

УДК 533.9

А.И. ЦАГЛОВ

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУИ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ЭРД  
С ВЧ ИОНИЗАЦИЕЙ РТ

Предметом исследования является безэлектродное ускорение плазмы ВЧ разряда во внешнем магнитном поле определенной конфигурации модели перспективного безэлектродного ЭРД. На основании результатов испытаний инженерной модели двигателя рассчитаны и оценены основные параметры плазмы в РК двигателя, необходимые в качестве исходных данных для моделирования процессов истечения плазмы при помощи магнитогидродинамического метода и на основе кода ХООРИС. В работе приводятся результаты моделирования, сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных, обсуждаются параметры (величина перепада потенциала и длина зоны ускорения) двойного электрического слоя. На основании полученных данных сделан вывод о применимости разработанной модели для дальнейшей разработки двигателя и об эффективности примененной конфигурации магнитного поля.

**Ключевые слова:** безэлектродный ЭРД, ВЧ ионизация, 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.

Рассматриваемый тип двигателя основан на индукционном ВЧ разряде низкого давления, помещенного во внешнее магнитное поле. ВЧ поле различных частотных диапазонов используется для ионизации рабочего тела и получения высокоэнергетических ионов. Внешнее магнитное поле создается для обеспечения радиального удержания плазмы, улучшения поглощения ВЧ мощности плазмой и создания магнитного сопла на выходе из 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.

Целью данной работы является исследование истечения плазмы в безэлектродном ЭРД с ВЧ ионизацией РТ на основании экспериментальных данных тестирования инженерной модели (ИМ) разрабатываемого двигателя сравнительно с результатами моделирования истечения плазмы при помощи магнитогидродинамического метода на основе открытого кода ХООРИС для оценки адекватности разра-

ботанной модели и примененной конфигурации внешнего магнитного поля.

Работа выполнена в рамках программы «7-th framework program theme SPA.2007.2.2.02» по проекту «Helicon Plasma Hydrazine. Combined Micro Propulsion». Grant agreement no.: 218862». Изложенные в статье материалы опираются на цикл экспериментальных работ, проведенных в отделении ЭРД МНТЦ КЭД ХАИ в ходе работы над проектом.

В данной статье использованы данные, полученные при испытаниях ИМ двигателя в отделении ЭРД ХАИ и данные, полученные в ходе испытаний и моделирования двигателя в аэрокосмической лаборатории ONERA, Франция.

Перепад потенциала в ДЭС, определяющий энергию выходной струи ионов, может быть рассчитан по следующей формуле, которая является обобщением уравнения Больцмана [3]:

$$\Delta U = \frac{k}{e} T_e \ln \frac{n_{e1}}{n_{e2}}, \quad (1)$$

где  $T_e$  – температура электронов;  $n_e$  – концентрация электронов.

Исходя из литературных данных [4], ширина слоя составляет от десятков до сотен дебаевских длин.

Наложение внешнего магнитного поля влияет на топографию ДЭС и приводит к увеличению ширины зоны ускорения за счет фокусировки струи и снижения дивергенции концентраций вдоль продольной оси. Также конфигурации магнитного поля,

формирующие магнитные ловушки, способствуют повышению энергии электронов, что в свою очередь прямо пропорционально влияет на величину перепада в ДЭС.

Исходя из формулы (1), разница давлений в РК двигателя и в вакуумной камере (ВК) также влияет на величину перепада в ДЭС [2.4]. Сильные зависимости энергии ионов от давления в ВК были получены в экспериментах при отсутствии магнитного поля либо при слабом магнитном поле (менее 15 мТл). Эксперименты с сильным магнитным полем (40 и 110 мТл) показали отсутствие изменений энергии ионов при варьировании давления в ВК через отдельный газовый тракт.

Таким образом, ширина ДЭС и величина перепада потенциала зависят от разницы давлений в РК и за её пределами, массового расхода и геометрии РК; и от конфигурации магнитного поля.

### Экспериментальная часть

Разрядная камера ИМ двигателя является трубкой из кварцевого стекла с керамическим инжектором и выходной диафрагмой. Фотографии ИМ двигателя представлены на рис. 1. В качестве антенны была применена 6-ти витковая медная спираль.

Для создания магнитного поля использовались постоянные магниты (магнитоласт), а также разработанный в лаборатории ЭРД электроаналог постоянного магнита, позволяющий формировать конфигурации магнитного поля постоянного магнита при возможности варьирования величины магнитного поля в ходе эксперимента.

