

УДК 629.78.05

Расчет основных рабочих характеристик ионного двигателя мощностью 20 – 30 Вт.

Алдонин Ф.И.*, Ахметжанов Р.В.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: fela95@mail.ru*

***e-mail: ahmetzhanov1991@mail.ru*

Аннотация

В статье рассчитываются основные рабочие характеристики и геометрия ионно-оптической системы высокочастотного ионного двигателя мощностью 20-30 Вт. Описывается лабораторная модель такого двигателя, которая готовится к испытаниям с целью подтверждения расчетных данных.

Ключевые слова: высокочастотный ионный двигатель, ионно-оптическая система, малый космический аппарат.

Введение

В последнее время наблюдается рост числа космических аппаратов малой массы (до 100 кг) [1]. Для поддержания орбиты данных аппаратов и для увеличения их срока активного существования необходимо иметь двигатели управления орбитальным движением. В качестве таких двигателей могут рассматриваться

электроракетные двигатели (ЭРД) мощностью несколько десятков Вт, обладающие значительно большим ресурсом работы и значительно большим удельным импульсом тяги по сравнению с жидкостными ракетными двигателями (ЖРД). В 2010 году в Московском авиационном институте была создана Лаборатория высокочастотных ионных двигателей. За последние 4 года был накоплен значительный опыт в области исследования, разработки и создания, лабораторных образцов высокочастотных ионных двигателей различной мощности. На основе проведенных исследований начата разработка лабораторного образца высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД) мощностью 20-30Вт.

