

ИССЛЕДОВАНИЯ МОЩНОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОТЕРЬ В ТОРОИДАЛЬНОМ РЕЗОНАТОРЕ ПРОТОТИПА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

И. С. Вавилов, К. И. Жариков, П. С. Ячменев,
И. А. Кузьменко, И. В. Володьков

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

Авторы представляют прототип ускорительного микродвигателя для малого космического аппарата с максимальным энергопотреблением 5 Вт. Показана конструкция и описаны основные конструктивные элементы. Более того, в работе представлены вакуумные калориметрические исследования мощности высокочастотных потерь в объеме тороидального резонатора при различных рабочих телах: воздух, гелий, углекислый газ, азот, аргон и пары воды. Благодаря совместному с калориметрическими исследованиями замеру основных частот автогенератора были получены электрические ёмкости колебательного контура. При энергопотреблении прототипа 4–4,8 Вт расчётные величины ускоряющих переменных напряжений составили 199,65–287,9 В для различных газов. Расчётные мощности высокочастотных потерь составили 0,088–0,183 Вт, что составляет не более 4 % от общей потребляемой мощности.

Ключевые слова: мощность высокочастотных потерь, плазма, малый космический аппарат, азот, аргон, ускоряющее напряжение, термopара, электрическая ёмкость.

Для цитирования: Вавилов И. С., Жариков К. И., Ячменев П. С., Кузьменко И. А., Володьков И. В. Исследования мощности высокочастотных потерь в тороидальном резонаторе прототипа высокочастотного ионного двигателя // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 3. С. 92–100. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-92-100. EDN: TUYNLK.



© Вавилов И. С., Жариков К. И., Ячменев П. С.,
Кузьменко И. А., Володьков И. В., 2025.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDIES OF THE POWER OF HIGH-FREQUENCY LOSSES IN THE TOROIDAL RESONATOR OF A PROTOTYPE OF THE HIGH-FREQUENCY ION THRUSTER

I. S. Vavilov, K. I. Zharikov, P. S. Yachmenev, I. A. Kuzmenko, I. V. Volod'kov

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

The authors present a prototype of an accelerator micro thruster for a small spacecraft with a maximum power consumption of 5 W. The design is demonstrated and the main structural elements are described. Moreover, the paper also presents vacuum calorimetric studies of the power of high-frequency losses in the volume of a toroidal resonator for various working fields: air, helium, carbon dioxide, nitrogen, argon and water vapor. Due to the joint measurement of the main frequencies of the oscillator with calorimetric studies, the electrical capacitances of the oscillating circuit are obtained. With prototype 4–4.8 power consumption the calculated values of accelerating alternating voltages are 199.65–287.9 V for various gases. The measured power of high-frequency losses is 0.088–0.183 W, which is no more than 4 % of the total power consumption.

Keywords: power of high-frequency losses, plasma, small spacecraft, nitrogen, argon, accelerating voltage, thermocouple, electrical capacity.

For citation: Vavilov I. S., Zharikov K. I., Yachmenev P. S., Kuzmenko I. A., Volod'kov I. V. Studies of the power of high-frequency losses in the toroidal resonator of a prototype of the high-frequency ion



© Vavilov I. S., Zharikov K. I., Yachmenev P. S.,
Kuzmenko I. A., Volod'kov I. V., 2025.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В рамках проекта, поддержанного Российским научным фондом, авторами был получен экспериментальный прототип ускорительного микро-двигателя с магнитным кольцом (УМД МК) [1]. Максимальное энергопотребление экспериментального прототипа составляло 6 Вт. Прототип УМД МК является прототипом квазинейтрального двигателя [2, 3] с высокочастотным (ВЧ) генератором плазмы. Ускорение плазмы производится в переменном электрическом поле ёмкостных элементов резонатора. Квазинейтральные (безэлектродные) плазменные двигатели — это малоразвитая область электроракетных двигателей, которые имеют одно важное преимущество относительно классических ионных и стационарных плазменных двигателей — отсутствие в конструкции нейтрализатора. Катод-нейтрализатор — хрупкий элемент, который чувствителен к чистоте рабочего тела. Нейтрализатор увеличивает массу конструкции, энергопотребление и снижает надёжность системы. По принципу ускорения плазмы квазинейтральные двигатели могут быть тепловыми, с магнитным соплом и переменным ускоряющим полем. Данные принципы не противоречат друг другу, поэтому обычно сочетаются в конструкции.

Для квазинейтральных двигателей с большим энергопотреблением характерно преобладание тепловой компоненты тяги над электростатической (электродинамической) или магнитной компонентами. Широко представлена информация о проекте VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket) — электромагнитный ускоритель с изменяемым удельным импульсом [4–6], в котором разрабатывается реактивный плазменный двигатель с нагревом ионов путём электронно-циклотронного резонанса и ускорением плазмы в магнитном сопле. К двигателям с магнитным соплом относятся геликонный плазменный двигатель (Helicon Plasma Thruster, HPT) и плазменный двигатель на основе электронно-циклотронного резонанса (Electron Cyclotron Resonance, ECR) [7, 8].

3D-модель экспериментального прототипа УМД МК представлена на рис. 1.

