

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЕКТНОГО ОБЛИКА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ С ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

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

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

Представлены результаты экспериментальных исследований на азоте с избыточным давлением 0,02 МПа электротермического микродвигателя двигательной установки малого космического аппарата с пористой структурой массой 45 г и автономным нагревательным элементом радиусом 3 мм с потребляемой мощностью до 60 Вт для времени прогрева до 300 с. Экспериментально доказана возможность использования пористой структуры в качестве объемного газоваода топлива с увеличением интенсивности теплоотдачи и определена фактическая удельная теплоемкость пористой структуры. С учетом фактической удельной теплоемкости проведены теоретические исследования массы и геометрии пористой структуры в составе микродвигателя, оптимальные в отношении используемого автономного нагревательного элемента мощностью и величины нагрева топлива в диапазоне [573–1273] К. С учетом радиуса нагревательного элемента определен диапазон температур топлива [573–973] К, соответствующий оптимальным массам и радиусам пористой структуры для формирования проектного облика микродвигателя. **Ключевые слова:** автономный нагревательный элемент, двигательная установка, малый космический аппарат, пористая структура, проектный облик, удельная теплоемкость, электротермический микродвигатель.

Введение

Создание орбитальных группировок маневрирующих малых космических аппаратов (МКА) для решения широкого круга научных и прикладных задач ставит актуальную задачу повышения эффективности двигательной установки (ДУ) с электротермическим микродвигателем (ЭТМД) с автономным нагревательным элементом (АНЭ), используемым в целом ряде МКА различной размерности [1–6].

Проектный облик ЭТМД формируется на основе конструктивных решений по увеличению удельного импульса тяги микродвигателя для заданной мощности АНЭ, зависящего от величины нагрева газообразного топлива на входе в критическое сечение сопла (аммиак, изобутан, фреон R134-A и др.). Основными из таких решений являются: снижение массы корпуса ЭТМД и увеличение теплообмена рабочего тела ЭТМД с нагретыми поверхностями газоваода [7].

Снижение массы корпуса ЭТМД с АНЭ на 8–9 % достигается изготовлением его по аддитивной технологии из стали. Увеличение теплообмена рабочего тела с конструкцией обеспечивается выполнением газоваода в виде винтовых полостей, представленным в соответствии с рис. 1 [3, 4, 7].

Дальнейшее повышение эффективности ЭТМД с АНЭ за счет стабилизации процесса нагрева топлива и интенсификации теплообмена рабочего тела ЭТМД с нагретыми поверхностями газоваода достигается использованием объемного газоваода в виде пористой структуры в соответствии с рис. 2 [8–12].

Проведение теоретических исследований проектного облика ЭТМД основано на использовании

фактической удельной теплоёмкости и массы газоваода в виде пористой структуры, оптимальной по отношению к температуре нагрева топлива при входе в критическое сечение сопла и геометрическим ограничениям АНЭ.

Пористый объемный газоваод является нестабильной структурой, поэтому удельная теплоемкость газоваода в составе ЭТМД с АНЭ заданной мощности определяется экспериментальным путем в составе опытного образца ЭТМД.

Оптимизация массы газоваода в виде пористой структуры для АНЭ заданной мощности и габаритов может быть определена расчетным путем с использованием результатов экспериментальных исследований фактической удельной теплоемкости газоваода.

В этой связи актуальной является задача исследования оптимального проектного облика ЭТМД на основе экспериментальных исследований удельной теплоемкости объемного газоваода в виде пористой структуры и теоретических исследований массовых и геометрических характеристик газоваода.

Постановка задачи

Основными проектными параметрами ЭТМД, определяющими его оптимальный облик при фиксированной мощности и габаритов АНЭ, являются:

- температура рабочего тела на входе в критическое сечение сопла;
- масса объемного газоваода в виде пористой структуры.

