

УДК 533.9

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

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ВЧ ИОНИЗАЦИЕЙ РТ**

В статье изложены основные преимущества, особенности конструкции и результаты испытаний действующей модели перспективного безэлектродного двигателя с ВЧ ионизацией РТ малой мощности. Рассмотрены с физической точки зрения конструкционные аспекты корпуса и магнитной системы прототипа. Приводятся особенности испытаний, результаты измерений ионного тока струи двигателя при помощи плоского одиночного зонда и измерений тяги на маятниковом тягомере. Показано, что полученная эффективность действующей модели составила 13 % при 8 Вт ВЧ мощности. Изложены анализ полученных результатов, пути дальнейшего повышения эффективности и перспективы разработки двигателя данного типа.

Ключевые слова: безэлектродный ЭРД, действующая модель, геликонный разряд, двойной электрический слой, магнитное сопло.

Введение

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

Разрабатываемый тип двигателя основан на индукционном ВЧ разряде низкого давления, помещенного во внешнее магнитное поле. ВЧ поле частотой 11-14 МГц используется для ионизации рабочего тела и получения высокоэнергичных заряженных ионов. Внешнее магнитное поле создается для обеспечения радиального удержания плазмы, улучшения поглощения ВЧ мощности плазмой и создания магнитного сопла на выходе из разрядной камеры (РК). Образованные в процессе ионизации ионы ускоряются в амбиполярном электрическом поле, проходя через двойной электрический слой (ДЭС), возникающий на выходе из РК за счет разницы концентрации заряженных частиц в канале и за его пределами.

Основными преимуществами данного типа двигателя являются:

- значительно более высокий, по сравнению с другими ЭРД, ресурс работы, поскольку в конструкции отсутствуют контактирующие с плазмой электроды;
- отсутствие физических ограничений (в отличие от ПИД не ограничена плотность ионного тока);
- возможность использования различных рабочих тел, в том числе агрессивных [3].

Работа выполнена в рамках программы «7-th framework program theme SPA.2007.2.2.02» по про-

екту «Helicon Plasma Hydrazine. Combined Micro Propulsion». Grant agreement no.: 218862.

Целью данной работы являлось проведение испытаний разработанной и изготовленной в отделении ЭРД МНТЦ КЭД ХАИ действующей модели геликонного двигателя с уровнем ВЧ мощности 50 Вт и анализ полученных результатов.

Разработанная конструкция прототипа основана на результатах экспериментов, проведенных с различными лабораторными и инженерными моделями. Испытания инженерных моделей показали низкую эффективность (1-2%), что являлось недопустимым для конкурентоспособного ЭРД. При разработке прототипа двигателя были учтены все недостатки предшествующих моделей, а также проведены дополнительные исследования, показавшие возможность значительно повысить эффективность двигателя.

Особенности конструкции модели

Изготовленная модель двигателя с указанными габаритными размерами изображена на рис. 1.

Все элементы корпуса модели, за исключением монтажного фланца, изготовлены из стеклотекстолита, исходя из требования применения диэлектрического материала, способного работать в вакууме при повышенных температурах. Данное требование продиктовано необходимостью максимального снижения потерь ВЧ мощности в элементах конструкции модели за счет возбуждения токов Фуко.

Результаты моделирования влияния материала корпуса на распределение ВЧ поля внутри РК представлены на рис. 2.



