

В ходе выполнения ПНИ по Соглашению о предоставлении субсидии от "8" сентября 2014 г. № 14.574.21.0104 с Министерством образования и науки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе № 4 в период с 01.01.2016 г. по 31.06.2016 г. были выполнены следующие работы:

1. Разработаны методы проектирования аммиачных КДУ с ЭТМД для маневрирующих спутниковых платформ МКА массового ряда:

- до 10 кг;
- 10-30 кг;
- 30-40 кг;
- 40-70 кг;
- 70-120 кг;
- 120-200 кг;
- 200-400 кг и более.

Определены габаритно-массовых характеристики КДУ, их проектно-конструктивные параметры и различные схемы сопряжения с МКА для формирования требований к отсеку размещения КДУ в МКА;

2. Разработаны математические модели КДУ с ЭТМД различной конструкции;

3. Определены потребные запасы топлива, количества включений КДУ для различных схем запуска, габаритно-массовых характеристик, проектно-конструктивных параметров и различных схем сопряжения с МКА для формирования требований к отсеку размещения КДУ в МКА;

4. Разработана эскизная конструкторская документация на экспериментальный образец аммиачной КДУ для наноспутниковой платформы;

5. Разработан проект ТЗ на проведение ОКР по теме "Разработка аммиачной корректирующей двигательной установки с электротермическими микродвигателями для малого космического аппарата».

Применительно к выполненной работе:

-исследованы КДУ с различными ЭТМД: КДУ с ЭТМД с трубчатым нагревательным элементом; КДУ с ЭТМД с автономным нагревательным элементом; КДУ с ЭТМД с совмещенной с испарителем схемой; КДУ с ЭТМД электродуговым;

- по компоновке в составе МКА рассмотрены КДУ: верхняя торцевая компоновка КДУ; нижняя торцевая компоновка КДУ; центральная непереключаемая компоновка КДУ; центральная переключаемая компоновка КДУ;

- рассмотренные компоновки КДУ в составе МКА соответствуют совмещенной, параллельной, модульной схемам многоцелевых служебных платформ МКА;

- среди концептуальных методов проектирования КДУ (метод прямого проектирования, метод обратного проектирования, метод прототипа, многоцелевые методы: метод гарантированного результата, метод структурного проектирования) предпочтение отдано многоцелевому методу проектирования как наиболее перспективному при создании спутниковых платформ для МКА;

- выбор многоцелевого метода проектирования (метод структурного

проектирования, метод гарантированного результата) осуществляется на основе анализа запасов характеристических скоростей при решении задач орбитального маневрирования, заданных в ТЗ на ПНИ;

- анализ задач орбитального маневрирования ММКА показал, что наибольшие характеристические скорости требуются при решении задач межорбитального маневрирования, поддержания САС на низких орбитах (500 – 600 км), а также задачи по уводу ММКА на орбиту утилизации с заданным временем существования - 25 лет;

- оценка эффективности КДУ, разработанных по методу «гарантированного» результата, показывает, что для КДУ с фиксированными векторами проектных и конструктивных параметров наилучшая эффективность достигается для наиболее «тяжелой» целевой функции из числа реализуемых; при реализации же всех других целевых функций, даже весьма близких, эффективность многоцелевой КДУ всегда хуже;

- при структурном подходе принцип оптимизации заключается в формировании структурного состава КДУ с возможностью ее изменения как в сторону наращивания, так и в сторону сокращения относительно некоторой универсальной базовой структуры, используемой для всех целевых функций;

- сформулирована задача комплексных исследований, связанных с синтезом КДУ с улучшенными показателями эффективности: определить такое разбиение решаемых целевых задач КДУ на классы и в каждом классе найти такие значения стратегий структурного построения КДУ и распределения основных проектных параметров, которые обеспечивают выполнение поставленных перед КДУ задач и достижение требуемых тактико-технических характеристик при максимальном значении критерия эффективности КДУ;

- для определения удельного импульса тяги КДУ ($P_{уд}^B$, $P_{уд}^P$) использованы экспериментальные исследования на аммиаке следующих образцов ЭТМД: резервируемый ЭТМД с ТНЭ с профилированным соплом, сплошным корпусом токовыводов и «холодной» схемой запуска; резервируемый ЭТМД с ТНЭ с профилированным соплом, открытым корпусом токовыводов, «холодной» схемой запуска и длиной газовода 29 мм; резервируемый ЭТМД с ТНЭ с профилированным соплом, открытым корпусом токовыводов, «холодной» схемой запуска и длиной газовода менее 29 мм; нерезервируемый ЭТМД с АНЭ с профилированным соплом, «холодной» и «горячей» схемой запуска;

- при проектировании ММКА с КДУ рассматриваются задачи: проектный анализ (проектные и габаритно-массовые характеристики КДУ в составе ММКА) рассматриваемой альтернативы ММКА; выбор оптимальной альтернативы ММКА с КДУ;

- для решения данных задач использован разработанный в рамках ПНИ модифицированный многокритериальный метод аналитической иерархии с развитой шкалой коэффициентов предпочтительности на основе созданной базы данных опорных альтернатив и их математического описания;

