

Сведения о ходе выполнения проекта
**«Разработка новых высокоэнергетических материалов (ВЭМ) и
технических решений для перспективных схем гибридных двигателей
космического назначения»**

Руководитель д-р физ.-мат. наук Жуков А.С.

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 05 июня 2014 года 14.578.21.0034 с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе № 2 в период с 01 января 2015 г. по 30 июня 2015 г. выполнялись следующие работы:

- 1 Разработка математической модели, методики и программного обеспечения расчета внутрикамерных и энерготяговых параметров ГРДТТ.
- 2 Верификация методики расчета процессов в ГРДТТ по разработанным тестовым примерам.
- 3 Теоретическая оценка оптимальных вариантов технических решений для зарядов ГРДТТ.
- 4 Разработка физико-математической модели и программного обеспечения эволюции капельной среды прекурсора при ее движении в камере плазмохимического реактора.
- 5 Теоретическая оценка необходимых параметров работы плазмохимического реактора для получения требуемых по размеру частиц плотной структуры.
- 6 Разработка основных технических решений по методам получения наноразмерных порошков металлов и их соединений.
7. Выполнение работ по модернизации экспериментальных стендов исследования образцов ВЭМ и зарядов ГРДТТ, экспериментального стенда для исследований нанокерамических эжекционных форсунок.
- 8 Сопровождение работ по проекту:
 - 8.1 Приобретение оборудования, материалов и комплектующих изделий для экспериментальных стендов в ТГУ (в соответствии с планом мероприятий по дооснащению стендового хозяйства).
 - 8.2 Приобретение оборудования, материалов и комплектующих изделий для изготовления и испытаний образцов ВЭМ и ГРДТТ в ООО НПЦ «ХТ».

При этом были получены следующие результаты:

1. Базовая математическая модель процессов газодинамики и тепломассобмена в камере сгорания ГРДТТ, обеспечивающая анализ экспериментальных данных по идентификации параметров рабочих процессов и характеристик элементной и материальной базы двигателя. Модель позволяет физически адекватно прогнозировать параметры рабочих процессов в гибридных твердотопливных двигателях с учетом основных особенностей их функционирования. Изложены и обоснованы все зависимости, необходимые для расчета параметров газодинамики и тепломассобмена в камере сгорания ГРДТТ, даны схемы и алгоритмы конструирования граничных условий при расчете параметров потока на поверхности контакта газодинамической (пространственной) и нульмерной (термодинамической, осредненной) подобластями решения.

В частности,

- учтена зависимость скорости газификации твердого горючего от, главным образом, массовой плотности тока окислителя, "омывающего" поверхность горения;
- сформулированы балансные соотношения газового потока с учетом потребления части окислителя для обеспечения процесса горения топлива при соответствующей потере энтальпии и количества движения газа;
- учтены зависимости теплофизических характеристик газовой смеси от условий сгорания твердого топлива, а также их влияние на вязкость и связанные с ней параметры силового и энергетического взаимодействия рабочего тела с элементами конструкции двигателя.

2. Представлена аналитическая оценка характеристик двигателя для верификации разработанной физико-математической модели процессов в ГРДТТ на квазистационарном режиме течения при неизменной проходной площади для постоянного периметра рабочей поверхности цилиндрического канала заряда. Выполненный параметрический сравнительный анализ расчетных и аналитических данных показал более чем удовлетворительную сопоставимость результатов численного счета и аналитической оценки – различие определяющих параметров не превышает 3.5 % для выбранной конфигурации двигателя.

3. Проведена теоретическая оценка вариантов технических решений для зарядов ГРДТТ – сформулирован критерий выбора оптимальности конструкции двигателя, получены соотношения, позволяющие достигнуть требуемого уровня давления в камере сгорания лабораторного двигателя. Кроме того – представлено новое оригинальное решение, обеспечивающее достижение требуемого технического результата – равномерности и высокой полноты сгорания твердотопливного заряда, и, соответственно, высокого значения удельной тяги двигателя.

4. Сформулирована базовая математическая модель процессов тепломассобмена в рабочем объеме химического реактора для оптимизации технологии получения нанокomпонентов ВЭМ (микро и наноразмерных порошков металлов) и керамических порошков (для изготовления нанокерамических эжекционных форсунок). Модель для оценки эволюции капельной среды инжестируемого раствора прекурсора и морфологии частиц основана на анализе тепловых и диффузионных процессов в капле.

5. Проведен теоретический анализ рассматриваемой модели морфологии частиц при плазмохимическом синтезе керамических порошков из растворов солей металлов, который, показал, что единственным безразмерным параметром, определяющим структуру (морфологию) частицы, является отношение характерных времен диффузии и испарения K . При значениях $K < K_*$ диффузионные процессы идут быстрее процессов испарения, и образуются сплошные частицы, а при $K > K_*$ – пустотелые сферические частицы.

В случае образования пустотелых частиц процесс кристаллизации соли происходит в две стадии – первичное осаждение с образованием "первоначального" слоя и последующее осаждение "оставшейся" соли с внутренней поверхности частицы при "утолщении" образованного ранее слоя. Соотношение предыдущего и последующего наслоений определяется значением параметра K .

При получении керамических порошков с заданной морфологией основными режимными параметрами процесса контролируемого плазмохимического синтеза являются начальная концентрация соли в прекурсор (растворимость соли), перепад температур между газообразным теплоносителем и прекурсором, а также разность между значениями концентрации критического перенасыщения $C_{кр}$ и равновесного насыщения C_* .

6. Определены приоритетные методы получения наноразмерных порошков металлов и их соединений. Обоснован выбор приоритетных методов, в качестве которых предложены плазмохимический метод, метод электровзрыва проводников и СВЧ метод. Отдельно по каждому из методов изучены основные принципы реализации процессов, обеспечивающих работу технологических устройств, разработаны основные технические решения и требования к техническим характеристикам отдельных узлов и агрегатов.

7. Представлены результаты выполнения работ по модернизации экспериментальных стендов исследования образцов ВЭМ и зарядов ГРДТТ, экспериментального стенда для исследований нанокерамических эжекционных форсунок. В частности:

1. Модернизирована экспериментальная установка для исследования горения образцов ВЭМ в условиях обдува высокоскоростным газовым потоком при

скоростях до 2 М и температурах до 2500 К. В установке регулируются расход газа, его давление и температура, а также содержание кислорода. Скорость горения образцов ВЭМ рассчитывается как при визуализации процесса, так и путем обмера образцов после эксперимента, в том числе и при принудительном гашении.

2. Модернизирован пневмогидравлический стенд с оптической системой регистрации дисперсности распыла. Стенд позволяет по результатам измерений рассеяния лазерного излучения факелом распыла форсунки рассчитать функцию распределения капель по размерам и определить характерные средние диаметры капель для оценки эффективности распыливания.

Таким образом, все пункты план графика исследований по 2-ому этапу проекта выполнены. По результатам выполненных работ можно указать наиболее важные моменты для последующих исследований – в "теоретической" части необходим дополнительный анализ существующих моделей скорости горения в ГРДТТ и его сопоставление со специальным изучением физически адекватного лабораторного эксперимента.