

ДВУХАЗОРНЫЙ СВЧ ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ И ЕГО ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

И. С. Вавилов, П. С. Ячменев, В. В. Федянин, К. И. Жариков,
П. В. Степень, А. И. Лукьянчик, 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 представлен СВЧ ионный двигатель с двойным ускорением ионизированного газа в зазорах, образованных торцевыми поверхностями цилиндрических резонаторов. Представлены результаты экспериментального исследования силы давления реактивной струи ионизированного газа аэродинамическим методом двойного угла. Представлен стенд определения силовых параметров слабых плазменных струй. Представлена конструкция прототипа. Суммарное энергопотребление прототипа составило 5 Вт, скорость истечения ускоренного газа составила до 200 км/с, сила давления струи на чувствительный элемент стенда составила 0,1 мкН. Рабочим телом прототипа являлся азот при давлении в вакуумной камере 18 Па.

Ключевые слова: объемный резонатор, СВЧ, плазма, малый космический аппарат, азот, тяга, скорость.

Введение

Из теории ускорительной техники известно, что в качестве ионных ускоряющих систем используются 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 [1].

Одноазорным ускорителем является тороидальный объемный 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.

Обычно перед входом в ускоряющий зазор рабочее тело ионизируется и предварительно ускоряется постоянной разностью потенциалов электродов ионно-оптической системы, таким образом, реализована схема ионного источника [3].

Таким образом, в системе имеют место несколько подсистем: система ионизации нейтрального газа; система ускорения ионизированного газа постоянной разностью потенциалов; система ВЧ/СВЧ генерации электромагнитного излучения для создания переменного поля в тороидальном резонаторе.

Современная радиоэлектронная промышленность позволяет создавать маломощные ВЧ/СВЧ генераторы на основе твердотельных полупроводниковых элементов. Снижение массы, энергопотребления и увеличение прочности элементов позволило перенести наработки ускорительной техники в область двигателестроения малых космических аппаратов.

В мире ведутся работы по радиочастотному ускорению ионизированного газа, когда энергия частице отдаётся не постоянным, а переменным электрическим полем [4]. В данной работе авторы решают вопрос нейтрализации ионной струи за пределами двигателя без применения специализированных устройств. Переменное электрическое поле, по словам авторов, оказывает слабое возмущающее воздействие на ионы из-за их высокой инерционности, но позволяет выбрасывать за пределы двигателя электронную компоненту, которая нейтрализует ионы.

Реактивная сила ионного двигателя с энергопотреблением менее 10 Вт незначительна по сравнению с газодинамической силой нейтрального газа. Расходы газа выше 0,5 мг/с нецелесообразны, т.к. ионная составляющая тяги полностью «растворяется» в газодинамической компоненте. Малые расходы и малое давление ионной струи значительно ограничивают конструктивное разнообразие методов регистрации этих воздействий. В настоящее время работы в области низковаттных ионных двигателей с ВЧ или СВЧ разрядом не слишком обширны. Поиск по открытым источникам показал, что нижний предел по мощности достигнут в ионном двигателе ММІТ [5]. Мощность образца — 8 Вт. Тяга составляет: на аргоне — 0,217 мН, на ксеноне — 0,392 мН. Максимум работы представлен в диапазоне мощностей 13–15 Вт. Ксеноновый двигатель MiDGIT производит реактивную тягу в диапазоне 0,25–0,48 мН при энергопотреблении 13–18 Вт [6]. Аргоновый двигатель MRIT [7] при энергопотреблении 13–15 Вт создаёт ионную тягу 1,45–59 мкН. Японский ксеноновый ионный двигатель $\mu 1$ реализует тягу 0,297 мН при потребляемой мощности 15,1 Вт [8, 9].

Уровень силового воздействия струи в некоторых случаях не превышает уровня погрешностей

измерительного оборудования. Например, рычажный стенд измерения полной тяги двигателя, представленный в [10], предназначен для определения тяги в диапазоне 100 мкН — 1 Н. Конструкция оснащена подвесным маятниковым рычагом, прикрепленным к балансирующему механизму, который преобразует горизонтальные отклонения, создаваемые рабочим двигателем, в усиленное вертикальное движение вторичного рычага. Перемещение измеряется с помощью бесконтактного оптического датчика перемещения линейного зазора. Чувствительность стенда составляет 50 мкН. Стенд применялся для определения тяги стационарного плазменного ксенонного двигателя СНТ с энергопотреблением 90–185 Вт и тягой 3–6 мН [11–13]. Расход ксенона составлял до 1 мг/с. Тяги, реализуемые ионными двигателями с энергопотреблением до 10 Вт, находятся в области до 10 мкН. Соответственно, стендовые методы определения величин такого уровня должны отвечать этому уровню. К основным требованиям можно отнести простоту математического аппарата, минимум трущихся поверхностей, минимум передаточных звеньев.

В данной работе предложен прототип интегрированного СВЧ-плазменного двигателя с суммарным энергопотреблением до 6 Вт. В данном прототипе имеется только один источник электромагнитной энергии — СВЧ-автогенератор на основе транзистора MRF284L [14]. Интеграция заключается в объединении плазмогенерирующих и ускоряющих систем в одном модуле. СВЧ-автогенератор является источником рабочего тела — плазмы, а также источником электромагнитного излучения, которое обеспечивает ускорение плазмы в зазорах тороидального и цилиндрического резонаторов.