Экспериментальный прототип УМД МК можно условно разделить на несколько систем:

- система подачи нейтрального газа в рабочую полость прототипа;
- плазмогенератор (кольцевая магнитная ячейка) — система производства рабочего тела (плазмы);
- источник высокочастотного излучения (ВЧ-автогенератор);
- система ускорения рабочего тела;
- система охлаждения ВЧ-автогенератора;
- система защиты от утечек электромагнитной энергии (фильтр низких частот — ФНЧ и защитная сетка);
- система электропитания — цифровой блок питания (система за пределами корпуса прототипа).

На рис. 2 представлен разнесённый вид прототипа. Схема изображена без внешнего резонатора (без цилиндрической оболочки). Прототип представляет собой цилиндрический объект высотой 110 мм и диаметром 90 мм.

В прототипе УМД МК реализована кольцевая магнитная ячейка по двухэлектродной схеме с последовательным расположением магнитов (схема N-S по кольцу). Ячейка состоит из двух корпусных элементов, изготовленных из АБС-пластика методом аддитивных технологий и двенадцати дисковых магнитов диаметром 12 мм и толщиной 5 мм. Каждые 6 магнитов связаны гальванической связью между собой и составляют электрод ёмкостного зазора. В плазмогенирующий комплекс входит двухпроводной резонатор на пластиковом держателе. Резонатор устанавливается между платой ВЧ-автогенератора и кольцевой магнитной ячейкой. Наличие данного промежуточного резонатора обеспечивает возбуждение автоколебаний. Промежуточный двухпроводной резонатор — это два проводника, намотанные в плоскую спираль. С одной стороны эти проводники припаиваются к затвору и истоку СВЧ-транзистора, с другой стороны — к электродам кольцевой магнитной ячейки.

Система охлаждения транзистора, кроме своей основной роли, выполняет функцию гальванической развязки между стоком транзистора и резонатором прототипа. Ранее было выявлено явление

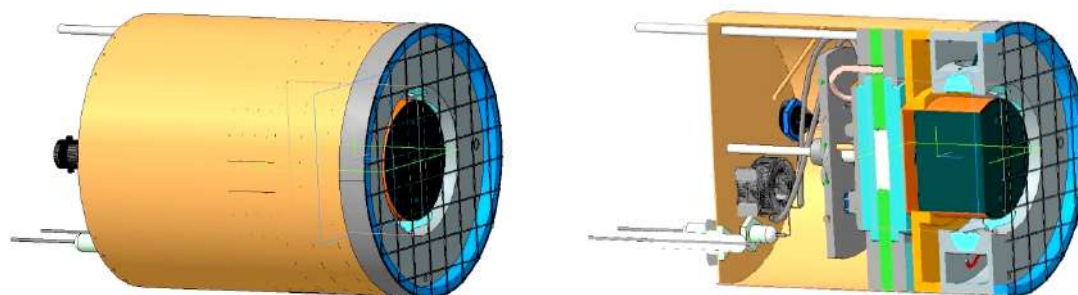


Рис. 1. 3D-модель прототипа УМД МК (без сечения и с продольным сечением)
Fig. 1. 3D-model of the prototype accelerator of the micro thruster with a magnetic ring
(without cross-section and with a longitudinal section)

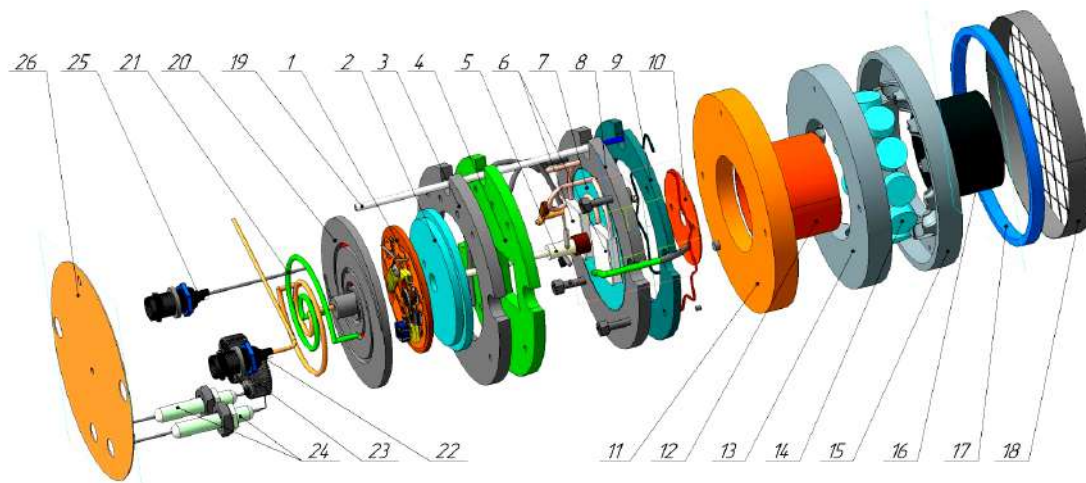


Рис. 2. Разнесённый вид конструкции прототипа УМД МК:

1 — кольцевая плата ВЧ-автогенератора; 2 — алюминиевый радиатор охлаждения транзистора ВЧ-автогенератора (диск, контактирует с холодной стороной элементов Пельтье); 3 — прижимное кольцо (выполнено аддитивными технологиями из АБС-пластика); 4 — держатель элементов Пельтье (выполнен аддитивными технологиями из АБС-пластика); 5 — металлическая опора, она же связь внешнего резонатора с внутренним сердечником; 6 — элементы Пельтье (два элемента размерами 20×20 мм); 7 — алюминиевый радиатор охлаждения транзистора ВЧ-автогенератора (диск, контактирует с горячей стороной элементов Пельтье); 8 — прижимное кольцо (выполнено аддитивными технологиями из АБС-пластика); 9 — кольцо-проставка (выполнено аддитивными технологиями из АБС-пластика); 10 — днище внутреннего сердечника (материал — медь); 11 — защитный корпус (не позволяет плазме проникать в полость внешнего резонатора); 12 — внутренний сердечник (материал — медь); 13 — первая часть корпуса плазмотрона (выполнен аддитивными технологиями из АБС-пластика); 14 — постоянные магниты (материал — N35, количество — 12 шт., размеры каждого диска — диаметр 12 мм, высота 5 мм); 15 — вторая часть корпуса плазмотрона (выполнен аддитивными технологиями из АБС-пластика); 16 — текстолитовая монтажная вставка (для установки различных торцевых крышек внутреннего сердечника); 17 — кольцо из АБС-пластика; 18 — защитная металлическая сетка; 19 — пластиковая трубка подвода нейтрального газа; 20 — диск со спиральной выемкой (выполнен аддитивными технологиями из АБС-пластика); 21 — двухпроводной спиральный резонатор; 22 — линия связи с BNC-разъёмом (для исследования амплитудно-частотных характеристик резонатора); 23 — катушка индуктивности ФНЧ; 24 — проходной конденсатор ФНЧ; 25 — штыревая антенна с BNC-разъёмом (для исследования спектра частот прототипа); 26 — торцевая крышка резонатора (материал — медь).

Fig. 2. Spaced view of the prototype accelerator of the micro thruster with a magnetic ring:

1 — ring board of the RF-autogenerator; 2 — aluminum radiator for cooling the transistor of the RF-autogenerator (disk, in contact with the cold side of the Peltier elements); 3 — pressure ring (made with additive technologies from ABS-plastic); 4 — holder of Peltier elements (made with additive technologies from ABS-plastic); 5 — metal support, it is also the connection of the external resonator with the inner core; 6 — Peltier elements (two elements measuring 20×20 mm); 7 — aluminum radiator cooling transistor RF-generator (disk, in contact with the hot side of the Peltier elements); 8 — pressure ring (made of additive technologies made of ABS-plastic); 9 — spacer ring (made of additive technologies made of ABS-plastic); 10 — bottom of the inner core (material — copper); 11 — protective housing (does not allow plasma to penetrate into the cavity of the external resonator); 12 — inner core (material — copper); 13 — the first part of the plasma generator body (made by additive technologies from ABS-plastic); 14 — permanent magnets (material — N35, quantity — 12 pieces, dimensions of each disk — diameter 12 mm, height 5 mm); 15 — second part of the plasma generator body (made of ABS-plastic with additive technologies); 16 — textolite mounting insert (for installing various end caps of the inner core); 17 — ABS-plastic ring; 18 — protective metal mesh; 19 — plastic neutral gas supply tube; 20 — disk with a spiral recess (made of ABS-plastic with additive technologies); 21 — a two-wire spiral resonator; 22 — a communication line with a BNC connector (for studying the amplitude-frequency characteristics of the resonator); 23 — a low-pass inductor; 24 — pass low — pass capacitor; 25 — pin antenna with BNC-connector (for studying the frequency spectrum of the prototype); 26 — end cap of the resonator (material — copper)

выхода из строя транзистора при непосредственном контакте его стока со стенкой резонатора. Возможно, это связано с большими величинами напряжений, возникающих при поглощении резонатором высокочастотного излучения. Для устранения этого эффекта потребовалось введение в конструкцию диэлектрической вставки (керамический элемент Пельтье) между транзистором и резонатором. Таким образом, холодная сторона элемента Пельтье подводится к стоку транзистора, а его горячая сторона — к металлической поверхности резонатора.

В прототипе УМД МК два элемента Пельтье (рис. 2) представлены размерами 20×20 мм. Элементы Пельтье соединены последовательно между собой, соединение элементов Пельтье с ВЧ-автогенератором также последовательное. Система охлаждения составляет узел из элементов Пельтье

в пластиковом держателе, алюминиевых дисковых радиаторов, пластиковых прижимных колец и днища внутреннего сердечника с самим сердечником. В алюминиевом диске выполнены резьбовые отверстия для установки транзистора платы автогенератора. В диске выполнены резьбовые отверстия для установки внутреннего сердечника. Между стоком транзистора, алюминиевыми дисками, элементами Пельтье и днищем внутреннего сердечника нанесена теплопроводящая паста. Все элементы системы охлаждения укладываются стопкой и стягиваются четырьмя болтами. Отбор тепла от транзистора осуществляется в сторону внутреннего сердечника. Охлаждение внутреннего сердечника осуществляется истекающим через отверстия между магнитами нейтральным газом. Соответственно, нагрев внешнего корпуса посредством охлаждения СВЧ-

