

УДК 621.455

А.И. ЦАГЛОВ, А.В. ЛОЯН, Н.Н. КОШЕЛЕВ, О.П. РЫБАЛОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ ГЕЛИКОНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДВОЙНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Приводится концепция, устройство, принцип работы и основные преимущества перспективного электрореактивного геликонового двигателя с двойным электрическим слоем. Описан механизм ионизации и ускорения, проведен краткий обзор научных статей по данной тематике. Приводятся результаты исследования параметров лабораторной модели геликонового двигателя мощностью до 80 Вт с использованием лэнгмюровского и многосеточного (RFA анализатора) зондов, а также результаты эксперимента по определению распределения давления и концентрации рабочего тела в разрядной камере лабораторной модели двигателя. На основе экспериментальных данных приводится анализ оптимального режима работы данного двигателя в зависимости от массового расхода рабочего тела.

Ключевые слова: геликоновый двигатель, двойной электрический слой, ВЧ разряд, степень ионизации.

Введение

На сегодняшний день возникает ряд новых космических задач, для решения которых требуется высоконадежная двигательная установка, способная работать длительный период времени. К таким задачам относятся: пилотируемый полет к Марсу, исследование различных планет Солнечной системы при помощи автоматических космических аппаратов, а также стабилизация орбиты в течение длительного времени, выполнение различных маневров и ориентация спутников в пространстве. Если для выполнения первых двух задач требуется маршевая двигательная установка высокой мощности, то для выполнения последней необходим двигатель с потребляемой мощностью до 100 Вт, который может быть установлен на широкий класс спутников, в том числе на мини и микро спутники, число которых на околоземных орбитах постоянно растет.

Перспективным двигателем, отвечающим поставленным требованиям, является геликоновый двигатель с двойным электрическим слоем (Helicon Double Layer Thruster) – магнитоплазменный двигатель в котором ионный пучок разгоняется до сверхзвуковых скоростей благодаря двойному электрическому слою, создаваемому в выходном сопле двигателя [1].

Способ ионизации рабочего тела – индукционный (при наложении внешнего магнитного поля наз. геликоновым) [1]. В газе, поступающем в разрядную камеру, помещенную в индуктор, по которому пропускается высокочастотный ток, под действием вихревого электрического поля, инициируемого переменным магнитным потоком, возникает пробой и зажигается разряд [2].

Концепция ускорения геликоновых двигателей с двойным электрическим слоем основана на явлении скачка потенциала (электрического слоя), возникающего при резком изменении сечения канала [3]. На рисунке 1 показана схема двойного электрического слоя, а также распределения температуры и концентрации [3].

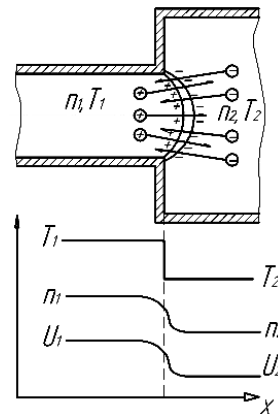


Рис. 1. Схематическое изображение двойного электрического слоя

Рассчитать разность потенциалов, возникающую на двойном электрическом слое можно по следующей формуле [3]:

$$\Delta U = \frac{k}{e_0} \left(T_{e2} - T_{e1} + \frac{T_{e2} + T_{e1}}{2} \ln \frac{n_{e2}}{n_{e1}} \right), \quad (1)$$

где T_{e1}, T_{e2} – температуры электронов до и после скачка потенциала.

Проведенный обзор научных статей на данную тему показал, что ускоренный скачком потенциала ионный пучок, покидающий двигатель, характеризуется малым углом разлета, с постоянной по радиусу скоростью потока и скоростью истечения до 15 км/с [4–6].

Такой тип двигателя обладает рядом преимуществ перед остальными электрореактивными двигателями:

- перспективно более высокий ресурс работы, чем у других типов двигателей, так как в конструкции отсутствуют подвергающиеся эрозии электроды: анод, катод (ИПД, СПД) и ускоряющие сетки (ПИД);
- простота конструкции;
- возможность использования в качестве рабочего тела различных газов и их смесей, в том числе агрессивных;
- возможность масштабирования по размеру и требуемой мощности.

