

## Сведения о выполненных работах в 2022 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

Доработана математическая модель и программный код для расчета процесса агломерации частиц бора и алюминия при горении высокоэнергетической композиции (ВЭК). Математическая модель учитывает химическое взаимодействие частиц бора и алюминия с кислородом, содержащимся в газообразных продуктах сгорания. В разработанной модели агломерации рассматривается нагрев частиц бора и алюминия над поверхностью горения за счет протекания указанных экзотермических химических реакций, плавление сначала частиц алюминия, а затем, при определенных условиях, и частиц бора с образованием жидких капель, которые под действием сил поверхностного натяжения сливаются в более крупные капли – агломераты. Учитывается отрывающая сила, действующая со стороны оттекающих газообразных продуктов горения, как на отдельные частицы и агломераты, так и в целом на каркас, находящийся на поверхности горения топлива, и состоящий из спекшихся частиц.

Разработана математическая модель и программа расчета течения продуктов сгорания борсодержащих ВЭК в камере дожигания ракетно-прямоточного двигателя. В модели учитывается турбулентное течение газовой смеси (k- $\omega$  модель турбулентности), химические реакции в газовой фазе, двухфазное течение с учетом химических реакций газообразного окислителя и конденсированных продуктов горения твердого топлива, таких, как бор, алюминий, углерод, карбид бора. Конденсированные продукты сгорания ВЭК, такие, как бор, алюминий, углерод, карбид бора, нитрид бора, а также оксид бора, рассматриваются, как отдельные частицы, имеющие в общем случае разные размеры.

Разработана математическая модель и программа расчета эволюции конгломератов, состоящих из твердых частиц бора и расплава оксида бора с учетом сил поверхностного натяжения. Проведены параметрические численные исследования для несферических конгломератов различной формы, представляющих собой совокупность твердых частиц бора, покрытых расплавом оксида бора. Определена структура и форма конгломератов в процессе их эволюции в зависимости от содержания расплава, количества и размеров твердых частиц. Исследовано влияние сил адгезии и когезии на эволюцию и окончательную форму конгломератов.

Разработана математическая модель и программа расчета процесса дробления конгломератов частиц бора покрытых расплавом оксида бора, в широком диапазоне скоростей набегающего потока, содержания расплава, количества и размеров твердых

частиц. Проведены параметрические численные исследования процесса ускорения и разрушения конгломерата дозвуковым, трансзвуковым и сверхзвуковым потоками, определены критерии разрушения конгломерата и распределения его осколков по размерам.

Изготовлены образцы бинарных композиций СКДМ-80+AlB12 в пропорциях 0/100, 30/70, 50/50, 70/30, 90/10 и 100/0. Проведено исследование этих образцов на дериватографе и получены данные ТГА и ДТА. Проведен анализ данных ТГА и ДТА исследованных образцов и определены зависимости относительно массы остатка всего образца и относительной массы неуносимого остатка связующего, от содержания AlB12 в исходном образце. Установлено, что наличие AlB12 в смеси существенно изменяет скорость газификации связующего. Установлено, что для образцов, содержащих AlB12, в диапазоне температур 600-1000С наблюдается эндотермический эффект, зависящий от содержания AlB12 в исходном образце. Определена зависимость величины этого эндотермического эффекта от содержания AlB12 в исходном образце. Исследован пиролиз указанных композиций на установке УРАН-1 при значениях плотности теплового потока в диапазоне 80...291 Вт/см<sup>2</sup> и давлениях до 10 атм. Получены зависимости скорости уноса (пиролиза) композиций от содержания AlB12 в исходном образце и от плотности теплового потока во всем исследованном диапазоне. Проведен химический анализ остатков образцов после пиролиза и определено содержание в них AlB12 и углерода. Для определения содержания карбида бора в остатке образца после пиролиза проведен рентгенофазовый анализ остатков на спектрометре Shimadzu XRF 1800. Установлено, что количество карбида бора в остатке образца после пиролиза слабо зависит от содержания AlB12 в исходном образце, однако существенно зависит от плотности теплового потока, воздействующего на образец. Проведены измерения температуры (термопарным методом и инфракрасным пирометром) в зоне пиролиза для разных составов ВЭК и разных плотностей теплового потока. Проведена серия экспериментов в широком диапазоне плотности теплового потока и разных содержаний AlB12 в исходном образце. Установлена связь температуры в зоне пиролиза и плотности теплового потока. Получена аппроксимационная зависимость температуры в зоне пиролиза от плотности потока. Определена зависимость содержания карбида бора в остатке образца от температуры в зоне пиролиза. Проведена серия экспериментов по пиролизу изготовленных образцов на установке УРАН-1 под давлением в диапазоне плотностей теплового потока на поверхности образца 80–170 Вт/см<sup>2</sup>.