

УДК 533.9.07

**А. И. ЦАГЛОВ, А. В. ЛОЯН, Т. А. МАКСИМЕНКО, О. П. РЫБАЛОВ***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***КОНФИГУРАЦИЯ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
МАЛОМОЩНОГО ГЕЛИКОННОГО ЭРД**

*В статье приведены конструкция и принцип работы геликонного ЭРД, изложены результаты экспериментального исследования влияния конфигурации внешнего магнитного поля на эффективность работы маломощного геликонного двигателя с рабочей частотой 10–14 МГц и уровнем ВЧ мощности до 50 Вт. Представлена разработанная конфигурация внешнего магнитного поля, описаны ее особенности. Показано, что применение данной конфигурации позволяет повысить тяговый к.п.д. маломощного геликонного двигателя до 13–19% в диапазоне мощности 10–50 Вт и индукции внешнего магнитного поля менее 115 мТл. Изложена научная новизна и практическая значимость проведенных работ. Намечены пути дальнейшего совершенствования разработанной конфигурации внешнего магнитного поля.*

**Ключевые слова:** безэлектродный ЭРД, геликонный разряд, двойной электрический слой, магнитное сопло, электронно-циклотронный резонанс, нижний гибридный резонанс.

**Введение**

Данная статья является продолжением цикла публикуемых материалов, посвященных разработке перспективного безэлектродного ЭРД с ВЧ ионизацией РТ малой мощности [1, 2, 3, 4]. В зарубежной литературе данный тип ЭРД именуется как «безэлектродный магнитоплазменный» или «геликонный (helicon)» двигатель.

Работы проводились в отделении 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 продолжают по сей день, несмотря на завершение международного проекта.

На сегодняшний день актуальными направлениями исследований в области ЭРД являются создание маломощных ЭРД для микро- и малых КА с уровнем потребляемой мощности менее 100 Вт, а также повышение ресурса существующих типов ЭРД [5,6].

Сложность решения данных задач заключается в резком снижении эффективности и ресурса двигателей при их миниатюризации вследствие возрастания влияния различных краевых эффектов, а также в неизбежном возрастании скорости эрозии электродов при увеличении потребляемой мощности [6].

На данном фоне перспективным типом ЭРД является безэлектродный магнитоплазменный (геликонный) двигатель (рис. 1), основанный на ВЧ разряде низкого давления, помещенном во внешнее постоянное во времени магнитное поле. ВЧ поле используется для ионизации рабочего тела (РТ) и получения высокоэнергетич-

еских заряженных частиц. Внешнее магнитное поле создается для обеспечения радиального удержания плазмы, улучшения эффективности поглощения ВЧ мощности плазмой и создания магнитного сопла на выходе из разрядной камеры (РК) [1,2,7].

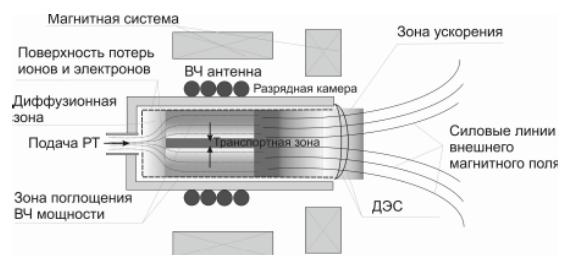


Рис. 1. Схема геликонного двигателя

Такой тип двигателей обладает рядом преимуществ по сравнению с другими типами ЭРД [1-4, 7]:

- а) значительно более высокий ресурс работы за счет отсутствия катода-нейтрализатора и контактирующих с плазмой электродов сравнительно с другими типами ЭРД;
- б) повышенная надежность вследствие малого числа конструктивных элементов и отсутствия катода-нейтрализатора;
- в) отсутствие физических ограничений на объемную плотность заряда (в отличие от ПИД);
- г) возможность использования в качестве рабочего тела различных газов и их смесей, в том числе агрессивных.