Цель работы: Исследование параметров плазмы в лабораторной модели геликонового двигателя с двойным электрическим слоем с потребляемой мощностью до 80 Вт.

Экспериментальная часть

1. Описание лабораторной установки

Лабораторная модель геликонового двигателя с двойным электрическим слоем представляет собой сборную конструкцию, которая герметично крепится к вакуумной камере с внешней стороны. Лабораторная модель (рис. 2) состоит из:

- системы хранения и подачи РТ (СХПРТ);
- стеклянной разрядной камеры длиной 80 мм и внутренним диаметром 18 мм. (РК);
- опорных фланцев, соединенных 3-мя шпильками;
- входной (газораспределительной) выходной и керамических диафрагм;
- индуктора (4-х витковая многожильная медная спираль);
- резиновых уплотнителей и керамических изоляторов.

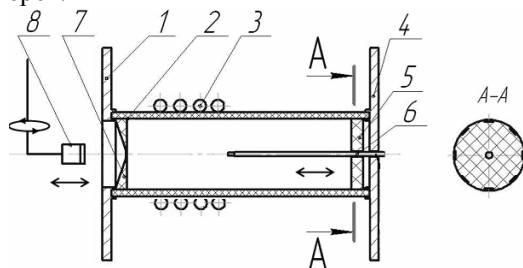


Рис. 2. Схема экспериментальной модели

На рис. 2 цифрами обозначены следующие элементы лабораторной модели: 1 – опорный фланец, герметично соединенный с вакуумной камерой; 2 – разрядная трубка; 3 – индуктор; 4 – внешний опорный фланец; 5 – керамический газораспределительный фланец; 6 – лэнгмюровский зонд; 7 – выходной керамический фланец, 8 – RPA анализатор.

Рабочее тело (аргон) подводится к разрядной камере от СХПРТ через входную диафрагму– газораспределитель. ВЧ мощность с рабочей частотой 13,56МГц подводится к индуктору через устройство согласования от ВЧ источника питания при помощи коаксиального медного кабеля. Схема системы электропитания представлена на рис. 3.

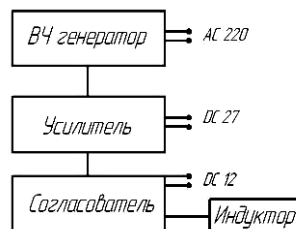


Рис. 3. Схема системы электропитания

Параметры плазмы (концентрация, температура электронов и потенциал плазмы) в РК измерялись при помощи цилиндрического лэнгмюровского зонда, перемещаемого вдоль центральной оси РК лабораторной модели. Зонд был изготовлен из вольфрамовой проволоки диаметром 0,5 мм, помещенной в керамический изолятор. Потенциал плазмы измерялся относительно опорного электрода. Диагностика выходного потока плазмы проводилась при помощи установленного на расстоянии 2 см от выходной диафрагмы цилиндрического многосеточного RPA анализатора.

2. Режимы работы двигателя

При работе лабораторной модели двигателя были зафиксированы два режима работы: «тусклый» (рис. 4 сверху) и «яркий» (рис. 6 снизу), различающиеся различной яркостью, формой разряда и рабочим диапазоном по массовому расходу.

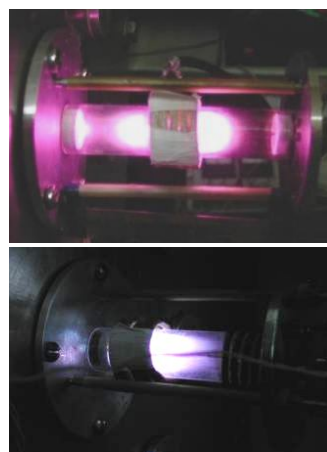


Рис. 4. Фотографии режимов работы

На рис. 5 представлены границы существования двух режимов работы двигателя, определяемые массовым расходом рабочего тела.

