

Экспериментальные исследования нагревательных элементов электротермических микродвигателей

Experimental Studies of the Heating Elements of Electrothermal Microthrusters

Блинов / Blinov W.

Виктор Николаевич
(blinovviktor@yandex.ru)
доктор технических наук, профессор,
почетный машиностроитель РФ,
заслуженный изобретатель РФ.
ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ),
профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение».
г. Омск

Вавилов / Vavilov I.

Игорь Сергеевич
(vava-igg@mail.ru)
кандидат технических наук.
ОмГТУ,
старший преподаватель кафедры
«Авиа- и ракетостроение».
г. Омск

Косицын / Kositsin V.

Валерий Владимирович
(valera_kositsin@mail.ru)
кандидат технических наук.
ОмГТУ,
доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение».
г. Омск

Лукьянчик / Lukuanchik A.

Антон Игоревич
(lukuanchik1991@mail.ru)
ОмГТУ,
аспирант кафедры «Авиа- и ракетостроение».
г. Омск

Рубан / Ruban V.

Виктор Иванович
(rubanvictor@rambler.ru)
ОмГТУ,
научный сотрудник НИЧ,
кафедры «Авиа- и ракетостроения».
г. Омск

Ячменев / Yachmenev P.

Павел Сергеевич
(yachmenev-pavel@mail.ru)
ОмГТУ,
ассистент кафедры «Авиа- и ракетостроение».
г. Омск

Ключевые слова: автономный нагревательный элемент – autonomous heating element; корректирующая двигательная установка – corrective propulsion unit; малогабаритный нагревательный элемент – compact heating element; электротермический микродвигатель – electrothermal microthruster.

В статье приведены конструктивные схемы нагревательных элементов, на основе которых были разработаны и изготовлены малогабаритные нагревательные элементы различной конструкции. Представлены результаты экспериментальных исследований малогабаритных нагревательных элементов различной конструкции электротермических микродвигателей. Результаты исследований говорят о возможности создания на основе малогабаритных нагревательных элементов электротермических микродвигателей для корректирующей двигательной установки маневрирующего наноспутника.

The article presents structural schemes of heating elements, on the basis of which compact heaters of different design have been developed and manufactured. Results of experimental studies of small heating elements for electrothermal microthrusters of different design are presented. Results of the study suggest possibility of creating electrothermal microthrusters for correcting propulsion unit of maneuvering nano-satellite on the basis of compact heating elements.

Создание современных маневрирующих наноспутниковых платформ (весом до 10 кг) связано с разработкой корректирующих двигательных установок (КДУ) с микродвигателями [1–3]. Широкое применение получили электрические микродвигатели [4–6], к их числу относятся созданные в России электротермические микродвигатели (ЭТМД) [1].

В настоящее время созданы различные конструкции аммиачных ЭТМД с трубчатыми нагревательными элементами (ТНЭ), тягой 30 мН и энергопотреблением 60 Вт (рис. 1а) и ЭТМД с автономным нагревательным элементом (АНЭ), тягой 30–50 мН и энергопотреблением до 60 Вт (рис. 1б).

Результаты экспериментальных исследований и летных испытаний ЭТМД с ТНЭ и АНЭ, показывают их надежность, работоспособность в составе КДУ малых космических аппаратов, достижение высоких удельных характеристик при энергопотреблении 60 Вт [7–10].

Ввиду крайне ограниченной бортовой энергетики маневрирующего наноспутника (как правило, не превышающей 10 Вт) применение данных ЭТМД приводит к низким удельным характеристикам.

Для достижения достаточно высоких удельных характеристик ЭТМД, при малом энергопотреблении необходимо переразмерить нагревательные элементы и сами ЭТМД по массе и габаритам для уменьшения теплоемкости конструкции ЭТМД.

На основе малогабаритного АНЭ диаметром 3 мм был разработан ЭТМД с низким энергопотреблением. Экспериментальные исследования малогабаритного АНЭ диаметром 3 мм с потребляемой мощностью 5 Вт и 10 Вт (рис. 2) показывают, что время выхода на стационарный режим составляет около 3 минут, а максимально достигнутая температура нагревателя за 5 минут составила 520 К и 640 К соответственно. В ходе экспериментальных исследований

подтверждена работоспособность данного нагревателя при мощности в 20 Вт. Измерения температуры осуществлялось с использованием многоканального измерителя температуры МИТ-8 посредством термопар ТХА.