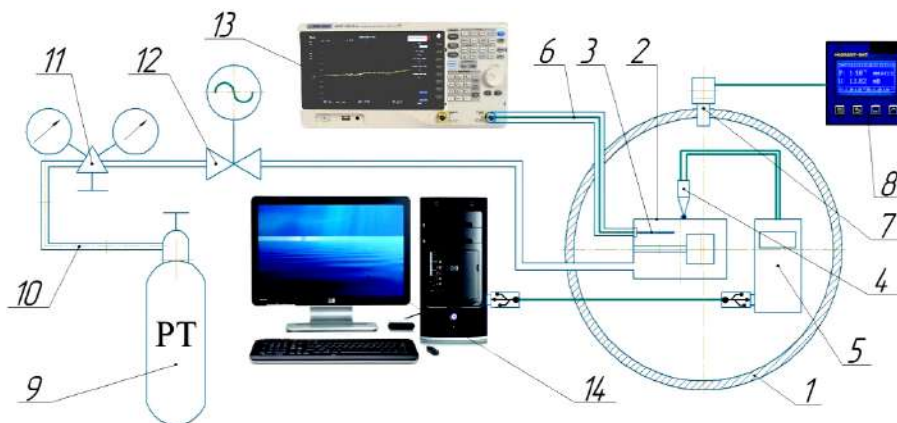


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 — вакуумная камера; 2 — резонатор экспериментального прототипа; 3 — штыревая антенна; 4 — термопара; 5 — многоканальный измеритель температуры; 6 — коаксиальная линия; 7 — преобразователь ПМТ-6-3М-1; 8 — вакуумметр; 9 — баллон с рабочим телом; 10 — газовая магистраль; 11 — газовый редуктор; 12 — электрический клапан; 13 — анализатор спектра частот; 14 — персональный компьютер

Fig. 3. Experimental setup scheme: 1 — vacuum chamber; 2 — resonator of an experimental prototype; 3 — pin antenna; 4 — thermocouple; 5 — multichannel temperature meter; 6 — coaxial line; 7 — PMT-6-3M-1 converter; 8 — vacuum gauge; 9 — cylinder with working fluid; 10 — gas main; 11 — gas reducer; 12 — electric valve; 13 — frequency spectrum analyzer; 14 — personal computer

транзистора не осуществляется. Также наличие диэлектрической (АБС-пластик) разрядной камеры позволяет устранить нагрев внешнего корпуса от оптического излучения. Таким образом, подобная схема охлаждения позволяет проводить калориметрические исследования мощности ВЧ-потерь в резонаторе при помощи обыкновенной термопары без риска фиксации нагрева корпуса от элементов Пельтье и оптического излучения разряда.

Принцип работы прототипа УМД МК представлен в ранних работах авторов, например, в [9]. Наиболее сложной задачей является определение величины ускоряющего переменного напряжения в прототипе. В прототипе отсутствуют ускоряющие электроды, которые являются неотъемлемым элементом классических электростатических ионных двигателей. Соответственно, приборное определение ускоряющего напряжения затруднено. Актуальной задачей является определение данной величины. Для определения мощности ВЧ-потерь в резонаторе прототипа был применён калориметрический метод.

Постановка задачи

Авторами был разработан и изготовлен прототип УМД МК (рис. 1, 2). Были проведены вакуумные калориметрические исследования с целью определения теплового эффекта на корпусе прототипа от рассеяния ВЧ-энергии в объёме резонатора.

Целью работы является определение величины ускоряющего переменного напряжения по мощности ВЧ-потерь при подаче в плазмогенератор различных типов рабочего газа.

Изначально данное исследование предполагалось проводить при помощи тепловизора и термовизуализационного экрана. Однако одновременное исследование нагрева резонатора при подаче ВЧ-излучения в прототип термопарой и тепловизором показало следующий недостаток тепловизионного способа: при длительном термографировании (испытания от 30 мин. и выше) делать термограммы следует после автокалибровки тепловизора. Авто-

калибровка производится раз в минуту, после чего показания температуры на экране тепловизора начинают неоправданно расти. После следующей калибровки значения температуры падают до нормальных и процесс начинается снова. График роста температуры, полученный после обработки термограмм, имеет характерный пилообразный профиль. Соответственно, было принято решение температуру корпуса определять термопарой (тип ТХА — термопара хромель-алюмель) и прибором МИТ-8, передающим его данные на персональный компьютер.

Экспериментальное исследование нагрева корпуса прототипа производилось для следующих веществ: воздух, азот, аргон, гелий, углекислый газ и пары воды. Также был проведён замер при включённом автогенераторе и отсутствием разряда. Температура фиксировалась термопарой ТХА и многоканальным измерителем температуры МИТ-8 с частотой один замер в 5 сек.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Основные элементы экспериментальной установки — это вакуумная камера, прототип УМД МК, ёмкость с рабочим телом и магистраль подачи рабочего тела в плазмогенератор прототипа УМД МК. Газовыми элементами автоматики являются редуктор газового баллона и электрический пневматический клапан. Уровень вакуума в вакуумной камере определяется цифровым тепловым вакуумметром Мерадат-ВИТ16Т3 посредством преобразователя ПМТ-6-3М-1. Измеряемыми величинами в экспериментальном исследовании являлись частота электромагнитных колебаний в полости резонатора прототипа УМД МК и температура корпуса резонатора прототипа УМД МК. Частота определялась анализатором спектра АКИП-4205/1. Сигнал во входной канал анализатора спектра передавался по коаксиальной линии от штыревой антенны, установленной в корпусе тороидального резонатора. Температура корпуса резонатора определялась посредством термопары типа ТХА, закреплённой на корпусе резонатора методом пайки. Через многоканальный измеритель температуры сигнал

с термопары передавался на персональный компьютер.