Рассмотрен «горячий» запуск ЭТМД, при котором конструкция ЭТМД перед подачей газообраз-

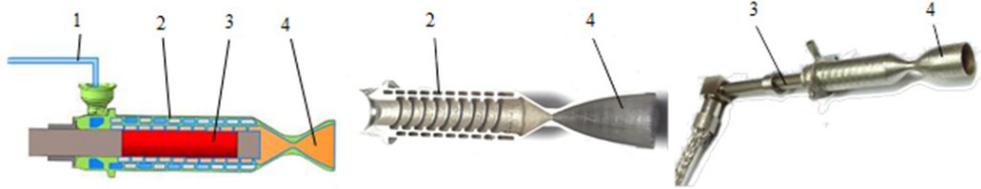


Рис. 1. ЭТМД с АНЭ с винтовыми газоведами:

1 — подвод топлива; 2 — газоведы в виде винтовых полостей; 3 — АНЭ; 4 — сопло

Fig. 1. Resistojet with automation elements with screw gas ducts:

1 — fuel supply; 2 — gas carriers in the form of screw cavities; 3 — automation elements; 4 — nozzle

ного топлива разогревается электрической мощностью.

В качестве АНЭ использован цилиндрический электронагреватель с характеристиками: номинальная мощность 60 Вт, рабочее напряжение 12 В, диаметр 6 мм, длина 80 мм, общая масса 0,03 кг.

Ставится задача формирования оптимального проектного облика ЭТМД с пористой структурой.

Для решения поставленной задачи:

— разработана принципиальная 3D модель ЭТМД с пористой структурой в соответствии с рис. 2;

— изготовлен опытный образец ЭТМД с пористой структурой и массой 45 г, превышающей массу корпуса аналога с металлическими винтовыми газоведами (20 г).

Задачами исследований для формирования оптимального проектного облика ЭТМД приняты:

— экспериментальные исследования на азоте удельной теплоемкости объемного газоведа в виде пористой структуры в составе опытного образца ЭТМД;

— теоретические исследования оптимальной массы газоведа в отношении АНЭ заданной мощности;

— исследования оптимального облика ЭТМД с пористой структурой с учетом габаритов АНЭ.

Экспериментальные исследования на азоте проведены на опытном ЭТМД в соответствии с рис. 3.

Теория

Для рассматриваемого ЭТМД с АНЭ и объемным газоведом в виде пористой структуры количество теплоты Q при нагреве АНЭ определяется мощностью и временем работы микродвигателя $N_{\text{ЭТМД}}$, $\tau_{\text{ЭТМД}}$, удельными теплоемкостями и массами входящими в состав ЭТМД элементами, а также требуемой температурой нагрева топлива dT_n :

$$Q = N_{\text{ЭТМД}} \cdot \tau_{\text{ЭТМД}} \quad (1)$$

$$Q = \left(c_{\text{зас}}^{\text{АНЭ}} m_{\text{зас}}^{\text{АНЭ}} + c_{\text{к}}^{\text{АНЭ}} m_{\text{к}}^{\text{АНЭ}} + c_{\text{пс}}^{\text{р}} m_{\text{пс}}^{\text{р}} + c_{\text{к}}^{\text{ЭТМД}} m_{\text{к}}^{\text{ЭТМД}} + c_{\text{пт}}^{\text{а}} m_{\text{пт}}^{\text{а}} \right) dT_n \quad (2)$$

где $c_{\text{зас}}^{\text{АНЭ}}$, $c_{\text{к}}^{\text{АНЭ}}$, $c_{\text{пс}}^{\text{р}}$, $c_{\text{к}}^{\text{ЭТМД}}$, $c_{\text{пт}}^{\text{а}}$ — удельные теплоемкости материала засыпки корпуса АНЭ, корпуса АНЭ, пористой структуры объемного газоведа, внешнего корпуса ЭТМД в виде термостойкого герметика, рабочего тела в виде азота;

$m_{\text{зас}}^{\text{АНЭ}}$, $m_{\text{к}}^{\text{АНЭ}}$, $m_{\text{пс}}^{\text{р}}$, $m_{\text{к}}^{\text{ЭТМД}}$, $m_{\text{пт}}^{\text{а}}$ — масса засыпки корпуса АНЭ, корпуса АНЭ, пористой структуры объемного газоведа, внешнего корпуса ЭТМД в виде термостойкого герметика, рабочего тела в виде азота; dT_n — температура нагрева топлива

