

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2023 г. по 30.06.2024 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. Проведены эксперименты с модельными топливами, содержащими 15.7 % металлического горючего, перхлорат аммония и активное связующее МПВТ-АСП при уровнях давления (около 8 МПа). Гашение частиц дисперсной фазы проводили вблизи поверхности горения в спутном потоке аргона. В качестве металлического горючего использованы микроразмерные порошки алюминия, бора, диборида алюминия, додекаборида алюминия и их механические смеси. Для порошков горючих определен гранулометрический состав и содержание активного (неокисленного) металла цериметрическим методом аналитической химии. Представлены результаты определения скорости горения и характеристики продуктов горения – гранулометрический состав, морфологический состав, неполнота сгорания металла. Полученные данные лягут основу для верификации теоретических моделей горения металлизированных топлив:

1.1. Получена информация о константах законов горения образцов в форме степенной зависимости вида $r = Br^n$. Изучение влияния природы металлического горючего и горючего-связующего на показатель степени в законе скорости горения.

Анализ данных по скорости горения показывает следующее:

– Среди исследованных топлив наименьший показатель степени в законе скорости горения $n = 0.31$ имеет топливо с AlB12. Среди алюминизированных топлив наименьший показатель $n = 0.51$ имеет топливо с АСД-6, а наибольший $n = 0.67$ топливо с Alex. Топливо с В имеет показатель $n = 0.53$.

– Топлива с комбинированным металлическим горючим, включающим как алюминий, так и бор, занимают промежуточное положение по величине показателя: $n = 0.43$ для топлива со смесью Alex + В и $n = 0.47$ для топлива с AlB12.

– Безметалльное топливо имеет величину показателя $n = 0.44$.

1.2. Исследованы характеристики конденсированных продуктов горения (КПГ) ВЭМ для уровней давлений (2, 4, 8 МПа), полученных методом отбора. Получены данные о их дисперсности, функции распределения массы частиц по размерам и их морфологии.

1.3. Методом обратного цериметрического титрования проведен химический анализ КПГ. Получены данные о неполноте сгорания КПГ и эффективности энерговыделения металлического горючего в составе топлива. Установлено влияние дисперсности и массовой доли порошка алюминия в составе исследованных топливных композиций на неполноту сгорания КПГ.

1.4. Проведен сравнительный анализ влияния активного горючего связующего на характеристики КПГ и скорость горения. Показано, что замена пассивного

связующего на активное существенно повышает скорость горения, от двух (для топлив с добавками порошка алюминия) до 4 раз (для бор содержащих топлив). При этом для топлив на активном связующем показатель степени в законе скорости горения снижается по сравнению с аналогичным составом на пассивном горючем-связующем.

2. Проведены эксперименты по сбросу давления в бомбе постоянного объема образцов ВЭМ на активном горючем-связующем, включающих в состав порошки металлов – нанопорошок алюминия марки Alex, штатный порошки алюминия марок АСД-4 и АСД-6, порошки аморфного бора марки Б-99А, диборида алюминия AlB_2 и додекаборида алюминия AlB_{12} .

2.1. Показано, что добавка порошков металлов в состав ВЭМ стабилизирует характеристики переходных процессов при сбросе давления, повышая его устойчивость. Характер влияния аналогичен влиянию добавок порошков металлов в составы ВЭМ на инертном горючем-связующем, но выражен более ярко, обеспечивая при аналогичных скоростях сброса давления (150 МПа/с) фактически квазистационарную скорость горения.

2.2. Методом решения обратной задачи внутренней баллистики определена нестационарная скорость горения образцов ВЭМ.

2.3. Проведен сравнительный анализ влияния активного горючего связующего на характеристики переходных процессов, в сравнении с результатами, полученными на инертном горючем-связующем показывает, что образцы ВЭМ с добавками порошков металлов на активном связующем более стабильны при аналогичных скоростях и глубинах сбросов давления. Безметалльные составы на активном горючем связующем, напротив характеризуются более низкой устойчивостью горения.

