

УДК 533.9

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

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

ИСПЫТАНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ МОДЕЛИ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ РАБОЧЕГО ТЕЛА

В статье авторами изложены основные особенности разработки безэлектродных электрореактивных двигателей (ЭРД), представлены результаты испытаний инженерной модели двигателя, а именно результаты измерений теплового состояния модели, параметров струи и тяги. Показано, что параметры струи (ионный ток и средняя энергия ионов) зависят от давления в вакуумной камере, а эффективность работы двигателя определяется величиной потерь ВЧ мощности и конфигурацией внешнего магнитного поля. Представлен анализ полученных результатов, выводы и дальнейшие планы работы по освещенной тематике.

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

Введение

Сегодня развитие космических технологий движется с огромной скоростью. Запуск на орбиту всё большего количества КА различного назначения влечет за собой потребность в разработке новых, более экономичных и эффективных двигательных установок на базе ЭРД для выполнения как маневровых, так и маршевых задач. Основными требованиями к ЭРДУ нового класса являются обеспечение длительного ресурса, высокий удельный импульс, надежность и многорежимность.

Перспективным типом ЭРД являются магнитоплазменные безэлектродные двигатели, основанные на индукционном высокочастотном (ВЧ) разряде. ВЧ поле различных частотных диапазонов используется для ионизации рабочего тела и получения высокоэнергетических заряженных частиц. Внешнее магнитное поле создается для обеспечения радиального удержания плазмы, улучшения поглощения ВЧ мощности плазмой и создания магнитного сопла на выходе из РК. Образованные в ходе 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.

Безэлектродные ЭРД обладают рядом преимуществ по сравнению с другими плазменными двигателями, а именно:

– значительно более высокий ресурс работы (отсутствуют контактирующие с плазмой электроды и катод-нейтрализатор);

– повышенная надежность (отсутствует катод-нейтрализатор);

– отсутствие физических ограничений: возможность масштабирования по мощности;

– возможность использования в качестве рабочего тела различных газов и их смесей, в том числе агрессивных [1].

В безэлектродных двигателях используются ВЧ разряды, помещенные во внешнее магнитное поле с индукцией, соответствующей условиям электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) и условиям возбуждения геликонов и волн Трайвелписа-Голда (геликонные источники), а также комбинации обоих режимов. [2 – 4].

В данной статье приведены результаты испытаний инженерной модели (ИМ) безэлектродного ЭРД при уровне мощности 50–60 Вт, работающего в геликонном режиме. Конечной целью проводимых работ является создание геликонного двигателя с потребляемой мощностью до 80 Вт, удельным импульсом более 1200 с и тягой более 1,5 мН.

Экспериментальная часть

Исследования проводились на промышленной частоте 13,56 МГц. Рабочее тело, использовавшееся в экспериментах, – аргон. Общая структура работ схематически изображена на рис. 1.

Результаты экспериментов с лабораторными моделями без внешнего магнитного поля, а также результаты эксперимента по определению давления внутри РК лабораторной модели двигателя приведены в статье [5].

Для обеспечения эффективной работы разрабатываемого безэлектродного ЭРД необходимо создание магнитного поля определенной конфигурации в РК двигателя. Поэтому проведенные эксперименты с лабораторными моделями с внешним магнитным полем включали в себя эксперименты с электромагнитами, а также эксперименты с разработанными электро аналогами постоянных магнитов (ПМЕА), позволяющих моделировать конфигурацию магнитного поля постоянного магнита при помощи электромагнитов и магнетомягких сердечников.

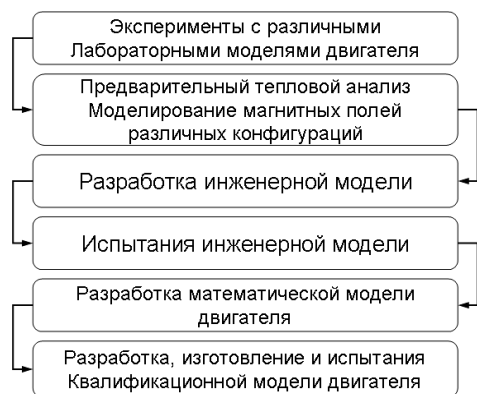


Рис. 1. Структура работ по созданию безэлектродного ЭРД

В конечном варианте разработанный двигатель будет комплектоваться только постоянными магнитами определенных размеров и с заданной величиной магнитной индукции.