Рис. 1. Модель геликонного двигателя

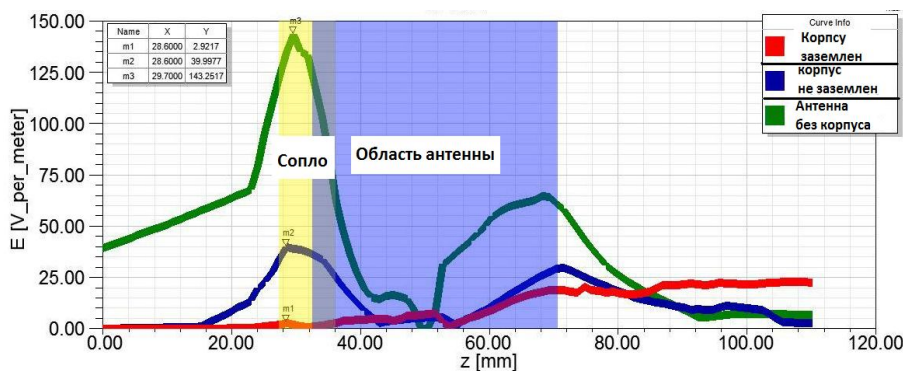


Рис. 2. Распределение ВЧ поля внутри РК в зависимости от материала корпуса

Из рис. 2 видно, что наличие вокруг антенны проводящего корпуса, а также заземление/ развязка антенны от корпуса существенно влияет на распределение ВЧ поля в области РК.

Отдельным требованием к конструкции явилось необходимость электрической развязки антенны и плазмы, поскольку в ходе экспериментов было обнаружено значительно снижение ионного тока на зонд за счет утечки плазмы на заземлённую антенну.

Исходя из вышесказанного, в конструкции модели применен экран струи, механически развязанный с РК во избежание его перегрева. Антенна отвязана от плазмы при помощи лабиринтного изолятора. Все элементы ВЧ системы (антенна, линия подвода ВЧ мощности, коннектор) электрически отвязаны от монтажного фланца и от газоподводящего тракта.

Конфигурация внешнего магнитного поля модели двигателя осталась неизменной по форме от конфигурации инженерной модели [2], поскольку примененная конфигурация обеспечивает высокую температуру электронов, прямо пропорциональную связанную с величиной перепада в ДЭС. В ходе испытаний инженерной модели средняя энергия ионов составила 130 эВ. Рассматриваемая конфигурация была разработана путем исследовательской работы с различными лабораторными моделями двигателя.

При проектировании конфигурации магнитного поля действующей модели была увеличена величина магнитного поля – приближена к величине

ниже гибридного резонанса для обеспечения более эффективного поглощения ВЧ мощности плазмой и снижения плазменных потерь за счет радиального дрейфа заряженных частиц.

Расчетная конфигурация магнитного поля, имеющая двухпиковое распределение величины магнитного поля вдоль РК с областью с нулевым полем внутри РК и двумя максимумами в зонах выходной диафрагмы и инжектора, представлена на рис. 3.

Для создания магнитного поля были использованы 16 SmCo магнитов. Схема размещения постоянных магнитов представлена на рис. 4.

Материал опорных деталей магнитного блока – стеклотекстолит. Изготовленный магнитный блок и измеренное распределение поля вдоль центральной оси прототипа представлены на рис. 5. Масса магнитной системы составила – 1395 г.

Общая масса модели составила 1990 г, основную долю которой составляет масса магнитной системы. Таким образом, основным аспектом дальнейшего снижения массы двигателя является снижение массы магнитной системы за счет уменьшения рабочей температуры магнитного блока и применения более легких магнитов.

Антенный блок существенно отличается от предыдущих версий. В данной модели была применена новая схема антенны, настроенная на резонанс с частотой генератора, что позволило решить проблему согласования до и после поджига разряда.

