

ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИЙ МИКРОДВИГАТЕЛЬ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С РЕЗОНАНСНЫМ СВЧ-УСКОРИТЕЛЕМ

И. С. Вавилов, А. И. Лукьянчик, П. С. Ячменев, Р. Н. Литау, И. А. Кузьменко

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

Статья содержит изыскания авторов в области реактивных двигательных систем с низким энергопотреблением малых космических аппаратов (МКА) класса наноспутников. В работе представлена концепция микродвигателя, объединяющего термогазодинамический и электродинамический методы создания реактивной тяги. Речь идёт о двигательной установке с резонансной ускорительной системой предварительно подогретого и ионизированного рабочего тела. В качестве ускорителя рассмотрен тороидальный объёмный резонатор, возбуждаемый твёрдотельным СВЧ-автогенератором малой мощности.

Работа имеет экспериментальную и теоретическую составляющие. Экспериментальная часть посвящена разработке способа передачи СВЧ-энергии объёмному резонатору от автогенератора. Теоретическая часть включает расчёт ускоряющего зазора, габаритов тороидального резонатора, оценку скорости рабочего тела после предварительного нагрева и ускорения.

Данная работа является продолжением работ по созданию методологических основ для проектирования корректирующего двигателя микротяги МКА с СВЧ-ускорением рабочего тела.

Ключевые слова: малый космический аппарат, азот, тяга, объёмный резонатор, СВЧ, плазма, газод.

Данные исследования проводятся в рамках финансовой поддержки Российским фондом фундаментальных исследований по Договору № 31 16-38-60089\15 от 02.12.2015 г. (НИР № Гр.46-15, рег. № АААА А161160202100195).

Введение

Современные разработки в области твердотельных СВЧ-элементов позволяют создавать малогабаритные и маломощные СВЧ-генераторы, лишённые хрупкости ламповых устройств. СВЧ-устройства могут найти применение в области двигателестроения малых космических аппаратов. Интересным направлением является создание реактивной тяги путём ускорения ионизированного рабочего тела в ускоряющем зазоре СВЧ-резонатора.

В качестве ускоряющих систем для линейных ионных ускорителей применяют Н-резонаторы и системы на основе длинных линий (для приведённой фазовой скорости $\beta = 0,005 - 0,1$), резонаторы Альвареса ($\beta = 0,04 - 0,5$) или бипериодические ускоряющие системы (БУС) при $\beta \geq 0,5$ [1].

Простейшим одноззорным ускорителем является тороидальный объёмный резонатор. Такие резонаторы относятся к квазистационарным, характерным признаком которых является выраженное пространственное разделение электрического и магнитного полей у колебания с наименьшей резонансной частотой [2]. Электрическое поле сконцентрировано между плоскими поверхностями резонатора, магнитное поле вытесняется в кольцевую полость.

Перед входом в ускоряющий зазор рабочее тело должно быть ионизировано и предва-

рительно ускорено постоянной разностью потенциалов — реализована схема ионного источника [3].

Суть теоретического расчёта сводится к выбору параметров резонаторных устройств, величины ускоряющего напряжения, длины ускоряющего зазора и определение скорости рабочего тела на выходе из ускоряющего зазора.

Авторами поставлена цель — разработка и создание гибридного реактивного микродвигателя для МКА нанокласса, сочетающего термогазодинамический и электродинамический способы передачи энергии рабочему телу. Данная ниша является относительно свободной, т.к. проектирование двигательных систем для подобного класса аппаратов сопряжено с жесткими энергетическими ограничениями.

Постановка задачи

Теоретическому исследованию подвергается модель реактивного микродвигателя с двумя резонаторами и ионным источником (рис. 1). На рис. 1 представлен микродвигатель с ускорителем, состоящим из тороидального объёмного резонатора (поз. 1) с габаритными размерами $D \times d \times H \times h$, объёмного цилиндрического резонатора (поз. 2) с габаритными размерами $d \times h$ (толщиной стенок пренебрегаем на этапе оценки выходных параметров) и источника ионов. Источник