Авторами представлена конструкция прототипа двухзорного СВЧ плазменного двигателя. Были проведены экспериментальные исследования по определению силы давления ускоренной струи плазмы аэродинамическим методом двойного угла. Следует сказать, что, ввиду выброса из рабочей полости двигателя не только положительной, но и отрицательной компоненты плазмы, происходит быстрая рекомбинация и видимая часть плазменной струи значительно короче ионной струи двигателей с постоянной разностью потенциалов на электродах ионно-оптической системы.

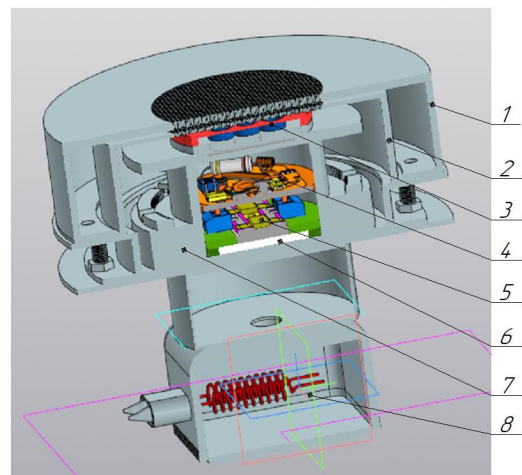


Рис. 1. Модель микродвигателя с СВЧ-ускорителем рабочего тела
Fig. 1. The model of the microjet with linear accelerator working substance

Постановка задачи

Авторами был разработан и изготовлен прототип двухзорного СВЧ ионного двигателя на базе научно-исследовательской лаборатории «Двигательные установки микротяги малых космических аппаратов» ОмГТУ. Для наглядности представлена 3D-модель прототипа (рис. 1). Основные элементы прототипа обозначены позициями. Второй высокочастотный ускоряющий зазор образован торцевыми поверхностями тороидального резонатора, который образован внешним цилиндрическим резонатором (поз. 1) и внутренним цилиндрическим резонатором (поз. 2). Резонаторы выполнены из листовой меди толщиной 1 мм и 0,3 мм соответственно. Внутри внутреннего цилиндрического резонатора расположена камера (поз. 7), выполненная из АБС-пластика аддитивным методом, содержащая плату СВЧ-автогенератора (поз. 4), модуль магнитных плазменных ячеек (поз. 3), модуль транзисторов (поз. 5) с системой охлаждения (поз. 6). Для охлаждения транзисторов применён элемент Пельтье. Выход СВЧ энергии через провода питания СВЧ-

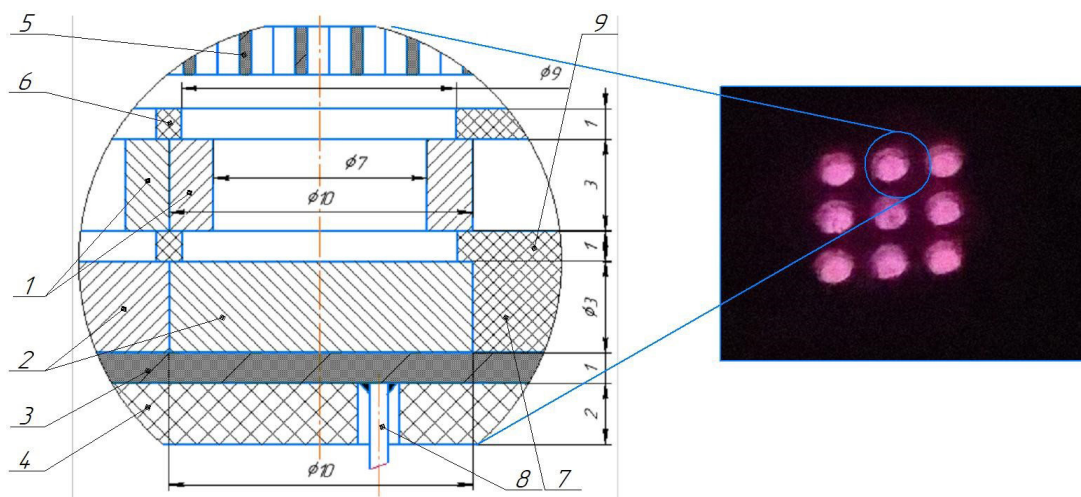


Рис. 2. Магнитная плазмогенерирующая ячейка
Fig. 2. Magnetic cell for plasma generation