Отдельной особенностью разработки безэлектродных ЭРД является обеспечения эффективного вклада ВЧ мощности в плазму, поскольку только часть мощности забирается плазмой, остальная идет на нагрев антенны, выделяется на металлических элементах конструкции двигателя вследствие возбуждения в них паразитных ВЧ токов. Также эффективность вкладки ВЧ мощности в плазму в сильной степени зависит от согласования нагрузки и генератора. В данном случае согласование является сложной задачей, поскольку параметры нагрузки сильно различны до поджига разряда и после появления плазмы. К тому же импеданс плазмы зависит от многих факторов и может изменяться в процессе работы двигателя, что приводит к рассогласованию и появлению отраженной доли мощности.

Для геликонной области ВЧ разряда низкого давления характерна немонотонная зависимость сопротивления плазмы (следовательно, доли мощности, вкладываемой в плазму) от величины внешнего магнитного поля ($R_{pl}(B)$). Положение и количество локальных максимумов кривой $R_{pl}(B)$ зависят от вложенной ВЧ мощности, длины и радиуса источника плазмы, рода газа и его давления, осо-

бенностей вклада ВЧ мощности (доля индуктивной и емкостной составляющих) [4, 6]. Именно поэтому разработка оптимальной конфигурации магнитного поля является трудоемкой задачей, требующей отдельного решения для каждого шага при изменении конструкции разрабатываемого двигателя на пути к финальной версии.

На основании полученных данных, а также результатов моделирования магнитных полей в программном пакете ANSYS оптимальной конфигурацией магнитного поля представляется конфигурация магнитной ловушки с разно знаковыми пиками магнитного поля на входе и выходе из РК и резкой дивергенцией магнитного поля в области антенны. Величина и крутизна пиков определяется конфигурацией модели, эффективностью и механизмами вклада ВЧ мощности в плазму.

В ходе экспериментов с лабораторными моделями было получено, что приложение внешнего магнитного поля оптимальной конфигурации может привести к десятикратному возрастанию плотности плазмы в РК по сравнению с разрядом без внешнего магнитного поля.

На основе полученных данных было спроектировано и изготовлено две ИМ безэлектродного ЭРД, отличающиеся массовыми характеристиками и условиями сборки (рис. 2). Тип применяемой антенны – спиральная 6-ти витковая. Масса 2-й модели с 3-мя постоянными магнитами – 420 г; длина РК – 55 мм; диаметр РК – 18 мм.



Рис. 2. Фотографии инженерных моделей: 01 без корпуса слева; 02 с корпусом и постоянными магнитами справа

Линия подвода ВЧ мощности состояла из ВЧ генератора, усилителя и согласователя, размещенных снаружи вакуумной камеры. Через ВЧ герметичные разъемы и 50 Ом коаксиальный кабель питание подавалось на ИМ.

Испытания инженерных моделей (рис. 3) проходили следующим образом. Сначала были проведены измерения температуры инженерной модели при помощи 3-х термопар без использования ПМЕА, чтобы исключить влияние на тепловое состояние модели отдельного источника тепла. Затем параметры выходной струи измерялись при помощи

RPA при наличии внешнего магнитного поля, созданного ПМЕА. Конечным этапом было измерение тяги модели.

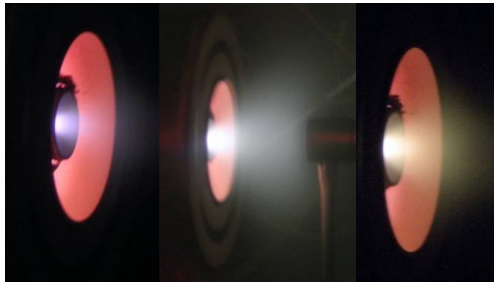


Рис. 3. Фотографии работающей ИМ при различных режимах

Результаты измерений температуры ИМ представлены на рис. 4.