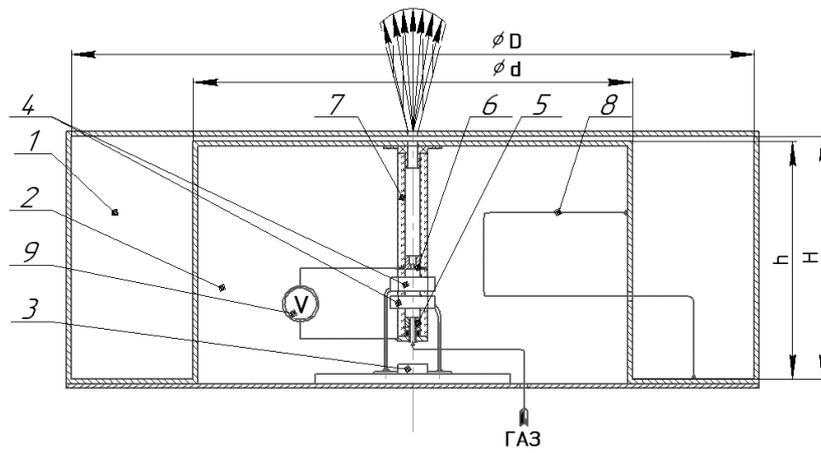


Рис. 1. Модель микродвигателя с СВЧ-ускорителем рабочего тела
 Fig. 1. The model of the microjet with linear accelerator working substance



Рис. 2. СВЧ-генератор на транзисторе MRF284L
 Fig. 2. Microwave generator on MRF284L transistor

ионов состоит из анода (поз. 5), катода (поз. 6) и источника постоянного напряжения (поз. 9). Газ (в экспериментах — азот) поступает в кварцевую трубку (поз. 7), где ионизируется в ёмкостном разряде между кольцами (поз. 4) и ускоряется разностью потенциалов между анодом и катодом. Источником СВЧ-излучения является автогенератор на основе MOSFET (полярного) транзистора (поз. 3). Связь между цилиндрическим и тороидальным резонаторами осуществляется петлёй (поз. 8).

Задачей, поставленной в исследовании, являлось определение геометрических и частотных характеристик резонаторов, определение ускоряющего напряжения, конечной скорости частиц рабочего газа на выходе из ускоряющего зазора и тягу гипотетического реактивного микродвигателя.

Экспериментальная часть была посвящена выбору способа ионизации рабочего тела и определению резонансных частот цилиндрического резонатора. В части ионизации газа были при-

менены логопериодические структуры, двухпроводные резонаторы, спиральные и коаксиальные антенны. Исследования проводились в вакуумной камере при низком расходе рабочего тела. Рабочим телом являлся азот. Малый расход газа обеспечивался дилатометрическим микродвигателем [4], который применялся как дросселирующий клапан.

Теория

Источником СВЧ-излучения является автогенератор на СВЧ-транзисторе (рис. 2) массой не более 40 г. Характеристики данного устройства являются основой для дальнейшего проектирования микродвигателя с СВЧ-ускорением рабочего тела:

1. Напряжение питания 6–20 В. Пусковое напряжение 6 В с возможностью снижения напряжения питания до 4 В.

2. Потребляемый ток зависит от режима работы генератора:

— при возникновении дуги (СВЧ-факела) — ток 1 А и более;

— режим простой генерации — от 0,1 А.

3. Ток потребления (излучаемая мощность) регулируется изменением токоограничительного резистора — от 0,2 до 10 Ом.

Согласно [5] интересующие в контексте исследования технические характеристики транзистора MRF284L:

1. Частота 2 ГГц на 26 В.
2. КПД до 45 %.
3. Рабочая температура корпуса 150 °С.
4. Рабочая температура соединения 200 °С.
5. Тепловое сопротивление 2 °С/Вт.

Использование объемных резонаторов позволяет значительно снизить потребляемую транзистором мощность при сохранении устойчивой генерации СВЧ-излучения.

Прирост энергии равновесной частицы на периоде ускоряющей структуры можно записать выражением [6]:

$$\Delta W = e \cdot E \cdot T \cdot L \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где e — заряд частицы; E — амплитуда напряженности поля в ускоряющем азоре;

$T \approx \frac{\sin(\pi \cdot \alpha)}{\pi \cdot \alpha}$ — коэффициент пролётного времени [7],

здесь $\alpha = t \cdot v$ — коэффициент пролётного времени, t — время, за которое частица пролетает зазор длиной $L = H - h$ (рис. 1), v — частота ускоряющего поля; φ — фаза поля, соответствующая пролету центра зазора.

