

# АВТОНОМНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ С ДВУМЯ АВТОНОМНЫМИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ

В. Н. Блинов, В. В. Косицын, А. И. Лукьянчик, П. В. Степень, П. С. Ячменев

Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Целью работы является проведение автономных экспериментальных исследований электротермического микродвигателя с двумя автономными нагревательными элементами диаметром 4 мм. В результате экспериментальных исследований микродвигателя определена динамика нагрева конструкции микродвигателя и рабочего тела (изобутана) в диапазоне мощностей от 5 Вт до 60 Вт. Проведенные экспериментальные исследования показали возможность применения предложенной конструкции микродвигателя с двумя автономными нагревательными элементами не только на малых космических аппаратах, но и на микро- и наноспутниках в условиях ограниченной бортовой энергетике.

**Ключевые слова:** наноспутник, двигательная установка, электротермический микродвигатель, автономные экспериментальные исследования, автономный нагревательный элемент.

## Введение

Быстроразвивающимся направлением ракетно-космической техники является создание и применение малых космических аппаратов (МКА), в том числе и наноспутников (НС), для исследования околоземного космического пространства, развития космических технологий, проведения различных экспериментов в космосе [1–5].

Развитие современных НС как в России, так и за рубежом связано с созданием маневрирующих наноспутников (МНС) и создания на их основе маневрирующих орбитальных группировок для решения актуальных прикладных и научных задач [5, 6].

Одной из основных служебных систем МНС является двигательная установка (ДУ) [7–10].

Наиболее эффективными ДУ по критериям надежности, стоимости и времени создания, простоте конструкции, малому энергопотреблению при реализации повышенных значений тяг (до 100 мН) отвечают ДУ с электротермическими (электронагревными) микродвигателями (ЭТМД), успешно используемые в целом ряде малых космических аппаратов (МКА) различной размерности [6, 7, 9, 11].

Среди ЭТМД можно выделить ЭТМД с трубчатым нагревательным элементом (ТНЭ) и ЭТМД с автономным нагревательным элементом (АНЭ) [12].

Основным преимуществом ЭТМД с ТНЭ является возможность резервирования ТНЭ, что резко повышает надежность его функционирования [12]. Однако они обладают существенными недостатками, среди которых можно выделить: сложную и длительную технологию герметизации мест выхода токовыводов и термопар, использование менее энергетически выгодного «холодного» способа запуска (рис. 1а) [12].

ЭТМД с АНЭ позволяет осуществлять как «холодный», так и «горячий» способы запуска (рис. 1б)

[12]. «Горячий» способ запуска позволяет увеличить удельный импульс тяги ЭТМД.

Основным недостатком ЭТМД с АНЭ является отсутствие возможности резервирования нагревательного элемента, что значительно снижает надежность всей ДУ.

Повышение надежности функционирования ЭТМД с АНЭ может быть достигнуто применением двух независимых АНЭ. Наличие двух АНЭ позволяет осуществлять нагрев рабочего тела микродвигателя одним нагревательным элементом, при этом второй находится в резерве, либо использовать оба АНЭ с подачей напряжения на каждый из них в различных комбинациях.

Применение двух АНЭ приводит к разработке нового корпуса ЭТМД, который должен иметь минимальную массу и обеспечивать наибольший теплообмен рабочего тела с горячими поверхностями ЭТМД.

В этой связи актуальной задачей является проведение автономных экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ с целью подтверждения его работоспособности и оценки эффективности.

## Постановка задачи исследования

Ставится задача оценки эффективности ЭТМД с двумя АНЭ на основе автономных экспериментальных исследований.