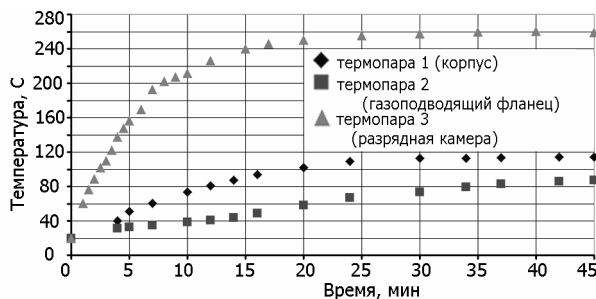


Рис. 4. Температуры элементов ИМ в зависимости от времени

Исходя из полученных данных, а также результатов моделирования теплового состояния модели методом конечных элементов прогнозируемые температуры элементов двигателя при уровне мощности до 80 Вт являются следующими: разрядная камера – до 300 С; корпус – 120-160 С; газоподводящий фланец – 80-100 С; время выхода на стационарный тепловой режим – 45-50 мин.

Критическим аспектом является температура корпуса модели двигателя, на котором размещаются постоянные магниты, рабочие свойства и скорость деградации которых сильно зависят от температуры.

Измерения ВАХ RPA проводились с целью нахождения оптимальной конфигурации магнитного поля, исходя из значений ионного тока и энергии ионов при варьировании числа и силы магнитов. ВАХ, полученная при испытании ИМ с магнитным полем, близким к локальному оптимуму, представлена на рис. 5. Рассчитанная средняя скорость ионов составляет около 18000 м/с.

Стоит отметить сильную зависимость параметров струи ИМ от давления в вакуумной камере (ВК). Для подтверждения данной зависимости был проведен эксперимент в ходе которого при постоянном массовом расходе через ИМ изменялось давления в

ВК путем ввода аргона через отдельный газовый тракт.



Рис. 5. ВАХ RPA при испытаниях ИМ с ПМЕА

Результаты эксперимента представлены на рис. 6. Получено, что величина ионного тока, средняя энергия ионов, а также степень влияния магнитного поля на разряд сильно зависят от давления в ВК. При давлении в ВК выше $4 \cdot 10^{-5}$ торр происходит резкое снижение параметров выходной струи ИМ. Теоретическое обоснование полученных результатов требует более детального изучения представленных зависимостей и рассмотрения влияния разности концентрацией частиц в РК и за её пределами на параметры двойного электрического слоя.

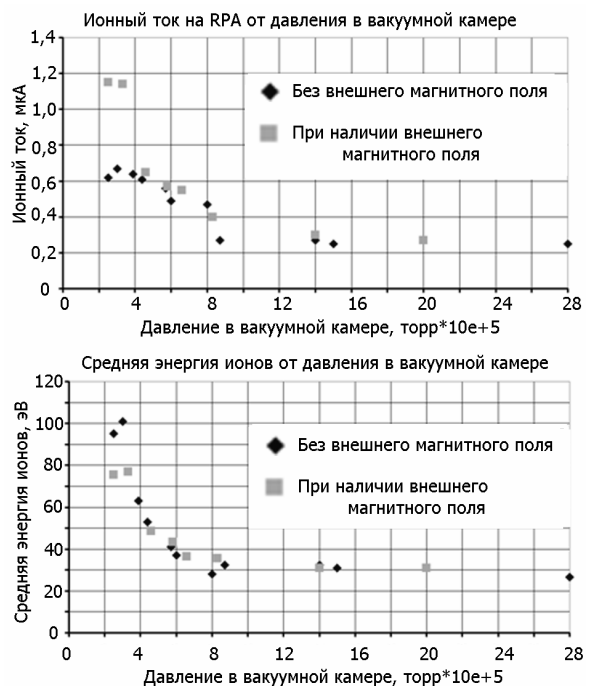


Рис. 6. Зависимости параметров струи от давления в ВК

Сначала измерение тяги ИМ планировалось провести путем установки двигателя на маятниковый тягомер, предназначенный для измерения малых тяг ЭРД. Однако в ходе тарировки тягомера было установлено, что электромагнитные силы, об-

разующиеся при пропускании ВЧ тока через подводный кабель, оказывают сильное влияние на показания тягомера, и таким методом измерение тяги двигателя провести невозможно.