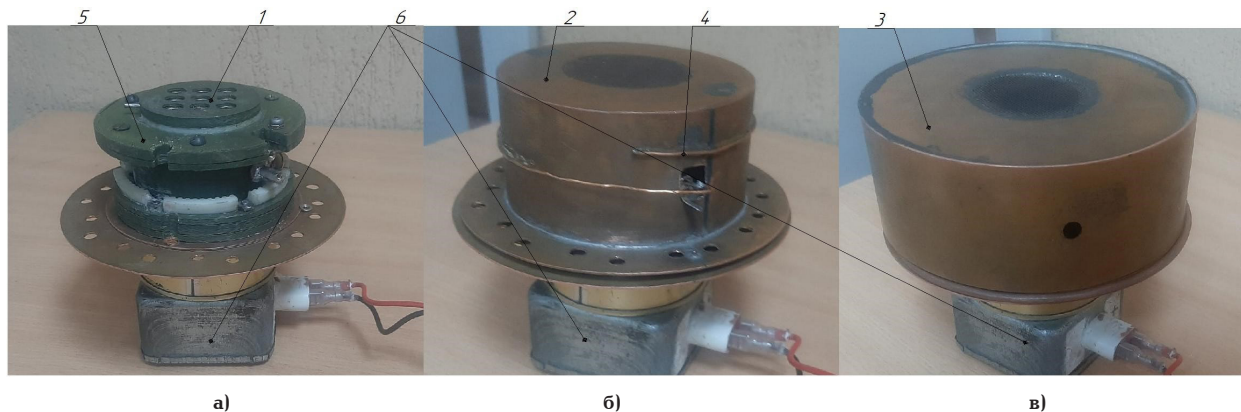


Рис. 3. Экспериментальный прототип СВЧ ионного двигателя с двухзазорным высокочастотным ускорением:
а — без резонаторов; **б** — с цилиндрическим внутренним резонатором; **в** — с тороидальным резонатором
Fig. 3. Experimental prototype of a microwave ion engine with two-gaps high-frequency acceleration:
a — without resonators; **b** — with a cylindrical internal resonator; **c** — with a toroidal resonator

автогенератора ограничен фильтром низких частот (поз. 8). Диаметр внешнего цилиндрического резонатора — 140 мм, диаметр внутреннего цилиндрического резонатора — 100 мм. Связь между резонаторами обеспечивается спиральной линией связи. Первый ускоряющий высокочастотный зазор образован плоскостью магнитных ячеек и торцевой поверхностью внутреннего цилиндрического резонатора. Неразъёмные соединения в прототипе — пайка и клеевые соединения. Разъёмные соединения — винтовые и болтовые.

Элементарная магнитная ячейка представлена на рис. 2. В прототипе установлено девять магнитных ячеек. Здесь же представлена работа магнитных ячеек в условиях вакуумной камеры в среде азота. Кольцевой (поз. 1) и дисковый (поз. 2) магниты установлены соосно на расстоянии 1 мм друг от друга. Удержание зазора обеспечивает диэлектрическая проставка (поз. 9). Дисковые магниты установлены на медном диске (поз. 3). От медного диска проволочный проводник (поз. 8) подводится к плате СВЧ-автогенератора. Дисковые магниты удерживаются корпусом из диэлектрического материала (поз. 7). Элементы из АБС-пластика под поз. 6 и поз. 4 замыкают конструкцию в независимый сменный модуль плазмогенерации. Между элементом поз. 6 и торцевой поверхностью внутреннего цилиндрического резонатора (поз. 5) образуется первый ускоряющий зазор.

Для исследования характеристик струи ускоренного ионизированного газа были применены два метода:

1. Аэродинамический метод двойного угла;
2. Метод определения тока пучка цилиндром Фарадея.

Исследования проводились для трёх состояний прототипа при электропитании платы автогенератора от 6 до 15 В с шагом 1 В.

Исследования проводились на прототипе СВЧ ИД в трёх компоновках:

1. Прототип без резонаторов (рис. 3а) — на чувствительный элемент аэродинамического стенда направлен поток плазмы из магнитных ячеек, в цилиндр Фарадея поступает поток при напряжениях 6–15 В;
2. Прототип с внутренним цилиндрическим резонатором (рис. 3б) — на чувствительный элемент аэродинамического стенда направлен поток плазмы

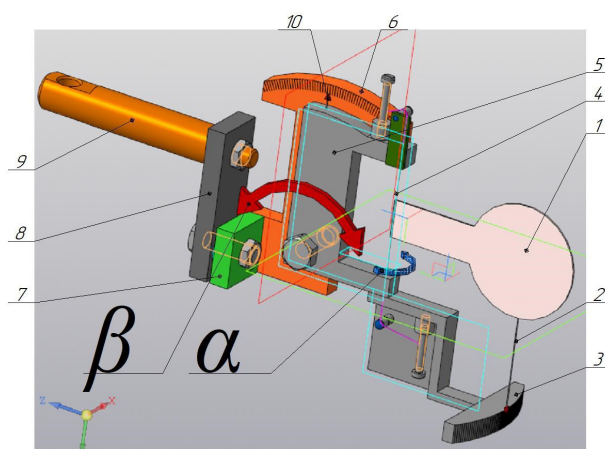


Рис. 4. Стенд измерения силы давления реактивной струи аэродинамическим методом двойного угла
Fig. 4. Stand for measuring the pressure force of a jet by the aerodynamic double angle method

из первого ускоряющего зазора, в цилиндр Фарадея поступает поток при напряжениях 6–15 В;

3. Прототип с цилиндрическим и тороидальным резонатором (рис. 3в) — на чувствительный элемент аэродинамического стенда направлен поток плазмы из двух ускоряющих зазоров, в цилиндр Фарадея поступает поток при напряжениях 6–15 В.

На рис. 3а–в позициями обозначены: 1 — модуль магнитных ячеек; 2 — внутренний цилиндрический резонатор; 3 — тороидальный резонатор; 4 — линия связи между резонаторами; 5 — корпус платы СВЧ-автогенератора; 6 — корпус фильтра низких частот.