Принцип работы высокочастотного ионного двигателя

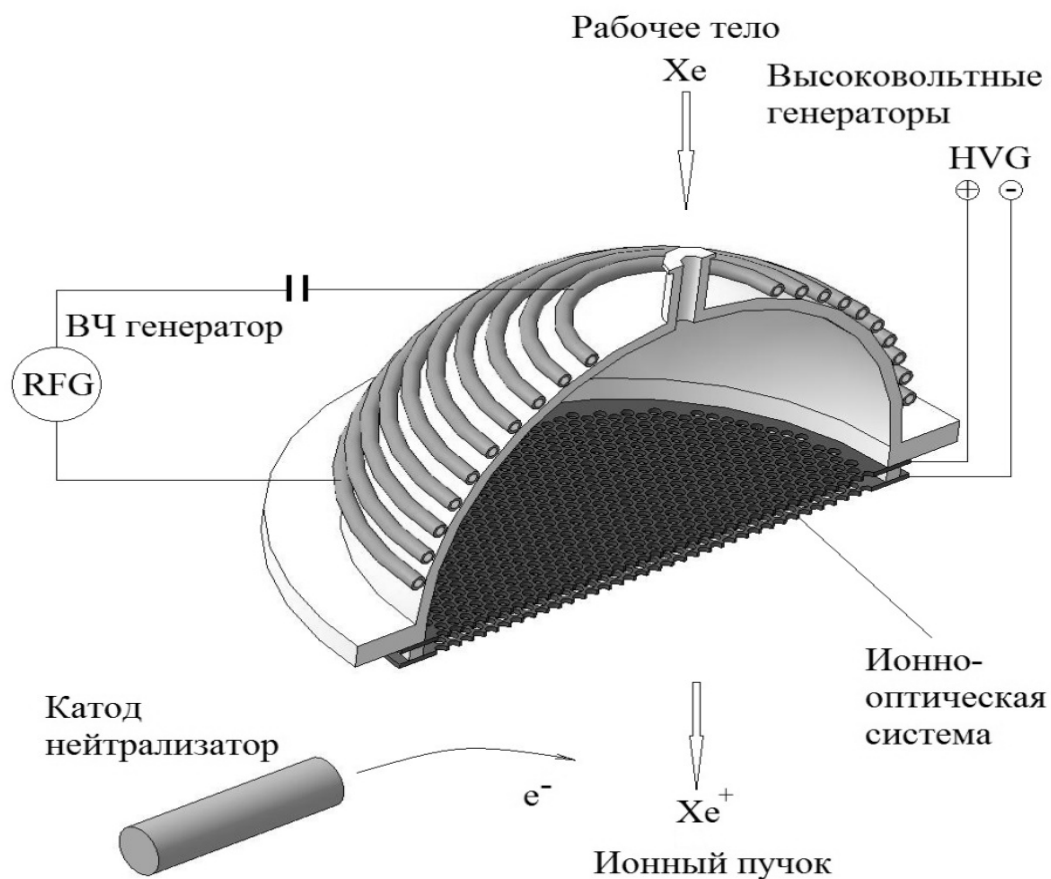


Рисунок 1. Схема ВЧИД

Схема ВЧИД приведена на рисунке 1. Двигатель работает следующим образом. Рабочий газ – ксенон подается в газоразрядную камеру (ГРК). Высокочастотная (ВЧ) мощность в радиочастотном диапазоне подводится от ВЧ-генератора (ВЧГ) к индуктору. Зажигание разряда инициируется кратковременной подачей электронов, эмитируемых нейтрализатором в ГРК. После зажигания в ГРК поддерживается ВЧ разряд индуктивного типа. В разряде нагреваемые ВЧ электромагнитным полем электроны производят ионизацию рабочего тела. Ионы извлекаются из плазмы разряда и ускоряются в ионно-оптической системе (ИОС). ИОС является электростатическим ускорителем ионов и образована тремя электродами: эмиссионным электродом (ЭЭ), ускоряющим электродом (УЭ) и замедляющим электродом (ЗЭ). ЭЭ и УЭ выполнены в виде перфорированных мембран, ЗЭ чаще всего выполняется кольцевым. На стационарном режиме работы катод-нейтрализатор (КН) служит для инжекции электронов в пучок ускоренных ионов, что обеспечивает токовую нейтрализацию плазменной струи.

Расчет основных рабочих характеристик

К основным характеристикам двигателя относятся: удельный импульс тяги I_{y0} , тяга P и тяговый КПД η . Эти величины связаны между собой соотношением:

$$N = \frac{I_{y0} \cdot P}{2 \cdot \eta} \quad (1)$$

Здесь N - потребляемая мощность двигателя, складывающаяся из мощности пучка ионов N_{II} и высокочастотной (ВЧ) мощности $N_{ВЧ}$, потребляемой от ВЧГ:

$$N = N_{II} + N_{BЧ} \quad (2)$$

Мощность пучка ионов есть произведение ускоряющего напряжения U_+ на ток пучка i .

$$N_{II} = U_+ \cdot i \quad (3)$$

ВЧ мощность, подводимая от высокочастотного генератора, рассчитывается по формуле:

$$N_{BЧ} = C_i \cdot i \quad (4)$$

где C_i - удельные энергозатраты на формирование пучка ионов. Величина C_i зависит от коэффициента ионизации рабочего тела η_m , который рассчитывается по формуле:

$$\eta_m = \frac{i}{\dot{m}_{II} \cdot \frac{q}{M}} \quad (5)$$

который называют также массовым КПД. В этой формуле \dot{m}_{II} - полный расход рабочего тела, q - заряд иона ксенона, M - масса атома рабочего тела (в данном случае ксенона). Параметры C_i и η_m характеризуют ГРК как ионизатор рабочего тела. Тяга двигателя вычисляется следующим образом:

$$P = \eta_\alpha \cdot \frac{i}{\frac{q}{M}} \cdot I_{y\partial} \quad (6)$$

Где η_α - КПД по расходимости, оценивающий потери в создании направленного импульса (тяги) из-за расходимости пучка. Приближенно η_α оценивается по формуле:

$$\eta_{\alpha} = \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (7)$$

где α - полуугол расходимости ионного пучка.

Удельный импульс рассчитывается по формуле

$$I_{y0} = \eta_m \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{q}{M} \cdot (U_+ + U_{II})} \quad (8)$$

где U_{II} – потенциал плазмы в ГРК относительно ЭЭ.

При расчете характеристик были рассмотрены варианты с потребляемой мощностью двигателя, равной 20, 25 и 30 Вт. Были приняты постоянными следующие параметры:

- Удельные энергозатраты на ионизацию оцениваются C_i , исходя из результатов экспериментальных данных, полученных в Гиссенском университете (Германия) для двигателей с разными диаметрами газоразрядной камеры [2]. Для разрабатываемого двигателя выбран диаметр ГРК 3 см, и C_i оценивается в 1500 Вт/А;
- Полуугол расходимости пучка ионов принят равным 15° ;

Принимая значения η_{α} , C_i , η_m постоянными и исходя из величины потребляемой мощности двигателя, можно оценить основные характеристики двигателя через ускоряющее напряжение U_+ . В таблице 1 приведены результаты расчета характеристик двигателя для выбранных мощностей.

