

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2019 г. по 30.06.2020 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. На основе анализа литературных данных, опубликованных в научной литературе, собрана база данных о характеристиках горения металлизированных ВЭМ. В базу данных входят сведения о компонентном составе ВЭМ (вид металла, массовая доля порошка металла, дисперсный состав порошка металла), условия проведения экспериментов (способ зажигания, среда, в которой сжигались образцы), скорости горения, показатель степени в законе горения.

2. Проведена серия термодинамических расчетов с применением программного комплекса «ТЕРРА» для ряда композиций ВЭМ и определены исходные данные для выбора базовых составов ВЭМ. На основе анализа результатов термодинамических расчетов проведен выбор компонентных составов металлизированных ВЭМ, содержащих порошки алюминия разной дисперсности, бора и боридов алюминия для экспериментального исследования процессов зажигания, стационарного и нестационарного горения в соответствии с планом работ по проекту. Для выбранных базовых композиций ВЭМ изготовлено девять опытных партий образцов (всего более 200 образцов).

В исследованных образцах ВЭМ в качестве углеводородного горючего-связующего (ГСВ) использовался СКДМ-80 – раствор дивинилового каучука в трансформаторном масле в соотношении 20/80. Окислителем служил бидисперсный перхлорат аммония (ПХА), состоящий из 60% крупнодисперсной фракции с диаметром частиц $165 \div 315$ мкм и 40% мелкодисперсной фракции с диаметром частиц менее 50 мкм. Исследуемые композиции включали порошки металлов – нанопорошок алюминия марки Alex, штатные порошки алюминия марок АСД-4 и АСД-6, порошки аморфного бора марки Б-99А, диборида алюминия AlB_2 и додекаборида алюминия AlB_{12} . В каждую из композиций ВЭМ вводилось 0.5 % сверх 100% отвердителя марки ТОН-2.

3. Проведен гранулометрический анализ (на Малверн 3600Е) исходных металлических горючих (АСД-4, АСД-6, додекаборид алюминия, диборид алюминия, бор аморфный, Alex. Режим: диапазон 0.5–118 мкм, несущая жидкость – вода, ультразвук 30 секунд до измерения, механическая мешалка включена. Установлено, что порошок Alex слишком мелкий для применяемого метода анализа и не может быть корректно измерен. Для остальных металлических горючих измерения

корректны, обработаны и соответствуют ожидаемым. Получены РЭМ изображения исходных металлических горючих.

4. Разработан новый метод исследования характеристик зажигания образцов ВЭМ лучистым тепловым потоком, основанный на зажигании цилиндрического образца, вращающегося вокруг своей оси. Данный метод позволяет обеспечить равномерное распределение плотности потока излучения по поверхности образца. Разработана, изготовлена и отлажена экспериментальная установка для реализации данного метода.

Проведены экспериментальные исследования характеристик зажигания образцов металлизированных ВЭМ при их нагреве лучистым тепловым потоком (СО₂-лазер). В ВЭМ в качестве углеводородного горючего-связующего (ГСВ) использовался СКДМ-80 – раствор дивинилового каучука в трансформаторном масле в соотношении 20/80. Окислителем служил бидисперсный перхлорат аммония (ПХА), состоящий из 60% крупнодисперсной фракции с диаметром частиц 165÷315 мкм и 40% мелкодисперсной фракции с диаметром частиц менее 50 мкм. Исследуемые композиции включали порошки металлов – нанопорошок алюминия марки Alex, штатные порошки алюминия марок АСД-4 и АСД-6, порошки аморфного бора марки Б-99А, диборида алюминия AlB₂ и додекаборида алюминия AlB₁₂. В каждую из композиций ВЭМ вводилось 0.5 % сверх 100% отвердителя марки ТОН-2. Проведены измерения времени задержки зажигания t_{ign} (мс) исследованных образцов ВЭМ в зависимости от плотности теплового потока q (Вт/см²) осредненные по трем дублирующим экспериментам. По результатам проведенных экспериментов методом наименьших квадратов были получены аппроксимационные зависимости. Получены значения констант формальной кинетики E , Q_z , рассчитанные по предложенной методике.

Проведены серии экспериментов по зажиганию интегральным потоком излучения (установка «Уран-1») борсодержащих топливных композиций и по анализу процесса шлакообразования при горении этих композиций. Оценка шлакообразования при горении смесевой композиции проводилась по методу осаждения конденсированных продуктов горения на стальной пластине, расположенной над горящим образцом.