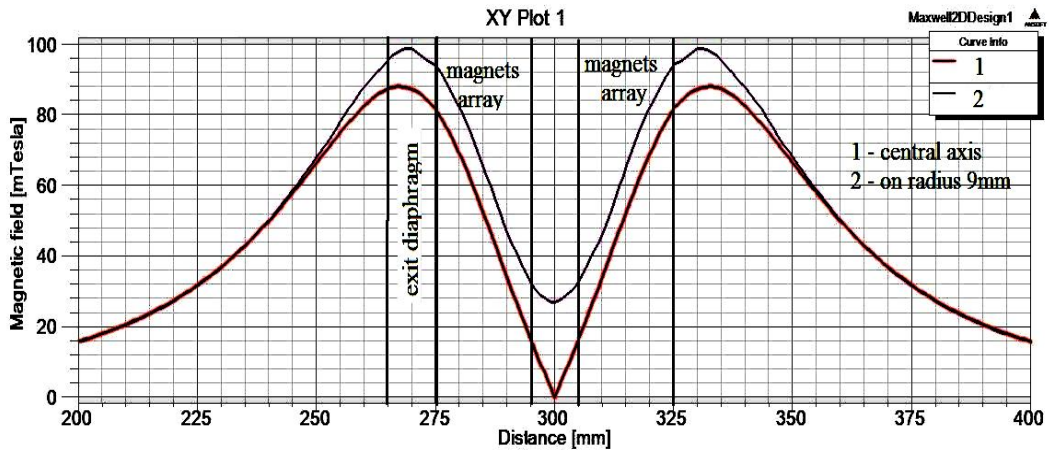


Рис. 3. Конфигурация магнитного поля

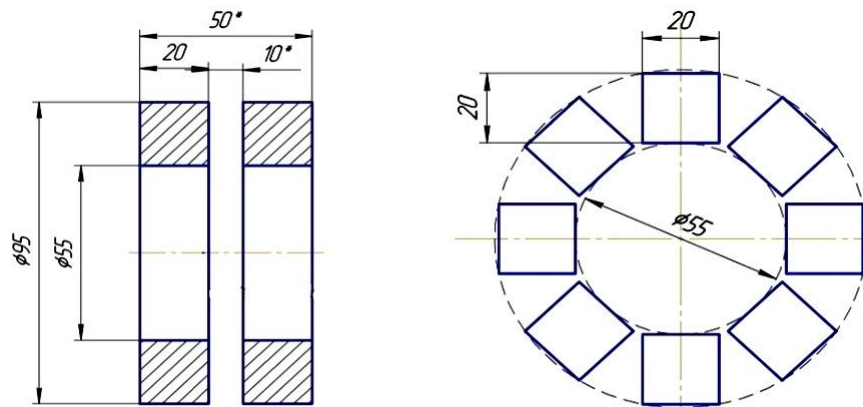


Рис. 4. Конфигурация магнитной системы

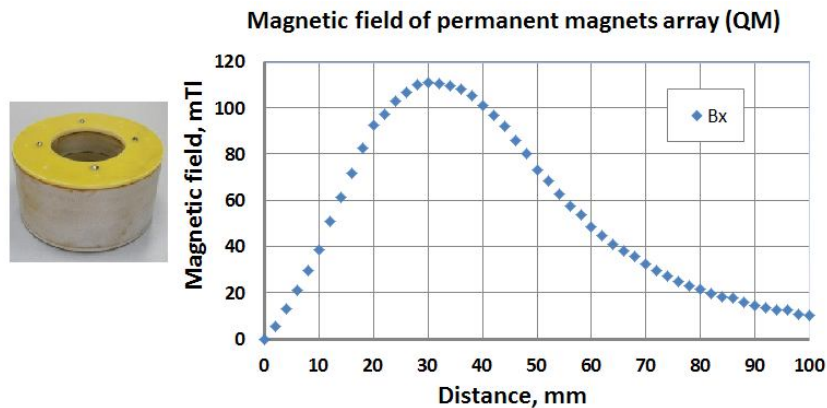


Рис. 5. Магнитный блок и распределение магнитного поля вдоль РК

Особенности и результаты испытаний

Проведенные испытания модели заключались в измерении величины ионного тока струи и в измерении тяги на маятниковом тягомере. Во всех экспериментах рабочим газом являлся аргон.

Схема подключения и установки двигателя в вакуумной камере (ВК) при измерениях ионного тока представлена на рис. 6. Особое внимание было удивлено развязке модели от «земли» и размещению

в центре ВК, удаленно от стен камеры, поскольку наличие заземленных элементов вблизи антенны и струи двигателя приводит к значительному снижению эффективности работы.

Измерения ионного тока проводились при помощи плоского зонда, помещенного в заземленное оградительное кольцо и размещенного на трехосном координатном устройстве (рис. 7).

Результаты измерений величины ионного тока прототипа представлены на рис. 8 и 9.