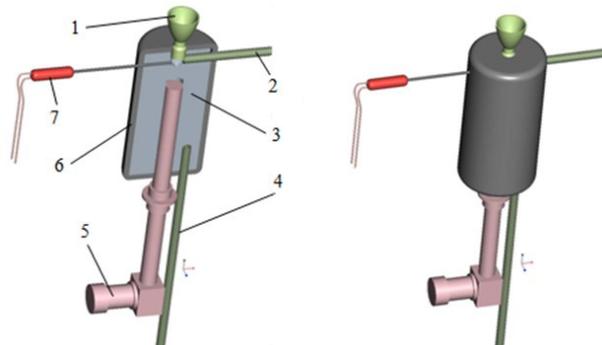


Рис. 2. Схема ЭТМД с АНЭ и газоведом в виде пористой структуры:

1 — сопло; 2 — трубопровод замера давления; 3 — объемный газовед в виде пористой структуры; 4 — трубопровод подачи топлива; 5 — АНЭ; 6 — корпус ЭТМД; 7 — термопара

Fig. 2. Resistojet circuit with automation elements and a gas pipeline in the form of a porous structure:

1 — nozzle; 2 — pressure measuring pipeline; 3 — volumetric gas pipeline in the form of a porous structure; 4 — fuel supply pipeline; 5 — automation elements; 6 — corpus resistojet; 7 — thermocouple

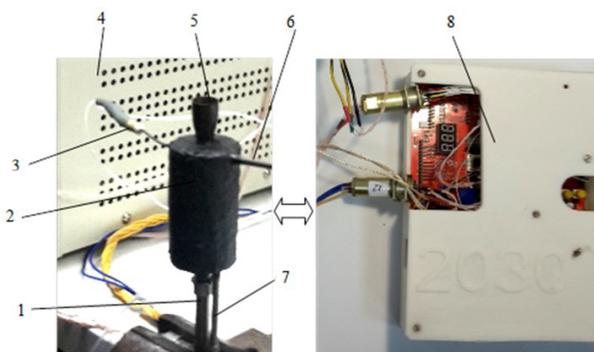


Рис. 3. Опытный образец ЭТМД с объемным газоведом в виде пористой структуры:

1 — АНЭ; 2 — корпус ЭТМД в виде пористой структуры с корпусом из высокотемпературного герметика; 3 — термопара для замера температуры азота на входе в критическое сечение сопла (принята соответствующей температуре пористой структуры при «горячем» запуске ЭТМД); 4 — источник питания; 5 — реактивное сопло; 6 — трубопровод замера давления; 7 — трубопровод подачи азота с избыточным давлением 0,02 МПа; 8 — блок управления

Fig. 3. A prototype of resistojet with a volumetric gas duct in the form of a porous structure:

1 — automation elements; 2 — corpus resistojet in the form of a porous structure; 3 — thermocouple for measuring the temperature of nitrogen at the entrance to the critical section of the nozzle (adopted by the corresponding temperature of the porous structure at the "hot" start of the resistojet); 4 — power supply; 5 — nozzle; 6 — pressure measuring pipeline; 7 — nitrogen supply pipeline with an overpressure of 0,02MPa; 8 — control unit

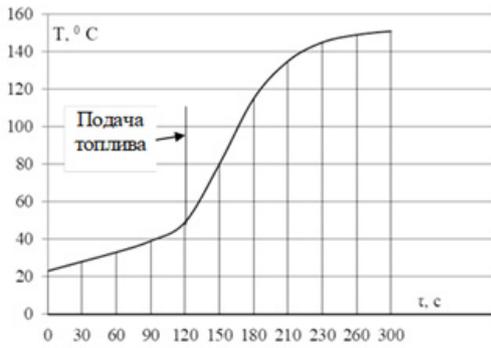


Рис. 4. Изменение параметров ЭТМД при запуске
Fig. 4. Changing resistojet parameters at startup

ЭТМД (как разность между конечной и начальной температурой: $dT_n = T_k - T_0$).

Масса расходуемого азота при включении ЭТМД определяется с учетом «горячей» схемы включения с предварительным нагревом ЭТМД по выражению:

$$m_{рт}^a = \frac{P_{ЭТМД}^b}{P_{YA}^b} \tau_b + \frac{P_{ЭТМД}^p}{P_{YA}^p} \tau_p, \quad (3)$$

где $P_{ЭТМД}^b, P_{ЭТМД}^p$ — тяга ЭТМД на участках выхода на режим и на режиме;

P_{YA}^b, P_{YA}^p — удельный импульс тяги ЭТМД на участках выхода на режим и на режиме;

τ_b, τ_p — время выхода на режим и работы на режиме.