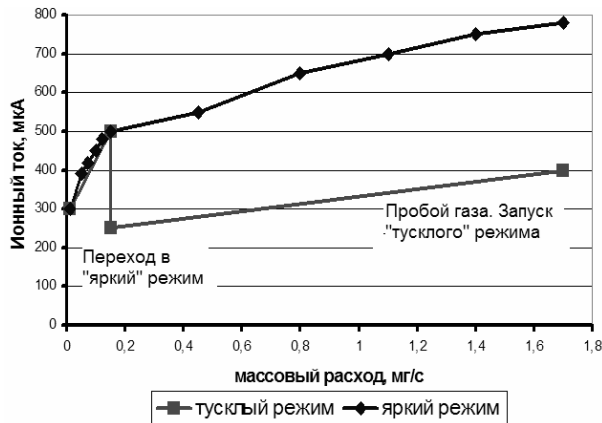


Рис. 5. Границы существования режимов

При менее интенсивном свечении «тусклый» режим работы лабораторной модели характеризовался видимым факелом выходной плазменной струи, поэтому этот режим было принято решение исследовать первым.

3. Исследование «тусклого» режима работы двигателя

В ходе исследования данного режима работы были проведены измерения параметров плазмы в выходной струе и в РК лабораторной модели.

Измерения величины ионного тока в выходной струе двигателя проводились при входной ВЧ мощности 40 Вт в зависимости от различного массового расхода.

Было обнаружено, что величина ионного тока уменьшается с увеличением массового расхода. Наибольшие значения ионного тока были зафиксированы при массовом расходе равным 0,3 мг/с. Однако при понижении массового расхода ниже 0,3 мг/с форма разряда резко менялась: исчезало свечение за выходной диафрагмой, и ионный ток падал до нуля, что свидетельствовало о срыве двойного скачка потенциала за выходной диафрагмой (рис. 6).

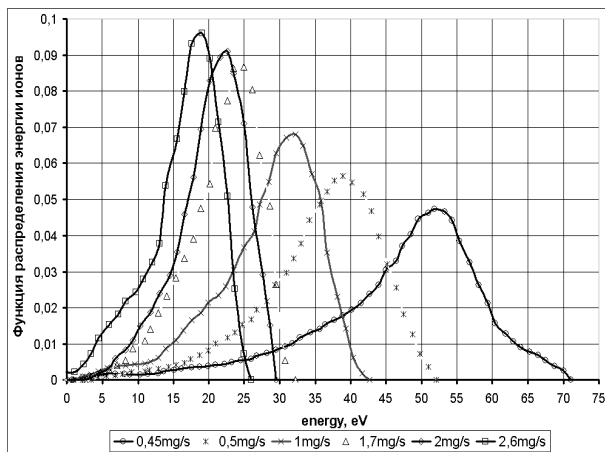


Рис. 6. Функции распределения энергий ионов

Полученные зависимости ионного тока от запирающего напряжения были обработаны с целью получения функций распределения ионов по энергиям. На рис. 6 представлены полученные зависимости. Как видно, средняя энергия ионов постоянно возрастает с уменьшением массового расхода до критического значения, после которого происходит срыв разряда (уход от ускорительного режима работы).

На рис. 7 представлены зависимости ионного тока, средней энергии ионов и удельного импульса от величины массового расхода.

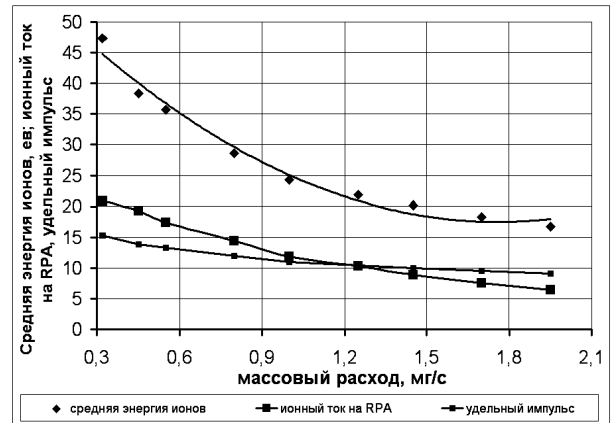


Рис. 7. Зависимости ионного тока(мкА*10), средней энергии ионов (эв) и удельного импульса (с/100) от массового расхода

Было определено, что при «тусклом» режиме работы лабораторной модели и 40 Вт ВЧ мощности удельный импульс равен 1600с на центральной оси двигателя.