Испытания проводились для нескольких видов рабочего тела на двух режимах работы прототипа УМД МК: режим «без разряда» (режим «БР»), при котором ВЧ-энергия подводится в полость резонатора без существования разряда в магнитном кольце, и режим «разряд» (режим «Р»), при котором существует поток плазмы из полости прототипа. Режим «БР» достигался повышением давления в вакуумной камере до значений 3000 Па. Опорным напряжением питания автогенератора прототипа УМД МК являлась величина 20 В.

Необходимость замера частоты электромагнитных волн в полости резонатора обусловлена влиянием генерируемой плазмы на основную частоту колебательной системы. По величине фактической частоты позволяет вычислить полную электрическую ёмкость колебательного контура прототипа УМД МК.

Теория

Величина ускоряющего напряжения зависит от мощности ВЧ-потерь в полости тороидального резонатора. Мощность ВЧ-потерь проявляет себя как тепловой эффект на корпусе резонатора при работе прототипа УМД МК. Связь мощности ВЧ-потерь и величины переменного ускоряющего напряжения представлена в виде формулы:

$$P_T = \frac{U_m^2}{2\rho \cdot Q}, \quad (1)$$

где U_m — амплитуда напряжения на зазоре, а $\rho = 1/\omega \cdot C_0$ — характеристическое сопротивление резонатора на круговой частоте $\omega = 2\pi \cdot \nu$; Q — добротность резонатора; ν — основная частота колебательного контура.

Отсюда величина напряжения равна

$$U_m = \sqrt{2\rho \cdot Q \cdot P_T}. \quad (2)$$

Для определения характеристического сопротивления резонатора на основной частоте необходимо определить электрическую ёмкость резонатора. Ёмкость, на которую нагружен резонатор, определяется как ёмкость плоского конденсатора, образованного круглыми крышками на внутреннем и внешнем цилиндрах и ёмкостью, образованной цилиндрическими поверхностями внешней стенки и внутреннего сердечника. В отличие от предыдущих конструкций в представленном прототипе отсутствует укорачивающая ёмкость. Ёмкость резонатора можно представить как ёмкости параллельно соединённых цилиндрических конденсаторов ($C_{1ц}$ и $C_{2ц}$) и ёмкости плоского конденсатора (C_n) (рис. 4).

Суммарная электрическая ёмкость резонатора (без учёта внутренних элементов конструкции прототипа и ёмкости плазмы) равна сумме:

$$C_0 = C_{1ц} + C_{2ц} + C_n. \quad (3)$$

Расписывая компоненты формулы (3), получим выражение:

$$C_0 = 2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \left(\frac{L-l}{\ln \frac{D}{d_c}} + \frac{l}{\ln \frac{D}{d}} \right) + \epsilon_0 \frac{\pi \cdot d^2}{4(L-l)}, \quad (4)$$

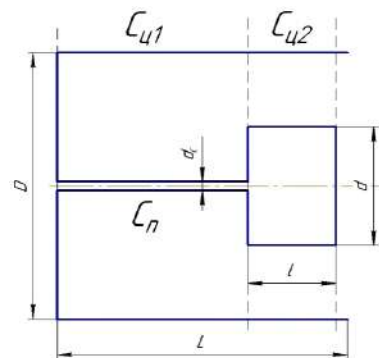


Рис. 4. Схема резонатора прототипа УМД МК

Fig. 4. Circuit resonator of the prototype accelerator of the micro thruster with a magnetic ring

где L — длина внешней цилиндрической оболочки резонатора; D — диаметр внешней цилиндрической оболочки резонатора; d — диаметр внутреннего медного сердечника; l — длина внутреннего медного сердечника; d_c — диаметр стержня-связи внутреннего сердечника с внешней оболочкой.

Таким образом, резонатор имеет нестандартную форму (не классический коаксиальный или тороидальный резонаторы). Для расчета добротности воспользуемся формулой соотношения объема и площади внутренней поверхности резонатора:

$$Q = \frac{2V_p}{\delta \cdot \mu_c \cdot S_p}, \quad (5)$$

где $V_p = \frac{\pi}{4} [D^2 \cdot L - d^2 \cdot l - d_c^2 \cdot (L-l)]$ —

внутренний объём резонатора;

$S_p = \pi \cdot \left[\frac{D^2}{4} + D \cdot L + d \cdot l + \frac{d^2}{2} + d_c \cdot (L-l) \right]$ — площадь внутренней поверхности резонатора;

$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f_{зам} \cdot \sigma \cdot \mu_c \cdot \mu_0}}$ — глубина скин-слоя; $f_{зам}$ — частота электромагнитной волны в резонаторе; σ — электрическая проводимость материала стенок резонатора; μ_c — магнитная проницаемость материала стенок резонатора.

Формула (4) даёт ёмкость колебательного контура при условии пустотелости тороидального резонатора. Однако автогенератор, двухпроводной резонатор, плазма и ёмкостные свойства транзистора и элементов платы также являются частью общей ёмкости резонатора. Соответственно, данные компоненты меняют резонансную частоту системы. Нельзя рассматривать прототип УМД МК только как источник электромагнитного излучения и его потребитель.