Для решения поставленной задачи:

- разработана 3D модель ЭТМД с двумя АНЭ (основным и резервным);
- изготовлен корпус опытного образца ЭТМД для двух АНЭ по аддитивной технологии;
- собран опытный образец ЭТМД с двумя АНЭ. Задачами автономных экспериментальных исследований являются:
- экспериментальные исследования ЭТМД с двумя АНЭ в нормальных условиях (атмосфере)

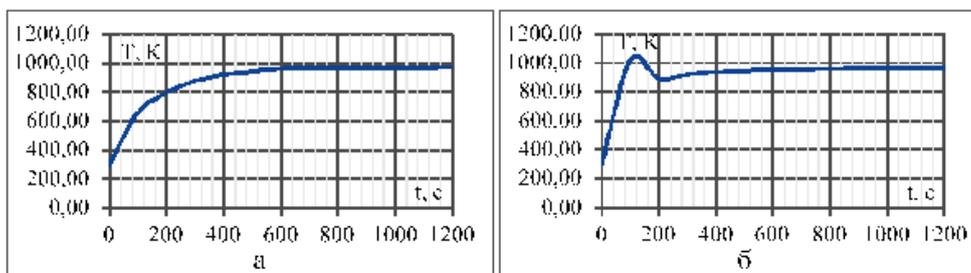


Рис. 1. Зависимость температуры АНЭ ЭТМД от времени нагрева при «холодном» (а) и «горячем» (б) способах запуска ЭТМД

Fig. 1. Dependence of the temperature of the heating element of the resistojet on the heating time for the «cold» (a) and «hot» (b) methods of starting the resistojet

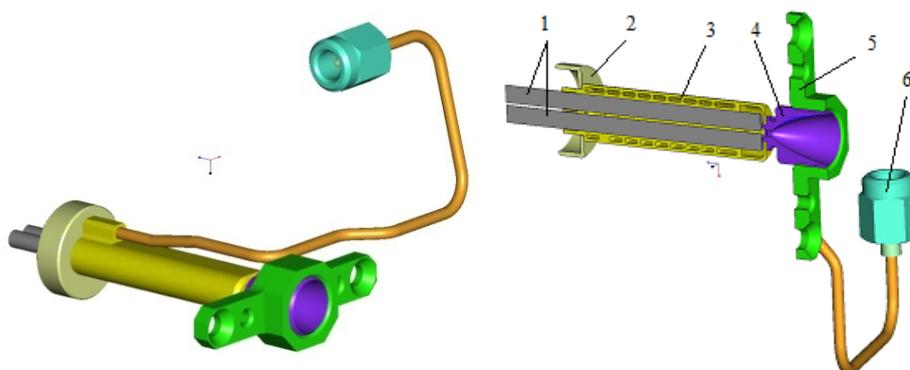


Рис. 2. 3D модель ЭТМД с двумя АНЭ:

1 — АНЭ; 2 — центрирующая опора; 3 — корпус (3D печать); 4 — сопло;  
5 — фланец; 6 — подводящий трубопровод

Fig. 2. 3D model of resistojet with two heating elements:

1 — heating element; 2 — centering support; 3 — housing (3D printing);  
4 — nozzle; 5 — flange; 6 — supply pipeline

без теплозащиты и с теплозащитой для определения влияния теплозащиты, а также определения максимального времени выхода ЭТМД на квазистационарный режим при «горячем» способе запуска; — экспериментальные исследования ЭТМД с двумя АНЭ в вакуумной камере с подачей рабочего тела для определения динамики нагрева конструкции и определения нагрева рабочего тела в опытном образце ЭТМД с двумя АНЭ.

### Теория

Конструкция ЭТМД с двумя АНЭ должна обеспечивать максимальный нагрев рабочего тела (аммиак, изобутан, фреон R134-A и др.) для увеличения удельного импульса тяги микродвигателя. Корпус ЭТМД представляет собой сложную конструкцию с большим количеством каналов газовада, в котором и осуществляется нагрев рабочего тела. Для обеспечения максимального теплообмена рабочего газа с горячими поверхностями микродвигателя его корпус изготовлен по аддитивным технологиям из стали, за счет чего удалось уменьшить толщину стенок каналов газовада (толщина стенок не превышает 0,5 мм), что, в свою очередь, уменьшает общую массу корпуса и позволяет уменьшить теплоемкость корпуса [8, 13–15].

Уменьшение теплоемкости корпуса приводит к увеличению температуры нагрева рабочего тела.

Для повышения надежности ЭТМД в корпусе предусмотрена возможность размещения двух АНЭ, один из которых является резервным. При не-



Рис. 3. ЭТМД с двумя АНЭ и теплозащитой

Fig. 3. Resistojet with two heating elements and thermal protection

обходимости подаваемая мощность на ЭТМД может подаваться как на один АНЭ, так и на оба.