Для запуска ускорительного режима работы двигателя после срыва разряда при снижении массового расхода ниже 0,3 мг/с требовалось увеличение массового расхода до 1 мг/с, при достижении которого разряд скачкообразно перескакивал в ускоряющий режим работы. Наблюдаемое явление гистерезиса ионного тока от величины массового расхода представлено на рис. 8.

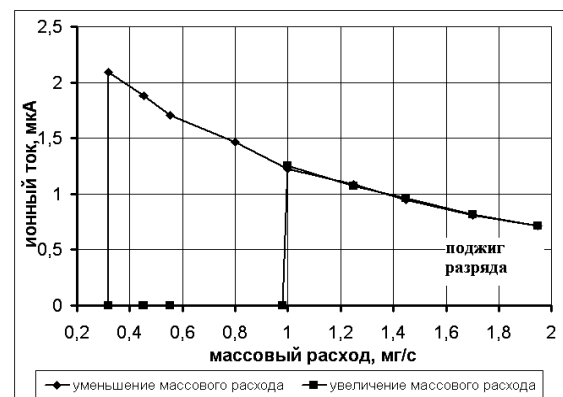


Рис. 8. Зафиксированное явление гистерезиса

В ходе исследования был проведен эксперимент по определению оптимального положения индуктора относительно выходной диафрагмы. При фиксированном массовом расходе были измерены характеристики ионного тока при перемещении индуктора от диафрагмы с шагом 5 мм на расстояние от 0 до 50 мм (рис. 9).

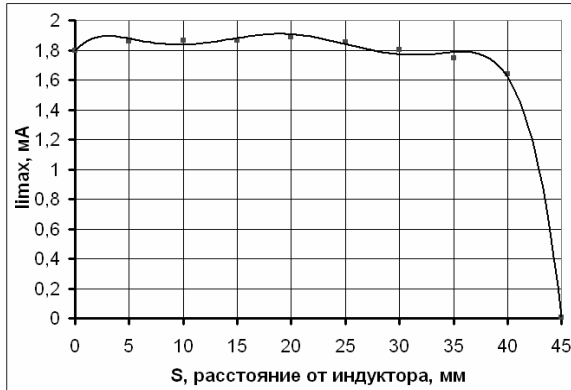


Рис. 9. Зависимость максимума ионного тока от расстояния между индуктором и диафрагмой

Результаты эксперимента показали, что неявно выраженный оптимум положения индуктора лежит в диапазоне 15...25 мм от выходной диафрагмы. При расстоянии от 0 до 40 мм ионный ток меняется слабо, но при дальнейшем увеличении расстояния до диафрагмы, резко падает до нуля.

В ходе обработки вольтамперной характеристики лэнгмюровского зонда при определении концентрации и температуры электронов были обнаружены две электронные компоненты: электроны с высокой энергией, порядка нескольких десятков эВ и электроны с низкой энергией, порядка эВ.

На рис. 10 показаны зависимости температуры двух электронных компонент от расстояния между зондом и индуктором. Как видно из графика высокоэнергетичная компонента присутствует на расстоянии от 5 до 35 мм.

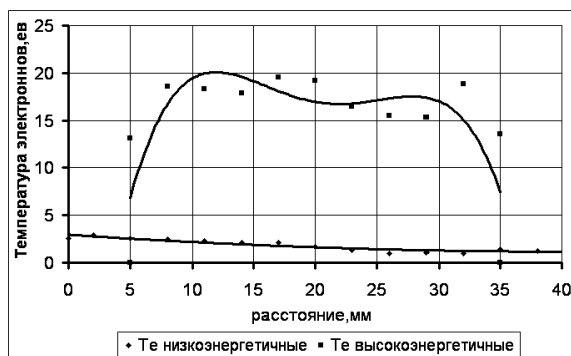


Рис. 10. Зависимость температуры электронов от расстояния до индуктора

На рис. 11 приведены зависимости концентрации электронов от расстояния между индуктором и измерительным зондом.