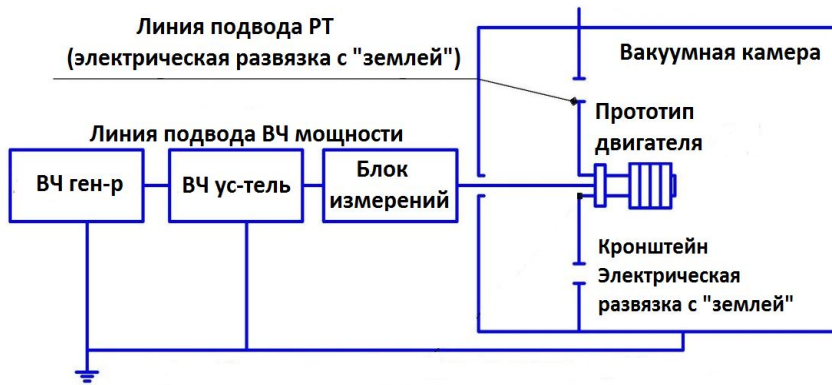


Рис. 6. Схема подключений прототипа

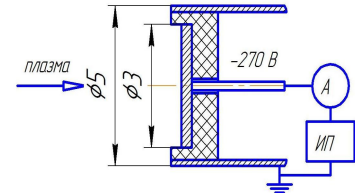


Рис. 7. Схема измерительного зонда

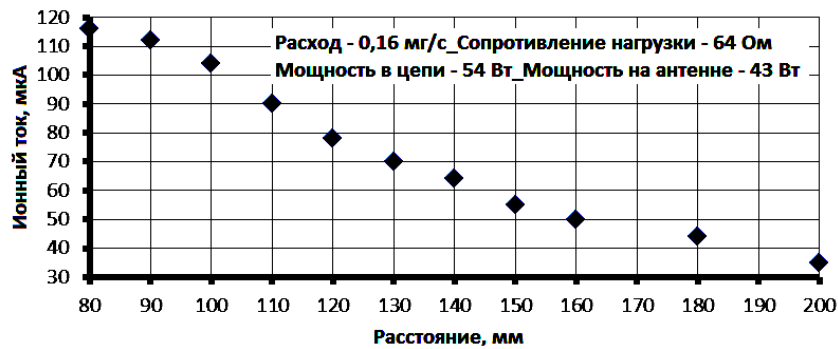


Рис. 8. Ионный ток в зависимости от расстояния

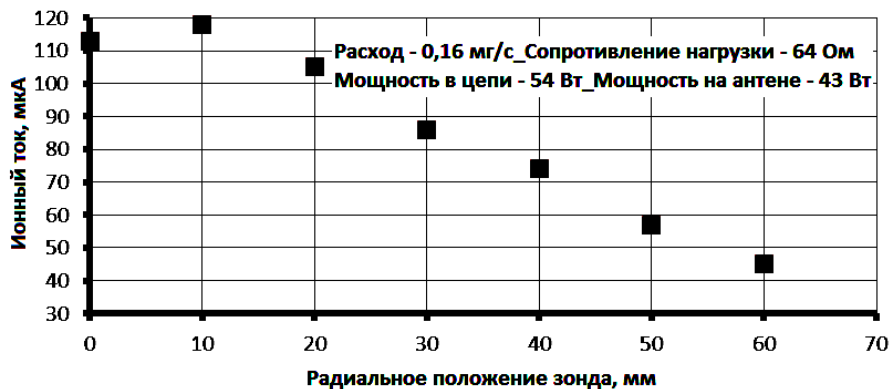


Рис. 9. Ионный ток в зависимости от радиального положения зонда

Представленные на рис. 8 и 9 сопротивления нагрузки (антенна + плазма) рассчитывались путем деления измеренного эффективного напряжения на эффективное значение тока. Мощность в цепи рассчитывалась по формуле:

$$P_{ВЧ} = I_{эф} \cdot U_{эф} \cdot \cos \varphi. \quad (1)$$

Доля мощности, излучаемая антенной, грубо оценивалась пропорционально отношению между рассчитанным сопротивлением и сопротивлением генератора в 50 Ом, характеризующему степень согласования системы.

