

## **Сведения о ходе выполнения проекта № 14.577.21.0157**

на тему: «Разработка активной бортовой системы спуска отработанных ступеней ракет космического назначения с маршевыми жидкостными ракетными двигателями на основе использования энергетических ресурсов, заключённых в невырабатываемых остатках топлива в баках ступеней».

Уникальный идентификатор RFMEFI57714X0157

Этап № 5 (заключительный)

**Целью** прикладных научных исследований на данном этапе - является обобщение и оценка результатов проведенных исследований по теме в соответствии с ТЗ на проведение пятого этапа исследований (в соответствии с пунктами 2.1 (д, з, и), 2.8, 3.7, 3.13 – 3.16 и 4.2.7 технического задания на выполнение ПНИЭР).

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 28 ноября 2014 г. № 14.577.21.0157 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 № 5 (заключительном) в период с 1 июля по 31 декабря 2016 г. выполнялись следующие работы:

1. Обработка результатов экспериментальных исследований.
2. Проведение обоснования достоверности полученных результатов на основе сравнения с известными модельными результатами.
3. Разработка и определение требования к проектно-конструкторским параметрам для систем, входящих в АБСС отработанных ступеней РКН, в том числе: системы газификации (система получения ТН и газификации) и реализации газифицированных продуктов (газореактивная система и система ввода продуктов газификации в погранслой).
4. Обобщение и оценка полученных в ходе ПНИЭР результатов, в том числе, оценка эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем, оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей ПНИЭР.
5. Разработка предложений по использованию полученных результатов ПНИЭР на предприятии Индустриального партнера с учетом его технологических возможностей и особенностей.
6. Разработка проекта технического задания на проведение ОКР по теме «Разработка опытного образца системы газификации активной бортовой системы спуска отработанных ступеней ракет космического назначения с маршевыми жидкостными ракетными двигателями».

7. Разработка плана создания экспериментальной базы для проведения наземных экспериментов по бортовым системам, входящим в АБСС, с привлечением материальной базы Индивидуального партнера.

8. Проведение технико-экономического анализа разработки АБСС отработанных ступеней РКН на изделиях Индустриального партнера.

Состав выполненных работ удовлетворяет условиям Соглашения о предоставлении субсидии, в том числе Техническому заданию и Плану-графику исполнения обязательств.

**На основании проведённых исследований получены следующие основные результаты.**

На основании проведённых исследований получены следующие основные результаты, которые представлены в промежуточном отчете о ПНИЭР.

Проведена обработка результатов экспериментальных исследований полученных на модернизированных экспериментальных стендах (п. 4.1, 5.1 план-графики): по синтезу эффективных ТН на основе твердотопливных газогенерирующих составов; процессам газификации модельных жидкостей с использованием синтезированных ТН; процессам утилизации продуктов газификации, в том числе, на основе газореактивной системы; процессу ввода продуктов газификации в погранслой. Выполнено обобщение и анализ результатов предыдущих этапов, в том числе оценка достоверности полученных результатов на основе нескольких методических подходов и в сравнительном аспекте с современным научно-техническим уровнем исследований (п. 5.4 план-графики):

1. Согласно термодинамическим расчетам продукты реакции смесового состава при давлении 60 атм содержат в основном  $H_2O$ ,  $HCl$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$  и  $CO$ , а продукты реакции нитроглицеринового пороха -  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  и  $H_2$ . Дополнительные расчеты показали, что реакции между финальными продуктами реагирования газогенерирующих составов и парами керосина приводят к образованию больших количеств метана и атомарного углерода. По приближенным оценкам превращение части испаренного керосина в метан и углерод мало повлияет на теплотворную способность смеси, предназначенной для сжигания в парах кислорода во вспомогательном ракетном двигателе. При обработке данных по зажиганию лучистым потоком получены значения глобальных кинетических параметров экзотермической

реакции в конденсированной фазе нитроглицеринового пороха: энергия активации которого равна 19470 кал/моль и произведение теплового эффекта экзотермической реакции на предэкспонент  $Q_{ko}=1.769 \times 10^{11}$  кал/г $\times$ с. Определить кинетические параметры экзотермической реакции в конденсированной фазе смесевое топлива ПХП/МПВТ-АСП (80/20) с помощью представленного подхода не удастся, и это требует разработки адекватной модели зажигания систем такого типа. На основе анализа данных термодинамических расчетов реагирования продуктов горения газогенерирующих составов с парами керосина предпочтительно использование нитроглицеринового пороха в качестве газогенерирующего состава, поскольку в продуктах горения пороха не содержится хлорная кислота и при взаимодействии с керосином образуется максимальное количество теплотворных продуктов (атомарный углерод и метан), способных производить тепло при последующих реакциях с кислородом. Из двух анализируемых композиций на основе ПХА предпочтение можно отдать составу с НТРВ в качестве связующего, как производящему больше атомарного углерода и метана по сравнению с составом, содержащим МПВТ-АСП.

