение расплава между частицами. Расчет продолжался до момента разрыва жидкой перемычки. По форме поверхности жидкой перемычки, вычислялась сила, действующая между частицами. В результате серии расчетов получены зависимости силы, действующей между частицами, соединенными жидкой перемычкой, от расстояния между частицами и параметров системы. Проведена оценка роли силы тяжести или перегрузок, действующих в направлении оси жидкой перемычки. По результатам расчетов определены критерии разрыва жидкой перемычки между частицами. Полученные зависимости добавлена в алгоритм и программу расчета агломерации. Разработана уточненная модель слияния капель расплава порошкообразного горючего при горении твердых ракетных топлив на основе алгоритма SPH с учетом структуры топлива и реальных свойств расплавов оксида бора и алюминия. Разработана и отлажена методика и программа расчета для моделирования процесса слияния большого числа контактирующих случайным образом жидких капель и проведены параметрические расчеты. Установлено, что процесс агломерации таких структур можно разделить на два этапа. На первом этапе происходит слияние жидких капель, имеющих в начальный момент времени точки контакта с другими каплями. В процессе слияния таких капель наблюдаются колебания жидкости, которые создают новые точки контакта, способствующие продолжению процесса агломерации. На этом этапе важную роль играют нестационарные процессы описывающие динамику изменения свободной поверхности в зависимости от поверхностного натяжения, вязкости и плотности жидкости. Разработанный метод использован для моделирования начальной стадии агломерации расплавленных частиц на поверхности горения твердого топлива. Моделировалась структура топлива: частицы порошкообразных компонентов размещались в пространстве с заданной для каждого порошка объемной долей. Далее рассчитывался процесс агломерации в предположении, что частицы окислителя мгновенно сгорают, а частицы порошкообразного горючего мгновенно плавятся. Проведенные параметрические расчеты показали, что несмотря на то, что каждый из исходных порошков (алюминий и перхлорат аммония) монодисперсный, полученные в результате слияния агломераты имеют широкое распределение по размерам, которое зависит от исходных размеров порошков, их объемной доли в составе смесевой композиции и температуры расплава, которая влияет на вязкость и коэффициент поверхностного натяжения. Проведены параметрические расчеты агломерации расплавленных частиц и определены функции распределения по размерам образующихся агломератов для разных смесевых композиций. Расчеты методом SPH сравнивались с результатами расчетов по приближенной методике. Изготовлено более 3000 образцов бинарных композиций на основе связующего НТРВ и

порошкообразного горючего АІВ12 с разными содержаниями АІВ12 (от 0 до 70 %). Смесь из связующего НТРВ и АІВ12 отверждалась чистым МDІ, процесс отверждения проводился в условиях вакуума в течение суток, так как в смеси отмечено большое количество пузырьков CO₂. Проведены экспериментальные исследования по пиролизу борсодержащих смесевых композиций на основе связующего НТРВ и АІВ12 на установке УРАН-1. Получены зависимости массовой скорости пиролиза композиций от мощности теплового потока и содержания АІВ12. Полученные зависимости для композиций с НТРВ+АІВ12 сравнивались с аналогичными зависимостями для составов СКДМ-80+АІВ12. Установлено, что скорость пиролиза для композиций с НТРВ в качестве связующего существенно ниже, чем для аналогичных составов на основе СКДМ-80. Это различие связано с «вспучиванием» образцов на основе НТРВ. Увеличение пористости образца на основе связующего НТРВ в процессе пиролиза существенно снижает коэффициент теплопроводности; в результате поверхностный слой образца фактически приобретает теплоизоляционные свойства, изолируя его остальную часть от внешнего теплового потока. Проведен рентгенографический анализ оставшейся после пиролиза к-фазы показал, что даже при мощности теплового потока выше 300 Вт/см² обнаруживаются только следы В4С. При данной мощности теплового потока для образцов на основе СКДМ-80 количество В4С достигало 40 %. Проведены экспериментальные исследования по пиролизу составов на основе НТРВ в два этапа: первоначальный пиролиз в течение 5 с со сбором оставшейся к-фазы; прессование и пиролиз с такой же мощностью в течение еще 5 с. После такого двухстадийного пиролиза обнаружено появление заметного количества В4С для композиций на основе связующего НТРВ и АІВ12. По результатам серии экспериментов определены зависимости содержания В4С в остатке образца от плотности теплового потока. Проведены ТГА и ДТА анализы различных композиций НТРВ+АІВ12 и НТРВ+В2О3, в среде аргона, с темпом нагрева 10 градусов в минуту. Для образцов с В2О3 отмечены потери энергии, связанные с присутствием воды в В2О3. Установлено, что в просушенном образце В2О3 такие потери отсутствуют.