Система автоколебательная, следовательно, существуют взаимные влияния потребителя и источника друг на друга. В пользу этого выступает явление изменения основной частоты колебаний при возникновении плазмы. При включении автогенератора в режиме «БР» величина основной частоты составляет 123,7 МГц.

С увеличением ёмкости колебательного контура снижается основная частота. Трансцендентное выражение для определения резонансной частоты контура прототипа УМД МК выглядит следующим образом [10]:

$$\frac{1}{2\pi \cdot \nu \cdot C_{0п}} = Z_{01} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi \cdot \nu \cdot l}{c}\right) + Z_{02} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi \cdot \nu \cdot (L-l)}{c}\right), \quad (6)$$

где $C_{0п} = C_o + C_k + C_{пл}$ — ёмкость резонатора с учётом ёмкости конструктивных элементов плазмогенератора (C_k) и плазмы ($C_{пл}$); $Z_{01} = 60 \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)$ — волновое сопротивление элемента резонатора как коаксиальной линии с внутренним медным сердечником; $Z_{02} = 60 \cdot \ln\left(\frac{D}{d_c}\right)$ — волновое сопротивление элемента резонатора как коаксиальной линии с металлическим стержнем; c — скорость света.

По величине частоты ν (из спектрограммы) работы автогенератора на режиме «БР» рассчитывается величина C_k . Измерив частоту на режиме «Р», можно определить $C_{пл}$.

Для нахождения величины ускоряющего напряжения по ВЧ-энергии, рассеянной в полости тороидального резонатора, необходимо определить текущую электрическую ёмкость колебательного контура.

Для режима «БР» формула (6) имеет следующий вид:

$$\frac{1}{2\pi \cdot \nu \cdot (C_o + C_k)} = Z_{01} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi \cdot \nu_{БР} \cdot l}{c}\right) + Z_{02} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi \cdot \nu_{БР} \cdot (L-l)}{c}\right), \quad (7)$$

где $\nu_{БР}$ — основная частота колебаний в резонаторе на режиме «БР». Отсюда определяется величина электрической ёмкости C_k .

Для режима «Р» формула (6) имеет вид

$$\frac{1}{2\pi \cdot \nu \cdot (C_o + C_k + C_{пл})} = Z_{01} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi \cdot \nu_p \cdot l}{c}\right) + Z_{02} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi \cdot \nu_p \cdot (L-l)}{c}\right), \quad (8)$$

где ν_p — основная частота колебаний в резонаторе на режиме «Р». Отсюда определяется величина электрической ёмкости $C_{пл}$.

Результаты экспериментов

На рис. 5 представлена диаграмма изменения температуры корпуса после включения автогенератора. Масса корпуса резонатора — 112,07 г, материал корпуса — медь.

Зная массу резонатора, его материал и скорость нагрева, по уравнению теплопроводности можно определить величину тепловой мощности, соответственно, величину ВЧ-потерь в объёме резонатора.

В табл. 1 приведены измеренные значения фонового давления в вакуумной камере, полной электрической мощности прототипа УМД МК на режимах «Р» и «БР», тепловой мощности (мощность ВЧ-потерь) и доли мощности ВЧ-потерь в полной электрической мощности.

На режиме «БР» основная частота колебательного контура составляла 123,7 МГц, а на режиме «Р» — 118 МГц.

Расчёт колебательного контура по формулам (1)–(5) (без учёта дополнительных электрических ёмкостей внутренних элементов конструкции прототипа и генерируемой плазмы) даёт высокие значения ускоряющего напряжения. Результаты представлены в табл. 2.

Расчёт величин ёмкостей конструкции C_k и плазмы $C_{пл}$ по формулам (7) и (8) показал, что для прототипа УМД МК $C_k = 24$ пФ, а ёмкость плазмы зависит от вида газа, но находится в пределах 3 пФ.

Подставляя в формулу (1) величину $C_{0п}$ вместо величины C_o из формулы (3), получаем более скромные значения ускоряющего напряжения. Результаты представлены в табл. 3.

Обсуждение результатов

Калориметрические исследования показали, что нагрев корпуса резонатора УМД МК при работе на гелии и воздухе значительно менее интенсивен, чем на воде, аргоне, азоте и углекислом газе. В режиме «БР» нагрев корпуса также слабый, но и энергопотребление прототипа было незначительным. Из табл. 1 видно, что доля тепловой мощности в общей входящей мощности у аргона, воды, углекислого газа и азота выше, чем у воздуха и гелия. На режиме «БР» из-за отсутствия нагрузки энергопотребление прототипа составляет 1,8 Вт. При этом доля тепловой энергии в общей мощности составляет 3,17 %. Из табл. 1 и 2 следует, что вид рабочего тела оказывает влияние на режим рабо-

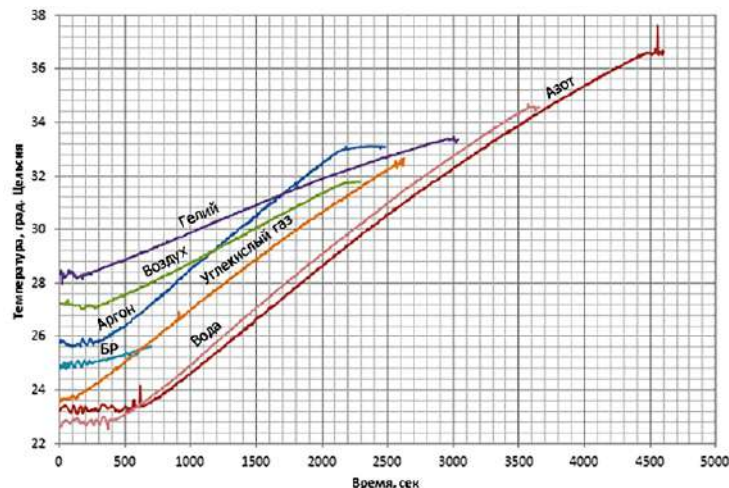


Рис. 5. Диаграмма нагрева поверхности резонатора
 Fig. 5. Diagram of the resonator surface heating