Частоту ускоряющего поля в зазоре можно определить, вычислив резонансную частоту тороидального объёмного резонатора. Она выражается формулой [2]:

$$v = \frac{\sqrt{2(H-h)}}{\pi \cdot d \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot H \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)}}, \quad (2)$$

где ϵ_0 и μ_0 — соответственно электрическая и магнитная постоянные.

Для определения времени прохождения зазора t необходимо задаться разностью потенциалов между анодом и катодом источника ионов $U_{ин}$. Тогда приращение скорости частицы от постоянной разности потенциалов можно определить по формуле:

$$u_{ин} = \sqrt{\frac{2e \cdot U_{ин} \cdot R}{M \cdot k}}. \quad (3)$$

Здесь M — молекулярная масса рабочего тела; R — универсальная газовая постоянная; k — постоянная Больцмана. Степень ионизации рабочего тела зависит от мощности СВЧ потерь в цилиндрическом резонаторе, который является реактором.

Скорость иона на входе в ускоряющий зазор равна сумме термогазодинамической скорости молекулы, полученной при охлаждении рабочим телом СВЧ-транзистора и скорости $u_{ин}$:

$$u_{вх} = u_{терм} + u_{ин}. \quad (4)$$

Тогда время прохождения зазора можно определить простой зависимостью:

$$t = \frac{L}{u_{вх}}. \quad (5)$$

Для определения напряжения в зазоре можно воспользоваться уравнением мощности СВЧ потерь в резонаторе [8]:

$$P = \frac{U^2}{2\rho \cdot Q}, \quad (6)$$

где ρ — характеристическое сопротивление резонатора; Q — добротность резонатора.

Характеристическое сопротивление определяется через параметры контура:

$$\rho = \frac{1}{2\pi \cdot v \cdot C}, \quad (7)$$

где ёмкость тороидального резонатора определяется по формуле [9]:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \pi \cdot d^2}{4(H-h)} \cdot \left(1 + \frac{8(H-h)}{d} \cdot \ln\left(\frac{H}{H-h}\right)\right). \quad (8)$$

Добротность тороидального резонатора можно оценить по расчётной формуле определения добротности коаксиального резонатора [9]:

$$Q = \frac{875}{k} \sqrt{\lambda[\text{см}]} \times \frac{1}{2} (2\beta \cdot H + \sin(2\beta \cdot H)) \times \frac{\pi}{15 + \frac{1}{\rho \cdot \text{ctg}(\beta \cdot H)} \cdot \frac{\lambda}{d} \left(1 + e^{-\frac{\rho}{60} \cdot \text{ctg}(\beta \cdot H)}\right)} \times \frac{1}{(2\beta \cdot H + \sin(2 \cdot \beta \cdot H))}, \quad (9)$$

где $k = 1$ — отношение поверхностного сопротивления материала резонатора к поверхностному сопротивлению меди (значение принято для медного резонатора); $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число.

Задаваясь геометрическими размерами тороидального резонатора и материалом стенок, решая уравнения (1)–(9), можно определить прирост кинетической энергии ионизированной частицы рабочего тела. Это приводит к увеличению скорости частицы. Мощность СВЧ потерь можно определить экспериментально, зная КПД СВЧ-генератора.

Задаваясь геометрическими размерами тороидального резонатора и материалом стенок, решая уравнения (1)–(9), можно определить прирост кинетической энергии ионизированной частицы рабочего тела. Это приводит к увеличению скорости частицы. Мощность СВЧ потерь можно определить экспериментально, зная КПД СВЧ-генератора.

Результаты экспериментов

В ходе экспериментальных исследований работы автогенератора на СВЧ-транзисторе

Таблица 1. Выходная частота цилиндрического объёмного резонатора
Table 1. Output frequency of cylindrical volumetric resonator

Геометрические размеры резонатора, мм	Напряжение, В	Сила тока, А	Частота, МГц
Ø100×120	2	0,12	671,9683
	2,4	0,18	1009,088
	3,5	0,34	2019,2716
	4	0,43	2019,0111
	5,8	0,73	2516,5098
	6,86	0,71	2610,3975

Таблица 2. Результаты теоретического анализа
Table 2. Results of theoretical analysis