Измерение тяги геликонного двигателя является сложной задачей из-за сильного влияния линии подвода ВЧ мощности на показания тягомера. В

работах [4, 5] для измерения тяги РК двигателя была установлена на тягомер, а антенна и магнитная системы зафиксированы на отдельных кронштейнах. Результаты данных работ сильно различаются. Так в работе [4] полученная эффективность двигателя составила около 20%, а в работе [5] порядка 1%. Стоит отметить, что при сравнимых мощностях экспериментов, конфигурации магнитных полей существенно различались (100-150 мТл против 20-50 мТл соответственно).

В ХАИ для измерения тяги двигателя было принято решение установить на тягомер двигатель вместе с ВЧ усилителем, что позволило бы измерить полную тягу модели и максимально сократить длину кабеля между усилителем и двигателем, влияю-

щую на степень согласования. Схема эксперимента представлена на рис. 10.

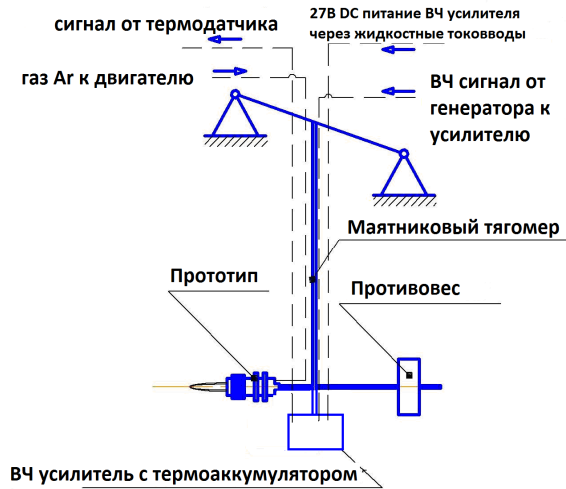


Рис. 10. Схема измерения тяги двигателя

Для этих целей был разработан и создан компактный ВЧ усилитель с термоаккумулятором, позволяющим непрерывно работать в вакууме в течение 20 - 40 мин, в зависимости от режима работы.

Стоит отметить следующие особенности проведения этого эксперимента:

1. Значительное влияние ВЧ поля на электронику тягоизмерительного устройства. Измерения тяги были проведены с уровнем ВЧ мощности менее 10 Вт. Для дальнейшей работы необходима защита электроники от помех, исходящих от антенны двигателя.

2. Существенная зависимость уровня тяги от степени согласования усилителя и двигателя.

3. Взаимодействие поля постоянных магнитов двигателя с полем тоководов линии питания ВЧ усилителя, приводящее к отклонению тягомера. Данный эффект был предварительно тарирован по току потребления усилителя и учитывался при пересчете отклонения в тягу.

Контролируемые во время эксперимента параметры были следующими: частота генератора; ВЧ напряжение генератора (700 мВ); ток потребления ВЧ усилителя; температура ВЧ усилителя. Рассчитанный уровень ВЧ мощности во время измерений тяги составил 7-10 Вт.

Интерфейсы программы по измерению тяги, показывающие зависимость отклонения штанги тягомера от времени, представлена на рис. 11.

Полученные результаты эксперимента (тяги, удельный импульс, эффективность) представлены на рис. 12.

