

УДК 533.9.07

А. И. ЦАГЛОВ, С. Ю. НЕСТЕРЕНКО, А. В. ЛОЯН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МЕХАНИЗМЫ УСКОРЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ГЕЛИКОННОМ ЭРД**

В статье рассмотрены вопросы ускорения плазмы в безэлектродном электроракетном двигателе с высокочастотной ионизацией рабочего тела – геликонном двигателе малой мощности. Представлена конструкция, конфигурация внешнего магнитного поля и результаты испытаний действующей лабораторной модели двигателя. Изложены вопросы влияния геометрии разрядной камеры двигателя на его эффективность и предварительные результаты исследований. Рассмотрены основные механизмы ускорения плазмы в геликонном двигателе. Проведены оценочные расчеты вклада различных механизмов ускорения, таких как электромагнитное ускорение и ускорение под действием электронного давления в тягу двигателя. Показано, что при данной конфигурации лабораторной модели геликонного двигателя основным механизмом ускорения плазмы является электромагнитный.

Ключевые слова: геликонный ЭРД, геликонный резонанс, электронно-циклотронный резонанс, нижний гибридный резонанс, электромагнитное ускорение плазмы.

Введение

Данная статья является продолжением цикла публикуемых материалов, посвященных разработке перспективного безэлектродного электроракетного двигателя (ЭРД) с высокочастотной (ВЧ) ионизацией рабочего тела (РТ) - геликонного двигателя малой мощности [1 - 6].

Актуальность и интерес к данной тематике обуславливается преимуществами геликонного двигателя (отсутствие контактирующих с плазмой электродов, возможность использования различных типов РТ) и значительным потенциалом его применения на борту низкоорбитальных (200..500 км) космических аппаратов (КА) класса «микро», что позволит существенно увеличить время их активного существования. Ресурс геликонного двигателя, в отличие от других типов ЭРД, не зависит от уровня потребляемой мощности. На сегодняшний день основной задачей научных исследований в данной области является увеличение КПД маломощных геликонных двигателей.

Работы по геликонному ЭРД проводились в отделе ЭРД ХАИ в рамках программы «7-th framework program theme SPA.2007.2.2.02» по проекту «Helicon Plasma Hydrazine. Combined Micro Propulsion» (2010 – 2012 гг.) и продолжаются по сей день, несмотря на завершение международного проекта.

В рамках проекта впервые для геликонного ЭРД была предложена конфигурация внешнего магнитного поля (ВМП) с двухпиковым распределением магнитной индукции в разрядной камере (РК), в частности с размещением пиков у ее среза и инжек-

тора, наличием на оси зоны с близкой к нулю магнитной индукцией, выполнением условий электронно-циклотронного (ЭЦР), геликонного и нижнего гибридного резонансов (НГР) и согласованием распределений магнитной индукции и напряженности ВЧ электрического поля антенны - совпадением их минимумов и максимумов.

Применение разработанной конфигурации ВМП при испытаниях лабораторной модели маломощного геликонного двигателя позволило повысить тяговый КПД до 13...19% в диапазонах потребляемой ВЧ мощности 8...50 Вт, удельного импульса 420...1250 с и использовании аргона в качестве РТ.

На сегодняшний день основными направлениями работы являются исследования механизмов ускорения плазмы в геликонном ЭРД, а также изучение влияния геометрии РК на параметры струи и эффективность работы двигателя.

Действующая модель геликонного двигателя

Представленные результаты были получены при испытаниях действующей лабораторной модели геликонного двигателя (рис. 1).

Особенностью данной модели является возможность демонтажа / замены РК, антенны и магнитной системы. Корпус модели изготовлен из стеклотекстолита. В двигателе используется резонансная антенна, согласование которой осуществляется путем подстройки частоты.

В качестве источников ВМП применены самарий-кобальтовые постоянные магниты. Распреде-

ния магнитной индукции вдоль РК по оси и у стенок представлены на рис. 2.



Рис. 1. Действующая модель геликонного ЭРД

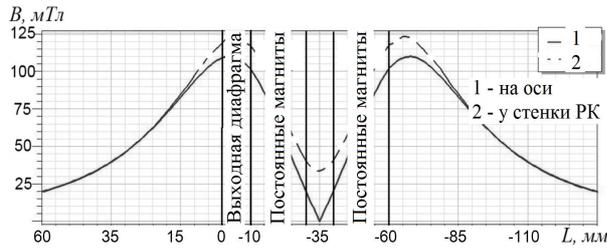


Рис. 2. Конфигурация ВМП действующей модели

Распределение резонансных зон поглощения ВЧ мощности плазмой вдоль РК разработанной модели двигателя представлено на рис. 3. Конфигурация ВМП совмещает выполнение трех типов резонансов (ЭЦР, геликонных и НГР) в РК разработанной модели геликонного двигателя.