Проведенные экспериментальные исследования показали перспективность и возможность использования 3 мм малогабаритного АНЭ в ЭТМД наноспутниковой платформе. При исследовании используемого в испытаниях АНЭ был выявлен существенный недостаток – его активная часть ограничена по длине и составляет около 25 мм (рис. 3).

Это связано с особенностями конструктивного исполнения самого нагревательного элемента, а так как именно активная часть нагревателя играет наибольшую роль в нагреве и испарении аммиака, была поставлена задача по оптимизации конструкции нагревательного элемента, с тем чтобы зона активной части была равна длине всего нагревательного элемента.

В этой связи разработаны новые конструкции нагревательных элементов – малогабаритные автономные нагревательные элементов (МАНЭ) и проведены их экспериментальные исследования.

На рисунке 4 представлены конструкции МАНЭ диаметром 3 мм, различной длины 40 мм и 50 мм. МАНЭ представляют собой металлический стержень, на который намотан проволочный нагреватель, имеющий форму двойной спирали, выполненный из нихромовой проволоки диаметром 0,35 мм. На стержень наносится электроизоляционное покрытие, исключающее замыкание проволочного нагревателя. Вся конструкция помещена в металлическую трубку и залита изолирующей смесью.

На втором образце (рис. 4б) токовыводы помещены в двухканальную керамическую трубку для дополнительной изоляции.

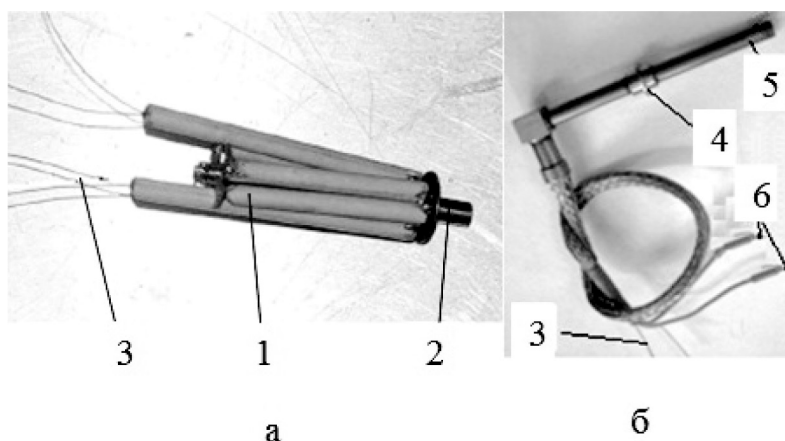


Рис. 1. Конструкции ТНЭ (а) и АНЭ (б) ЭТМД:
1 – керамические двухканальные трубки, 2 – газовод,
3 – токовыводы нагревателя, 4 – буртик для крепления в составе ЭТМД,
5 – корпус нагреватель, 6 – токовыводы термопары