Таблица 1. Основные характеристики ВЧИД

Мощность (Вт)	U_+ (В)	U_- (В)	Ток пучка (мА)	Удельный импульс (с)	Тяга (мН)	КПД (%)	ВЧ- мощность (Вт)
20	1000	- 110	79.43	2531	0.411	25.5	11.9
25	1500	- 165	82.74	3100	0.52	31.6	12.4
30	1500	- 165	100.47	3100	0.52	31.6	15

Расчет ионно-оптической системы

При расчете основных геометрических параметров ионно-оптической системы (ИОС) необходимо учитывать ряд требований. ИОС нужно спроектировать так, чтобы пучок ионов не попадал на ускоряющий электрод (УЭ). Полуугол расходимости ионного пучка должен не превышать 15 градусов для снижения потерь тяги и снижения влияния пучка на бортовые системы аппарата.

Зазор между ЭЭ и ускоряющим электродом (УЭ) должен обеспечивать режим работы двигателя без пробоя межэлектродного промежутка при заданной разности потенциалов между электродами. Для титановых электродов выбран зазор, равный 0,7 мм [3]. Толщину ЭЭ следует сделать минимально возможной, для снижения цены ионизации [2].

Расчет основных геометрических параметров ИОС произведен с помощью моделирования элементарного пучка ионов, извлекаемых через одно отверстие в ИОС. Расчеты производились с использованием программного комплекса IGUN. Входными параметрами при этом являлись геометрия отверстия ИОС, плотность тока ионного пучка через элементарное отверстие ЭЭ и температура электронов в

ГРК. Геометрия отверстия подбирается таким образом, чтобы можно было получить хорошо сфокусированный пучок ионов с полууглом расходимости меньше 15° при максимальной плотности ионного тока.

Определив геометрические параметры отверстия и плотность тока пучка, можно определить ток пучка через элементарное отверстие. Затем, используя эти данные, определяется количество отверстий, исходя из рассчитанного полного тока ионного пучка.

Ниже представлено изображение траекторий ионов в ячейке ИОС, соответствующее мощности двигателя 25 Вт и напряжению на ускоряющей электроде, равному 1500 В.

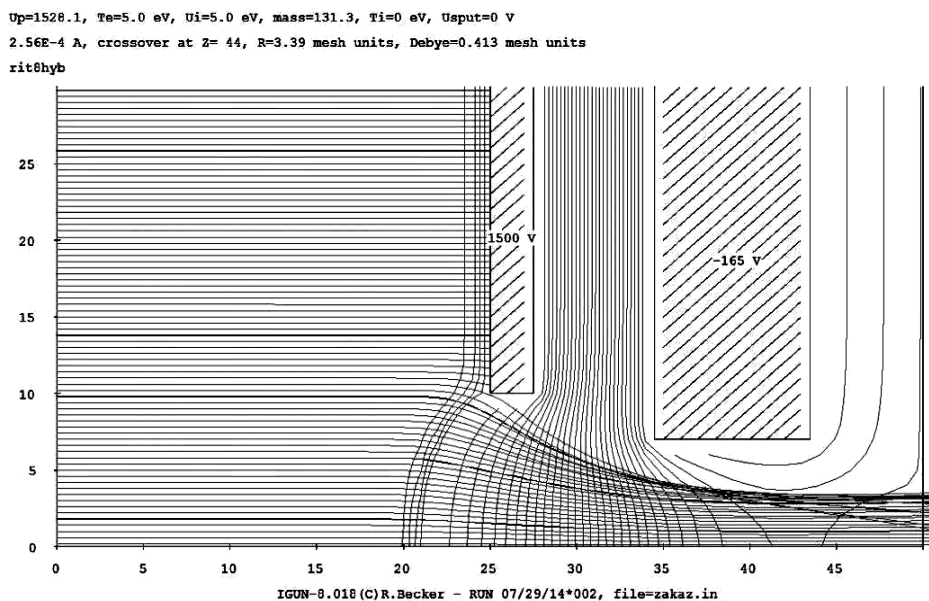


Рисунок 2. Моделирование пучка в элементарной ячейке ИОС

Были рассчитаны геометрические параметры ионно-оптической системы, для каждой из выбранных мощностей.