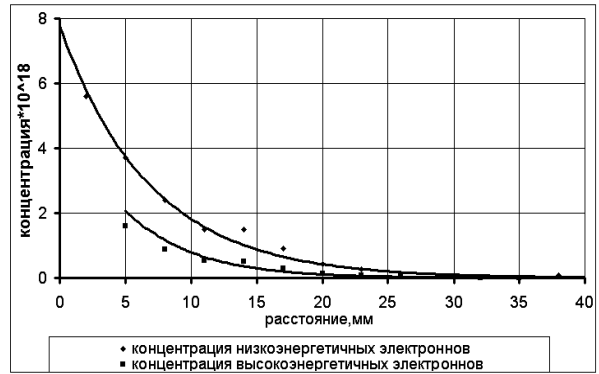


Рис. 11. Зависимость концентрации электронов от расстояния до индуктора

При анализе данных, полученных при помощи лэнгмюровского зонда, видно, что максимальные значения температуры электронов, измеренные по оси двигателя (рис. 10) находятся в соответствии с максимальным ионным током, определенным при помощи RPA анализатора при подборе оптимального расстояния между индуктором и выходной диафрагмой (рис. 9).

4. Распределения давления и концентрации рабочего тела в РК двигателя

Необходимость измерить распределение давления в разрядной камере двигателя при различных массовых расходах рабочего тела продиктована следующими задачами:

- расчет концентрации РТ в РК двигателя;
- расчет степени ионизации рабочего тела, исходя из концентрации нейтральных атомов в РК двигателя и концентрации ионов при разряде;
- определение оптимального режима работы двигателя исходя из требования получения наибольшей степени ионизации рабочего тела.

Для измерения распределения давления в разрядной камере была модернизирована лабораторная модель двигателя (изменена конструкция опорных фланцев).

Схема эксперимента представлена на рис. 12.

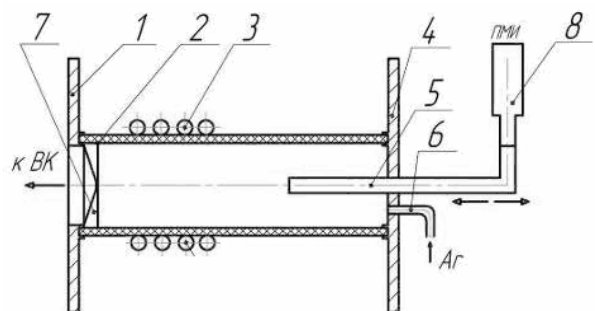


Рис. 12. Схема эксперимента. 5 – перемещаемая вдоль оси трубка измерения давления; 6 – трубка подачи рабочего тела; 8 - ионизационная лампа (остальные обозначения соответствуют рис. 3)

Давление в РК измерялось при помощи перемещаемой вдоль центральной оси измерительной трубки (5), подсоединенной к ионизационной лампе ПМИ (8). Диаметр трубки подбирался исходя из требования установления динамического равновесия концентраций газа в вакуумной камере и в измерительной трубке за приемлемый временной интервал. В ходе эксперимента давление измерялось одновременно в вакуумной камере и разрядной камере двигателя при помощи 2-х приборов ВИТ-3. Диаметр выходной диафрагмы $d = 4,5$ мм.

Эксперимент проводился в два этапа: измерение распределения давления в РК двигателя при фиксированном массовом расходе и измерения давления в РК при различных массовых расходах. Измерение распределения давления и концентрации РТ в РК двигателя при массовом расходе $m = 0,01$ мг/с (сверху) и $0,5$ мг/с (снизу) представлены на рис. 13.