На рис. 4 представлена 3D-модель стенда для определения силы давления струи аэродинамическим методом двойного угла. Чувствительным элементом стенда является поворотный экран (поз. 1) (в экспериментах материал экрана — полистирол, масса $0,8 \pm 0,05$ гр., положение центра тяжести от нити — 53 мм, положение центра давления от нити — 73 мм), который свободно вращается на тонкой нити (поз. 4) (в экспериментах — леска, ш 0,15 мм). Движение экрана с помощью индикаторной стрелки (поз. 2) отмечает угол отклонения на лимбе (поз. 3) — угол α . Данный угол являет-

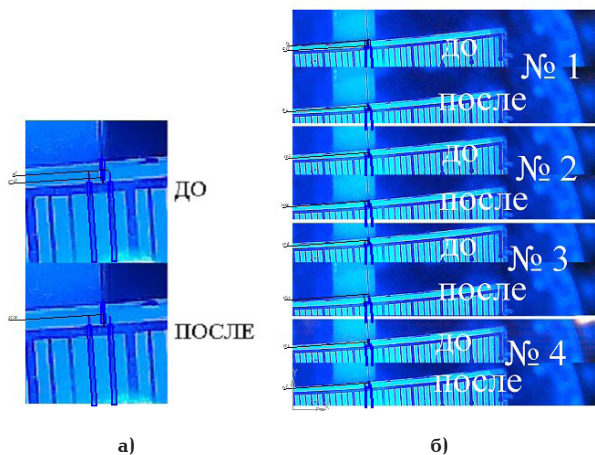


Рис. 5. Фотографические изображения лимба стенда и индикаторной стрелки
 Fig. 5. Photographic images of the scale of the stand and the indicator arrow

ся искомым. Деталь поз. 5 подвижна относительно детали поз. 6. Вращение детали поз. 5 задаёт угол обезвешивания β . Значение угла отображается индикаторной стрелкой (поз. 10). Держатель (поз. 9) неподвижно закреплен на станине стенда. С помощью деталей поз. 7 и поз. 8 изначально нить устанавливается в вертикальное положение относительно линии горизонта. Для этого используется пузырьковый уровень, типа «бычий глаз». Цена деления шкал составляет 1° . Натяжение нити обеспечивается винтами.

Теория

При подаче напряжения на плату СВЧ-автогенератора в условиях разреженной среды вакуумной камеры в ёмкостном магнитном высокочастотном зазоре ячейки возникает СВЧ разряд. Магнитное поле постоянных магнитов дополнительное время удерживает электронную лавину в зазоре между магнитами, что способствует более успешному «поджигу» газа (относительно немагнитных электродов аналогичной конфигурации) и существованию разряда при более низких напряжениях питания системы. Одновременно в объёме внутреннего цилиндрического резонатора возникает переменное электрическое поле, которое оказывает попеременное (ускоряющее и замедляющее) воздействие на компоненты плазмы. Положительные ионы дрейфуют в переменном поле первого зазора и при достижении перфорированной торцевой стенки внутреннего резонатора, в зависимости от фазы поля, ускоряются или замедляются. По линии связи электромагнитная энергия выводится в полость между цилиндрическими резонаторами — в полость тороидального резонатора. Частота поля снижается, между торцевыми поверхностями возникает второй ускоряюще-замедляющий зазор. Частицы, вышедшие с приращением скорости из первого зазора, ускоряются во втором зазоре. Часть ионов, попавших в замедляющую фазу поля, тормозится. Т.к. частота поля в тороидальном резонаторе ниже, чем частота в цилиндрическом резонаторе, а скорость ионов первого зазора высока, то замедлению подвергается меньший процент ионов, чем в первом зазоре, что показали эксперименты с цилиндром Фарадея.

Помимо положительной компоненты из полости двигателя выбрасывается и отрицательная компонента плазмы. За пределами двигателя на расстоянии 1 см от торцевой стенки тороидального резонатора струя уже не визуализируется, что может говорить о быстром процессе рекомбинации частиц. Соответственно, электрические методы диагностики таких струй малоприменимы — фактически из прототипа выходит ускоренный нейтральный газ. Поэтому метод, представленный в [15], не показал результата при работе с прототипом.

Авторы уже представляли аэродинамический метод двойного угла [7].

С помощью данного метода был исследован прототип двухзорного СВЧ-ионного двигателя с постоянной ускоряющей разностью потенциалов. В рамках исследований, представленных в [16], в полость двигателя дополнительно вводился нейтральный газ как рабочее тело прототипа. Было показано, что газодинамическая тяга газа значительно выше ионной тяги двигателя даже при низких значениях расхода газа (до 0,2 мг/с). В данной работе в полость двигателя газ не подавался, осуществлялась ионизация остаточного газа в вакуумной камере (давление испытаний — 18 Па), что устраняло необходимость вычитания газодинамической тяги из показаний стенда.

Сила давления реактивной струи определяется по соотношению:

$$P_i = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \frac{L}{H}, \quad (1)$$

где m — масса поворотного экрана; g — ускорение свободного падения; L — расстояние от оси вращения экрана до его центра тяжести; H — расстояние от оси вращения экрана до центра давления.

Положение индикаторной стрелки стенда фиксировалось веб-камерой, далее изображения обрабатывались и определялась градусная мера смещения экрана при воздействии на него ионизированного ускоренного потока.