Тяга и удельный импульс тяги ЭТМД определяются по параметрическим зависимостям на основе газодинамических функций газового потока [6].

Время выхода на режим и работы на режиме ЭТМД определены на основе результатов экспериментальных исследований в соответствии с рис. 4.

Для известных значений удельных теплоемкостей и масс, входящих в состав элементов ЭТМД, а также массы пористой структуры объемного газоваода находится его удельная теплоемкость c_{nc}^r .

В соответствии с рис. 5 приведен алгоритм исследования проектного облика ЭТМД с АНЭ и объемным газоваодом в виде пористой структуры с учетом выражений (1) – (3).



Рис. 5. Алгоритм исследования проектного облика ЭТМД
Fig. 5. Algorithm for the study of the resistojet design layout

Результаты и обсуждения

В результате экспериментальных исследований ЭТМД с объемным газоваодом в виде пористой структуры длиной 50 мм, диаметром 6 мм и массой 45 г получены следующие результаты: время нагрева — 300 с, температура нагрева 424 К.

Для экспериментально-теоретических исследований ЭТМД приняты следующие исходные данные: $c_{зас}^{АНЭ} = 1000$ Дж/(кг·К), $m_{зас}^{АНЭ} = 0,008$ кг, $c_k^{АНЭ} = 500$ Дж/(кг·К), $m_k^{АНЭ} = 0,008$ кг, $c_k^{ЭТМД} = 1300$ Дж/(кг·К), $m_k^{ЭТМД} = 0,016$ кг, $c_{рт}^a = 1042$ Дж/(кг·К), расход прогреваемого топлива 53 мг/с.

С учетом экспериментальных и исходных данных и выражения (2) получено значение удельной теплоемкости объемного газоваода в виде пористой структуры $c_{nc}^r = 2531$ Дж/(кг·К).

Исследования оптимальных значений массы и радиуса объемного газоваода в виде пористой

Таблица 1. Параметры ЭТМД, оптимальные для температуры нагрева (573–1073) К
Table 1. Resistojet parameters optimal for heating temperature (573–1073) K

№	Оптимальные параметры ЭТМД	Температура азота на входе в критическое сечение сопла ЭТМД, К					
		573	673	773	873	973	1073
1	Масса газоваода, г	15,8	9,99	6,69	4,58	3,1	2,1
2	Радиус газоваода, мм	8,3	6,8	5,8	5,1	4,6	4,1

Таблица 2. Оптимальные параметры ЭТМД с объемным газоваодом из пористой структуры
Table 2. Optimal parameters of a resistojet with a volumetric gas duct made of a porous structure

№	Параметры	Температура топлива на входе в критическое сечение сопла ЭТМД, К				
		573	673	773	873	973
1	Масса газоваода, г	15,8	9,99	6,69	4,58	3,1
2	Радиус газоваода, мм	8,3	6,8	5,8	5,1	4,6

структуры длиной 50 мм с учетом радиуса АНЭ 3 мм, оптимальных для температуры нагрева в диапазоне $dT_n = (573 - 1273)$ К, приведен в табл. 1.

Анализ полученных данных показывает, что полученные массовые и геометрические значения объемного газовада в виде пористой структуры имеют ограничения по радиусу АНЭ 3 мм и могут являться основой для формирования оптимального облика рассматриваемого ЭТМД только до температуры 973 К (табл. 2).

Выводы

1. Определена экспериментальным путем на опытном образце ЭТМД с АНЭ фактическая удельная теплоемкость объемного газовада в виде пористой структуры массой 45 г, которая составила $c_{nc}^r = 2531$ Дж/(кг·К).

2. Оптимальные масса и радиус объемного газовада в виде пористой структуры в составе ЭТМД с АНЭ диаметром 6 мм для температуры азота на входе в критическое сечение сопла в диапазоне (573–1073) К находятся в диапазоне: масса пористого газовада — (15,8–2,1) г, радиус пористого газовада — (8,3–4,1) мм.

