

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2021 г. по 30.06.2022 г.

по проекту «**Экспериментально-теоретическое изучение свойств
металлизированных смесевых твердых топлив с добавками нанопорошков
металлов и разработка цифровой системы проектирования твердотопливных
составов обладающих заданными свойствами**»,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 19-79-10054

Руководитель: канд. физ.-мат. наук Порязов Василий Андреевич

1. Изготовлены партии образцов с пониженным содержанием металлического горючего (порошки алюминия промышленных марок АСД-4, АСД-6, Alex; диборида AlB_2 и додекаборида AlB_{12} алюминия, Бора и их смесей). Содержание связующего и отвердителя оставалось неизменным (СКДМ-80 – 19,7 % / отвердитель ТОН2 – 0,5 % сверх 100 %). Уменьшалась массовая доля металлического горючего (7.85 % и 1 %) за счет увеличения доли ПХА б/д – 64,6 % (60/40).

2. Изучен процесс горения образцов при давлении 1 атмосфера в воздухе. Регистрировали время горения и параметры факела пламени (высоту, форму, цвет). Скорость горения топлив на воздухе при 1 атм увеличивается с уменьшением содержания алюминия в составе топлива. Образец, содержащий 5.85 % АСД-4 и 2 % Alex, не горит на воздухе при атмосферном давлении. После воспламенения поджигающего состава происходит несколько вспышек на торцевой поверхности образца, а затем погасание.

Горение образцов (с разным содержанием бора в топливе) отличается незначительно. Для этих образцов характерно окрашивание пламени в зеленый цвет, что свидетельствует о присутствии в продуктах сгорания оксида VO_2 , образующийся в результате газофазного горения бора. Отмечается, что скорость горения увеличивается с повышением содержания бора в составе топлива (для образцов с алюминием наоборот). Определено, что наибольшей скоростью горения при атмосферном давлении обладает образец, содержащий 10.7 % Alex и 5 % В. Кроме того для данного образца получена наибольшая высота факела.

3. Произведен отбор и анализ дисперсности конденсированных продуктов горения образцов ВЭМ. Измерена скорость горения. Методом периметрического титрования получены данные о полноте сгорания КПП.

Исследованы основные характеристики горения модельных топлив на основе ПХА, неактивного связующего (раствор дивинилового каучука в трансформаторном масле) и 15.7 % одного из четырех МГ – Al, AlB_2 , AlB_{12} , В. Целями работы было выявление особенностей поведения в волне горения борсодержащих МГ по сравнению с алюминием и оценка их эффектов, в частности, синергетического влияния Al и В на повышение полноты сгорания бора и эффективности энерговыделения. Установлено, что вариация природы МГ дает возможность

изменять величину скорости горения примерно в 1.5 раза на уровне порядка 10 мм/с. Вместе с тем, вариация МГ по ряду Al $\rightarrow$ AlB2 $\rightarrow$ AlB12 $\rightarrow$ В приводит к следующему изменению показателя n в степенной зависимости скорости от давления в диапазоне 2–8 МПа: 0.89, 0.55, 0.31, 0.41. Наименьшее значение $n = 0.31$ реализуется для МГ AlB12 и обусловлено как повышением скорости горения при низком давлении, так и понижением скорости при высоком давлении. Имеются различия в морфологии и размерах КПГ. Так, в случае Al образуются прочные сферические агломераты, в случае В – хрупкие агрегаты кораллообразной формы. В случае AlB12 КПГ близки к борным, в случае AlB2 в КПГ появляются сферические частицы, характерные для Al. Это наиболее существенная особенность сравнительной морфологии КПГ исследованных топлив\горючих. Предполагается, что в волне горения топлива с AlB2 В и Al физически разделяются, а затем формируют агломераты своего морфологического типа.

Для исследованных рецептур с неактивным связующим и сравнительно небольшим содержанием МГ 15.7 % синергетический эффект в виде повышения полноты сгорания бора за счет введения Al в состав комбинированного горючего не выявлен.

4. Проведено экспериментальное исследование нестационарной скорости горения образцов ВЭМ при сбросе давления со скоростью от 140 до 160 МПа/с. Для определения нестационарной скорости горения использовался метод, основанный на постановке и решении обратной задачи внутренней баллистики. Исследования проведены для высокоэнергетических материалов, включающих энергетические добавки в виде порошков металлов – алюминия марок АСД-4, АСД-6, Alex, а также диборида и додекаборида алюминия. Анализ результатов исследования показал, что нестационарная скорость горения ВЭМ при резком сбросе давления носит колебательный характер и зависит от типа энергетической добавки.

Для всех рассмотренных композиций смесевых ВЭМ, содержащих разные энергетические добавки, при сбросе давления получен устойчивый переход на второй режим стационарного горения (с более низким значением давления) при сбросе давления со скоростью порядка (140 ÷ 160) МПа/с. Для всех исследованных составов смесевых ВЭМ зависимость нестационарной скорости горения от времени в период сброса давления носит колебательный характер. Частота колебаний для всех рассмотренных составов составляла порядка 20 Гц. Наличие колебательных режимов при сбросе давления может быть связано с реализацией очагово-пульсирующего механизма горения, обнаруженного К.И. Синаевым и В.Н. Маршаковым.

Показано, что максимальное отличие нестационарной скорости горения от квазистационарной в период сброса давления наблюдалось для базового состава не содержащего энергетических добавок. Добавление порошков алюминия в состав ВЭМ приближает нестационарную скорость горения к квазистационарной. Наименьшее отличие между нестационарной скоростью горения и квазистационарной получено для состава содержащего порошок алюминия Alex. Для составов ВЭМ

включающих полибориды в качестве высокоэнергетических добавок требуется большее расстояние от поверхности горения до сопла.

5. Разработана сопряженная физико-математическая газодинамическая модель горения смесового твердого топлива, содержащего полидисперсный порошок бора, в которой над поверхностью твердого топлива учитываются газодинамические процессы в двухфазной, многоскоростной, многотемпературной теплопроводной среде и процессы теплопереноса и реагирования в твердом топливе. Для учета эффекта агломерации используются экспериментальные данные о характеристиках дисперсности и полноте сгорания конденсированных продуктов сгорания. Получена расчетно-теоретическая зависимость линейной скорости горения СТТ, содержащего частицы бора, от давления газа над поверхностью топлива. Показано что для построения детерминированной физико-математической модели горения смесовых металлизированных твердых топлив одним из важнейших параметров является учет эффекта агломерации частиц, так как размер и массовая доля частиц на выходе с поверхности горения определяет тепловой к поверхности топлива

6. В рамках представленной модели горения смесового металлизированного твердого топлива в сопряженной постановке, в которой давление не зависит от координаты, разработана новая методика учета порядка химической реакции в газе на основе данных о показателе степени в законе горения. Использование данного подхода позволило улучшить согласование результатов расчета по методике с применением данных о дисперсности и функции распределения массы частиц по размерам с данными экспериментальных измерений.

7. Показано что для построения детерминированной физико-математической модели горения смесовых металлизированных твердых топлив одним из важнейших параметров является учет эффекта агломерации частиц, так как размер и массовая доля частиц на выходе с поверхности горения определяет тепловой к поверхности топлива, а следовательно и его скорость. На основе анализа полученных результатов сделан вывод о перспективности предложенного подхода к моделированию процессов горения металлизированных твердых топлив, однако подход требует дополнительной доработки.