Массовый расход ионов, участвующих в создании ионной тяги, можно определить по формуле:

$$\dot{m}_i = \frac{m_i \cdot I_\phi}{q_e}, \quad (2)$$

где m_i — масса иона (можно принять как массу молекулы азота); I_ϕ — ток пучка по цилиндру Фарадея; q_e — заряд электрона.

Соответственно, скорость ионов можно определить по формуле:

$$u_i = \frac{P_i}{\dot{m}_i}. \quad (3)$$

Результаты экспериментов

В ходе экспериментальных исследований прототипа микродвигателя аэродинамическим методом двойного угла были получены фотографические изображения индикаторной стрелки до воздействия струи и после воздействия струи. В случае испытаний прототипа без резонаторов чувствительный элемент стенда показал неожиданный результат — экран не отталкивается, а движется к плазмогенерирующим ячейкам. В случаях с резонаторами результат был обратным.

На рис. 5 представлены изображения лимба стенда и индикаторной стрелки. Для случая с од-

Таблица 1. Отклонения стрелки стенда
Table 1. Deviations of the stand arrow

С одним резонатором					С двумя резонаторами				
s , мм	$h_{до}$, мм	$h_{после}$, мм	α , град	P_r , мкН	s , мм	$h_{до}$, мм	$h_{после}$, мм	α , град	P_r , мкН
187	127,32	132,28	0,027	0,046	54	32,32	35,11	0,052	0,09
						38,2	36,88	-0,024	-0,042
						39,33	42,16	0,052	0,091
						35,3	41,2	0,109	0,19

Таблица 2. Ток ионного пучка по цилиндру Фарадея
Table 2. Ion beam current through the Faraday cylinder

U , В	Без резонаторов		Один резонатор		Два резонатора	
	I , А	I_{Φ} , мкА	I , А	I_{Φ} , мкА	I , А	I_{Φ} , мкА
6	0,23	4,3	0,23	1,2	0,2	0,5
7	0,3	5	0,3	1,2	0,24	0,6
8	0,32	7,6	0,35	1,2	0,25	0,7
9	0,34	9,7	0,34	1,7	0,26	0,8
10	0,37	10	0,37	1,7	0,26	0,9
11	0,41	11,2	0,34	2,4	0,27	1
12	0,43	13,3	0,33	2,8	0,28	1,2
13	0,57	13,8	0,33	3,2	0,29	1,3
14	0,6	14,3	0,31	3,5	0,3	1,5
15			0,33	3,7	0,31	1,6

Таблица 3. Расчётный массовый расход ионов
Table 3. Calculated mass flow of ions

U , В	Без резонаторов	Один резонатор	Два резонатора
	\dot{m}_I , кг/с	\dot{m}_I , кг/с	\dot{m}_I , кг/с
6	$1,255 \cdot 10^{-12}$	$3,502 \cdot 10^{-13}$	$1,459 \cdot 10^{-13}$
7	$1,459 \cdot 10^{-12}$	$3,502 \cdot 10^{-13}$	$1,751 \cdot 10^{-13}$
8	$2,218 \cdot 10^{-12}$	$3,502 \cdot 10^{-13}$	$2,043 \cdot 10^{-13}$
9	$2,831 \cdot 10^{-12}$	$4,962 \cdot 10^{-13}$	$2,335 \cdot 10^{-13}$
10	$2,919 \cdot 10^{-12}$	$4,962 \cdot 10^{-13}$	$2,627 \cdot 10^{-13}$
11	$3,269 \cdot 10^{-12}$	$7,005 \cdot 10^{-13}$	$2,919 \cdot 10^{-13}$
12	$3,882 \cdot 10^{-12}$	$8,172 \cdot 10^{-13}$	$3,502 \cdot 10^{-13}$
13	$4,028 \cdot 10^{-12}$	$9,34 \cdot 10^{-13}$	$3,794 \cdot 10^{-13}$
14	$4,174 \cdot 10^{-12}$	$1,022 \cdot 10^{-12}$	$4,378 \cdot 10^{-13}$
15		$1,08 \cdot 10^{-12}$	$4,67 \cdot 10^{-13}$

ним резонатором был сделан один замер (рис. 5а), для случая с двумя резонаторами (рис. 5б) было произведено четыре съёмки состояния экрана: до воздействия (на рис. 5 записано как «до») и после воздействия (на рис. 5 — «после»). В САПР Компас-3D производились замеры расстояния между штрихами шкалы стенда (параметр s) и расстояния между штрихом шкалы и индикаторной стрелкой до воздействия (параметр $h_{до}$) и после воздействия (параметр $h_{после}$). Испытания проводились при напряжении питания платы СВЧ-автогенератора — 15 В.

Значения углов отклонения индикаторной стрелки стенда можно получить по формуле:

$$\alpha = \frac{h_{после} - h_{до}}{s} \quad (4)$$

В табл. 1 приведены численные значения отклонений стрелки стенда в масштабе поля САПР Компас-3D и пересчитанные по формуле (4) углы отклонения α . Также в табл. 1 представлены расчётные значения силы давления струи на чувствительный элемент стенда. Значения получены по формуле (1). Ток пучка по цилиндру Фарадея, полученный экспериментально, приведён в табл. 2. Количество ионизированных частиц можно оценить по формуле (2). Данные представлены в табл. 3. По формуле (3) для энергопотребления 15 В и 0,33 А были получены скорости ионизированного газа для случаев с одним резонатором и с двумя резонаторами. Для одного резонатора значение составило 42630 м/с, для двух резонаторов — 192000 м/с (замеры № 1 и № 3) и 406000 м/с (для замера № 4). Случай с отклонением стрелки в отрицательную сторону (замер № 2) не рассматривался.