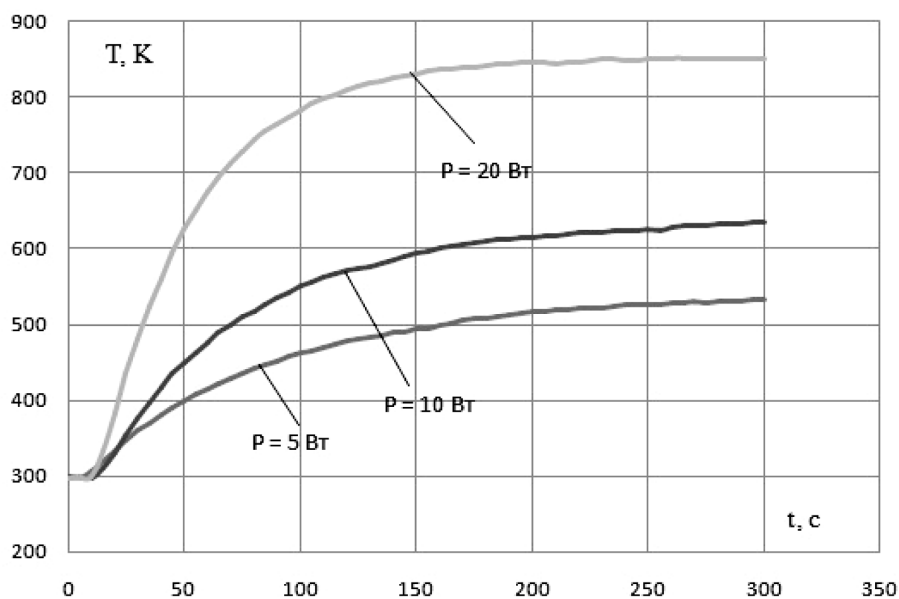


Рис. 2. Зависимость температуры автономного нагревательного элемента от времени нагрева и мощности

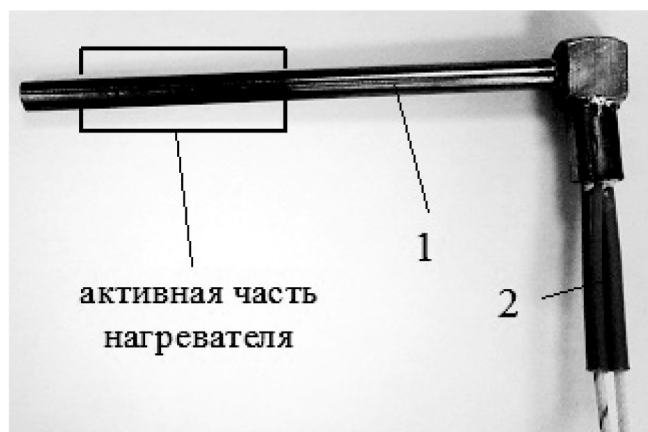


Рис. 3. Автономный нагревательный элемент:
1 – нагреватель; 2 – токовыводы нагревателя

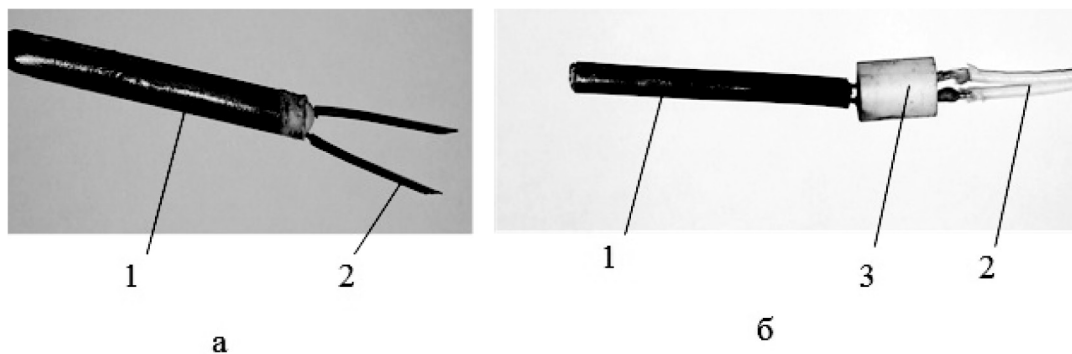


Рис. 4. МАНЭ длиной 40 мм и диаметром 3 мм (а),
длиной 50 мм и диаметром 3 мм (б):
1 – нагреватель; 2 – токовыводы; 3 – керамическая изоляция