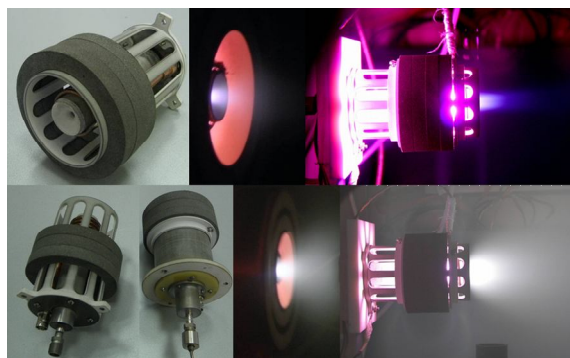


Рис. 1. Фотографии ИМ двигателя

Основные параметры экспериментальных и расчетных данных являются следующими:

- ВЧ мощность – 50 Вт;
- Рабочая частота – 13.56 МГц;
- Рабочий газ – аргон;
- Длина РК – 55 мм;
- Диаметр РК – 18мм;
- Диаметр отверстия диафрагмы – 4 мм.

Конфигурация магнитного поля ИМ двигателя имеющая двухпиковое распределение величины магнитного поля вдоль РК с областью с нулевым полем возле выходной диафрагмы, представлена на рис. 2.

Согласно проведенным автором исследования, именно такая конфигурация магнитного поля обеспечивает максимальную энергию ионов за счет создания магнитной ловушки, которая обеспечивает высокую температуру электронов, определяемую величиной максимумов магнитного поля, сравнительно с конфигурациями магнитных полей без областей с нулевым полем в РК.



Рис. 2. Конфигурация магнитного поля

Проведенные исследования показали, что наличие резко изменяющегося в пространстве магнитного поля в области антенны приводит к росту эффективности ионизации РТ. В представленной конфигурации магнитного поля передача энергии плазме происходит как путем резонансного возбуждения геликонных волн, так и вследствие локального электронно-циклотронного резонанса в областях с величинами магнитного поля менее 1 мТл.

На этапе моделирования в качестве задаваемых параметров и критериев сравнения правильности модели были взяты за основу экспериментальные данные, представленные в табл. 1, полученные в ходе экспериментов с лабораторными моделями и с ИМ двигателя при массовом расходе 0,1 мг/с.

Исходя из данных, представленных в табл. 1, можно сделать следующие выводы:

1. Электроны являются замагниченными в РК двигателя, в то время как гирорадиусы ионов на выходе из РК сравнимы, а за пределами превышают геометрические размеры РК. То есть магнитное поле за пределами РК влияет только на топографию амбиполярного поля за счет формирования траекторий движения электронов. На движение ионов магнитное поле за пределами РК практически не влияет. В свою очередь траектории ионов определяются топографией амбиполярного электрического поля.

2. При расходе 0,1 и 0,2 мг/с максимально возможный ток через выходную диафрагму составляет

240 и 480 мА соответственно. Тогда расчетная степень ионизации равна около 4 % и 2 % соответственно. Стоит отметить, что указанные значения степени ионизации включают в себя критерий, показывающий эффективность истечения образованной плазмы с РК двигателя.

Таблица 1

Параметры РК ИМ

№	Параметр	Эксп-ные данные / формула	Рассчитанные значения
1	Давление в РК	4·9·10 <sup>-3</sup> торр	
2	Температура РТ	350°С	
3	Концентрация нейтралей в РК	$n = \frac{P}{kT}$	$1-1,5 \cdot 10^{20} \frac{1}{i^3}$
4	Тепловая скорость атомов	$V = \sqrt{\frac{3kT}{m_a}}$	620 м/с
5	Температура электронов	75% - 3-5 эВ 25% - 15-25 эВ	Среднее – 8 эВ
6	Ионный ток через д-му Макс. ионный ток	$N_{i100\%} = \frac{\dot{m}}{m_i}$ ; $I_{i100\%} = N_i \cdot e$	10 мА 240 мА
7	Ср. энергия ионов струи	130 эВ	
8	Средняя скорость ионов струи	$V = \sqrt{\frac{2e \cdot U}{m_i}}$	24900 м/с
9	Скорость звука (Бомовская скорость)	$V = \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}}$	4400 м/с
10	Гирорадиусы	$r_x = \frac{m_x \cdot V_x}{B \cdot e}$	Ион: 0,6..4,5 см Эл-н: 0,4 мм
11	Перепад потенциала в ДЭС	$\Delta U = \frac{k}{e} T_e \ln \frac{n_{e1}}{n_{e2}}$	55 В
12	Длина свободного пробега электрона	$\lambda_x = \frac{V_x}{n_x \cdot V_{xx} \sigma_x}$	~0,06 м
13	Дебаевский радиус	$r_D = 743 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}}$	≥ 2·10 <sup>-5</sup> м

Полученные при испытаниях ИМ экспериментальные данные представлены на рис. 3 – 5.

На рис. 3 представлено радиальное распределение энергии ионов. Расстояние от зонда до РК двигателя составляло 250 мм. Массовый расход 0,24 мг/с. На рис. 4 представлены распределения ионного тока в зависимости от углового положения зонда для двух массовых расходов.