В результате проведённых исследований были получены параметры плазменной струи прототипа СВЧ ионного двигателя с двухззорным ускорением плазмы переменными электрическими полями. Методами исследования были выбраны аэродинамический метод двойного угла и метод цилиндра Фарадея. Из исследования видно, что установка ускоряющих зазоров уменьшает число заряженных частиц, истекающих из рабочей полости двигателя, при этом скорость этих частиц увеличивается. Если при выходе из первого зазора скорость составляет порядка 40 км/с, то на выходе из второго зазора скорость увеличивается до 200 км/с. При этом массовый расход ионов падает в 2–2,5 раза. Это может говорить о сепарации ионов по скорости при прохождении ими каждого зазора: при выходе из плазмогенератора с малой начальной скоростью (скорость диффузии ионов из высокочастотного зазора) в зазор с высокой частотой гармонического электрического поля (резонансная частота внутреннего цилиндрического резонатора выше резонансной частоты тороидального резонатора вследствие выбранной геометрии) положительно заряженная частица претерпевает большое число смен направления напряжённости поля, часть частиц подвергается рекомбинации, четвертая часть (согласно экспериментальным исследованиям с цилиндром Фарадея) получает ускорение при выходе из первого зазора. Скорость входа во второй зазор составляет порядка 40 км/с, при этом частота поля, а соответственно, и число смен направления вектора напряжённости ниже, чем в первом зазоре. Эти обстоятельства позволяют пропустить больший процент ионов через второй зазор.

Согласно исследованию, доля заторможенных и рекомбинированных частиц составляет половину от всего вошедшего в зазор объёма. Второй зазор увеличивает скорость прошедших его ионов до 200 км/с.

Выводы и заключение

Можно сделать следующие выводы:

1. При суммарном энергопотреблении прототипа 5 Вт система с тороидальным резонатором оказывает силу давления на чувствительный элемент стэнда порядка 0,1 мкН при скорости истечения рабочего тела порядка 200 км/с. По данным показателям прототип мало отличается от прототипа с ионно-оптической системой с постоянным напряжением на электродах. Работы с прототипом представлены в [6, 7]. При этом скорость потока определялась времяпролётным методом на основе датчиков положительного заряда.

2. Можно говорить о высоком уровне удельного импульса тяги прототипа при низком коэффициенте использования рабочего тела. Только один из девяти сгенерированных ионов проходит оба зазора с ускорением, остальные частицы тормозятся полем и проходят процесс рекомбинации.

3. По потребляемой мощности представленный прототип значительно выгоднее аналогов.

Благодарности

Данные исследования проводятся в рамках финансовой поддержки Российского научного фонда (проект № 19-79-10038).

1. Зверев Б. В., Собенин Н. П. Электродинамические характеристики ускоряющих резонаторов. Москва: Энергоатомиздат, 1993. 240 с.

2. Пименов Ю. В., Вольман В. И., Муравцов А. Д. Техническая электродинамика. Москва: Радио и связь, 2000. 536 с.

3. Капчинский И. М. Теория линейных резонансных ускорителей: динамика частиц. Москва: Энергоиздат, 1982. 240 с.

4. Hahl L., Lafleur T., Rafalskyi D. [et al.]. Plasma plume expansion with pulsed electron neutralization // Plasma Sources Science and Technology. Vol. 30, № 4. 30045014. DOI:10.1088/1361-6595/abf1d5.

5. Taunay P. Y. C. R., Bilén S. G., Micci M. M. Numerical simulations of a miniature microwave ion thruster // 33rd International Electric Propulsion Conference. 2013. P. 1–18.

6. Collingwood C. M., Gabriel S. D., Corbett M. H. [et al.]. The MiDGIT thruster: Development of a multi-mode thruster // 31st International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, Michigan. 2009. P. 1–13.

7. Trudel T. A., Bilén S. G., Micci M. M. Design and performance testing of a 1-cm miniature radio-frequency ion thruster // The 31st International Electric Propulsion Conference. 2006. P. 1–6.

8. Koizumi H., Kuninaka H. Switching Operation of Ion Beam Extraction and Electron Emission Using the Miniature Ion Thruster $\mu 1$ // Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan. 2010. Vol. 8, № 27. P. Pb_85–Pb_90. DOI: 10.2322/tastj.8.Pb_85.

9. Koizumi H., Kuninaka H. Performance evaluation of a miniature ion thruster $\mu 1$ with a unipolar and bipolar operation // Proc. 32nd Int. Elect. Propuls. Conf. 2011. P. 1–10.

10. Polzin K. A., Markusic T. E., Stanojev B. J. [et al.] Thrust Stand for Electric Propulsion Performance Evaluation // Review of Scientific Instruments. 2006. Vol. 77, № 10. 105108. DOI: 10.1063/1.2357315.

11. Smirnov A., Raitsev Y., Fisch N. J. Plasma measurements in a 100 W cylindrical Hall thruster // Journal of Applied Physics. 2004. Vol. 95, № 5. P. 2283–2292. DOI: 10.1063/1.1642734.