В качестве АНЭ используются трубчатые электронагреватели ТЭНУ с внутренней термпарой, соответствующий ГОСТ 13268-88 [16]. Характеристики АНЭ: номинальная мощность — до 60 Вт; рабочее напряжение — 12 В; диаметр — 4,0 мм; длина — 50 мм; гарантийный ресурс при эксплуатации в газовой среде — 3000 ч.

К корпусу ЭТМД приваривается сопло, на внешней поверхности которого имеется резьба для крепления фланца. Фланец позволяет разместить ЭТМД с двумя АНЭ во внутренней полости топливного бака, тем самым уменьшая общие габариты КДУ.

Конструкция ЭТМД с двумя АНЭ представлена на рис. 2.

Для снижения тепловых потерь корпуса ЭТМД с двумя АНЭ по аналогии с экспериментальными

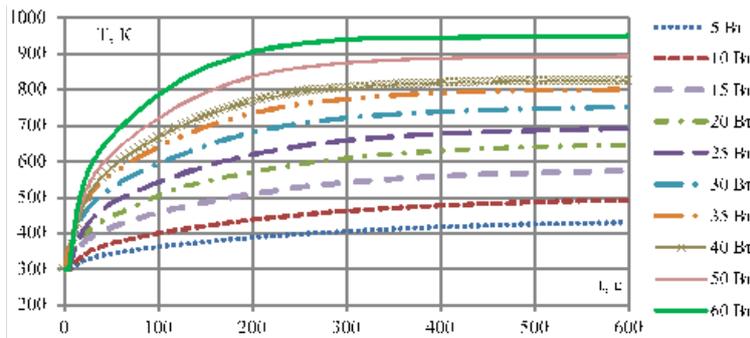


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ на воздухе без теплозащиты

Fig. 4. Results of experimental studies of resistojet with two heating elements in air without thermal protection

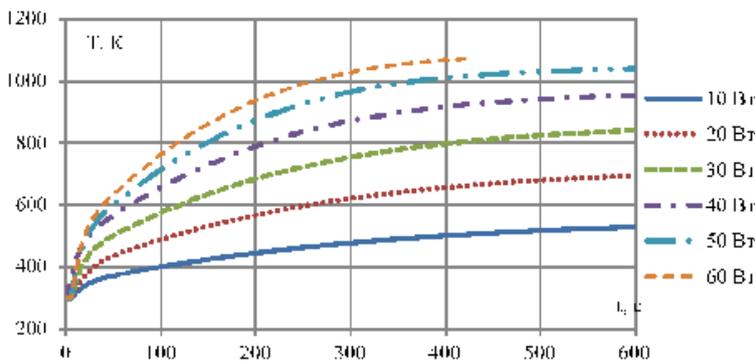


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ на воздухе с теплозащитой

Fig. 5. Results of experimental studies of resistojet with two heating elements in air with thermal protection

исследования ЭТМД с АНЭ диаметром 6 мм использована многослойная теплозащита в составе: ткань ХВК-0.05, фольга, сплав ИВЗВ, 8 мкм.

В соответствии с рис. 3 представлен изготовленный ЭТМД с двумя АНЭ.

Для определения максимального времени выхода ЭТМД на квазистационарный режим при «горячем» способе запуска предложена методика экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ в нормальных условиях (атмосфере), которая включает в себя:

- подключение АНЭ ЭТМД к источнику питания, подключение внутренней термопары АНЭ к многоканальному измерителю температуры (МИТ-8);

- подача мощности на АНЭ от 10 Вт до 60 Вт (мощность подается на один АНЭ, второй находится в резерве);

- регистрация температуры АНЭ через каждые 5 с в течение 10 мин (или до достижения максимальной температуры — 1073 К);

- прекращение подачи мощности на АНЭ и остывание ЭТМД до 298 К.