Несмотря на заявленные преимущества, эффективной работы действующих моделей геликонных двигателей удалось добиться

только при мощностях более 500 Вт и уровне магнитных полей более 0,2 Тл. Такие параметры применимы к маршевой ДУ для межпланетных перелетов и не могут быть установлены на околоземные КА мини- и микроклассов. Поэтому основной целью проводимых работ являлось создание геликонного двигателя со следующими параметрами:

- ВЧ мощность – не более 50 Вт;
- уровень индукции магнит. поля – 0..150 мТл;
- тяга – 1-2 мН;
- удельный импульс – не менее 1200 с;
- тяговый к.п.д. – свыше 10 %;
- РТ – аргон.

В данной работе изложена методология и результаты исследования влияния конфигурации внешнего магнитного поля на эффективность работы двигателя, позволившие значительно повысить тяговый к.п.д. в диапазоне малых мощностей.

Результаты испытаний моделей двигателя детально изложены в работах [4, 7].

#### Исследование влияния внешнего магнитного поля на характеристики двигателя

Эффективность работы геликонного ЭРД зависит от многих взаимосвязанных аспектов, таких как геометрические размеры РК, тип антенны, частота генератора, вид РТ. Наиболее многогранным фактором, определяющим эффективность работы рассматриваемого двигателя, является конфигурация внешнего магнитного поля. Она определяет режим ВЧ разряда, эффективность поглощения ВЧ мощности плазмой (степень ионизации РТ), уровень плазменных потерь и эффективность ускорения плазмы (величину удельного импульса).

Под конфигурацией внешнего магнитного поля здесь и далее будет пониматься распределение (величина и направление вектора) индукции внешнего магнитного поля вдоль РК двигателя и за ее пределами в области ускорения плазмы.

Под уровнем индукции внешнего магнитного поля здесь и далее будет пониматься максимальная величина индукции внешнего магнитного поля на центральной оси двигателя.

Выбор структуры работы, направленной на достижение поставленной цели, был произведен исходя из требования обеспечения минимальных массово-габаритных характеристик магнитной системы маломощного геликонного двигателя. Блок-схема этапов работы представлена на рис. 2.

Поскольку масса и габариты магнитной системы прямо пропорциональны числу магнитов и требуемой величине индукции магнитного поля в РК двигателя, исследование влияния конфигурации внешнего магнитного поля на интегральные

характеристики двигателя проходило поэтапно, следуя по пути постепенного увеличения величины индукции и сложности конфигурации.



Рис. 2. Блок-схема этапов работы

На каждом этапе интегральные параметры моделей двигателя сравнивались с целевыми, при не достижении которых принимались решения об увеличении уровня либо усложнении конфигурации внешнего магнитного поля.

Выбранные на начальном этапе геометрические параметры двигателя (тип и размеры антенны, геометрия РК) уточнялись в ходе разработки различных моделей двигателя, однако, при исследовании влияния конфигурации внешнего магнитного поля на эффективность работы моделей на каждом из этапов, были зафиксированными [см. 1-4].

В ходе работы был создан ряд различных моделей двигателя: от упрощенных до приближенных к летным вариантам. Первые использовались для исследования влияния различных конфигураций внешнего магнитного поля на параметры факела моделей, последние – для измерения интегральных характеристик и проверки полученных результатов исследований.

В процессе исследований были применены следующие технические решения:

- 1) Эксперименты проводились параллельно с серией разборных моделей двигателя с изменяемыми магнитными системами, что позволило сократить срок и расширить поле проводимых исследований;
- 2) Впервые в процессе исследования в качестве источников внешнего магнитного поля использовались электроаналоги постоянных магнитов (ПМЭА), позволяющие изменять напряженность магнитного поля в процессе эксперимента, при этом топология силовых магнитных линий была идентична постоянным магнитам [2];
- 3) В моделях двигателей была применена гальваническая развязка антенны и плазмы;
- 4) Для согласования нагрузки (антенны и плазмы) и генератора был применен резонансный метод.

Для обеспечения условий работы двигателя в режимах электронно-циклотронного (ЭЦР), геликонного и нижнего гибридного резонансов, характеризующихся эффективным вкладом ВЧ мощности в плазму, необходимые соотношения рабочей частоты и индукции внешнего магнитного поля рассчитывались исходя из представленных ниже соотношений.