3. Полученные оптимальные радиусы объемного газовада из пористой структуры в диапазоне температур (1073–1273) К имеют близкие значения к радиусу АНЭ 3 мм и не могут являться основой для формирования оптимального облика рассматриваемого ЭТМД.

4. Массы и радиусы объемного газовада из пористой структуры в диапазоне температур (573–973) К соответствуют ограничениям со стороны используемого АНЭ с радиусом 3 мм и мощностью 60 Вт и могут быть использованы при разработке оптимального ЭТМД для ДУ МКА.

Список источников

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

2. Leslabay P., Laurette R., Pedreira P. The ResistoJet as a simple and cost-effective propulsion system for nano- and microsatellites // 1st IAA Latin American Symposium on Small Satellites: Advanced Technologies and Distributed Systems. March 7–10, 2017.

3. 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.

4. 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.

5. Makled A., Othman M. Theoretical and experimental investigation of resisto-jet thruster // 17th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering. 19–21 April, 2016. 15 p. URL: http://www.mtc.edu.eg/pub/Issues/IssuesPaper/20170111_111606.pdf (дата обращения: 11.09.2022).

6. Blinov V. N., Vavilov I. S., Kositsin V. V. [et al.]. Design features and research of Electrothermal Microthrusters with Autonomous Heating Elements for the Purposes of Small

Space Vehicle Orbital Manoeuvring // Indian Journal of Science and Technology. 2015. Vol. 8 (27). DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i27/82937.

7. Блинов В. Н., Косицын В. В., Лукьянчик А. И. [и др.]. Исследования основных проектных параметров импульсной электротермической двигательной установки наноспутников // Космонавтика и ракетостроение. 2022. Т. 2 (125). С. 75–88.

8. Литвиненко В. В. Влияние капиллярно-пористых структур на интенсификацию процессов теплообмена при кипении жидкостей // Молодой ученый. 2019. № 7 (245). С. 113–116.

9. Овсяник А. В., Макеева Е. Н. Определение параметров теплообмена при парообразовании смесевых хладагентов на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 70–79. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-70-79.

10. Володин О. А., Печеркин Н. И., Павленко А. Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59, № 2. С. 280–312. DOI: 10.31857/S0040364421020149.

11. Макеева Е. Н., Кныш О. А. Интенсивные теплообменные поверхности для испарителей холодильных и теплонасосных установок на смесевых озонобезопасных гидрофторуглеродах // Вестник ГТТУ имени П. О. Сухого: научно-практический журнал. 2019. № 3. С. 71–76.

12. Hu H., Xu C., Zhao Y. [et al.]. Boiling and quenching heat transfer advancement by nanoscale surface modification // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. P. 6117. DOI: 10.1038/s41598-017-06050-0.

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: blinovviktork@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

Для цитирования

Блинов В. Н., Косицын В. В., Лукьянчик А. И. Исследования проектного облика электротермического микродвигателя с пористой структурой для двигательных установок малых космических аппаратов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 1. С. 55–60. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-55-60.

Статья поступила в редакцию 09.12.2022 г.

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

STUDIES OF THE DESIGN LAYOUT OF RESISTOJET WITH POROUS STRUCTURE FOR PROPULSION SYSTEMS OF SMALL SPACECRAFT

V. N. Blinov, V. V. Kositsin, A. I. Lukyanchik

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

The results of experimental studies on nitrogen with an overpressure of 0,02 MPa resistojet propulsion system of a small spacecraft with a porous structure weighing 45 g and an autonomous heating element with a radius of 3 mm with a power consumption of up to 60 watts for a warm-up time of up to 300 s are presented. The possibility of using a porous structure as a volumetric fuel gas pipeline with an increase in heat transfer intensity has been experimentally proved and the actual specific heat capacity of the porous structure has been determined. Taking into account the actual specific heat capacity, theoretical studies of the mass and geometry of the porous structure in the resistojet composition are carried out, optimal with respect to the autonomous heating element used by the power and the amount of fuel heating in the range [573–1273] K. Taking into account the radius of the heating element, the fuel temperature range [573–973] K corresponding to the optimal masses and radii of the porous structure for the formation of the resistojet design layout is determined.

Keywords: autonomous heating element, propulsion system, small spacecraft, porous structure, design layout, specific heat capacity, resistojet.