- для модифицированного метода аналитической иерархии разработана методика выбора и проектного анализа ММКА с аммиачными КДУ на основе математических моделей ММКА с выделением частной задачи, связывающей габаритно-массовые, энергетические и динамические характеристики ММКА и позволяющей получать расчетные числовые критерии ММКА, определяющие его проектный облик;

- в рамках ПНИ разработан проектно-конструктивный облик следующих КДУ: КДУ с охлаждаемым электроклапаном для увеличения времени разового включения > 20 минут; КДУ с ЭТМД с совмещенной с испарителем схемой для снижения энергопотребления КДУ; КДУ с дроссельным элементом вместо регулятора давления для снижения стоимости и упрощения конструкции; КДУ с малыми запасами топлива с резервируемой автоматикой для повышения надежности; КДУ с большими запасами топлива для реализации повышенных характеристических скоростей в составе МКА; КДУ с торообразным топливным баком с малыми запасами топлива с размещением

ЭТМД во внутренней полости бака для снижения габаритов КДУ; КДУ с ЭТМД и ГРС для обеспечения движения центра масс МКА и движения вокруг центра масс МКА;

- рассмотренные конструктивные особенности элементов автоматики (муфты, электроклапан, регулятор давления, испаритель) и БУ КДУ из базы данных опорных альтернатив свидетельствуют о том, что они могут успешно использоваться для создания широкого ряда КДУ;

- задача повышения энергетических характеристик КДУ (повышенный удельный импульс тяги микродвигателя, сокращение запасов топлива для реализации заданной характеристической скорости, сокращение количества включений для выработки топлива) может быть решена за счет: снижения энергопотребления предварительной газификации жидкого аммиака в испарителе и увеличения на снижаемую величину энергопотребления микродвигателя путем использования выделяемого тепла электроклапана для предварительного нагрева аммиака и выполнения испарителя двухзаходным; увеличения времени разового включения электроклапана путем исключения его перегрева за счет отвода выделяющегося тепла на предварительный нагрев аммиака;

- в качестве метода расчетного определения габаритно-массовых характеристик КДУ, их проектно-конструктивных параметров и различных схем сопряжения с МКА выбран габаритно-массовый метод, реализованный в виде: аналитических габаритно-массовых моделей; параметрических моделей на основе 3-D моделей, через модели привязок связанных с математической моделью КДУ и со средствами адаптации в МКА;

- для определения проектно-конструктивного облика КДУ показана эффективность использования параметрических 3-D моделей КДУ, содержащих математическую модель топливного бака с входными параметрами: масса топлива, эксплуатационное давление, характеристики топлива и конструкционного материала бака; выходными параметрами 3-D моделей являются: габаритно-массовые характеристики КДУ;

- для всех рассмотренных вариантов ММКА расчет габаритно-массовых характеристик проводится также по разработанному программному комплексу на языке программирования «Object Pascal» в среде программирования «Borland Delphi» в виде программы помощник эксперта (свидетельство о регистрации электронного ресурса № 21184), программы оценивания вариантов ММКА методом аналитической иерархии (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016613722), а также с использованием ряда расчетных программ, которые позволяют представлять в визуализированном виде оцениваемые варианты ММКА; формировать проектный облик вариантов ММКА из базы данных опорных альтернатив и критерии оценивания; по выбранному сценарию оценивания ММКА рассчитывать значения числовых критериев; вычислять все необходимые процедуры, предусмотренные методом аналитической иерархии, с определением комплексного критерия оценивания ММКА;

- с учетом того, что аммиачные КДУ в составе МКА должны обеспечивать: ликвидацию ошибок выведения МКА РН; межорбитальное маневрирование МКА; разведение МКА по орбите функционирования; поддержание заданных параметров рабочей орбиты в течение САС МКА; увод МКА на орбиту утилизации, определены требуемые для этого запасы характеристической скорости для МКА массового ряда: 8 кг; 10 кг; 30 кг; 40 кг; 70 кг; 120 кг; 200 кг; 400кг; 450 кг; 500 кг;

- определена область использования ККС МКА в заданном массовом ряде; в соответствии с принятой областью использования ККС МКА определены требуемые запасы топлива m_t , количество включений КДУ N для различных схем запуска, габаритно-массовых характеристик, проектно-конструктивных параметров и различных схем сопряжения с МКА для формирования требований к отсеку размещения КДУ в МКА;

- оценены возможности создания наноспутника массой 8 кг с реализацией характеристических скоростей 237,5 м/с и 118,9 м/с;

- анализ проведенных расчетов показал: характеристическая скорость $\Delta V_{\text{хар1}} = 237,5$ м/с не может быть реализована массой МКА 8 кг; характеристическая скорость $\Delta V_{\text{хар1}} = 118,9$ м/с в принципе может быть реализована массой МКА 8 кг, но при этом масса самого МКА без КДУ крайне незначительная;

- проведенные проработки наноспутника с габаритами $200 \times 200 \times 200$ мм показали, что максимальной реализуемой характеристической скоростью является $\Delta V_{\text{харр}} = 60$ м/с.