Показатель	Задаваемые значения	Расчётное значение
Габаритные размеры, D×d×H×h, мм	140×90×50×49	—
Материал резонаторов	медь	—
Ускоряющее напряжение ионного источника, В	400	—
Рабочее тело	азот	—
Скорость рабочего тела на входе в ионный источник, м/с	800	—
Массовый расход рабочего тела, мг	0,4	—
Резонансная частота цилиндрического объёмного резонатора, МГц	—	2552
Резонансная частота тороидального объёмного резонатора, МГц	—	319
Скорость иона на входе в ускоряющий зазор, м/с	—	53150
Ёмкость тороидального резонатора, пФ	—	62,56
Добротность тороидального резонатора	—	5016
Скорость иона на выходе из ускоряющего зазора, м/с	—	87560
Реактивная тяга, Н	—	0,035

MRF284L определялись выходные частоты цилиндрического резонатора диаметром 100 мм и высотой 120 мм в зависимости от рассеиваемой мощности и мощность возникновения ёмкостного тлеющего разряда при низком давлении азота в условиях вакуумной камеры.

Был изготовлен цилиндрический резонатор, автогенератор монтировался на внутренней стороне днища резонатора, соосно устанавливалась излучающая антенна. Петля связи припаивалась к внутренней боковой поверхности резонатора в области максимальной пучности поля и выводилась через крышку резонатора в коаксиальный разъём. Измерителем уровня электромагнитного фона АТТ-2592 измерялась плотность потока энергии в резонаторе. Плотность потока энергии составляла до 120 Вт/м² при напряжении 5–6 В. Благодаря высокой добротности цилиндрического резонатора генерация СВЧ-излучения на-

чиналась с напряжения 2 В вместо заявленных в технических характеристиках 6 В.

Результаты исследования частотных характеристик автогенератора совместно с объёмным цилиндрическим резонатором представлены в табл. 1. Частота колебаний определялась частотомером АСН-8325.

Вторым этапом было получение азотной плазмы в вакуумной камере. Цилиндрический объёмный резонатор помещался в вакуумную камеру, соосно с излучающей антенной устанавливался капиллярный трубопровод подачи азота. Клапаном-дресселем являлся дилатометрический микродвигатель. Подача газа осуществлялась в процессе вакуумирования камеры при включённом автогенераторе. Было установлено, что свечение азота наблюдается при напряжении 4–6 В при давлении в камере до 200 Па и массовом расходе азота 0,4–0,8 мг/с. При снижении напряжения

свечение исчезает, что говорит о недостаточной подводкой мощности, необходимой для ионизации молекул азота.

Далее проводился теоретический эксперимент, позволяющий оценить скорость рабочего тела на выходе из ускоряющего зазора. За величину мощности СВЧ-потерь в тороидальном резонаторе была взята величина 1,5 Вт (при потребляемой автогенератором мощности 4,5 Вт). Термогазодинамическая скорость азота принималась 800 м/с (уровень скорости истечения через капиллярный трубопровод холодного газа). Результаты решения уравнений (1)–(9) представлены в табл. 2.

Обсуждение результатов

В работе представлены основные полученные в настоящий момент результаты исследования авторов в области создания реактивного микродвигателя с СВЧ-ускорителем предварительно ионизированного рабочего тела:

1. Была представлена концептуальная модель микродвигателя, состоящего из четырёх основных компонентов:

а) дилатометрического клапана-дресселя, привод которого осуществляется тепловым эффектом СВЧ-транзистора, который в данном контексте выступает как резистивный элемент [10];

б) ионного источника с ускоряющей системой на постоянной разности потенциалов;

в) объёмного цилиндрического резонатора, благодаря высокой добротности которого рабочее тело ионизируется при меньшей потребляемой мощности;

г) объёмного тороидального резонатора, плоские поверхности которого формируют ускоряющий промежуток для вторичного ускорения ионизированного рабочего тела.

2. Была представлена, но не верифицирована, электродинамическая математическая модель микродвигателя, позволяющая оценить прирост энергии частицы при прохождении ускоряющих структур.

3. Экспериментально было получено значение потребляемой мощности автогенератора СВЧ, работающего совместно с цилиндрическим объёмным резонатором, при которой наблюдается азотная плазма, подобрана конструкция излучающей антенны.