Геликонные волны возникают в плазме во внешнем магнитном поле на частотах, удовлетворяющих условию:

$$\omega_{ci} < \omega_H < \omega < \omega_{ce} < \omega_p, \quad (1)$$

где  $\omega_{ce} = \frac{e \cdot B}{m_e}$  — циклотронная электронная частота — частота периодического движения заряженной частицы в постоянном магнитном поле в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного поля ( $e$  — заряд электрона,  $m_e$  — масса электрона,  $c$  — скорость света в вакууме,  $B$  — величина индукции магнитного поля).

$\omega_{ci} = \omega_{ce} \cdot \frac{m_e}{m_i}$  — циклотронная ионная частота, где  $m_i$  — масса иона.

$$\omega_{HG} = \sqrt{\omega_{ce} \cdot \omega_{ci} \cdot \left(1 + \frac{\omega_{ce}^2}{\omega_p^2}\right)}$$

— нижняя гибридная частота. Гибридные частоты плазмы характеризуют частоты слабозатухающих поперечных электростатических колебаний и играют важную роль для оценки частотного диапазона распространяющихся электромагнитных волн.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e \cdot e^2}{\epsilon_0 \cdot m_e}}$$

— плазменная частота.

На рис. 3 и 4 представлены схема и результаты одного из экспериментов по определению оптимального положения магнитов относительно антенны и выходной диафрагмы.

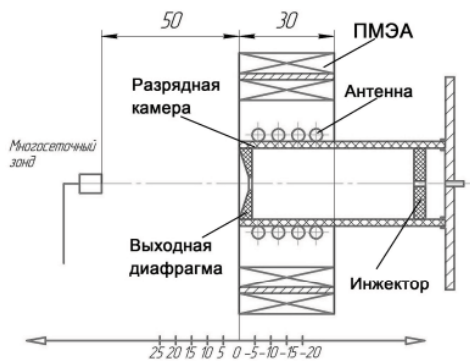


Рис. 3. Схема эксперимента с ПМЭА

При обработке полученных ВАХ зонда было зафиксировано два положения ПМЭА, при которых функции зависимостей ионного тока и средней энергии ионов имеют максимумы. Проведение подобных экспериментов позволило выявить наиболее эффективное распределение индукции внутри РК двигателя.

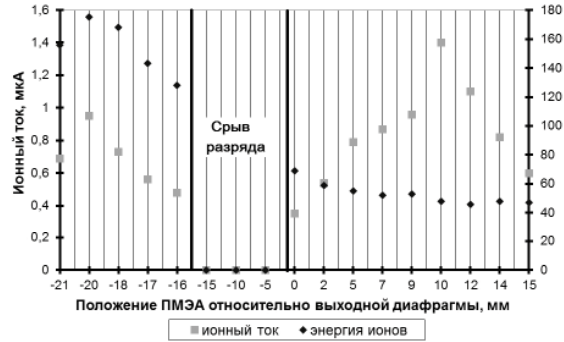


Рис. 4. Результаты эксперимента с ПМЭА

На рис. 5 представлены результаты одного из экспериментов по определению зависимости величины ионного тока струи от индукции внешнего магнитного поля.

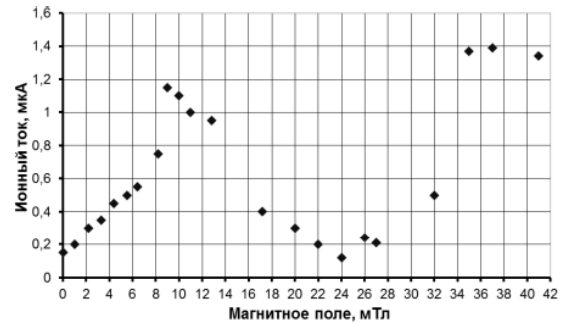


Рис. 5. Зависимость ионного тока на зонд от индукции внешнего магнитного поля ПМЭА

Пиковые значения ионного тока на рис. 5 характеризуют наличие геликонных резонансов, приводящих к эффективному поглощению ВЧ мощности плазмой. Проведение подобных экспериментов позволило выявить необходимую пиковую величину индукции внешнего магнитного поля.