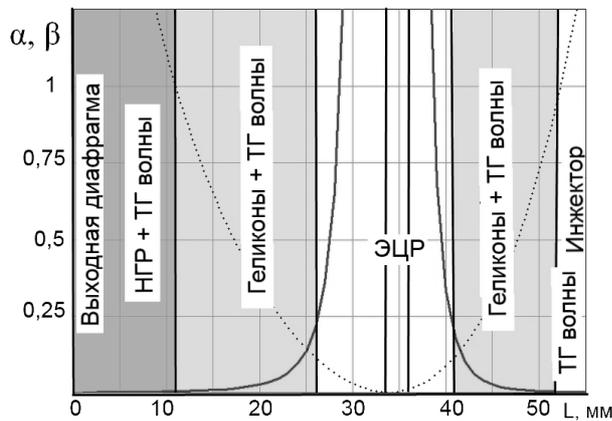


Рис. 3. Распределение режимов поглощения ВЧ мощности плазмой по длине РК двигателя

Распределения осевой и радиальной составляющих магнитной индукции ВМП у стенки РК представлены на рис. 4.

Из рисунка 4 следует, что осевая составляющая магнитной индукции в области ускорения (за пределами выходной диафрагмы) является преобладающей. Изложенные во введении результаты испытаний были получены при использовании цилиндри-

ческой РК. Для проведения дальнейших исследований была разработана и изготовлена РК с кольцевым сечением (рис. 5).

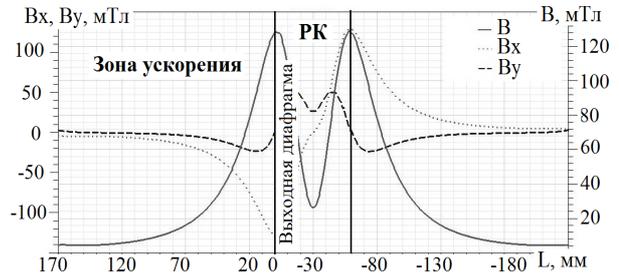


Рис. 4. Соотношение осевой и радиальной компоненты магнитной индукции ВМП двигателя

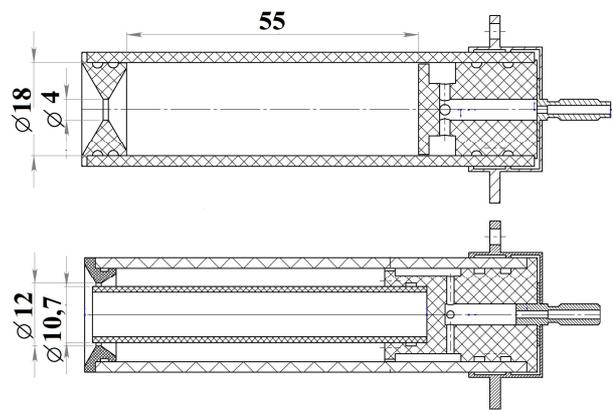


Рис. 5. Цилиндрическая и кольцевая типы РК

Кольцевая РК была изготовлена для проверки возможностей повышения КПД за счет увеличения электромагнитной составляющей тяги (см. формулы ниже) при сохранении необходимого уровня концентрации РТ в РК при рабочих массовых расходах. Площади критических сечений выходных диафрагм равнялись 12,6 мм² и 23 мм² для цилиндрической и кольцевой РК соответственно.

Экспериментальное исследование параметров струи модели

На момент написания статьи была проведена серия предварительных экспериментов с цилиндрической и кольцевой РК, направленных на исследования углового распределения ионного тока струи. Полученные при помощи многосеточного зонда экспериментальные данные представлены на рис. 6.

Прирост ионного тока на зонд при использовании кольцевой РК составил от 1,5 до 2,2 раз при одинаковых уровнях мощности, соотношениях площадей критических сечений диафрагм 1,8 раза и рабочих массовых расходов 1,2 раза, что говорит о работоспособности и перспективности кольцевой конфигурации, а также необходимости ее оптимизации.