2. Проведено обобщение результатов экспериментальных исследований на модернизированных экспериментальных стендах (ЭМУ и ЭММУ) при различных параметрах: давления 0.1 – 2 атм. , температуры 300 - 400 °К, массовым секундным расходам 100 – 400 л/мин. Выявлены зависимости коэффициентов тепло-и массообмена и теплоотдачи при газификации жидкости. На основе измеренных параметров, таких как температуры стенок, жидкости, время газификации и площадь теплообмена рассчитывались коэффициенты теплоотдачи «жидкость-стенка», «теплоноситель-жидкость», а также общее количество теплоты, затраченное на газификацию жидкости. Верификация процесса экспериментальных исследований с использованием ЭМУ осуществлена на основе сравнения известных результатов по газификации жидкостей, как без акустического воздействия, так и с его воздействием в условиях земного поля тяготения.

3. Результаты расчета изменения скорости истечения продуктов газификации без учета химических реакций показали, что скорость истечения максимальна в начальный момент процесса. Высокое значение скорости газа в начале истечения связано с низкой молекулярной массой газа (массовая доля гелия составляет 0.83). Затем, по мере развития процесса, скорость истечения уменьшается, хотя температура смеси газов растет. Из анализа результатов следует, что при отсутствии химических реакций скорость газа в выходном сечении сопла без расширения не превышает 1000 м/с. Для

повышения тяговых характеристик двигателя при сбросе продуктов газификации необходимо увеличивать температуру газа за счет горения смеси. При наличии химических реакций (горении смеси газов) скорость газа на выходе сопла будет расти, поскольку температура продуктов сгорания будет увеличиваться, а значения газовой постоянной и показателя адиабаты будут уменьшаться. Путем сравнения экспериментальных и расчетных данных по тяге модельного двигателя доказана достоверность результатов исследований.

4. Для изучения взаимодействия потоков при сбросе газов в пограничный слой обтекаемого объекта использовалась модельная аэродинамическая установка, позволяющая обдувать объект потоками воздуха со скоростью  $M = (2 \div 7)$ . Установка отлажена до высокой степени надежности (по повторяемости результатов опытов) и путем сравнения с известными данными других авторов дает достоверные результаты. Для изучения структуры вдува в пограничный слой разработан и изготовлен специальный блок-модуль, осуществляющий процесс вдува. Метод спектральной прозрачности при лазерном сканировании факела распыла позволяет получить пространственное распределение концентрации капель. Результаты распределения концентрации капель для соплового блока показали, что радиальное распределение носит монотонный характер с максимумом на оси симметрии факела распыла. Результаты теневых высокоскоростных видеосъемок записаны в виде видеофильма, и в настоящем отчете представлены отдельными сериями кадров. Сформулированы предложения для повышения эффективности и углубления дальнейших исследований.

5. Определены и разработаны требования к проектно-конструкторским параметрам для систем, входящих в АБСС отработанных ступеней РКН (системы получения ТН и газификации, газореактивной системы и системы ввода продуктов газификации в погранслой) (п. 5.3 план-графика):

- Проведена постановка задачи системы газификации жидких остатков компонентов ракетного топлива. Разработаны схема системы газификации в зависимости от типа компонентов ракетного топлива.

- Определен состав системы газификации, основанный на использовании газогенерирующих систем, отличающихся от известных (обеспечение наддува баков/ максимальная потенциальная энергия газа, обеспечение работы турбонасосного агрегата/ максимальная кинетическая энергия газа тем) тем, что получаемый газ должен обладать максимальной тепловой энергией и заданным химическим составом. Определены требования к параметрам ТН.

- Проведена постановка задачи расчётно-экспериментальной методики определения проектно-конструкторских параметров системы газификации, в том числе: масса топлива для получения теплоносителя, температура и массовый-секундный расход теплоносителя.

В отчете о ПНИЭР так же представлены результаты работ, выполненных за счет софинансирования (п. 5.5 - 5.8 план-графика):

- Подготовлены предложения по использованию полученных результатов ПНИЭР на предприятии Индустриального партнера с учетом его технологических возможностей и особенностей;

- Подготовлен проект технического задания на ОКР по теме «Разработка опытного образца системы газификации активной бортовой системы спуска отработанных ступеней ракет космического назначения с маршевыми ракетными двигателями» (Приложение А отчета);

- Подготовлен план создания экспериментальной базы для проведения наземных экспериментов по бортовым системам, входящим в АБСС, с привлечением материальной базы Индивидуального партнера (Приложение В отчета);

- Подготовлен технико-экономический анализ разработки АБСС отработанных ступеней РКН на изделиях Индустриального партнера (Приложение А отчета);

- Подготовлена заявка на патент и проведены патентные исследования по состоянию исследуемой проблематики (Приложение Б отчета).

Результаты выполненных работ соответствует требованиям Технического задания и нормативной документации.

Комиссия Минобрнауки России признала обязательства по соглашению на отчетном этапе исполненными надлежащим образом.