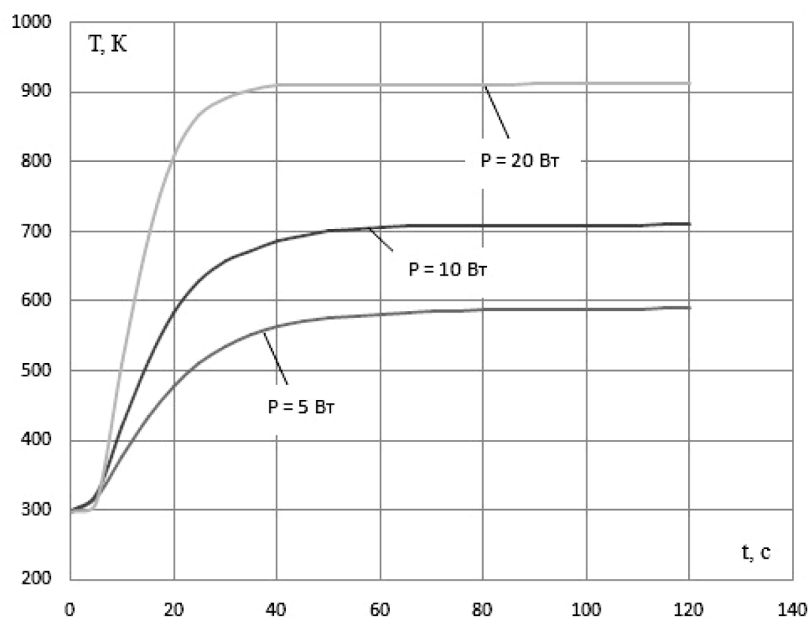


Рис. 5. Зависимость температуры МАНЭ длиной 40 мм и диаметром 3 мм от времени нагрева и мощности

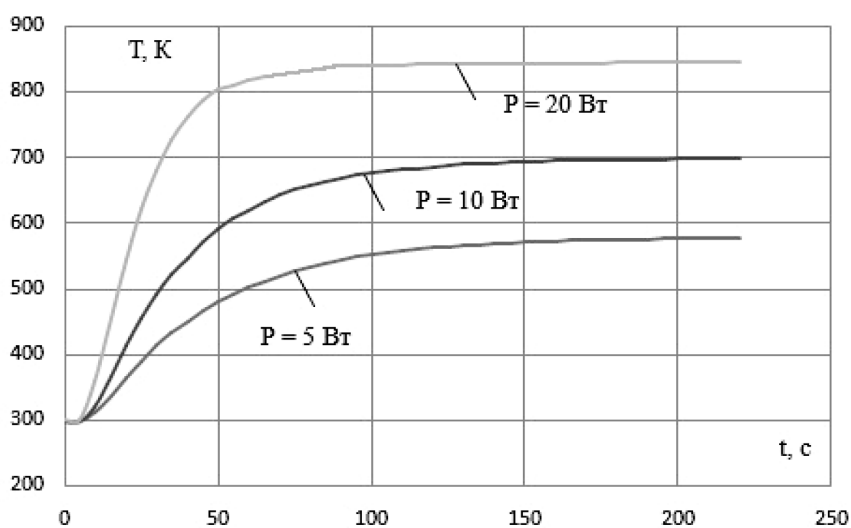


Рис. 6. Зависимость температуры МАНЭ длиной 50 мм и диаметром 3 мм от времени нагрева и мощности

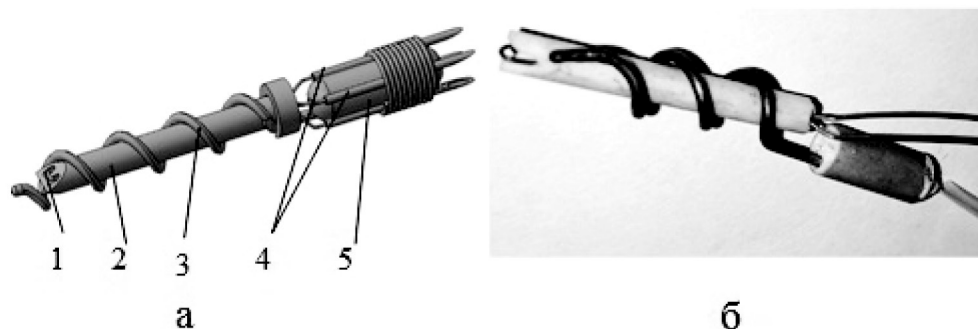


Рис. 7. 3D модель (а) и лабораторный образец (б) МАНЭ с термопарой:
 1 – проволочный нагреватель; 2 – двухканальная керамическая трубка;
 3 – термопара ТХА; 4 – токовыводы нагревателя; 5 – токовыводы термопары