### Разработанная конфигурация внешнего магнитного поля

На основании проведенных исследований была разработана двухпиковая конфигурация внешнего магнитного поля, применение которой позволило выполнить условия ЭЦР, геликонного и нижнего гибридного резонансов. Распределение индукции магнитного поля вдоль РК модели двигателя представлено на рис. 6.

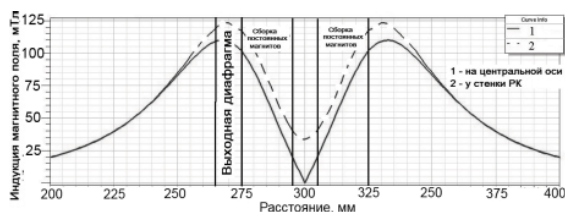


Рис. 6. Распределение индукции вдоль РК

Распределение силовых линий внешнего магнитного поля относительно конструкции модели двигателя [4], а также расположение зон с различными механизмами поглощения ВЧ мощности плазмой, представлены на рис.7.

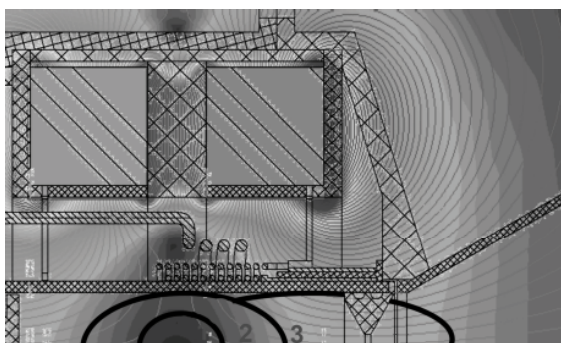


Рис. 7. Распределение силовых линий внешнего магнитного поля двигателя: 1 – ЭЦР; 2 – геликонные резонансы; 3 – нижний гибридный резонанс

### Выводы и дальнейшие перспективы

Основываясь на результатах экспериментальных исследований можно выделить следующую научную новизну проделанной работы:

а) наибольший вклад в прирост коэффициента использования массы и тягового к.п.д. двигателя в рассматриваемом диапазоне ВЧ мощности вносит выполнение условий нижнего гибридного резонанса. Выполнение условий ЭЦР и геликонного резонанса не достаточно для эффективной работы двигателя;

б) наибольший вклад в прирост средней энергии ионов струи и удельного импульса двигателя вносит наличие зоны с нулевым магнитным полем внутри РК, что повышает энергию электронов в зоне ДЭС за счет эффекта магнитной ловушки, а также вносит вклад в ионизацию РТ за счет ЭЦР в диапазоне индукции магнитного поля 0..1 мТл;

в) распределение индукции внешнего магнитного поля в РК двигателя должно согласовываться с распределением напряженности ВЧ поля антенны. Наиболее эффективная ионизация газа происходит в случаях, когда минимум индукции совпадает с минимумом напряженности электромагнитного поля антенны;

г) наиболее эффективной конфигурацией внешнего магнитного поля является двухпико-

вая конфигурация внешнего магнитного поля с размещением пиков в зоне инжектора и выходной диафрагмы, наличием зоны с нулевым магнитным полем в РК, а также соответствующая по длине РК выполнению условий ЭЦР, геликонных резонансов и нижнего гибридного резонанса;

д) наличие значительного градиента индукции внешнего магнитного поля в области антенны приводит к росту эффективности вклада ВЧ мощности в плазму, что приводит к увеличению коэффициента использования массы и тягового к.п.д. геликонного двигателя.

Основываясь на результатах экспериментальных исследований можно выделить следующую практическую значимость проделанной работы:

а) повышен до 13-19% тяговый к.п.д. геликонного двигателя в диапазоне ВЧ мощности 8-50 Вт, рабочем газе аргоне, удельном импульсе 420..1250 с и уровне индукции внешнего магнитного поля менее 115 мТл;

б) разработаны расчетно-аналитические рекомендации к проектированию необходимой конфигурации внешнего магнитного поля геликонного двигателя в зависимости от требуемых параметров геликонного двигателя (тип рабочего тела, массовый расход) при уровне мощности до 50 Вт;

в) предложена конфигурация магнитной системы, состоящая из постоянных магнитов, способная обеспечивать требуемую топологию внешнего магнитного поля геликонного двигателя;

г) изложенные рекомендации, а также созданные действующие модели двигателя могут быть использованы при исследовании физики процессов и разработке новых модификаций:

1) безэлектродных магнитоплазменных двигателей с ВЧ ионизацией РТ с емкостными и индуктивными типами антенн;

2) ПИД с ВЧ ионизацией РТ;

3) наземных промышленных ВЧ генераторов плазмы низкого давления во внешнем магнитном поле.