12. Smirnov A., Raitsev Y., Fisch N. J. Parametric investigation of miniaturized cylindrical and annular Hall thrusters // Journal of Applied Physics. 2002. Vol. 92, № 10. P. 5673–5679. DOI: 10.1063/1.1515106.

13. Polzin K. A., Smirnov A., Raitsev Y. [et al.]. Performance of a low-power cylindrical Hall thruster // Journal of Propulsion and Power. 2007. Vol. 23, № 4. P. 1–7. DOI: 10.2514/1.28595.

14. RF Power Field Effect Transistors. Freescale Semiconductor Technical Data. URL: <http://dtsheet.com/doc/357932/freescale-mrf284lsr1> (дата обращения: 19.11.2017).

15. Федянин В. В., Вавилов И. С., Ячменев П. С., Жариков К. И., Лукьянчик А. И., Степень П. В. Определение скорости ионного пучка ускорительного двухззорного микродвигателя // Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9, № 2. С. 108–118. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-108-118.

16. Вавилов И. С., Ячменев П. С., Жариков К. И., Федянин В. В., Степень П. В., Лукьянчик А. И. Определение тяги ионного двигателя аэродинамическим методом двойного угла (АМав-метод) // Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9, № 2. С. 78–86. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-78-86.

ВАВИЛОВ Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 3468-6744

AuthorID (РИНЦ): 518332

AuthorID (SCOPUS): 56610211900

ResearcherID: B-2634-2014

Адрес для переписки: vava-igg@mail.ru

ЯЧМЕНЕВ Павел Сергеевич, ассистент, аспирант кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.
SPIN-код: 4744-0940
ORCID: 0000-0003-3483-4321
AuthorID (SCOPUS): 57193405041
ResearcherID: P-5381-2016

Адрес для переписки: yachmenev-pavel@mail.ru

ФЕДЯНИН Виктор Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск.
SPIN-код: 1728-1697
ORCID: 0000-0003-3126-9865
AuthorID (SCOPUS): 57194235343
ResearcherID: O-9899-2015

ЖАРИКОВ Константин Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.
SPIN-код: 9469-0544
ORCID: 0000-0002-4966-1788
AuthorID (SCOPUS): 57192074889
ResearcherID: E-9087-2014

СТЕПЕНЬ Павел Валерьевич, ассистент кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

ЛУКЪЯНЧИК Антон Игоревич, ассистент, аспирант 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: lukuanchik1991@mail.ru

КУЗЬМЕНКО Ирина Анатольевна, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

Для цитирования

Вавилов И. С., Ячменев П. С., Федянин В. В., Жариков К. И., Степень П. В., Лукьянчик А. И., Кузьменко И. А. Двухзоровый СВЧ ионный двигатель и его исследование аэродинамическим методом // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 1. С. 109 – 117. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-109-117.

Статья поступила в редакцию 07.02.2022 г.

© И. С. Вавилов, П. С. Ячменев, В. В. Федянин,
К. И. Жариков, П. В. Степень, А. И. Лукьянчик,
И. А. Кузьменко

TWO-GAPS MICROWAVE ION ENGINE AND ITS STUDY BY AERODYNAMIC METHOD

I. S. Vavilov, P. S. Yachmenev, V. V. Fedyanin, K. I. Zharikov,
P. V. Stepen, A. I. Lukyanchuk, I. A. Kuzmenko

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

The article contains the authors' research in the field of jet propulsion systems with low energy consumption of small spacecraft of the class of nanosatellites. The paper presents a microwave ion engine with double acceleration of ionized gas in the gaps formed by the end surfaces of cylindrical resonators. The results of an experimental study of the pressure force of a jet set of ionized gas by the aerodynamic double angle method are presented. A stand for determining the power parameters of weak plasmajet is presented. The design of the prototype is presented. The total energy consumption of the prototype is 5 watts, the accelerated gas flow rate is up to 200 km/s, the jet pressure force on the sensing element of the stand is 0,1 μN . The working body of the prototype is nitrogen at a pressure in a vacuum chamber of 18 Pa.

Keywords: volumetric resonator, microwave, plasma, small spacecraft, nitrogen, thrust, speed.

Acknowledgments

The research is carried out at the expense of a grant from the Russian science Foundation (Project No. 19-79-10038).