5. Из анализа результатов обзора современных и классических методов измерения нестационарной скорости горения ВЭМ в период переходного процесса показано, что наиболее оптимальным является метод, основанный на постановке и решении обратной задачи внутренней баллистики. Разработаны алгоритм и программа расчета для реализации ОЗВБ-метода – определения значений скорости горения ВЭМ на каждом временном интервале по измеренной в эксперименте зависимости внутрикамерного давления от времени. Основным преимуществом ОЗВБ – метода является возможность измерения осредненной по поверхности образца нестационарной скорости горения, которая характеризует интегральные внутриваллистические характеристики твердотопливного ракетного двигателя.

Разработана и отлажена экспериментальная установка для определения нестационарной скорости горения ВЭМ при резком сбросе давления в камере сгорания за счет вскрытия дополнительного сопла. Отработка метода измерения нестационарной скорости горения при сбросе давления проводилась для гомогенного ВЭМ – пороха Н с катализатором (1% диоксида свинца). Эксперименты проводились при постоянной площади поверхности горения; начальное давление изменялось в диапазоне $p_0 = (2.5 \div 11)$ МПа. Результаты отработки показали, что динамика переходного процесса и характер изменения нестационарной скорости горения определяются максимальной скоростью сброса давления.

6. Проведена доработка модели горения смесового твердого топлива на основе ПХА и инертного связующего с добавлением порошка алюминия. Проведен расчет скорости горения смесового твердого топлива на основе ПХА и инертного связующего с добавлением порошка алюминия, в том числе нанодисперсного. С использованием данных о распределении КППГ (конденсированных продуктов сгорания) по размерам, полученных методом отбора в эксперименте, восстановлено распределение частиц алюминия на выходе с поверхности горения и проведен расчет скорости горения в диапазоне давлений 30-100 атм. Для проведенных расчетов показатель степени в законе горения $n = 0.52$. Что соответствует данным, опубликованным в научной литературе.

7. Разработаны новые физико-математическая модель горения металлизированного смесового твердого топлива (МСТТ), в которой над поверхностью твердого топлива учитываются газодинамические процессы в двухфазной, двухскоростной, двухтемпературной теплопроводной среде в полной постановке. Для моделирования используется модель Р.И. Нигматулина. Модель учитывает межфазный обмен импульсом и учет пространственного распределения давления над поверхностью давления. Метод решения системы уравнений математической модели основан на методах распада произвольного разрыва С.К. Годунова и распада разрыва в среде, лишенной собственного давления А.Н. Крайко. Для определения потоков массы, импульса и энергии газа используется решение задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах состояния газа в соседних ячейках. Для определения потоков массы, импульса и энергии для частиц используется решение задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах состояния частиц в соседних ячейках по методу А.Н. Крайко (используется алгоритм распада произвольного разрыва в среде, лишенной собственного давления). Модель реализована в сопряженной постановке и с расчетом величины массоприхода с поверхности горения твердого топлива, основанной на модели Германса. Выполнено параметрическое исследование зависимости линейной скорости горения металлизированного смесового твердого топлива с содержанием частиц алюминия – 20% от давления газа в окружающей среде и размера частиц алюминия. Характер зависимости скорости горения МСТТ от давления и дисперсности частиц алюминия соответствует представленным в научной литературе.

8. Произведен отбор и анализ конденсированных продуктов сгорания образцов ВЭМ порошка алюминия АСД-4 – 15,7%масс, порошка алюминия АСД-6 – 15,7%масс, порошка додекаборида алюминия AlB12 – 15,7%масс

Получены значения скорости горения образцов ВЭМ при давлении 4.5 МПа.

Установлено, что скорость горения образцов ВЭМ с добавлением додекаборида на 28% выше, чем у образцов ВЭМ с добавлением порошка алюминия АСД-4. А разность скоростей горения образцов ВЭМ с добавлением додекаборида алюминия и порошка алюминия АСД-6 отличается не более, чем на 5%.

Получены совокупные гистограммы плотности распределения относительной массы частиц КПП по размерам во всем диапазоне размеров.

Установлено, что:

- Все топлива могут быть отнесены к слабо агломерирующим, поскольку масса и размер агломератов малы.

- Явно выраженный «провал» между мелкими оксидными частицами и крупными агломератами отсутствует.

- Распределения для образцов ВЭМ существенно отличаются в области оксидных частиц, размером мельче 25 мкм.

- Топливо с додекаборидом имеет заметно большую массу крупных частиц (> 25 мкм), чем алюминизированные топлива. При этом отмечено, что часть массы крупных частиц в случае алюминизированных ВЭМ представлена чешуйками, а для образцов ВЭМ с додекаборидом и чешуйками и конгломератами.

- Распределение для ВЭМ с АСД-6 отличается от распределения для ВЭМ с АСД-4 большей массой частиц в районе 10–20 мкм. Средний размер частиц у образцов ВЭМ с АСД-4 больше, чем у образцов ВЭМ с АСД-6.

- Вычислены массовые и размерные параметры для всех частиц, для оксидных частиц и агломератов КПП.