Для определения динамики нагрева рабочего тела в ЭТМД с двумя АНЭ предложена методика проведения экспериментальных исследований в вакуумной камере в составе образца КДУ, которая включает в себя:

- подключение электрических разъемов ЭТМД к КДУ;

- предварительный разогрев конструкции ЭТМД и испарителя за счет подачи напряжения на АНЭ ЭТМД от 10 Вт до 60 Вт и подача напряжения

10 Вт на АНЭ испарителя без подачи рабочего тела;

- подача напряжения на электроклапан и подача рабочего тела в ЭТМД (в качестве рабочего тела использован изобутан);

- ограничение температуры нагрева ЭТМД — 1073 К;

- прекращение подачи мощности на АНЭ и напряжения на электроклапан, остывание ЭТМД до 298 К.

### Результаты исследований

На рис. 4–5 приведены результаты экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ на воздухе без теплозащиты и с использованием теплозащиты.

Экспериментальные исследования ЭТМД с двумя АНЭ в нормальных условиях (атмосфере) подтвердили работоспособность микродвигателя. Применение теплозащиты на ЭТМД позволяет увеличить температуру нагрева конструкции ЭТМД на величину  $\Delta T$ , а также позволяет уменьшить время нагрева до заданной температуры при одинаковой подаваемой мощности на ЭТМД с теплозащитой и без теплозащиты (рис. 6).

Кроме того, было определено максимальное время выхода ЭТМД на квазистационарный режим, что позволило определить максимальное время предварительного разогрева ЭТМД перед подачей рабочего тела при работе по штатной циклограмме в условиях вакуума.

С учетом полученных результатов в нормальных условиях (атмосфере) были проведены экспе-

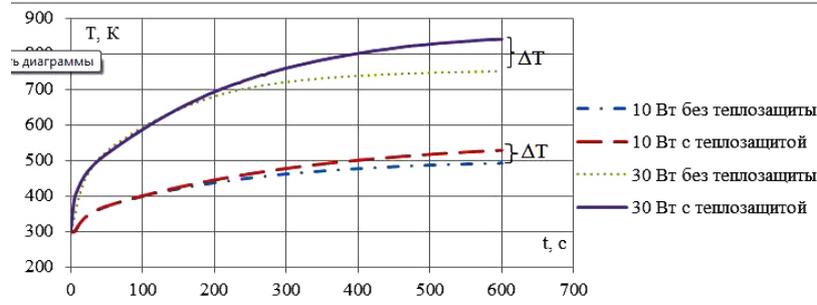


Рис. 6. Влияние теплозащиты на температурные характеристики ЭТМД с двумя АНЭ  
Fig. 6. The influence of thermal protection on temperature characteristics resistojet with two heating elements

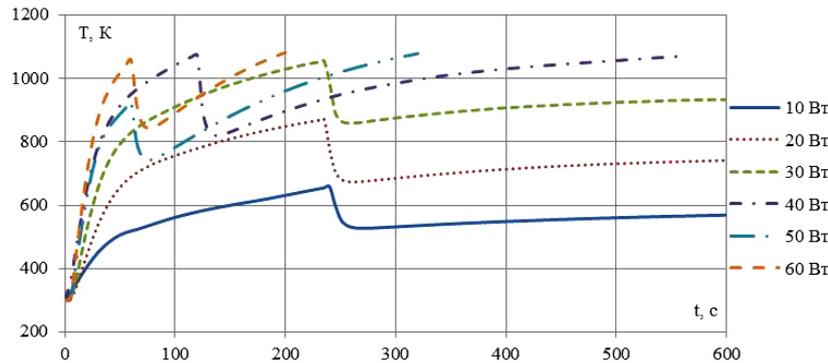


Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ в вакууме  
Fig. 7. Results of experimental studies of resistojet with two heating elements in vacuum

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ в условиях вакуума  
Table 1. Results of experimental studies of a resistojet with two heating elements under vacuum conditions

№	Время, t, с	Подаваемая на АНЭ мощность, Вт					
		10	20	30	40	50	60
		Время предварительного разогрева ЭТМД, с					
		240		120		60	
Температура АНЭ, К							
1	10	301,75	303,46	303,68	307,80	402,66	408,67
2	50	506,05	634,27	769,62	914,10	887,76	1017,81
3	100	561,63	750,62	902,28	1042,39	782,81	890,46
4	150	599,90	804,84	974,17	831,17	881,60	1002,72
5	200	631,19	845,28	1025,27	897,40	960,74	1082,14
6	250	555,54	707,11	893,87	949,18	1020,49	
7	300	531,76	683,34	873,24	984,62	1064,38	
8	350	540,90	699,49	891,77	1011,81		
9	400	548,61	712,44	906,40	1030,81		
10	450	554,98	722,57	915,78	1044,56		
11	500	560,36	730,26	923,67	1056,53		
12	550	564,91	736,19	930,02	1068,43		
13	600	568,75	740,89	933,26			

риментальные исследования ЭТМД с двумя АНЭ в вакуумной камере с подачей рабочего тела (изобутан), результаты которых представлены на рис. 7 и в табл. 1.

