

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2022 г. по 30.06.2023 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. Изготовлена партия образцов ВЭМ. В качестве активного горючего-связующего (ГСВ) - метилполивинил-тетразол, пластифицированный смесевым нитроэфирно-нитроаминным пластификатором. Окислитель - 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. Добавки металлических горючих (МГ) – 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, а также их комбинации. Массовая доля добавок МГ варьировалась в диапазоне 1 - 15.7 % (всего более 300 ед.).

2. Проведены термодинамические расчеты с применением программного комплекса «ТЕРРА» (Белов Г.В., Трусков Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. - М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. 96 с).

3. Определены геометрические размеры изготовленных образцов, их масса, плотность и пористость.

4. Определены теплофизические характеристики образцов ВЭМ (теплопроводность, удельная теплоемкость). Исследование температурной зависимости теплоемкости исследуемых образцов ВЭМ на установке ИТ-с-400. Нагревание образцов ВЭМ в диапазоне температур $(25\div 150)$ °С с шагом в 25 °С. Исследование температурной зависимости теплопроводности исследуемых образцов ВЭМ на установке ИТ-л-400 в диапазоне температур $(25\div 150)$ °С с шагом в 25 °С.

4. Проведено исследование процесса горения образцов ВЭМ при атмосферном давлении в среде воздуха. Выполнена регистрация времени горения и параметров факела пламени (цвет, форма, высота, светимость).

Анализ полученных данных показывает, что яркость свечения (А) для борсодержащих составов (на активном и неактивном горючем-связующем) существенно превышает значения, полученные для составов с алюминием (на активном и неактивном горючем-связующем) при одинаковом содержании горючего в топливе 15.7 масс. %. Схожая ситуация наблюдается и для составов с 7.85 и 1 масс. % металлов. Для образцов, содержащих 1 масс. % Me, значения параметра А незначительно отличаются от интенсивности для безметалльного состава. Установлено, что наибольший эффект повышения скорости горения (относительно безметалльного топлива) получен для четырех топлив 10.7 % Alex + 5% В (инертное

ГСВ), 15.7 % АСД-4 (инертное ГСВ), 15.7 % В (активное ГСВ), 5.7 % Alex+10 % В (активное ГСВ).

5. Исследование характеристик конденсированных продуктов горения (КПГ) ВЭМ для трех уровней давления (2, 4, 8 Мпа). Выполнен анализ дисперсности, функции распределения массы частиц по размерам, морфологии частиц КПГ.

Предварительный анализ данных по скорости горения показывает следующее:

– Среди исследованных топлив с активным горючим связующим наименьший показатель степени в законе скорости горения имеют топлива с В ($n = 0.30$) и с А1В12 ($n = 0.31$). Из числа алюминизированных топлив наименьший показатель ($n = 0.40$) имеет топливо с Alex.

– Следующим в ряду по возрастанию n идет безметалльное топливо ($n = 0.43$), и у него величина показателя практически совпадает с ($n = 0.44$) для топлива со смесью (Alex + В).

– Затем идет топливо с АСД-6 ($n = 0.51$).

– Завершает топливо с А1В12 с ($n = 1.56$). Однако, большие значения скорости горения этого топлива могут быть обусловлены нарушением послойного горения, или конвективным горением.

6. Проведены численные и натурные эксперименты по сбросу давления с одного уровня начального давления для изготовленных образцов ВЭМ. Получение данных измерений величины давления в камере сгорания. Анализ влияния природы и массовой доли металлического горючего в составе ВЭМ на характеристики переходных процессов.

Получены результаты экспериментального исследования нестационарной скорости горения высокоэнергетических материалов, содержащих добавки порошков металлов, при сбросе давления со скоростью от 140 до 160 МПа/с (в виде зависимости давления в камере сгорания от времени). Для определения нестационарной скорости горения использовался метод, основанный на решении обратной задачи внутренней баллистики. Исследования проведены для высокоэнергетических материалов, включающих энергетические добавки в виде порошков металлов – алюминия марок АСД-6, Alex, а также диборида и додекаборида алюминия. Анализ результатов исследования показал, что нестационарная скорость горения ВЭМ при резком сбросе давления носит слабый колебательный характер с частотой приблизительно равной собственной частоте камеры сгорания и зависит от типа энергетической добавки. Показано, что замена инертного ГСВ на активное ГСВ повышает стабильность переходных процессов при сбросе давления, приближая значения мгновенной скорости горения к квазистационарной величине.

Проведено численное моделирование горения МСТТ с добавками порошка алюминия при сбросе давления. Физико-химические процессы в твердой фазе определяются уравнением теплопроводности в конденсированной фазе и уравнением разложения окислителя. Процессы в газовой фазе описываются на основе подходов динамики многофазных реагирующих сред Р.И. Нигматулина. Функция, определяющая закон изменения давления во времени при сбросе давления была получена путем аппроксимации экспериментальных измерений. Показано, что

предложенная модель с достаточной точностью описывает характеристики переходных процессов при сбросе давления.

7. Разработана физико-математическая модель горения металлизированных ВЭМ с добавками различного металлического горючего в изобарической и полной газодинамической постановке (на основе подхода Р.И. Нигматулина).

Представлена физико-математическая модель и результаты численного моделирования горения металлизированного твердого топлива. Физико-химические процессы в твердой фазе определяются уравнением теплопроводности в конденсированной фазе и уравнением разложения окислителя. Процессы в газовой фазе описываются на основе подходов динамики многофазных реагирующих сред Р.И. Нигматулина. На поверхности твердого топлива ставятся условия сохранения потоков массы компонентов и энергии. Распределение частиц алюминия, выходящих с поверхности твердого топлива при горении, задается из экспериментальных измерений, проведенных по методике отбора КПП. Представлены результаты численного моделирования горения металлизированного смесового твердого топлива с добавлением порошка АСД-4 и смеси порошков АСД-4 и Alex. Полученные расчетные значения скорости горения совпадают с экспериментальными значениями в интервале давлений от 2 до 9 МПа с удовлетворительной точностью.

Проведенное численное исследование по модели подтвердило, что основное влияние на величину скорости горения металлизированного смесового твердого топлива оказывает дисперсность частиц алюминия, вылетающих с поверхности горения.

Построена физико-математическая модель окисления и горения порошка бора в составе газозвеси, использующая допущения PSU-модели, выполнены параметрические исследования закономерностей окисления и горения частиц бора в составе газозвеси. Результаты расчета показали сильную зависимость расчетной скорости горения газозвеси порошка бора 1) от значения коэффициента в законе диффузии; 2) от толщины оксидной пленки в начальный момент времени. Показано, что чем меньше начальная толщина оксида на поверхности частицы, тем выше скорость распространения пламени в газозвеси.

Указанные особенности модели дают отличие в расчетной скорости горения газозвеси порошка бора и в характере зависимости видимой и нормальной скорости горения газозвеси по сравнению с параметрическим исследованием с использованием модели Кинга. Указанные особенности требуют более тщательной проработки физико-математической модели.