Выводы и заключение

Можно сделать следующие промежуточные выводы:

1) по удельному импульсу тяги представленного микродвигателя, полученному при теоретическом расчёте, можно судить о его положении среди существующих типов реактивных двигателей систем: наиболее близкими к представленному являются стационарные плазменные двигатели и ионные двигатели;

2) по потребляемой мощности представленный двигатель значительно выгоднее электростатических аналогов;

3) представленная концепция и математическая модель идеализированы и в полной мере не подвергались верификации. Представленная работа отражает промежуточные результаты, по-

лученные при работе над двигательными системами с электродинамическим способом создания тяги.

Список источников

1. Зверев Б. В., Собенин Н. П. Электродинамические характеристики ускоряющих резонаторов. М.: Энергоатомиздат, 1993. 240 с.
2. Пименов Ю. В., Вольман В. И., Муравцов А. Д. Техническая электродинамика. М.: Радио и связь, 2000. 536 с.
3. Быстров Ю. А., Иванов С. А. Ускорители и рентгеновские приборы. М.: Высшая школа, 1976. 207 с.
4. Vavilov I. S., Lukyanchik A. I., Yachmenev P. S., Pavlenko A. V., Lysakov A. V., Litau R. N. Smallsat's dilatometric micromotor: estimation of characteristics // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1050. 012096. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012096.
5. RF Power Field Effect Transistors. Freescale Semiconductor Technical Data. URL: <http://dtsheet.com/doc/357932/freescale-mrf284lsr1> (дата обращения: 19.11.2017).
6. Капчинский И. М. Теория линейных резонансных ускорителей: динамика частиц. М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
7. Вальднер О. А., Власов А. Д., Шальнов А. В. Линейные ускорители. М.: Атомиздат, 1969. 248 с.
8. Орлов С. И. Расчёт и конструирование коаксиальных резонаторов. М.: Советское радио, 1970. 256 с.
9. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ. М.: Высшая школа, 1990. 335 с.
10. Vavilov I. S., Lukyanchik A. I., Yachmenev P. S., Litau R. N., Lysakov A. V. A small spacecraft microengine with SHF impact on working medium: cooling and dilatometric evaporator valve // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1050. 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012095.

ВАВИЛОВ Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» (АВиРС), научный сотрудник НИЧ НИЛ «ДУМИТ МКА» при кафедре АВиРС.

SPIN-код: 3468-6744; AuthorID (РИНЦ): 518332

AuthorID (SCOPUS): 56610211900

ResearcherID: B-2634-2014

Адрес для переписки: vava-igg@mail.ru

ЛУКЬЯНЧИК Антон Игоревич, ассистент, аспирант кафедры АВиРС.

SPIN-код: 2378-9723; ORCID: 0000-0002-3309-4125

AuthorID (SCOPUS): 57189506536

ResearcherID: O-8722-2016

Адрес для переписки: lukyanchik1991@mail.ru

ЯЧМЕНЕВ Павел Сергеевич, ассистент, аспирант кафедры АВиРС.

SPIN-код: 4744-0940; ORCID: 0000-0003-3483-4321

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ResearcherID: P-5381-2016

Адрес для переписки: yachmenev-pavel@mail.ru

ЛИТАУ Регина Николаевна, студентка гр. ПРК-142 факультета транспорта, нефти и газа.

КУЗЬМЕНКО Ирина Анатольевна, старший преподаватель кафедры АВиРС.

Для цитирования

Вавилов И. С., Лукьянчик А. И., Ячменев П. С., Литая Р. Н., Кузьменко И. А. Дилатометрический микродвигатель малого космического аппарата с резонансным СВЧ-ускорителем // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 4. С. 36–41. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-4-36-41.

Статья поступила в редакцию 29.10.2018 г.

© И. С. Вавилов, А. И. Лукьянчик, П. С. Ячменев, Р. Н. Литая, И. А. Кузьменко

DILATOMETRIC MICRODRIVE OF SMALL SPACECRAFT WITH RESONANT MICROWAVE ACCELERATOR

I. S. Vavilov, A. I. Lykyanchik, P. S. Yachmenev, R. N. Litau, I. A. Kuzmenko

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

The article contains the research of the authors in the field of jet propulsion systems with low energy consumption of small spacecraft (SSC) of nanosatellite class. The paper presents the concept of a Microdrive combining thermogasdynamic and electrodynamic methods of creating a jet thrust. We are talking about the propulsion system with resonance accelerating system, pre-heated and ionized working fluid. A toroidal volume resonator excited by a low-power solid-state microwave oscillator is considered as an accelerator.