### Выводы

В ходе проведенных автономных экспериментальных исследований была подтверждена работоспособность ЭТМД с двумя АНЭ.

Экспериментальные исследования на воздухе показали необходимость использования теплозащиты. При одинаковой подаваемой мощности на АНЭ ЭТМД с теплозащитой были достигнуты более высокие значения температуры по сравнению с ЭТМД без теплозащиты, в частности за 10 минут работы достигнуты следующие значения температуры:

— при мощности 10 Вт температура АНЭ составила 528,8 К (отличие от температуры без теплозащиты —  $\Delta T = 36,4$  К);

— при мощности 20 Вт температура АНЭ составила 694,4 К ( $\Delta T = 48,5$  К);

— при мощности 30 Вт температура АНЭ составила 840,3 К ( $\Delta T = 89,6$  К);

— при мощности 40 Вт температура АНЭ составила 953,8 К ( $\Delta T = 128,5$  К);

— при мощности 50 Вт температура АНЭ составила 1040 К ( $\Delta T = 147,7$  К);

— при мощности 60 Вт температура АНЭ составила 1072,5 К ( $\Delta T = 152,5$  К).

Данные исследования подтверждают необходимость применения теплозащиты ЭТМД в условиях вакуума.

В ходе проведения экспериментальных исследований было определено время предварительного разогрева ЭТМД при «горячем» способе запуска. Для мощностей 10 Вт, 20 Вт, 30 Вт время предварительного разогрева конструкции составило 4 минуты с достижением следующих максимальных температур АНЭ до подачи рабочего тела (ТАНЭ) и максимальных температур АНЭ после подачи рабочего тела (ТАНЭ с рт):

— 10 Вт —  $T_{АНЭ} = 658,3$  К;  $T_{АНЭ с рт} = 568,75$  К;

— 20 Вт —  $T_{АНЭ} = 871,24$  К;  $T_{АНЭ с рт} = 740,89$  К;

— 30 Вт —  $T_{АНЭ} = 1054,99$  К;  $T_{АНЭ с рт} = 933,26$  К;

Для мощности 40 Вт время предварительного разогрева конструкции составило 2 минуты, корпус ЭТМД разогрелся до 1072,97 К, а максимальная температура АНЭ после подачи рабочего тела составила 1072 К.

Для мощностей 50 Вт и 60 Вт время предварительного разогрева составило 1 минуту, с достижением следующих температур: 50 Вт — корпуса  $T_{АНЭ} = 924,67$  К;  $T_{АНЭ с рт} = 1078,5$  К; 60 Вт —  $T_{АНЭ} = 1058,19$  К;  $T_{АНЭ с рт} = 1082,14$  К.

Проведенные экспериментальные исследования ЭТМД с двумя АНЭ показали возможность применения данных микродвигателей как в составе ДУ МКА, так и в составе микро- и наноспутников с ограниченным потреблением мощности до 20 Вт.

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований по перераспределению общей подаваемой мощности на оба АНЭ ЭТМД и определения оптимальной циклограммы работы микродвигателя.

### Список источников

1. Sabatinia M., Volpeb R., Palmerinic G. B. Centralized visual based navigation and control of a swarm of satellites for on-

orbit servicing // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 171. P. 323–334. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.03.015.

2. Lev D., Myers R. M., Lemmer K. M. [et al.]. The technological and commercial expansion of electric propulsion // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 159. P. 213–227. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03/058.

3. Narayanasamy A., Ahmad Y. A., Othman M. Nanosatellites constellation as an IoT communication platform for near equatorial countries // 6th International Conference on Mechatronics – ICOM17. 2017. Vol. 260. P. 1–14. DOI: 10.1088/1757-899X/260/1/012028.