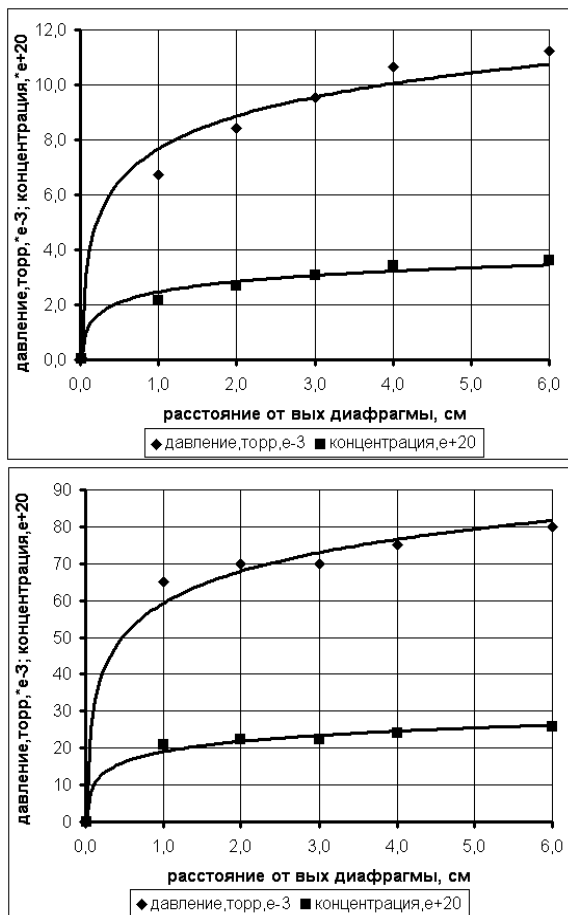


Рис. 13. Распределение давления и концентрации РТ в РК двигателя

При учете, что индуктор двигателя располагается вплотную к выходной диафрагме, на рис. 14 представлены зависимости давления и концентрации РТ в РК, измеренные на расстоянии 1 см от выходной диафрагмы (длина индуктора составляет 2 см).

Результаты эксперимента показали, что при уровне расходов от 0,01 до 1,7 мг/с давление в разрядной камере изменяется в пределах от $10^{-3}..10^{-1}$ торр, а концентрация аргона изменяется в диапазоне от $2 \cdot 10^{20}..10^{21}/\text{м}^3$. Измеренные концентрации зарядов при «тусклом» режиме работы двигателя достигали $10^{18}..10^{19}/\text{м}^3$ при массовых расходах 0,4 мг/с и выше. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при «тусклом» режиме работы модели степень ионизации является недопустимо низкой (до 10%), и такой режим работы не может использоваться в разрабатываемом электрореактивном двигателе.

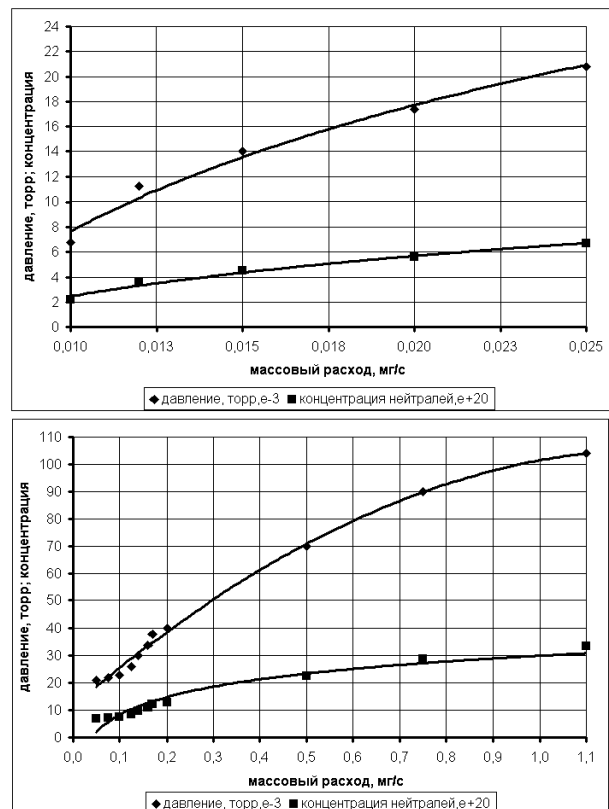


Рис. 14. Зависимость давления и концентрации РТ в РК двигателя в зависимости от массового расхода

Выводы

Представленные результаты исследования одного из режимов работы лабораторной модели геликонового двигателя со спиральным индуктором, работающего на аргоне, показали низкую эффективность использования рабочего тела.