The work has experimental and theoretical components. The experimental part is devoted to the development of a method for transmitting microwave energy to a volume resonator from an oscillator. The theoretical part includes the calculation of the accelerating gap, the dimensions of the toroidal resonator, the estimation of the working fluid velocity after preheating and acceleration.

This work is a continuation of works on creation of methodological bases for design correction engine micro thrust μa with microwave acceleration of the working body.

Keywords: small spacecraft, nitrogen, traction, a resonant cavity, microwave, plasma, the gas passage.

References

1. Zverev B. V., Sobenin N. P. Elektrodinamicheskiye kharakteristiki uskoryayushchikh rezonatorov [Electrodynamic characteristics of accelerating resonators]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1993. 240 p. (In Russ.).
2. Pimenov Yu. V., Vol'man V. I., Muravtsov A. D. Tekhnicheskaya elektrodinamik [Technical electrodynamic]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 2000. 536 p. (In Russ.).
3. Bystrov Yu. A., Ivanov S. A. Uskoriteli i rentgenovskiyeh pribory [Accelerators and X-ray devices]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1976. 207 p. (In Russ.).
4. Vavilov I. S., Lukyanchik A. I., Yachmenev P. S., Pavlenko A. V., Lysakov A. V., Litau R. N. Smallsat's dilatometric micromotor: estimation of characteristics // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1050. 012096. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012096. (In Engl.).
5. RF Power Field Effect Transistors. Freescale Semiconductor Technical Data. URL: <http://dtsheet.com/doc/357932/freescale-mrf284lsr1> (accessed: 19.11.2017). (In Engl.).
6. Kapchinskiy I. M. Teoriya lineynykh rezonansnykh uskoriteley: dinamika chastits [Theory of linear resonant accelerators: particle dynamics]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 240 p. (In Russ.).
7. Val'dner O. A., Vlasov A. D., Spal'nov A. V. Lineynyye uskoriteli [Linear accelerators]. Moscow: Atomizdat Publ., 1969. 248 p. (In Russ.).
8. Orlov S. I. Raschet i konstruirovaniye koaksial'nykh rezonatorov [Calculation and design of coaxial resonators]. Moscow: Sovetskoye radio Publ., 1970. 256 p. (In Russ.).
9. Grigor'yev A. D. Elektrodinamika i tekhnika SVCH [Electrodynamics and microwave technology]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1990. 335 p. (In Russ.).
10. Vavilov I. S., Lukyanchik A. I., Yachmenev P. S., Litau R. N., Lysakov A. V. A small spacecraft microengine with SHF impact on working medium: cooling and dilatometric evaporator valve // Journal of Physics: Conf. Series 2018. Vol. 1050. 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012095. (In Engl.).

VAVILOV Igor Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aviation and Rocketry Department (AVIRS); Research Associate of the Research Part of the Research Laboratory «DUMIT MCA» at the Department of AVIRS. SPIN-code: 3468-6744; AuthorID (RSCI): 518332 AuthorID (SCOPUS): 56610211900 ResearcherID: B-2634-2014 Address for correspondence: vava-igg@mail.ru
LUKYANCHIK Anton Igorevich, Assistant, Graduate Student of AVIRS Department. SPIN-code: 2378-9723; ORCID: 0000-0002-3309-4125 AuthorID (SCOPUS): 57189506536 ResearcherID: O-8722-2016 Address for correspondence: lukyanchik1991@mail.ru
YACHMENEV Pavel Sergeevich, Assistant, Graduate Student of AVIRS Department. SPIN-code: 4744-0940; ORCID: 0000-0003-3483-4321 AuthorID (SCOPUS): 57193405041 ResearcherID: P-5381-2016 Address for correspondence: yachmenev-pavel@mail.ru
LITAU Regina Nikolaevna, student gr. PRK-142 of Transport, Oil and Gas Department.
KUZMENKO Irina Anatolievna, Senior Lecturer of AVIRS Department.

For citations

Vavilov I. S., Lukyanchik A. I., Yachmenev P. S., Litau R. N., Kuzmenko I. A. Dilatometric Microdrive of small spacecraft with resonant microwave accelerator // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-rocket and Power Engineering. 2018. Vol. 2, no. 4. P. 36 – 41. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-4-36-41.

Received 29 October 2018.

© I. S. Vavilov, A. I. Lykyanchik, P. S. Yachmenev, R. N. Litau, I. A. Kuzmenko