4. Седельников А. В., Орлов Д. И., Сердакова В. В., Николаева А. С. Исследование возмущений от температурного удара панели солнечной батареи при моделировании вращательного движения малого космического аппарата вокруг центра масс // *Труды МАИ*. 2022. № 126. DOI: 10.34759/trd-2022-126-11.

5. Woellert K., Ehrenfreund P., Ricco A. J. [et al.]. Cubesats: Cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations // *Advances in Space Research*. 2010. Vol. 47 (4). P. 663–684. DOI: 10.1016/j.asr.2010.10.009.

6. Блинов В. Н., Косицын В. В., Лукьянчик А. И., Степень П. В., Ячменев П. С. Исследование основных проектных параметров импульсной электротермической двигательной установки наноспутников // *Космонавтика и ракетостроение*. 2022. № 2 (125). С. 75–88. EDN: TQJNNX.

7. Блинов В. Н., Косицын В. В., Лукьянчик А. И. [и др.]. Исследования надежности импульсной электротермической двигательной установки наноспутника // *Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2021. Т. 5, № 4. С. 75–82. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-75-82.

8. Romei F., Grubišić A. N. Numerical study of a novel monolithic heat exchanger for electrothermal space propulsion // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 159. P. 8–16. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.025.

9. Белоконов И. В., Ивлиев А. В., Богатырев А. М. [и др.]. Выбор проектного облика двигательной установки наноспутника // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии машиностроения*. 2019. Т. 18, № 3. С. 29–37. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-29-37.

10. Kwan P. W., Huangb X., Zhanga X. Design and testing of a microelectromechanical-system-based high heat flux vaporizing liquid microthruster // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 170. P. 719–734. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.01.017.

11. Belokonov I., Ivliev A. Development of a propulsion system for a maneuvering module of a low-orbit nanosatellite // *Procedia Engineering*. 2017. № 185. P. 366–372.

12. Блинов В. Н., Шалай В. В., Зубарев С. И., Косицын В. В., Рубан В. И., Ходорева Е. В. Исследования электротермических микродвигателей корректирующих двигательных установок маневрирующих малых космических аппаратов: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 264 с. ISBN 978-5-8149-1710-2.

13. Romei F., Grubišić A. N. Validation of an additively manufactured resistojet through experimental and computational analysis // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 167. P. 14–22. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.10.046.

14. Блинов В. Н., Лукьянчик А. И. Оценка эффективности малогабаритного электротермического микродвигателя с автономным нагревательным элементом // *Проблемы машиноведения: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф.*, Омск, 17–19 марта 2020 года. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2020. С. 223–230. EDN: WQTTWY.

15. Neji B., Hamrouni C., Alimi A. M. [et al.]. Design and prototype of an image capturing and processing system for ERPSat-1 PicoSatellite, in RAST '09 // 4th International Conference on Recent Advances in Space Technology. Recent Advances in Space Technologies. 2009. P. 1–12. DOI: 10.1109/RAST.2009.5158290, 2009.

16. ГОСТ 13268-88. Электронагреватели трубчатые. Введ. 1990–01–01. Москва: Госстандарт Союза ССР: Изд-во стандартов, 1989. 15 с.