- проведенные исследования показали, что возможно создание наноспутника массой 10 кг с аммиачной КДУ, реализующего запас характеристической скорости 60 м/с; при этом запасы топлива находятся в диапазоне (0,44-0,65) кг в зависимости от характеристик ЭТМД, масса КДУ – (2,58-2,95); масса средств адаптации наноспутника при принятой компоновке расходуется только на элементы крепления КДУ и незначительная; габариты КДУ обеспечивают размещение ее в наноспутнике с размерами $200 \times 200 \times 200$ мм;

- для МКА массой 30 кг показано, что характеристическая скорость $\Delta V_{\text{хар1}} = 198,1$ м/с, $\Delta V_{\text{хар2}} = 167,9$ м/с может быть реализована массой МКА 30 кг, но при этом масса самого МКА без КДУ составит $\approx 19-17$ кг; для увеличения массы МКА без КДУ необходимо снижать требуемый запас характеристической скорости;

- для МКА массой 30 кг для горячей схемы запуска КДУ (ЭТМД) рассмотрена характеристическую скорость $\Delta V_{\text{хар1}} = 100$ м/с; полученные данные свидетельствуют о том, что масса КДУ с топливом составила ≈ 7 кг, что для общей массы МКА 30 кг вполне реально;

- для МКА массой 40 кг также принята $\Delta V_{\text{хар1}} = 100$ м/с; полученные данные свидетельствуют о том, что масса КДУ с топливом составила для торцевой компоновки $\approx 9,5-12$ кг, для центральной $\approx 8-9,7$ кг, что для общей массы МКА 40 кг также вполне реально;

- массовый ряд МКА 70-500 кг может использовать все рассмотренные компоновки КДУ в МКА с реализацией заданных характеристических скоростей;

- для массы МКА 70 кг и $\Delta V_{\text{хар1}} = 211,9$ м/с максимальные приведенная масса КДУ составила ≈ 31 кг, а минимальная – ≈ 21 кг, что свидетельствует о необходимости оптимизации структурно-проектных параметров КДУ в составе МКА;

- начиная с массы МКА 120 кг, рассмотрен электродуговой ЭТМД; показана его эффективность по отношению к другим ЭТМД; так, для массы МКА 120 кг, приведенная масса КДУ для одной из компоновок с $\Delta V_{\text{хар1}} = 216,4$ м/с составила 23,5 кг, а для ЭТМД с ТНЭ – 45,1 кг;

- также показана эффективность горячей схемы запуска; так, для массы МКА 200 кг (перемещаемая КДУ) для $\Delta V_{\text{хар1}} = 224,9$ м/с приведенная масса КДУ с ЭТМД с ТНЭ для холодной схемы составила 48,8 кг, а для ЭТМД с АНЭ – 43,6 кг;

- количество включений КДУ зависит от массы топлива, тяги, удельного импульса тяги ЭТМД и допустимого времени разового включения КДУ (для существующих аммиачных КДУ – 20 минут); например, для массы топлива 44 кг (масса МКА 400 кг, $\Delta V_{\text{хар1}} = 235,65$ м/с, тяга ЭТМД 30,40,50 мН) количество включений составило 2449, 1837, 1470 соответственно для разных тяг ЭТМД;

- габариты отсека и масса определяются типом используемой ККС ММКА; наименьшие габариты отсека КДУ, определяющие габарит конструкции МКА, получаются при торцевой верхней компоновке КДУ в МКА; при такой компоновке КДУ только меньшая ее часть размещается в отсеке МКА, а большая часть размещается вне конструкции МКА;

- центральная компоновка с перемещаемой КДУ при выставке вектора тяги приводит к увеличению массы и габаритов МКА; так, масса средств адаптации центральной перемещаемой КДУ для массы МКА 400 кг и массы топлива 44 кг составляет

20,5 кг, а для неперемещаемой – 16,2 кг; соответственно габариты отсека КДУ составляют: 799×718×1117 мм и 1-28×500×820 мм;

- разработанные аналитические математические модели и параметрические 3- D модели КДУ и средств ее адаптации в МКА позволяют проводить проектно-конструктивный анализ КДУ и МКА в широком диапазоне массовых характеристик МКА, различных ККС и технических характеристик КДУ с ЭТМД;

- разработана эскизная конструктроская документация на экспериментальный образец КДУ для наноспутниковой платформы;

- проведенный анализ квазистатического и вибрационного нагружения и расчеты на прочность показали, что разработанная конструкция КДУ требованиям статической и вибрационной прочности, предъявляемым к бортовой аппаратуре при принятых коэффициентах безопасности, удовлетворяет;

- разработанная эскизная конструктроская документация на экспериментальный образец КДУ для наноспутниковой платформы будет использована для изготовления экспериментального образца КДУ для наноспутниковой платформы;

- проект ТЗ на проведение ОКР по теме "Разработка аммиачной корректирующей двигательной установки с электротермическими микродвигателями для малого космического аппарата" разработан с использованием опыта разработки аммиачных КДУ с участием авторов ПНИ;

- проект ТЗ может служить основой для создания ТЗ на проведение конкретной ОКР по созданию аммиачной КДУ для ММКА.