Таблица 1. Результаты тепловых испытаний корпуса прототипа УМД МК

Table 1. Thermal tests results of the body of the prototype accelerator of the micro thruster with a magnetic ring

Газ	Давление, Па	Напряжение, В	Ток, А	Входная мощность ($P_{\text{вх}}$), Вт	Тепловая мощность ($P_{\text{т}}$), Вт	$(P_{\text{т}} / P_{\text{вх}}) \cdot 100 \%$
Воздух	7	20	0,2	4	0,112	2,8
Гелий	9		0,2	4	0,088	2,2
Углекислый газ	6,8		0,22	4,4	0,168	3,81
Азот	7,5		0,24	4,8	0,161	3,35
Вода	7,2		0,22	4,4	0,168	3,81
Аргон	9		0,22	4,4	0,183	4,15
Режим «БР»	3000		0,09	1,8	0,057	3,17

Таблица 2. Результаты расчёта колебательного контура прототипа УМД МК

Table 2. Calculation results of the oscillatory circuit of the prototype accelerator of the micro thruster with a magnetic ring

Газ	Тепловая мощность ($P_{\text{т}}$), Вт	C_0 , пФ	ρ , Ом	ω , МГц	Q	U_m , В
Воздух	0,112	3,506	384,742	741,416	4955	653,446
Гелий	0,088					579,218
Углекислый газ	0,168					800,305
Азот	0,161					783,455
Вода	0,168					800,305
Аргон	0,183					835,27
Режим «БР»	0,057					466,164

Таблица 3. Результаты расчёта колебательного контура прототипа УМД МК

с учётом дополнительной электрической ёмкости

Table 3. Calculation results of the oscillatory circuit of the prototype accelerator of the micro thruster with a magnetic ring considering the additional electrical capacity

Газ	Тепловая мощность ($P_{\text{т}}$), Вт	C_0 , пФ	ρ , Ом	ω , МГц	Q	U_m , В
Воздух	0,112	29,506	45,712	741,416	4955	225,37
Гелий	0,088					199,65
Углекислый газ	0,168					275,85
Азот	0,161					270,05
Вода	0,168					275,85
Аргон	0,183					287,9
Режим «БР»	0,057					160,68

ты автогенератора. При одном и том же напряжении питания нагрузка в виде плазмы аргона, воды или углекислого газа более благоприятна, так как на этих газах увеличивается потребление тока ВЧ-автогенератором. При этом доля энергии, рассеиваемой резонатором, тоже увеличивается (до 4 %). Соответственно, увеличивается и уровень ускоряющего переменного напряжения в резонаторе.

Электрическая ёмкость внутренних конструктивных элементов прототипа УМД МК оказывает значительное влияние на величину ускоряющего напряжения. При условии пустотелости резонатора расчётная величина ускоряющего напряжения при испытаниях на аргоне составила 835,27 В, в обратном случае эта величина составила 287,9 В. Очевидным решением кажется вынос конструктивных элементов за пределы резонатора и освобождение резонаторной полости. Однако это ошибочная простота, так как режим работы прототипа автогенераторный, то все элементы конструкции (будь они снаружи резонатора или внутри него) являются частью единого колебательного контура. Также вынос палаты автогенератора за границу ре-

зонатора означает удлинение линии связи между магнитным кольцом и автогенератором. Соответственно, возникают вопросы согласованности линии связи и потери энергии в тракте. Магнитное кольцо является неотъемлемым атрибутом резонаторной полости, оно также обладает значительной ёмкостью.

Пары воды, азот и углекислый газ показали высокие значения мощности ВЧ-потерь и, соответственно, высокие значения ускоряющего напряжения. Однако в части молекулярной массы данные вещества проигрывают аргону. Ожидаемые тяговые характеристики этих веществ будут ниже, чем у аргона. Однако вода, как топливо для прототипа, имеет некоторые преимущества: низкое давление насыщенных паров в условиях вакуума, высокая плотность при нормальных условиях, доступность. При плазменном разложении воды образуются летучие компоненты. Применение углекислого газа нецелесообразно из-за наличия в продуктах плазменного разложения твёрдой фазы — углерода. Осаждение углерода приводит к загрязнению элементов плазмогенератора.

Выводы и заключение

В статье представлена часть большого экспериментального исследования прототипа УМД МК. Работа авторов направлена на решение проблемы определения выходных характеристик плазменных двигателей с ускорением плазмы переменным электрическим полем. Переход от постоянных ускоряющих напряжений к переменным напряжениям решает задачу нейтрализации ионной струи за счёт самонейтрализации. Однако применение переменных полей порождает ряд проблем, важнейшей из которых является определение величины ускоряющего напряжения. Калориметрический метод является одним из самых простых и надёжных методов определения мощности электромагнитного излучения. Конструкция прототипа УМД МК позволяет использовать его тороидальный резонатор как калориметр. По величине нагрева корпуса можно судить о величине ускоряющего напряжения. Следующей важной задачей является определение истинных электрических параметров колебательного контура. Для решения этой проблемы был применён частотный метод.