References

1. Belokonov I. V., Ivliev A. B., Bogatyrev A. M. [et al.]. Vybór proyektного oblika dvigatel'noy ustanovki nanosputnika [Selection of project structure for nanosatellite propulsion system] // Vestnik Samarskogo Universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 18, no. 3. P. 29–37. (In Russ.).
2. Leslabay P., Lauretta R., Pedreira P. The ResistoJet as a simple and cost-effective propulsion system for nano- and microsatellites // 1st IAA Latin American Symposium on Small Satellites: Advanced Technologies and Distributed Systems. March 7–10, 2017. (In Engl.).
3. 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.).
4. 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.).
5. Makled A., Othman M. Theoretical and experimental investigation of resisto-jet thruster // 17th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering. 19–21 April, 2016. 15 p. URL: http://www.mtc.edu.eg/pub/Issues/IssuesPaper/20170111_111606.pdf (accessed: 11.09.2022). (In Engl.).
6. Blinov V. N., Vavilov I. S., Kositsin V. V. [et al.]. Design features and research of Electrothermal Microthrusters with Autonomous Heating Elements for the Purposes of Small Space Vehicle Orbital Manoeuvring // Indian Journal of Science and Technology. 2015. Vol. 8 (27). DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i27/82937. (In Engl.).
7. Blinov V. N., Kositsyn V. V., Luk'yanchik A. I. [et al.]. Issledovaniya osnovnykh proyektnykh parametrov impul'snoy elektrotermicheskoy dvigatel'noy ustanovki nanosputnikov [Studies of the main design parameters of the pulsed electrothermal propulsion system of nanosatellites] // Kosmonavtika i raketostroyeniye. *Cosmonautics and Rocket Science*. 2022. Vol. 2 (125). P. 75–88. (In Russ.).
8. Litvinenko V. V. Vliyaniye kapillyarno-poristykh struktur na intensivatsiyu protsessov teplotobmena pri kipenii zhidkostey [The effect of capillary-porous structures on the intensification of heat exchange processes during boiling of liquids] // Molodoyucheny. *Young Scientist*. 2019. No. 7 (245). P. 113–116. (In Russ.).
9. Ovsyanik A. V., Makeyeva E. N. Opredeleniye parametrov teplotobmena pri paroobrazovanii smesevykh khladogentov na vysokoteploprovodnykh poroshkovykh spechennykh kapillyarno-poristykh pokrytiyakh [Determination of parameters of exchange for vaporization of the mixed refrigerant on the high thermal conductivity sintered powder capillary-porous coatings] // Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG. *Energy. Proceedings CIS Higher Educational Institutions and Power Energy Associations*. 2018. Vol. 61, no. 1. P. 70–79. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-70-79. (In Russ.).
10. Volodin O. A., Pecherkin N. I., Pavlenko A. N. Intensifikatsiya teplotobmena pri kipenii i isparenii zhidkostey na modifitsirovannykh poverkhnostyakh [Heat transfer enhancement at boiling and evaporation of liquids on modified surfaces—a review] // Teplofizika vysokikh temperature. *High Temperature*. 2021. Vol. 59, no. 2. P. 280–312. DOI: 10.31857/S0040364421020149. (In Russ.).
11. Makeyeva E. N., Knysh O. A. Intensivnyye teplotobmennyye poverkhnosti dlya ispariteley kholodil'nykh i teplonosnykh ustanovok na smesevykh ozonobezopasnykh gidrofluoroglerodakh [Intensive heat transfer surfaces for evaporators in refrigeration and heat pump systems using mixed ozone-safe hydrofluorocarbons] // Vestnik GGTU imeni P. O. Sukhogo: nauchno-prakticheskiy zhurnal. *Vestnik GGTU imeni P. O. Sukhogo: Nauchno-Prakticheskiy Zhurnal*. 2019. No. 3. P. 71–76. (In Russ.).
12. Hu H., Xu C., Zhao Y. [et al.]. Boiling and quenching heat transfer advancement by nanoscale surface modification //

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

For citations

Blinov V. N., Kositsin V. V., Lukyanchik A. I. Studies of the design layout of resistojet with porous structure for propulsion systems of small spacecraft // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, no. 1. P. 55–60. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-55-60.

Received December 09, 2022.

© V. N. Blinov, V. V. Kositsin, A. I. Lukyanchik