**БЛИНОВ Виктор Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск. SPIN-код: 8934-4313

AuthorID (РИНЦ): 530029

AuthorID (SCOPUS): 56503115200

ORCID: 0000-0002-9309-4610

Адрес для переписки: blinovvictor@yandex.ru

**КОСИЦЫН Валерий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск. SPIN-код: 8766-8891

AuthorID (РИНЦ): 723680

AuthorID (SCOPUS): 56503934600

Адрес для переписки: valera\_kositsin@mail.ru

**ЛУКЬЯНЧИК Антон Игоревич**, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск. SPIN-код: 2378-9723

ORCID: 0000-0002-3309-4125

AuthorID (SCOPUS): 57189506536

ResearcherID: O-8722-2016

Адрес для переписки: lukyanchik1991@mail.ru

**СТЕПЕНЬ Павел Валерьевич**, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск. SPIN-code: 4322-5980

AuthorID (РИНЦ): 1004744

AuthorID (SCOPUS): 57222345428

Адрес для переписки: stepen2@mail.ru

**ЯЧМЕНЕВ Павел Сергеевич**, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск. SPIN-код: 4744-0940

AuthorID (РИНЦ): 812493

ORCID: 0000-0003-3483-4321

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ResearcherID: P-5381-2016

Адрес для переписки: yachmenev-pavel@mail.ru

#### Для цитирования

Блинов В. Н., Косицын В. В., Лукьянчик А. И., Степень П. В., Ячменев П. С. Автономные экспериментальные исследования электротермического микродвигателя с двумя автономными нагревательными элементами для наноспутников // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 48–55. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-48-55.

Статья поступила в редакцию 12.10.2023 г.

© В. Н. Блинов, В. В. Косицын, А. И. Лукьянчик,

П. В. Степень, П. С. Ячменев

## AUTONOMOUS EXPERIMENTAL STUDIES RESISTOJET WITH TWO AUTONOMOUS HEATING ELEMENTS FOR NANOSATELLITES

V. N. Blinov, V. V. Kositsyn, A. I. Lukyanchik,  
P. V. Stepen, P. S. Yachmenev

Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The purpose of the work is to conduct autonomous experimental studies of an resistojet with two autonomous heating elements with a diameter of 4 mm. As a result of experimental studies of the resistojet, the heating dynamics of the micromotor structure and the working fluid (isobutane) in the power range from 5 W to 60 W is determined. Experimental studies have shown the possibility of using the proposed resistojet design with two autonomous heating elements not only on small spacecraft, but also on micro- and nanosatellites under conditions of limited on-board energy.

**Keywords:** nanosatellite, propulsion system, resistojet, autonomous experimental research, autonomous heating element.

### References

1. Sabatinia M., Volpeb R., Palmerinic G. B. Centralized visual based navigation and control of a swarm of satellites for on-orbit servicing // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 171. P. 323–334. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.03.015. (In Engl.).
2. Lev D., Myers R. M., Lemmer K. M. [et al.]. The technological and commercial expansion of electric propulsion // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 159. P. 213–227. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03/058. (In Engl.).
3. Narayanasamy A., Ahmad Y. A., Othman M. Nanosatellites constellation as an IoT communication platform for near equatorial countries // 6th International Conference on Mechatronics – ICOM17. 2017. Vol. 260. P. 1–14. DOI: 10.1088/1757-899X/260/1/012028. (In Engl.).
4. Sedel'nikov A. V., Orlov D. I., Serdakova V. V., Nikolayeva A. S. Issledovaniye vozmushcheniy ot temperaturnogo udara paneli solnechnoy batarei pri modelirovani vrashchatel'nogo dvizheniya malogo kosmicheskogo apparata vokrug tsentra mass [Investigation of disturbances from a temperature shock of a solar battery panel when simulating the rotational motion of a small spacecraft around the center of mass] // *Trudy MAI. Trudy MAI*. 2022. No. 126. DOI: 10.34759/trd-2022-126-11. (In Russ.).
5. Woellert K., Ehrenfreund P., Ricco A. J. [et al.]. Cubesats: Cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations // *Advances in Space Research*. 2010. Vol. 47 (4). P. 663–684. DOI: 10.1016/j.asr.2010.10.009. (In Engl.).
6. Blinov V. N., Kositsyn V. V., Luk'yanchik A. I., Stepen' P. V., Yachmenev P. S. Issledovaniye osnovnykh proyektnykh parametrov impul'snoy elektrotermicheskoy dvigatel'noy ustanovki nanospudnikov [Research of the main design parameters pulsed electrothermal propulsion system of nanosatellites] // *Kosmonavtika i raketostroyeniye. Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2022. No. 2 (125). P. 75–88. EDN: TQJNXX. (In Russ.).
7. Blinov V. N., Kositsyn V. V., Luk'yanchik A. I. [et al.]. Issledovaniya nadezhnosti impul'snoy elektrotermicheskoy dvigatel'noy ustanovki nanospudnika [Research on reliability of pulsed electrothermal propulsion system of nanosatellite] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin*.

*Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 4. P. 75–82. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-75-82. (In Russ.).