Калориметрический метод показал, что эффективность использования электрической энергии в прототипе УМД МК составляет не более 4 %.

Финансирование / Funding

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

The research was carried out by the financial support of the Russian Science Foundation (Project no. 19-79-10038).

Список источников / References

1. Вавилов И. С., Ячменев П. С., Федянин В. В. [и др.]. Экспериментальные исследования прототипа ионного двигателя времяпролетным методом // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2023. Т. 11, № 2. С. 30–36. DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-30-36. EDN: KfJUEQ.
2. Vavilov I. S., Yachmenev P. S., Fedyanin V. V. [et al.]. Eksperimental'nye issledovaniya prototipa ionnogo dvigatelya vremyaproletnym metodom [Experimental study of ion thruster by time-of-flight method]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2023. Vol. 11, no. 2. P. 30–36. DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-30-36. EDN: KfJUEQ. (In Russ.).
3. Jarrige J., Elias P. Q., Packan D. [et al.]. Characterization of a coaxial ECR plasma thruster. *44th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*. 2013. P. 1–9. DOI: 10.2514/6.2013-2628.
4. Vialis T., Jarrige J., Aanesland A. [et al.]. Direct thrust measurement of an electron cyclotron resonance plasma thruster. *Journal of Propulsion and Power*. 2018. Vol. 34, no. 5. P. 1–11. DOI: 10.2514/6.2018-1370.
5. Charles C. Plasmas for spacecraft propulsion. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009. Vol. 42, no. 16. P. 163001. DOI: 10.1088/0022-3727/42/16/163001.
6. Squire J., Olsen C., Cassidy L. [et al.]. Improved efficiency and throttling range of the VX-200 magnetoplasma thruster. *Journal of Propulsion and Power*. 2014. Vol. 30. P. 123–132. DOI: 10.2514/6.2014-1370.
7. Squire J., Carter M., Diaz F. [et al.]. VASIMR® spaceflight engine system mass study and scaling with power. *The 33rd International Electric Propulsion Conference*. USA, 2013.
8. Chen F. F. Physics of helicon discharges. *Physics of Plasmas — PHYS PLASMAS*. 1996. Vol. 3, no. 5. P. 1783–1793. DOI: 10.1063/1.871697.

8. Geller R. Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas. Routledge, 1996. 434 p. ISBN 9780203758663. DOI: 10.1201/9780203758663.

9. Вавилов И. С., Ячменев П. С., Федянин В. В. [и др.]. Определение мощности СВЧ/ВЧ-потерь в тороидальном резонаторе ускорительного ионного двигателя по его спектру частот // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2023. Т. 11, № 2. С. 21–29. DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-21-29. EDN: PTANKK.

Vavilov I. S., Yachmenev P. S., Fedyanin V. V. [et al.]. Opredeleniye moshchnosti SVCh/VCh-poter' v toroidal'nom rezonatore uskoritel'nogo ionnogo dvigatelya po ego spektru chastot [Determination of the power of the microwave/HF losses in the toroidal resonator of the accelerator ion thruster by its frequency spectrum]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2023. Vol. 11, no. 2. P. 21–29. DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-21-29. EDN: PTANKK. (In Russ.).

10. Орлов С. И. Расчёт и конструирование коаксиальных резонаторов. Москва: Советское радио, 1970. 256 с.

Orlov S. I. Raschet i konstruirovaniye koaksial'nykh rezonatorov [Calculation and construction of coaxial resonators]. Moscow, 1970. 256 p. (In Russ.).

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

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

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

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

SPIN-код: 9128-3421

AuthorID (SCOPUS): 686832

Адрес для переписки: kia55@inbox.ru

ВОЛОДЬКОВ Илья Владиславович, магистрант группы РКМ-231 кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 30.04.2025; одобрена после рецензирования 19.08.2025; принята к публикации 04.09.2025.

VAVILOV Igor Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aircraft and Rocket Building Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 3468-6744
AuthorID (RCSI): 518332
AuthorID (SCOPUS): 56610211900
ResearcherID: B-2634-2014
Correspondence address: vava-igg@mail.ru
ZHARIKOV Konstantin Igorevich, Candidate of
Technical Sciences, Associate Professor of the Aircraft
and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 9469-0544
ORCID: 0000-0002-4966-1788
AuthorID (SCOPUS): 57192074889
ResearcherID: E-9087-2014
YACHMENEV Pavel Sergeevich, Assistant,
Postgraduate of the 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
KUZMENKO Irina Anatolievna, Senior Lecturer of the
Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU,
Omsk.
SPIN-code: 9128-3421
AuthorID (SCOPUS): 686832
Correspondence address: kia55@inbox.ru
VOLOD'KOV Ilya Vladislavovich, Master's Student of
the PKM-231 group of the Aircraft and Rocket Building
Department, OmSTU, Omsk.

Financial transparency: the authors have no financial
interest in the presented materials or methods. There is
no conflict of interest.

The article was submitted 30.04.2025; approved
after reviewing 19.08.2025; accepted for publication
04.09.2025.