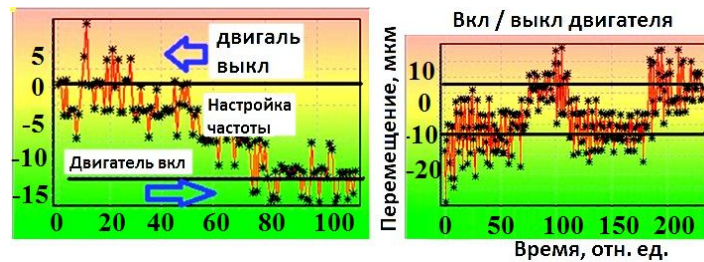


Рис. 11. Интерфейс программы тягомера

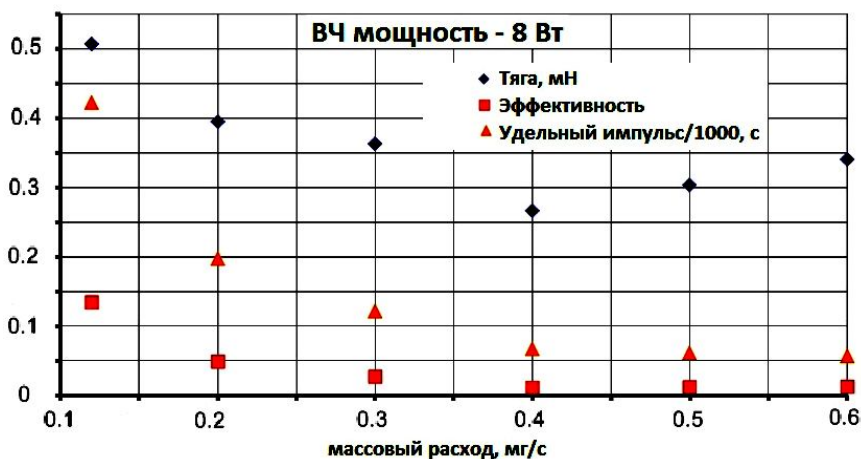


Рис. 12. Результаты измерений тяги

Таким образом, были зафиксированы следующие параметры работы данной модели геликонного двигателя:

Оптимальный массовый расход – 0,12 мг/с;

Уровень ВЧ мощности – 8 Вт;

Тяга – 0,5 мН;

Удельный импульс – 422 с;

Эффективность – 13%.

Анализ полученных результатов

Для оценки эффективности работы двигателя при 50 Вт ВЧ мощности был проведен расчет тяги прототипа исходя из измеренных величин ионного тока, сравнительно с максимально возможным ионным током при расходе 0,12 мг/с.

При данной конфигурации магнитного поля

средняя энергия ионов составляет 100 эВ. Максимально возможный ионный ток составляет 290 мА. Рассчитанный ионный ток действующей модели составил 170 мА.

Значит, оценочная степень ионизации изготовленного двигателя составляет 60%.

Результаты расчетов представлены на рис. 13.

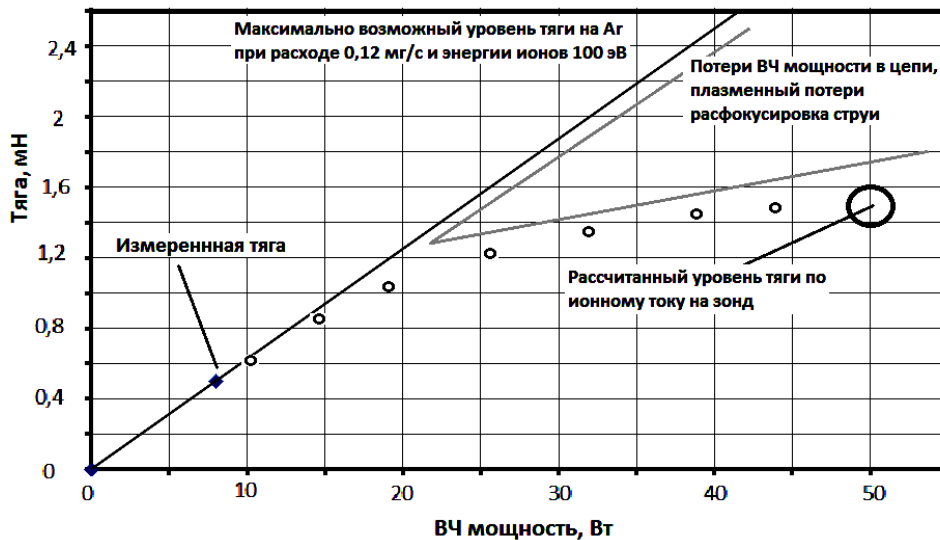


Рис. 13. Результаты анализа тяги двигателя при 50 Вт мощности

Таким образом, при 50 Вт мощности рассчитанная эффективность работы изготовленной модели двигателя является следующей:

- Массовый расход – 0,12 мг/с;
- Уровень ВЧ мощности – 50 Вт;
- Тяга – 1,5 мН;
- Удельный импульс – 1250 с;
- Эффективность – 19 %.