Было принято решение измерить тягу обратным методом (рис. 7). ИМ была неподвижно закреплена на кронштейне. На тягомер была установлена и уравновешена молибденовая пластина на расстоянии 5,5 см от сопла ИМ. Стоит отметить, что на момент проведения измерений оптимальное магнитное поле для ИМ еще не было определено.

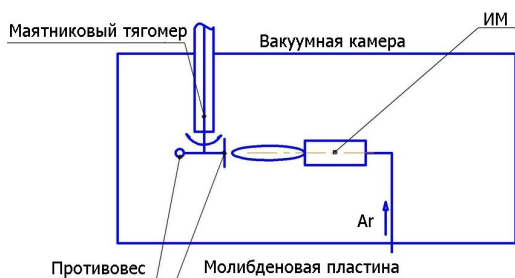


Рис. 7. Схема измерения тяги ИМ

В ходе эксперимента была получена тяга от 0,1 до 1 мН при массовых расходах от 0,1 до 1,4 мг/с при потребляемой мощности 50..60 Вт.

Анализ полученных результатов

Ниже представлены рассчитанные показатели эффективности ИМ, удельного импульса и степени ионизации РТ для массового расхода 0,1 мг/с, который является оптимальным для работы ИМ.

Тяговая эффективность ИМ оценивалась следующим образом:

$$\eta = \frac{F^2}{2 \cdot m \cdot P_{ВЧ}}, \quad (1)$$

где F – измеренная тяга; m – массовый расход; P – потребляемая ВЧ мощность.

Полученное значение тяговой эффективности ИМ составило 1..2%.

Удельный импульс ИМ оценивался по следующей формуле:

$$I_s = \frac{F}{m}. \quad (2)$$

Рассчитанный удельный импульс ИМ составил 100..200 с, что свидетельствует о степени ионизации РТ 5..12%.

Причины столь низкой эффективности кроются в следующих аспектах:

1) значительные потери мощности в ВЧ линии из-за многочисленных разъемов и длины кабеля более 0,1 от длины волны, что приводит к дополни-

тельному рассогласованию. Решение данной проблемы заключается в размещении блока питания ИМ (генератора, усилителя и блока согласования) в ВК, а также в настройке антенны на резонанс с рабочей частотой, что снимет проблему рассогласования после поджига разряда;

2) на момент измерений не было определено оптимальное магнитное поле для конструкции ИМ, как это было достигнуто ранее с лабораторными моделями двигателя, что существенно снизило эффективность;

3) обратный метод измерения тяги не был тарирован с учетом угла раскрытия факела ИМ и расстояния между ИМ и пластиной, на которую передается усилие, что внесло дополнительную погрешность и могло привести к занижению зафиксированной тяги.

При учете, что настройка оптимального магнитного поля приведет к приросту плотности плазмы в 10 раз, можно сделать следующий прогноз (3):

$$F = m_i \cdot V_i + m_0 \cdot V_0, \quad V_i \gg V_0; \\ F \approx m_i \cdot V_i \Rightarrow \frac{m_{i\text{opt}}}{m_{i0}} \frac{F_{\text{opt}}}{F_0} = 10, \quad (3)$$

где m_i , m_0 , V_i , V_0 – массовый расход и скорости ионной и нейтральной компонент.

Тогда ожидаемые параметры ИМ будут следующими:

- тяга – около 1..1,2 мН;
- удельный импульс – 1000..1200 с;
- тяговая эффективность – 10..15%.

Оптимизация ВЧ линии позволит дополнительно повысить эффективность.