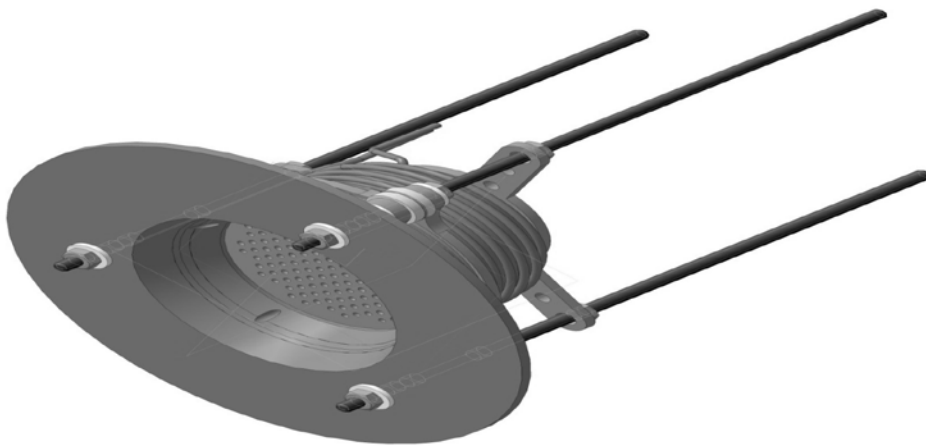
Таблица 2. Геометрические параметры ИОС

Мощность (Вт)	Диаметр отверстий ЭЭ (мм)	Диаметр отверстий УЭ (мм)	Толщина ЭЭ (мм)	Толщина УЭ (мм)	Зазор между ЭЭ и УЭ (мм)	Количество отверстий	Полуугол расходимости (°)
20	2	1.4	0.3	1.5	0.7	47	4.6
25	2	1.4	0.3	1.5	0.7	42	13.7
30	2	1.4	0.3	1.5	0.7	51	13.7

Указанные в таблице параметры позволяют достичь характеристик, рассчитанных в предыдущем разделе.

Изготовление лабораторной модели.

В НИИ ПМЭ МАИ проведена разработка основных узлов лабораторной модели ВЧИД. 3D-модель лабораторного образца ВЧИД представлена на рисунке



4.

Рисунок 4. 3D-модель ВЧИД

На текущий момент изготовлены ускоряющий и эмиссионный электроды ИОС двигателя. Они выполнены из молибдена. Фотографии электродов представлены на рисунке 5.