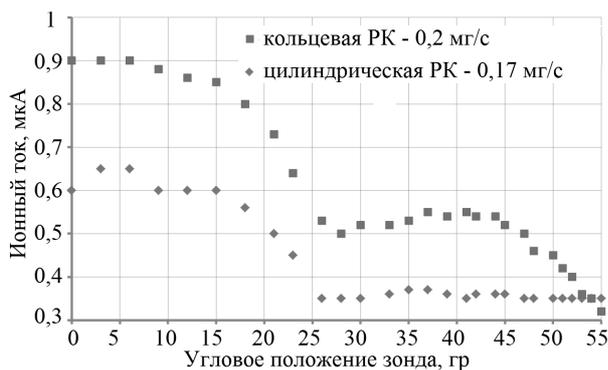


Рис. 6. Угловые распределения ионного тока струи при подводимой ВЧ мощности около 40 Вт

Теоретические расчеты

Можно выделить следующие основные механизмы ускорения в геликонном ЭРД, в котором ионная компонента плазмы не является замагниченной:

а) ускорение в амбиполярном электрическом поле, образующемся в результате пространственного разделения частиц при их движении в сторону снижения концентрации – ускорение за счет электронного давления;

б) электромагнитное ускорение плазмы объемными силами за счет взаимодействия кольцевых токов в плазме с радиальной составляющей внешнего постоянного во времени магнитного поля.

Вклад ускорения за счет электронного давления можно оценить по следующей формуле:

$$F_p = p_e \cdot S = \int_0^r p_e \cdot r dr = \int_0^r n_e \cdot k \cdot T_e \cdot r dr, \quad (1)$$

где p_e – продольная составляющая электронного давления;

S – площадь критического сечения выходной диафрагмы;

r – радиус отверстия в выходной диафрагме;

n_e – концентрация электронов;

k – постоянная Больцмана;

T_e – температура электронов.

Вклад электромагнитной составляющей в тягу двигателя можно упрощенно оценить по следующей формуле:

$$F_B = 2\pi \cdot \int_0^z \int_0^r j_\phi \cdot B_{cr} \cdot r dr dz, \quad (2)$$

где j_ϕ – кольцевой ток в плазме;

B_{cr} – радиальная составляющая индукции внешнего постоянного во времени магнитного поля.

Кольцевой ток в плазме можно записать в виде:

$$j_\phi = -\frac{dB_t}{dz} \varepsilon_0 c^2, \quad (3)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная;

c – скорость света;

B_t – переменная составляющая магнитной индукции, определяемая конфигурацией антенны и величиной тока, текущего по ней.

Тогда оценить вклад магнитной составляющей можно по следующей формуле:

$$F_B = \varepsilon_0 \cdot c^2 \cdot B_{cr} \cdot B_t \cdot S, \quad (4)$$

где S – площадь выходного сечения.

Экспериментальные и расчетные данные, необходимые для проведения оценки вклада компонент в тягу двигателя приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели двигателя

№	Параметр	Величина
1	Концентрация электронов	$6 \cdot 10^{18}$ 1/м ³
2	Температура электронов	15 эВ
3	Постоянная радиальная составляющая магнитной индукции	0..30 мТл
4	Переменная составляющая магнитной индукции	1 мТл
5	Радиус отверстия в выходной диафрагме	2 мм
6	Радиус РК	9 мм
7	Измеренная тяга модели при расходе 0,12 мг/с и уровне мощности 50 Вт	1,5 мН

Оцененные величины тяги для различных конфигураций РК, создаваемые за счет электронного давления и электромагнитных сил, составили 0,02...0,03 мН и 0,75...2 мН соответственно, что говорит о значительном преобладании электромагнитного механизма ускорения плазмы и его основной роли в создании тяги разработанного геликонного двигателя, а также об эффективности кольцевой конфигурации РК.

Выводы и дальнейшие перспективы

Таким образом, наибольший вклад в тягу разработанного геликонного двигателя вносит электромагнитный механизм, что говорит о протяженной зоне ускорения и необходимости детального исследования вопросов истечения плазмы в расходящемся магнитном поле.

Использование кольцевой РК является перспективным направлением модернизации модели геликонного двигателя, поскольку обеспечивает большую величину радиальной составляющей индукции ВМП в области выходной диафрагмы.

Дальнейшими направлениями исследования являются комплексное изучение влияния геометрии РК на параметры двигателя, испытания модели с

кольцевой РК на тягомере, а также проведение тяговых измерений с по отдельности устанавливаемыми на тягомер РК и магнитной системой двигателя для проверки теоретических оценок.