8. Romei F., Grubišić A. N. Numerical study of a novel monolithic heat exchanger for electrothermal space propulsion // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 159. P. 8–16. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.025. (In Engl.).

9. Belokonov I. V., Ivliyev A. V., Bogatyrev A. M. [et al.]. Vybor proyektogo oblika dvigatel'noy ustanovki nanospudnika [Selection of project structure for nanosatellite propulsion system] // *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii mashinostroyeniye. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 18, no. 3. P. 29–37. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-29-37. (In Russ.).

10. Kwan P. W., Huangb X., Zhanga X. Design and testing of a microelectromechanical-system-based high heat flux vaporizing liquid microthruster // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 170. P. 719–734. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.01.017. (In Engl.).

11. Belokonov I., Ivliyev A. Development of a propulsion system for a maneuvering module of a low-orbit nanosatellite // *Procedia Engineering*. 2017. No. 185. P. 366–372. (In Engl.).

12. Blinov V. N., Shalay V. V., Zubarev S. I., Kositsyn V. V., Ruban V. I., Khodoreva E. V. Issledovaniya elektrotermicheskikh mikrovdigatelyey korrektruyushchikh dvigatel'nykh ustanovok manevriruyushchikh malyykh kosmicheskikh apparatov [The researches of correcting power units electro-thermal micromotors of maneuverable small space vehicles]. Omsk, 2014. 264 P. ISBN 978-5-8149-1710-2. (In Russ.).

13. Romei F., Grubišić A. N. Validation of an additively manufactured resistojet through experimental and computational analysis // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 167. P. 14–22. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.10.046. (In Engl.).

14. Blinov V. N., Luk'yanchik A. I. Otsenka effektivnosti malogabaritnogo elektrotermicheskogo mikrovdigatelya s avtonomnym nagrevatel'nyim elementom [Evaluation of the efficiency of a small-sized resistojet with an autonomous heating element] // *Problemy mashinovedeniya. Mechanical Science and Technology*. Omsk, 2020. P. 223–230. (In Russ.).

15. Neji B., Hamrouni C., Alimi A. M. [et al.]. Design and prototype of an image capturing and processing system for ERPSat-1 PicoSatellite, in RAST '09 // 4th International

Conference on Recent Advances in Space Technology. Recent Advances in Space Technologies. 2009. P. 1–12. DOI: 10.1109/RAST.2009.5158290, 2009. (In Engl.).

16. GOST 13268-88. Elektronagrevateli trubchatyye [Tubular Electric Heaters]. Moscow, 1989. 15 p. (In Russ.).

---

**BLINOV Viktor Nikolayevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Aircraft and Rocket Building Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 8934-4313

AuthorID (RSCI): 530029

AuthorID (SCOPUS): 56503115200

ORCID: 0000-0002-9309-4610

Correspondence address: blinovviktor@yandex.ru

**KOSITSIN Valeriy Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 8766-8891

AuthorID (RSCI): 723680

AuthorID (SCOPUS): 56503934600

Correspondence address: valera\_kositsin@mail.ru

**LUKYANCHIK Anton Igorevich**, Senior Lecturer of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2378-9723

ORCID: 0000-0002-3309-4125

AuthorID (SCOPUS): 57189506536

ResearcherID: O-8722-2016

Correspondence address: lukyanchik1991@mail.ru

**STEPEN Pavel Valeryevich**, Senior Lecturer of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4322-5980

AuthorID (RSCI): 1004744

AuthorID (SCOPUS): 57222345428

Correspondence address: stepen2@mail.ru

**YACHMENEV Pavel Sergeevich**, Senior Lecturer of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4744-0940

ORCID: 0000-0003-3483-4321

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ResearcherID: P-5381-2016

Correspondence address: yachmenev-pavel@mail.ru

#### For citations

Blinov V. N., Kositsyn V. V., Lukyanchik A. I., Stepen P. V., Yachmenev P. S. Autonomous experimental studies resistojet with two autonomous heating elements for nanosatellites // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 48–55. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-48-55.

Received October 12, 2023.

© V. N. Blinov, V. V. Kositsyn, A. I. Lukyanchik,  
P. V. Stepen, P. S. Yachmenev