Выводы и дальнейшие перспективы

На данный момент эффективность изготовленного прототипа геликонного двигателя лежит в пределах 13-19%, по эффективности и массово габаритным характеристиками уступая двигателям других типов схожего класса. Однако из-за отсутствия контактирующих с плазмой электродов разрабатываемый двигатель должен значительно превосходить их по ресурсу.

Для дальнейшего повышения эффективности двигателя необходимо:

1. Повысить величину магнитного поля до уровня 130 - 140 мТл при частоте 13,56 МГц (незначительно выше частоты нижнегибридного резонанса) при сохранении конфигурации магнитной системы тем самым улучшить поглощение ВЧ мощности плазмой, уменьшить угол раскрытия струи и

уровень плазменных потерь на стенки РК.

2. Оптимизировать систему согласования нагрузки и усилителя, тем самым снизить потери ВЧ мощности в цепи.

3. Провести оптимизацию длин РК, антенны и магнитной системы.

Авторы выражают благодарность своим коллегам Т.А. Максименко и М.Ю. Титову.

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. Gilland, J.H. Application of a helicon discharge to electric propulsion [Text] / J.H. Gilland // 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion, AIAA – 1998.
4. Batishchev, O.V. Mini-Helicon Plasma Thruster Characterization [text] / O.V. Batishchev // 44th

AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, USA, 2008.

5. Thrust Measurements of a Small Scale Helicon

Double Layer Thruster [Text] / T. Harle, S.J. Pottinger and others // Papers of the 32nd International Electric Propulsion Conference, Germany, 2011.

Поступила в редакцию 21.05.2012

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

РЕЗУЛЬТАТИ ІСПИТІВ БЕЗЕЛЕКТРОДНОГО ЕЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГУНА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ З ВЧ ІОНІЗАЦІЄЮ РТ

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

В статті наведені основні переваги, особливості конструкції й результати іспитів діючої моделі перспективного безелектродного двигуна з ВЧ іонізацією РТ малої потужності. Розкриті з фізичної точки зору конструктивні аспекти корпусу й магнітної системи прототипу. Наводяться особливості іспитів, результати вимірювань іонного струму струї двигуна за допомогою плоского одиничного зонду та результати вимірювань тяги на маятниковому тягомірі. Показано, що отримана ефективність діючої моделі становила 13 % при 8 Вт ВЧ потужності. Викладені аналіз отриманих результатів, шляхи подальшого збільшення ефективності й перспективи розробки двигуна даного типу.

Ключові слова: безелектродний ЕРД, діюча модель, геліконий розряд, подвійний електричний шар, магнітне сопло.

TESTING RESULTS OF LOW POWER ELECTRODELESS PLASMA THRUSTER WITH RF IONIZATION OF WORKING MEDIUM

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

Main advantages, construction features and testing results of perspective electrodeless plasma thruster working model with RF ionization of working medium are expounded in this article. Construction frame and magnetic system aspects are described from physical point of view. Testing features, results of plume ion current measurements by flat single probe and results of thrust measurements on pendulum thrustbalance are presented. Obtained working model efficiency of 13 % for 8 W of RF power is demonstrated. Analysis of obtained results, ways of further efficiency increasing and perspectives of further given thruster type development are expounded too.

Key words: electrodeless EPT, working model, helicon discharge, double electric layer, magnetic nozzle.

Цаглов Александр Игоревич – аспирант каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: A.Tsaglov@ukr.net.

Лоян Андрей Витальевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник каф. 401, начальник отдела ЭРДУ МНТЦ КЭД Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: A.Loyan@khai.edu.

Кошелев Николай Николаевич – старший научный сотрудник каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: nikolajkoshelev@rambler.ru.

Рыбалов Олег Петрович – младший научный сотрудник каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.