Выводы

Полученная при испытаниях эффективность ИМ составила 1..2%. Определены причины низкой эффективности испытанной модели двигателя и пути её повышения. Показано, что при данном уровне мощности эффективность двигателя возможно повысить до значений 10..20%, а дальнейшие работы по данной тематике имеют широкий спектр исследования и обладают большим потенциалом. Увеличение уровня рабочей мощности также приведет к увеличению эффективности двигателя в целом. Проведены предварительные исследования зависимости параметров струи ИМ от давления в ВК.

Дальнейшая работа будет направлена на создание математической модели линии подачи ВЧ мощности и математической модели «ВЧ разряд – двигатель» для оптимизации разработанной системы; определение оптимального магнитного поля, проведение экспериментов в режиме параллельного резо-

нанса контура антенны с рабочей частотой генератора, тарировку обратного метода измерения тяги для испытаний безэлектродных ЭРД.

Работа выполнена в рамках программы «7-th framework programme theme SPA.2007.2.2.02» по проекту «Helicon Plasma Hydrazine. Combined Micro Propulsion». Grant agreement no.: 218862». Авторы благодарят за оказанную поддержку Морозова К. В., Титова М. Ю., Солонинко Е. П. и Максименко Т. А.

Литература

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

2. Toki K. Preliminary investigation of helicon plasma source for electric propulsion applications / K. Toki, S. Shinohara, T. Tanikawa // 28th International

Electric Propulsion Conference. – USA, 2003. – IEPC-03-0168.

3. Batishchev O. Experimental Study of the Mini-Helicon Thruster / O. Batishchev // Massachusetts Institute of Technology. – USA, 2008.

4. Кралькина Е.А. Индукционный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе / Е.А. Кралькина // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 5. – С. 27-31.

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

6. Александров А.Ф. Самосогласованная модель ВЧ индуктивного источника плазмы, помещенного во внешнее магнитное поле / А.Ф. Александров // Физика плазмы. – 2004. – Т. 30, № 5. – С. 434-449.

Поступила в редакцию 30.05.2011

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

ВИПРОБУВАННЯ ІНЖЕНЕРНОЇ МОДЕЛІ БЕЗЕЛЕКТРОДНОГО ЕЛЕКТРОРУШІЙНОГО ДВИГУНА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ З ВИСОКОЧАСТОТНОЮ ІОНІЗАЦІЄЮ РОБОЧОГО ТІЛА

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

В статті викладені основні особливості розробки безелектродних електрорушійних двигунів, представлені результати іспитів інженерної моделі двигуна, а саме результати вимірювань теплового стану моделі, параметрів струменю й тяги. Показано, що параметри струменя (іонний струм й середня енергія іонів) залежать від тиску у вакуумній камері, а ефективність роботи двигуна визначається величиною втрат ВЧ потужності і конфігурацією зовнішнього магнітного поля. Надається аналіз отриманих результатів, висновки й подальші плани роботи з окресленої тематиці.

Ключові слова: безелектродний ЕРД, інженерна модель, геліконний розряд, подвійний електричний шар, магнітне сопло.

TESTING OF LOWER POWER ELECTRODELESS PLASMA THRUSTER WITH RADIO FREQUENCY IONIZATION OF WORKING MEDIUM

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

Features of electrodeless plasma thrusters development and results of engineering model testing are presented in article. Results of temperature measuring, plume parameters measuring and thrust measuring are described. Indicated that plume parameters are depended from pressure level in vacuum chamber, efficiency of thruster is depended from RF losses level and configuration of outer magnetic field. The analysis of obtain results, conclusions and future plans of further work are presented.

Key words: electrodeless plasma thruster, engineering model, helicon discharge, double electric layer, magnetic nozzle.

Цаглов Александр Игоревич – инженер 3-й категории каф. 402 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. научный сотрудник каф. 402, начальник отдела ЭРДУ Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Кошелев Николай Николаевич – ст. научный сотрудник каф. 402 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Рыбалов Олег Петрович – мл. научный сотрудник каф. 402 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.