2.4. На основе физико-математической модели горения металлизированных (Al, B) ВЭМ в полной газодинамической постановке (на основе подхода Р.И. Нигматулина) с использованием полученных данных об изменении давления в камере сгорания от времени решены задачи расчета нестационарной скорости горения по известному закону изменения давления.

2.5. Сравнение полученных результатов расчетов, полученных ОЗВБ методом и с использованием разработанной модели физико-математической модели горения металлизированных (Al, B) ВЭМ в полной газодинамической постановке показывает удовлетворительное согласие.

Отдельно отметим, что все исследованные образцы ВЭМ на активно-горючем связующем характеризуются высокой температурой продуктов реакции и большим количеством шлаков в продуктах сгорания. Во всех экспериментах с металлизированными образцами наблюдалось существенное забивание критического сечения основного и дополнительного сопел конденсированными продуктами. Для Образцов с добавлением порошка бора и диборида алюминия наблюдалось также прожигание сопла.

5. Проведена доработка физико-математических моделей горения металлизированного смесового твердого топлива (МСТТ) с использованием экспериментальных данных о дисперсности и полноте сгорания конденсированных продуктов горения (КПГ) смесового твердого топлива на основе перхлората аммония и инертного/активного связующего с добавками порошков различных металлов (алюминий, бор). Проведено уточнение и валидация моделей на основе полученных

экспериментальных данных о дисперсности и полноте сгорания КПГ, а также измеренной скорости горения образцов при различных давлениях.

Разработана новая «упрощенная» модель горения. На поверхности топлива ставятся граничные условия сохранения потоков энергии и массы, под поверхностью твердого топлива записываются уравнения переноса тепла и разложения конденсированной фазы, над поверхностью твердого топлива записывается односкоростная, однотемпературная модель реагирующего течения продуктов его разложения и газификации над поверхностью твердого топлива. Давление не зависит от координаты, но может зависеть от времени. Эффективность тепловыделения в газовой фазе определяется с использованием экспериментальных данных из п.1.3. эффективности энерговыделения металлического горючего в составе топлива при горении. На базе разработанных моделей проведены расчеты скорости горения модельных образцов ВЭМ в диапазоне давлений 2–9 МПа. Полученные результаты показали хорошее согласие с данными экспериментальных измерений. Наилучшее согласие получено для борсодержащих ВЭМ.

6. Определены характеристики зажигания изготовленных составов на активном горючем-связующем, определено время задержки зажигания образцов металлизированных ВЭМ при их нагреве лучистым тепловым потоком, получены значения констант формальной кинетики (энергия активации, предэкспонента).

В результате проведенных измерений установлено влияние типа ГСВ (активное и инертное) на снижение времени задержки зажигания ВЭМ с микропорошком алюминия, которое более существенно при низких значениях плотности теплового излучения ($q < 150 \text{ Вт/см}^2$). В случае полной замены Alex на АСД-6 алюминия в ВЭМ снижение времени задержки зажигания более существенно при $q < 150 \text{ Вт/см}^2$ (снижение до 4 раз). Влияние ультрадисперсного порошка алюминия на снижение времени задержки воспламенения в составе смесевых композиций на активном горючем-связующем МПВТ ЛД более существенно при низких значениях интенсивности теплового излучения ($q < 150 \text{ Вт/см}^2$).

Анализ полученных результатов показал, что полная замена алюминия марки АСД-4 на алюминия Alex в составе ВЭМ приводит к снижению времени задержки зажигания в 1.2–1.7 раза во всем рассматриваемом диапазоне плотности теплового потока $q = 60\text{--}200 \text{ Вт/см}^2$. При полной замене алюминия АСД-4 на аморфного бора в составе ВЭМ времена задержки зажигания снижаются в 1.3–1.4 раза. Частичная замена алюминия АСД-4 и Alex на аморфный бор в составах ВЭМ снижает t_{ign} в 1.2 и 1.3–1.6 раза, соответственно.

Возможность практического использования результатов проекта:

Полученные в рамках выполнения данного исследования результаты позволят существенно сократить объем финансовых затрат на этапе проектирования новых типов твердых топлив для ракетных двигательных установок за счет сокращения количества дорогостоящих экспериментов, а также послужить основой для развития и валидации моделей горения металлизированных твердых топлив.