Результаты исследования распределения давления и концентрации РТ внутри РК показали, что допустимыми уровнями расхода при концентрации зарядов $10^{18}..10^{19}/\text{м}^3$ являются расходы ниже 0,1 мг/с.

Дальнейшая работа будет направлена на изучение «яркого» режима работы двигателя, соответст-

вующего низким уровням расхода РТ и на усовершенствование лабораторной модели двигателя фокусирующей магнитной системой, которая позволит повысить эффективность ионизации при низких давлениях в РК.

Работа выполнена в рамках программы «7-th framework programme theme SPA.2007.2.2.02» по проекту «HeliconPlasmaHydrazine.CombinedMirco. Grant agreement no.: 218862».

Авторы благодарят за оказанную поддержку Морозова К.В., Кравчука А.С. и Парахина Г.А.

Литература

1. Boswell R. Helicon Double Layer Thrusters / R. W. Boswell, C. Costa, O. Sutherland // 29th International Electric Propulsion Conference IEPC-2005-290, Canberra, Australia, 2005.

2. Райзер Ю.П. Высокочастотный индукционный разряд высокого давления и безэлектродный плазматрон / Ю.П. Райзер // Успехи физических наук. – 1969. – Т. 99, Вып. 4. – С. 687-712.

3. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В. Л. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 543 с.

4. Boswell W. Testing a Helicon Double Layer Thruster Immersed in a Space-Simulation Chamber / M. D. West, C. Charles, R.D. Boswell // JOURNAL OF PROPULSION AND POWER. – Canberra, Australia. – 2008. – Vol. 24, no. 1.

5. Toki K. Preliminary investigation of helicon plasma source for electric propulsion applications / K. Toki, S. Shinohara, T. Tanikawa // 28th International Electric Propulsion Conference, IEPC-03-0168, USA, 2003.

6. Toki K. Small helicon plasma source for electric propulsion / K. Toki, S. Shinohara, T. Tanikawa // Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology. – Tokyo. – 2005. – 2-24-16.

7. Francis F Chen. Large-area helicon plasma source with permanent magnets / F Chen Francis, Humberto Torreblanca // Plasma Phys. Control. Fusion. - Electrical Engineering Department, University of California, Los Angeles. – 2007. – P. 81-92.

Поступила в редакцию 31.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой робототехники Г.И. Костюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ МОДЕЛІ ГЕЛІКОНОВОГО ДВИГУНУ З ПОДВІЙНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ШАРОМ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

О.І. Цаглов, А.В. Лоян, М.М. Кошелев, О.П. Рыбалов

Надана концепція, устрій, принцип роботи та основні переваги перспективного електрореактивного геліконового двигуну з подвійним електричним шаром. Наведено механізми іонізації й прискорення. Наведено результати дослідження параметрів лабораторної моделі геліконового двигуна потужністю до 80 Вт за допомогою ленгмюрівського зонду та RPA аналізатору й результати експерименту по знаходженню розподілення тиску та концентрації у розрядній камері лабораторної моделі геліконового двигуна. На основі експериментальних даних надається аналіз оптимального режиму роботи цього двигуна.

Ключові слова: геліконовий двигун, подвійний електричний шар, ВЧ-разряд, степінь іонізації.

INVESTIGATION OF LOW POWER HELICON DOUBLE LAYER THRUSTER LABORATORY MODEL

A.I. Tsaglov, A.V. Loyan, N.N. Koshelev, O.P. Rubalov

Conception, conformation, work principles and main advantages of perspective electric propulsion helicon double layer thruster were reported. Ionization, acceleration mechanisms and short research review were reported too. Parameters of helicon double layer thruster laboratory model with power level up to 80 W were investigated by Langmuir probe and RPA analyzer. The experiment results of determination pressure and concentration distribution in thruster discharge chamber were described. On the ground of experimental results the analysis of optimal thruster work conditions was reported.

Key words: helicon thruster, electric double layer, RF-discharge, ionization rate.

Цаглов Александр Игоревич – студент факультета ракетно-космической техники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. научный сотрудник, начальник отдела ЭРДУ Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Кошелев Николай Николаевич – ст. научный сотрудник Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Рыбалов Олег Петрович – мл. научный сотрудник Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.