Литература

1. Исследование лабораторной модели геликонового двигателя с двойным электрическим слоем малой мощности [Текст] / А. И. Цаглов, А. В. Лоян, Н. Н. Кошелев, О. П. Рыбалов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 7(74). – С. 90 – 95.

2. Испытания инженерной модели безэлектродного электрореактивного двигателя малой мощности с высокочастотной ионизацией рабочего тела [Текст] / А. И. Цаглов, А. В. Лоян, Н. Н. Кошелев, О. П. Рыбалов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7(84). – С. 115 – 119.

3. Цаглов, А. И. Исследование параметров струи безэлектродного ЭРД с ВЧ ионизацией РТ [Текст] / А. И. Цаглов // *Авиационно-космическая*

техника и технология. – 2012. – № 9 (96). – С. 191 – 195.

4. Результаты испытаний безэлектродного электрореактивного двигателя малой мощности с ВЧ ионизацией РТ [Текст] / А. И. Цаглов, А. В. Лоян, Н. Н. Кошелев, О. П. Рыбалов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 8 (95). – С. 212 – 218.

5. Low Power Radio-Frequency Plasma Thruster Development and Testing [Электронный ресурс] / F. Trezzolani, A. Lucca Fabris, D. Pavarin, A. Selmo, A. I. Tsaglov, A. V. Loyan, O. P. Rubalov, M. Manente // *33rd International Electric Propulsion Conference, The George Washington University Washington, D.C. USA October 6–10, 2013*. – 16 с. – Режим доступа: www.iepc2013.org/get?id=153. – 23.05.2014.

6. Конфигурация внешнего магнитного поля маломощного геликонного ЭРД [Текст] / А. И. Цаглов, А. В. Лоян, Т. А. Максименко, О. П. Рыбалов // *Вестник двигателестроения*. – 2013. – № 2. – С. 94 – 98.

Поступила в редакцию 23.05.2014, рассмотрена на редколлегии 14.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А. И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МЕХАНІЗМИ ПРИСКОРЕННЯ ПЛАЗМИ У ГЕЛІКОННОМУ ЕРД

О. І. Цаглов, С. Ю. Нестеренко, А. В. Лоян

У статті розглянуто питання прискорення плазми в безелектродному електроракетному двигуні з високочастотною іонізацією робочого тіла - геліконному двигуні малої потужності. Представлено конструкцію, конфігурацію зовнішнього магнітного поля і результати випробувань діючої лабораторної моделі двигуна. Викладено питання впливу геометрії розрядної камери двигуна на його ефективність і попередні результати досліджень. Розглянуто основні механізми прискорення плазми у геліконному двигуні. Проведено оціночні розрахунки внеску різних механізмів прискорення, таких як електромагнітне прискорення і прискорення під дією електронного тиску у тягу двигуна. Показано, що при даній конфігурації лабораторної моделі геліконного двигуна основним механізмом прискорення плазми є електромагнітний.

Ключові слова: геліконний ЕРД, геліконний резонанс, електронно-циклотронний резонанс, нижній гібридний резонанс, електромагнітне прискорення плазми.

MECHANISMS OF PLASMA ACCELERATION IN HELICON PLASMA THRUSTER

O. I. Tsaglov, S. Yu. Nesterenko, A. V. Loyan

In article is discussed the electrodeless plasma acceleration in electric propulsion with high-frequency ionization of working body - helicon low power plasma thruster. Design, configuration of the external magnetic field and results of thruster laboratory model testing are presented. Questions of thruster discharge chamber geometry influence on its efficiency and preliminary investigations are described. Basic mechanisms of plasma acceleration in helicon engines are discussed. Assessment calculations of different acceleration mechanisms contributions, such as electromagnetic acceleration and acceleration under the influence of electron pressure, in the engine thrust were conducted. It is shown that for a given configuration of helicon plasma thruster laboratory model the main mechanism of plasma acceleration is electromagnetic.

Key words: helicon plasma thruster, helicon resonance, electron cyclotron resonance, the lower hybrid resonance, electromagnetic plasma acceleration.

Цаглов Александр Игоревич – аспирант каф. 401, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: atsaglov@ukr.net.

Нестеренко Сергей Юрьевич – канд. техн. наук, доцент каф. 401, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: sergiush@yahoo.com.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 401, начальник отдела ЭРДУ МНТЦ КЭД, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.