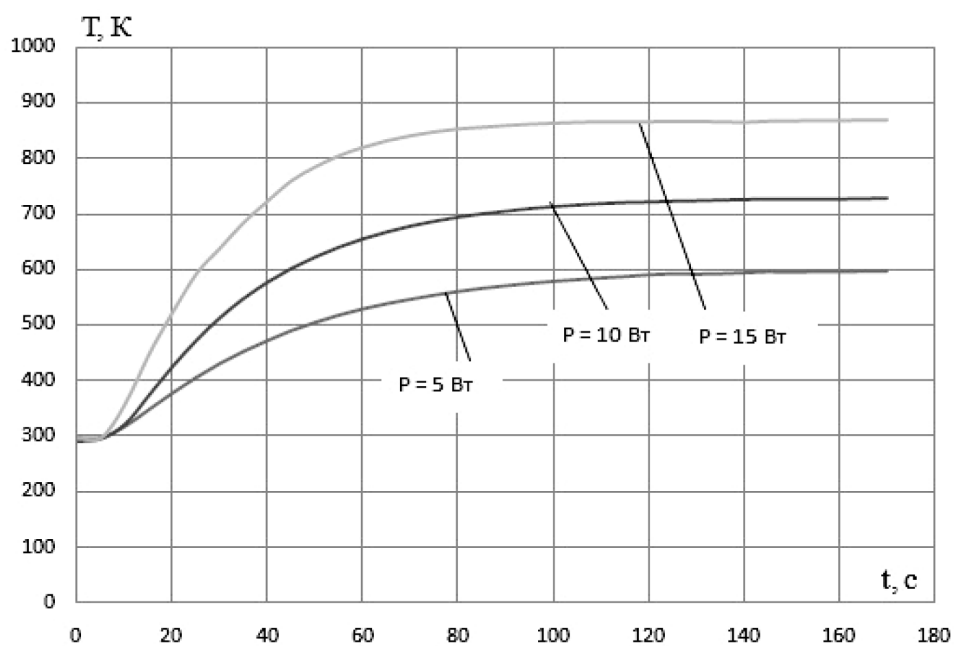


Рис. 8. Зависимость температуры МАНЭ от времени нагрева и мощности

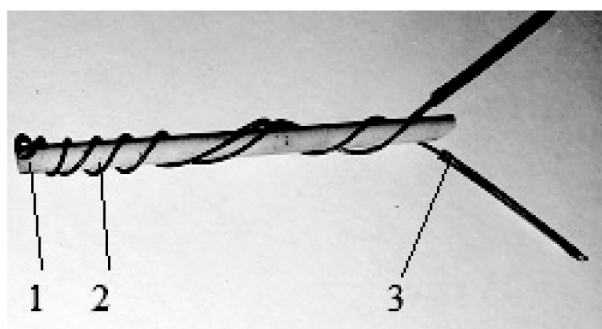


Рис. 9. МАНЭ с переменным шагом проволочного нагревателя:
1 – проволочный нагреватель; 2 – керамическая трубка; 3 – токовыводы

Экспериментальные исследования МАНЭ представлены на рисунках 5, 6.

На рисунке 7 представлен МАНЭ с длиной нагревателя 30 мм, диаметром 3 мм.

МАНЭ представляет собой керамическую двухканальную трубку, в которой размещается проволочный нагреватель. Для определения температуры используется термопара – ТХА, расположенная на корпусе керамической трубки в виде спирали. В дальнейшем термопару планируется использовать в качестве завихрителя ЭТМД для увеличения пути прохождения аммиака вдоль нагревательного элемента, и как следствие, увеличения времени контакта аммиака с нагревателем, что приводит к повышению его температуры.

Для увеличения надежности нагревательного элемента предполагается использовать четырехканальную керамическую трубку с двумя проволочными нагревателями (основной и резервный).

На рисунке 8 представлены экспериментальные исследования данного нагревательного элемента.