References

- Zverev B. V., Sobenin N. P. *Elektrodinamicheskiye kharakteristiki uskoryayushchikh rezonatorov* [Electrodynamic characteristics of accelerating resonators]. Moscow, 1993. 240 p. (In Russ.).
- Pimenov Yu. V., Vol'man V. I., Muravtsov A. D. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical electrodynamic]. Moscow, 2000. 536 p. (In Russ.).
- Kapchinskiy I. M. *Teoriya lineynykh rezonansnykh uskoriteley: dinamika chastits* [Theory of linear resonant accelerators: particle dynamics]. Moscow, 1982. 240 p. (In Russ.).
- Habl L., Lafleur T., Rafalskiy D. [et al.]. Plasma plume expansion with pulsed electron neutralization // *Plasma Sources Science and Technology*. Vol. 30, no. 4. 30045014. DOI:10.1088/1361-6595/abf1d5. (In Engl.).
- Taunay P. Y. C. R., Bilén S. G., Micci M. M. Numerical simulations of a miniature microwave ion thruster // 33rd International Electric Propulsion Conference. 2013. P. 1–18. (In Engl.).
- Collingwood C. M., Gabriel S. D., Corbett M. H. [et al.]. The MiDIGIT thruster: Development of a multi-mode thruster // 31st International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, Michigan. 2009. P. 1–13. (In Engl.).
- Trudel T. A., Bilén S. G., Micci M. M. Design and performance testing of a 1-cm miniature radio-frequency ion thruster // The 31st International Electric Propulsion Conference. 2006. P. 1–6. (In Engl.).
- Koizumi H., Kuninaka H. Switching Operation of Ion Beam Extraction and Electron Emission Using the Miniature Ion Thruster $\mu 1$ // *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*. 2010. Vol. 8, no. 27. P. Pb_85–Pb_90. DOI: 10.2322/tastj.8.Pb_85. (In Engl.).
- Koizumi H., Kuninaka H. Performance evaluation of a miniature ion thruster $\mu 1$ with a unipolar and bipolar operation // *Proc. 32nd Int. Elect. Propuls. Conf.* 2011. P. 1–10. (In Engl.).
- Polzin K. A., Markusic T. E., Stanojev B. J. [et al.] Thrust Stand for Electric Propulsion Performance Evaluation // *Review of Scientific Instruments*. 2006. Vol. 77, no. 10. 105108. DOI: 10.1063/1.2357315. (In Engl.).
- Smirnov A., Raitses Y., Fisch N. J. Plasma measurements in a 100 W cylindrical Hall thruster // *Journal of Applied Physics*. 2004. Vol. 95, no. 5. P. 2283–2292. DOI: 10.1063/1.1642734. (In Engl.).
- Smirnov A., Raitses Y., Fisch N. J. Parametric investigation of miniaturized cylindrical and annular Hall thrusters // *Journal of Applied Physics*. 2002. Vol. 92, no. 10. P. 5673–5679. DOI: 10.1063/1.1515106. (In Engl.).
- Polzin K. A., Smirnov A., Raitses Y. [et al.]. Performance of a low-power cylindrical Hall thruster // *Journal of Propulsion and Power*. 2007. Vol. 23, no. 4. P. 1–7. DOI: 10.2514/1.28595. (In Engl.).
- RF Power Field Effect Transistors. Freescale Semiconductor Technical Data. URL: <http://dtsheet.com/doc/357932/freescale-mrf284lsr1> (accessed: 19.11.2017). (In Engl.).
- Fedyanin V. V., Vavilov I. S., Yachmenev P. S., Zharikov K. I., Lukyanchuk A. I., Stepen' P. V. Opreddeniye skorosti ionnogo puchka uskoritel'nogo dvukhzazornogo mikrodvigatelya [Determination of the ion beam velocity of an accelerator two-gap ion thruster] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2021. Vol. 9, no. 2. P. 108–118. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-108-118. (In Russ.).
- Vavilov I. S., Yachmenev P. S., Zharikov K. I., Fedyanin V. V., Stepen' P. V., Lukyanchuk A. I. Opreddeniye tyagi ionnogo dvigatelya aerodinamicheskim metodom dvojnogo ugla (AM $\alpha\beta$ -metod) [Determination of the thrust of an ion thruster by the aerodynamic method of double angle (AM $\alpha\beta$ -method)] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2021. Vol. 9, no. 2. P. 78–86. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-78-86. (In Russ.).

VAVILOV Igor Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aviation and Rocketry

Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 3468-6744

AuthorID (RCSI): 518332

AuthorID (SCOPUS): 56610211900

ResearcherID: B-2634-2014

Address for correspondence: vava-igg@mail.ru

YACHMENEV Pavel Sergeevich, Assistant, Graduate Student of Aviation and Rocketry Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4744-0940

ORCID: 0000-0003-3483-4321

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ResearcherID: P-5381-2016

Address for correspondence: yachmenev-pavel@mail.ru

FEDYANIN Viktor Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electrical Equipment Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1728-1697

ORCID: 0000-0003-3126-9865

AuthorID (SCOPUS): 57194235343

ResearcherID: O-9899-2015

ZHARIKOV Konstantin Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aviation and Rocketry Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9469-0544

ORCID: 0000-0002-4966-1788

AuthorID (SCOPUS): 57192074889

ResearcherID: E-9087-2014

STEPEN Pavel Valer'yevich, Assistant of Aviation and Rocketry Department, OmSTU, Omsk.

LUKYANCHIK Anton Igorevich, Assistant, Graduate Student of Aviation and Rocketry Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-код: 2378-9723

ORCID: 0000-0002-3309-4125

AuthorID (SCOPUS): 57189506536

ResearcherID: O-8722-2016

Address for correspondence: lukyanchik1991@mail.ru

KUZMENKO Irina Anatolievna, Senior Lecturer of Aviation and Rocketry Department, OmSTU, Omsk.

For citations

Vavilov I. S., Yachmenev P. S., Fedyanin V. V., Zharikov K. I., Stepen P. V., Lukyanchuk A. I., Kuzmenko I. A. Two-gaps microwave ion engine and its study by aerodynamic method // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2022. Vol. 6, no. 1. P. 109–117. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-109-117.

Received February 07, 2022.

© I. S. Vavilov, P. S. Yachmenev, V. V. Fedyanin, K. I. Zharikov, P. V. Stepen, A. I. Lukyanchuk, I. A. Kuzmenko