Направления дальнейшей модернизации конфигурации внешнего магнитного поля будут заключаться в более детальном профилировании зоны ускорения плазмы путем проведения дополнительных экспериментальных работ и МГД моделирования истечения плазмы.

### Литература

1. Цаглов А.И. 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. Цаглов А.И. Испытания инженерной модели безэлектродного электрореактивного двигателя малой мощности с высокочастотной ионизацией рабочего тела [Текст] / Цаглов А.И., Лоян А.В., Кошелев Н.Н., Рыбалов О.П. // 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. Цаглов А.И. 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. Ходненко В.П. Корректирующие двигательные установки для малого космического аппарата [Текст] / В.П.Ходненко, А.В.Хромов // Вопросы электромеханики.- 2009.- Т.109.- С.27-32.

6. Loyan, A. V. Performance investigation of SPT-20M low power hall effect thruster [text] / A.V.Loyan, T.A.Maksymenko // International electric propulsion conference.- 2007.- 100.

7. Pavarin, A.V. Characterization of the helicon plasma thruster of the EU FP7 HPH. Com program [text] / D. Pavarin, F. Ferri, M. Manente, A. Lucca Fabris, F. Trezzolani, M. Faenza, L. Tasinato, D. Rondini, D. Currelli, D. Melazzi, D. Packan, P. Elias, J. Bonnet, A. Cardinali, O. Tudisco, Y. Protsan, A. Loyan, A. Tsaglov, A. Selmo, K. Katsonis, Ch. Berenguer, M. Pessana, V. Lancelotti // Space Propulsion Conference.- 2012.- 241.

*Поступила в редакцию 13.06.13*

**Цаглов О.И., Лоян А.В., Максименко Т.О., Рыбалов О.П. Конфігурація зовнішнього магнітного поля для малопотужного геліконного ЕРД**

*У статті наведені конструкція і принцип роботи геліконного ЕРД, викладені результати експериментальних досліджень впливу конфігурації зовнішнього магнітного поля на ефективність роботи малопотужного геліконного двигуна з робочою частотою 10-14 МГц і рівнем ВЧ потужності до 50 Вт. Представлена розроблена конфігурація зовнішнього магнітного поля, описано її особливості. Показано, що застосування даної конфігурації дозволяє підвищити тяговий к.к.д. малопотужного геліконного двигуна до 13-19% в діапазоні потужності 10-50 Вт й індукції зовнішнього магнітного поля менше 115 мТл. Викладена наукова новизна і практична значущість проведених робіт. Намічені шляхи подальшого вдосконалення розробленої конфігурації зовнішнього магнітного поля.*

**Ключові слова:** безелектродний ЕРД, геліконний розряд, подвійний електричний шар, магнітне сопло, електронно-циклотронний резонанс, нижній гібридний резонанс

**Tsaglov A.I., Loyan A.V., Maksimenko T.A., Rubalov O.P. Outer magnetic field configuration of low power helicon plasma thruster**

*The paper presents construction and working principles of helicon plasma thruster, expends experimental investigation results of outer magnetic field configuration influence on low power helicon thruster efficiency in operating frequency range between 10-14 MGs and RF power level up to 50 W. Developed outer magnetic field configuration and its features are presented. It is shown that applying of developed configuration allow to increase thrust efficiency of low power helicon thruster up to 13-19% in consumption power range 10-50 W and magnetic inductance level lower than 115 mTl. Scientific novelty and practical significance of done activity are presented in article. Further modernization ways of developed outer magnetic field configuration are outlined.*

**Key words:** electrodeless plasma thruster, helicon discharge, double electric layer, magnetic nozzle, electron-cyclotron resonance, low hybrid resonance.