

## НАЗЕМНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ КА НАНОКЛАССА

Белоконов И.В., Ивлиев А.В., Кумарин А.А., Соборницкая А.Н.  
Самарский университет, г. Самара, ivlievav@mail.ru

*Ключевые слова: электротермический двигатель, наземные испытания, импульсный режим, суперконденсаторы, наноспутник, коррекция орбиты.*

В работе рассмотрен этап экспериментальной наземной отработки прототипа лётного варианта электротермического двигателя (ЭТД) для КА нанокласса.

В качестве рабочего тела (РТ) ЭТД выбрана смесь воды дистиллированной с этиловым спиртом, которая позволяет одновременно обеспечить работоспособность ЭТД вплоть до температуры  $-28^{\circ}\text{C}$  и достаточно высокую удельную тягу [1-4]. В системе питания ЭТД нагреватель запитывается от предварительно заряженной батареи суперконденсаторов (СК) суммарной емкостью 50 фарад и максимальным напряжением 12 В [2-5].

Расчет основных параметров ЭТД выполнен по методике, приведённой в [6], на конструкцию ЭТД получены патенты РФ [7-8].

Наземные автономные испытания ЭТД проводились в термовакуумной камере УП-125ТХД при остаточном давлении  $5 \cdot 10^{-3}$  мм. рт. ст. Для измерения тяги был разработан специальный стенд, позволяющий измерять импульс струи газа, истекающего из сопла ЭТД. При проведении измерений использовался тензометрический датчик, размещённый под подвижным диском, воспринимающим давление реактивной струи ЭТД во время испытаний. Стенд позволяет измерять величину тяги в диапазоне от 1 до 400 мН. Вертикальное размещение ЭТД над датчиком позволяет повысить точность выполнения калибровки, которая выполняется с помощью набора разновесов, непосредственно устанавливаемых в центр диска. Случайная погрешность калибровки составляла менее  $\pm 0,1\%$ , возможная погрешность измерения тяги за счет разгона реактивной струи под действием силы тяжести не превышает 0,05 м/с, суммарная случайная ошибка определения тяги составляет  $\pm 3\%$ .

Расход РТ измерялся весовым методом с осреднением результатов 15 одинаковых импульсов. Масса испытуемой ЭТД-с полностью заряженным баком (масса РТ составляла 0,17 кг), монтируемой на стенд измерения тяги составляла 1,45 кг, погрешность взвешивания составляла  $\pm 0,1 \cdot 10^{-3}$  кг, а замеренный расход РТ на создание одного импульса тяги составил  $0,25 \cdot 10^{-3}$  кг.

Автоматизированная система управления экспериментом реализована на компьютере в пакете MatLab. Она позволяет контролировать все основные параметры процесса, выполнять заданную циклограмму работы ЭТД, оперативно изменять ее для поиска оптимального режима, а также записывать и обрабатывать результаты проведенного эксперимента.

Выяснилось, что исследуемый ЭТД работает в автоколебательном режиме с частотой порядка 3,4 Гц, который интенсифицирует процессы теплообмена. Анализ результатов испытаний показал, что потерь РТ при автоколебательном режиме не происходит, опасного действия на конструкцию не выявлено (по всей видимости ввиду малой размерности двигателя, хотя такой режим для «больших» реактивных двигателей совершенно недопустим).

Удельный импульс тяги ЭТД составил 1300 м/с, температура РТ перед соплом - около  $500^{\circ}\text{C}$ . Потребляемая мощность от бортовой системы электропитания при выдаче одного импульса тяги составила 1 Вт, при этом величина импульса тяги составила  $P_1 = 0,33 \text{ Н}\cdot\text{с}$ , что в случае массы наноспутника 3 кг обеспечивает величину характеристической скорости  $\Delta V_1 = 0,11 \text{ м/с}$  при общем запасе характеристической скорости более 60 м/с.

Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

### Список литературы

1. Белоконов И.В., Ивлиев А.В., Богатырев А.М., Кумарин А.А., Ломака И.А., Симаков С.П. Выбор проектного облика двигательной установки наноспутника // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. Т. 18, № 3. 2019. С. 29-37.
2. Белоконов И.В., Ивлиев А.В., Ключник В.Н., Кумарин А.А., Гимранов З.И., Кяримов Р.Р. Электротермическая двигательная установка наноспутника // Космическая техника и технологии. 2022. № 4(39). С. 45-57.
3. I. Belokonov, A. Ivliev. Development of a propulsion system for a maneuvering module of a low-orbit nanosatellite *Procedia Engineering*. 2017. P. 366-372.
4. Belokonov I. V., Avaryaskin D. P. 2018 Project of the technology testing of the formation flight of low-orbit nanosatellites *Advances in the Astronautical Sciences* Vol. 163. P. 657-663.
5. Kumarin A.A., Kudryavtsev I.A. 2018 Modelling the EDLC-based Power Supply Module for a Maneuvering System of a Nanosatellite *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* Vol. 302. No. 1. P. 1-6.
6. Феодосьев В.И., Синярев Г.Б. Введение в ракетную технику. ОБОРОНГИЗ. М., 1961. 510 с.
7. Пат. № 2759164. Российская Федерация. Электротермический двигатель. Белоконов И.В., Ивлиев А.В., Баринаева Е.В., Ключник В.Н.; заявитель и патентообладатель – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева; заявка № 2020132528; приоритет от 30.09.2020 г.; опубликовано 09.11.2021 г. // Бюллетень № 27.
8. Пат. № 2769484. Российская Федерация. Электротермический двигатель. Белоконов И.В., Ключник В.Н., Ивлиев А.В., Баринаева Е.В.; заявитель и патентообладатель – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева; заявка № 20201130409; приоритет от 18.10.2021 г.; опубликовано 01.04.2022 г. // Бюллетень № 9.

### Сведения об авторах

Белоконов Игорь Витальевич, доктор технических наук, профессор, заведующий межвузовской кафедрой космических исследований Самарского университета. Область научных интересов: баллистика, навигация и управление в космосе, проведение научных экспериментов с использованием КА нанокласса.

Ивлиев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник НИЛ-102 Самарского университета. Область научных интересов: двигатели КА нанокласса.

Кумарин Алексей Андреевич, аспирант, инженер НИЛ-102 Самарского университета. Область научных интересов: разработка бортовых систем КА.

Соборницкая Александра Николаевна, студентка гр. 6462-110301 Самарского университета. Область научных интересов: разработка бортовых систем КА.

### GROUND TESTING OF ELECTROTHERMAL PROPULSION SYSTEM FOR NANOSATELLITES

Belokonov I.V., Ivliev A.V., Kumarin A.A., Sobornitskaya A.N.  
Samara University, Samara, ivlievav@mail.ru

*Keywords: electrothermal propulsion system, ground testing, pulse mode, supercapacitor, nanosatellite, orbit correction.*

In this work ground, testing of electrothermal propulsion system for a nanosatellite was conducted. Testing was performed in vacuum chamber at pressure about  $5 \cdot 10^{-3}$  mmHg. Special thrust gauge system was designed and implemented using strain-gauge resistors and a metal disk. The disk absorbs the momentum of gas particles and allows  $\pm 3\%$  accuracy at 1...400 mN thrust. The resulting  $\Delta V$  was 0.11 m/s per pulse and overall 60 m/s.