Анализ графиков (рис. 5, 6, 8) показывает, что динамика выхода МАНЭ на стационарный температурный режим при рассмотренных мощностях составляет в среднем 3 минуты. При подводимой к МАНЭ мощности в диапазоне от 5 до 20 Вт достигаются температуры 570–910 К. Полученные температуры свидетельствуют о возможности газификации аммиака в ЭТМД с МАНЭ, а малые мощности показывают возможность их применения в составе КДУ для маневрирующих наноспутниковых платформ.

Для дальнейших исследований был создан лабораторный образец МАНЭ с переменным шагом проволочного нагревателя различной длины (рис. 9). Такой нагревательный элемент состоит из металлического стержня, на который нанесено электроизоляционное покрытие, проволочный нагреватель из нихромовой проволоки в форме двойной спирали с переменным шагом намотки. Этот МАНЭ позволит расширить активную часть нагревательного элемента и сместить ее к концу нагревателя, то есть как можно ближе к соплу ЭТМД.

Проведенные исследования показали, что внешний диаметр и толщина стенок цилиндрического МАНЭ номинальной мощностью 5–10 Вт должны быть как можно меньше, в разработанных образцах диаметр составляет 3 мм, а толщина стенок 0,5 мм.

Дальнейшее улучшение характеристик нагревательных элементов связано с созданием МАНЭ с переменным шагом проволочного нагревателя различной длины, а также использованием в качестве корпусов не тонкостенных трубок, а корпусов с использованием аддитивных технологий с использованием 3D принтеров по металлу и гальванических покрытий.

Результаты работы использованы при создании КДУ наноспутника по гранту № 14.574.21.0104 «Разработка принципов построения и методов проектирования многоцелевых спутниковых платформ с аммиачными корректирующими двигательными установками в целях создания маневрирующих малых космических аппаратов военного, социально-экономического и научного назначения».

Литература

1. Исследования электротермических микродвигателей корректирующих двигательных установок маневрирующих малых космических аппаратов : монография / В.Н. Блинов [и др.] – Омск, 2014. – 264 с.
2. Международные тенденции создания и эксплуатации малых космических аппаратов / В.И. Лукьященко [и др.] // III Международная конференция-выставка «Малые спутники». Кн.1. – 2002. – С. 332 – 348.
3. Ткаченко, И. С. Методика системного анализа эффективности средств орбитальной инспекции на базе маневрирующих малых космических аппаратов : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.13.01 / И. С. Ткаченко ; Сам. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева. – Самара, 2011. – 153 с.
4. Coxhill, I. The Evolution of Xenon Resistojet Propulsion Systems at SSTL / I. Coxhill, D. Gibbon, M. Drube. – Surrey Satellite Technology Ltd, Tycho House, Surrey Research Park, Guildford, Surrey, GU2 7YE, UK.
5. Ходненко, В. П. Корректирующие двигательные установки для малого космического аппарата / В. П. Ходненко,

А. В. Хромов // Вопросы электромеханики. – 2009. – Т. 109. – С. 27 – 32.

6. Busek Space Propulsion and Sitems [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.busek.com/index.htm>, свободный. – Загл. с экрана.

7. Design features and research of Electrothermal Microthrusters with Autonomous Heating Elements for the Purposes of Small Space Vehicle Orbital Manoeuvring / V. Blinov [et al.] // Indian Journal of Science and Technology. – 2015, October. – Vol 8(27).

8. Лукьянчик, А. И. Экспериментальные исследования аммиачного электротермического микродвигателя с автономным нагревательным элементом / А.И. Лукьянчик // XXII Туполевские чтения (школа молодых ученых) : материалы междунар. молодежной науч. конф. – Казань, 2015. Т. 2. – С. 418–424.

9. Зубарев, С. И. Пути оптимизации конструкции нагревателя электротермического микродвигателя / С.И. Зубарев, Л.Н. Назаренко, С. А. Пиюков // Материалы шестой всеросс. науч. техн. конф. – Омск, 2011. – С. 86 – 89.

10. Зубарев, С. И. Исследование динамики нагрева электротермического микродвигателя с автономным нагревателем / С. И. Зубарев, Л. Н. Назаренко // Молодежь. Техника. Космос: труды III Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2011. – С. 47–49.