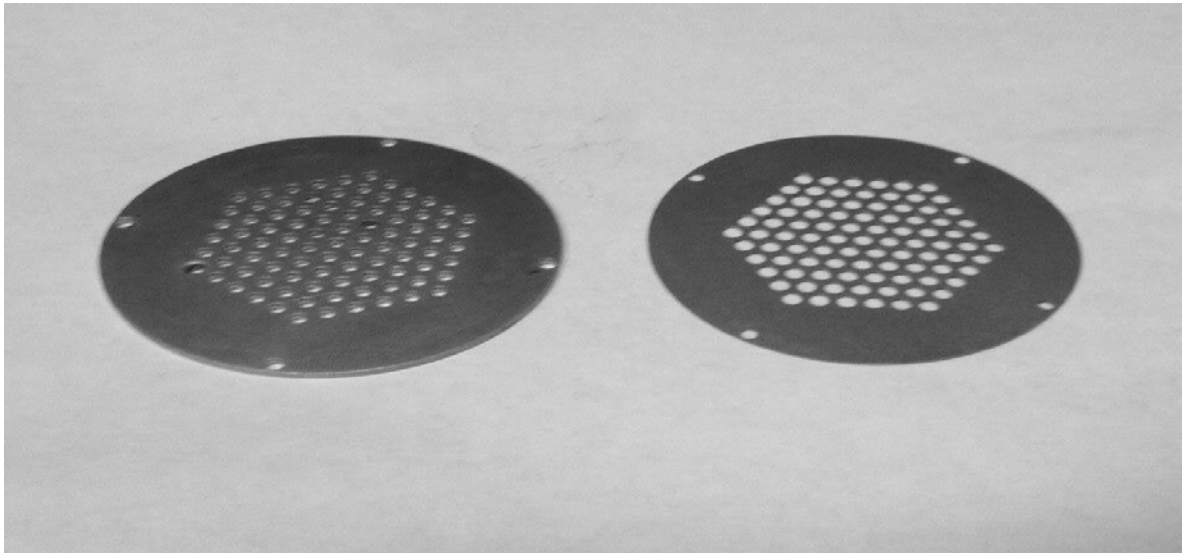


Рисунок 5. Изготовленные электроды

Также изготовлена керамическая газоразрядная камера, выполненная из особой керамики, содержащей 50% оксида алюминия и 50% нитрида кремния (рисунок 6).

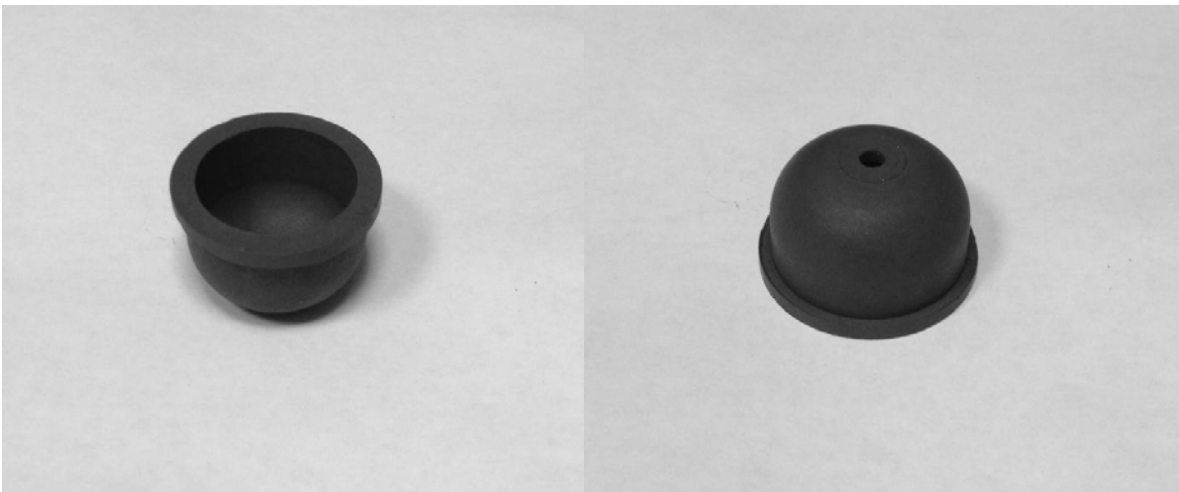


Рисунок 6. Изготовленная газоразрядная камера

Заключение

- 1) В работе были рассчитаны основные характеристики ВЧИД мощностью 20-30 Вт.

- 2) Для выбранных мощностей были рассчитаны геометрические параметры ИОС.
- 3) Была разработана конструкция лабораторной модели двигателя.
- 4) В дальнейшем запланированы испытания лабораторного образца.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущей научной школы Российской Федерации НШ-895.2014.8 и Гранта Правительства Российской Федерации № 11.G34.31.0022 для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования; при государственной поддержке комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств, выполняемых с участием высших учебных заведений по Договору № 02.G25.31.0072; при государственной поддержке проведения прикладных научных исследований и разработок, направленных на создание продукции и технологий по Соглашению № 14.577.21.0101.

Список использованных источников

1. Овчинников М.Ю. "Малыши" завоевывают мир: Сборник научно-популярных статей – победителей конкурса РФФИ 2007 года. Выпуск №11. –М: Издательство «Октопус», 2008. С. 17 – 29.
2. Loeb H.W. Principle of radio-frequency ion thrusters RIT . RIT-22 demonstrator test of Astrium ST at University of Giessen, 06-11 September, 2010.

3. Goebel D.M., Katz I. Fundamentals of electric propulsion: Ion and hall thrusters. JPL Space science and technology series, California, the USA, 2008.