Исходя из рис. 3, 4 угол раскрытия струи ИМ составляет около 50° при расходе 0,18 мг/с, и при увеличении расхода резко возрастает.

При расходах свыше 0,2 мг/с имеется центральная область с энергией ионов порядка 110 эВ и

боковые области со средней энергией порядка 140 эВ.

Зависимость потенциала плазмы от расстояния между выходной диафрагмой ИМ и зондом и представлены на рис. 5.

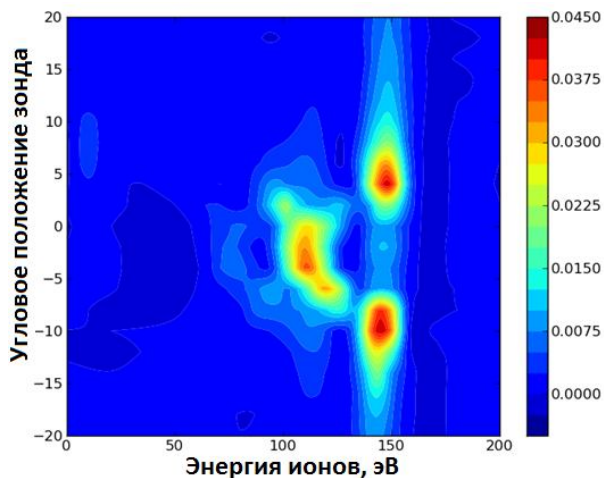


Рис. 3. Радиальное распределение энергии ионов

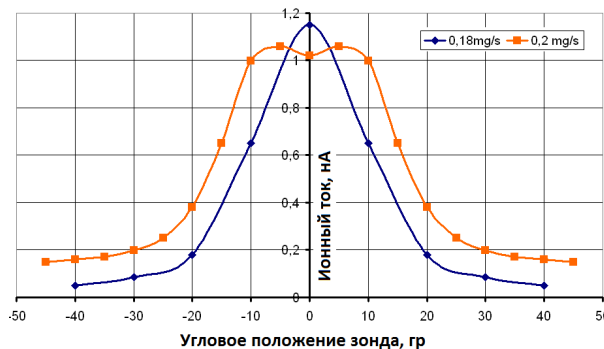


Рис. 4. Радиальное распределение ионного тока

Потенциал плазмы измерялся при помощи эмиссионного зонда. Измерить потенциал плазмы на расстоянии ближе, чем 40 мм не удалось из-за сильного влияния зонда на разряд. При приближении зонда к РК ИМ двигателя наблюдались срывы разряда [5].

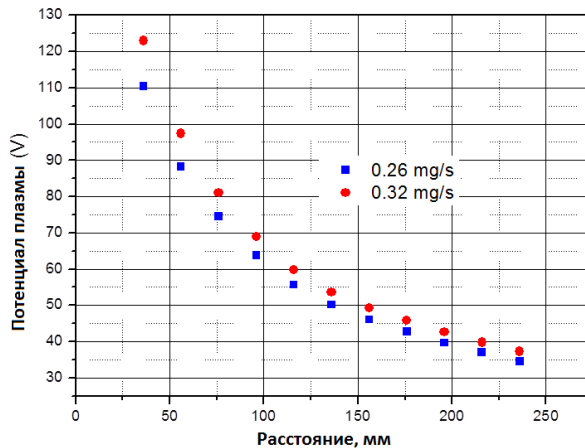


Рис. 5. Распределение потенциала плазмы

Как видно из рис. 5, перепад потенциала составляет более 100 В, что значительно более рассчитанной исходя из уравнения Больцмана величины, однако соответствует измеренному уровню энергий ионов. Схожие результаты (различие экспериментальных и расчетных данных при давлениях ниже 10 мторр) были приведены в статье [6].

Измеренная длина зоны ускорения составила около 280 мм, что составляет несколько сотен длин Дебая.

### Моделирование

Использованный метод моделирования - магнитогидродинамический на основе кода ХООРПС, написанного по методу «частица в ячейке» и рассчитываемого методом конечных элементов.

За исходные данные для моделирования были приняты:

- геометрия РК;
- степень ионизации – 4%;
- температура электронов – 8 эВ;
- конфигурация магнитного поля.

При разработке модели были приняты следующие допущения:

- осевая симметрия;
- дебаевский радиус значительно меньше характерных размеров расчетной области;
- все электроны имеют единую температуру;
- ионизация газа происходит равномерно по всей разрядной камере;
- ионы и электроны имеют одинаковую радиальную скорость;
- потери плазмы осуществляются за счет рекомбинации на стенках РК и путем выхода за пределы расчетной области;
- ионы покидают РК со звуковой (Бомовской) скоростью.

Результаты моделирования представлены на рис. 6, 7, 8. На рис. 6 представлено распределение плотности ионов в струе ИМ двигателя.

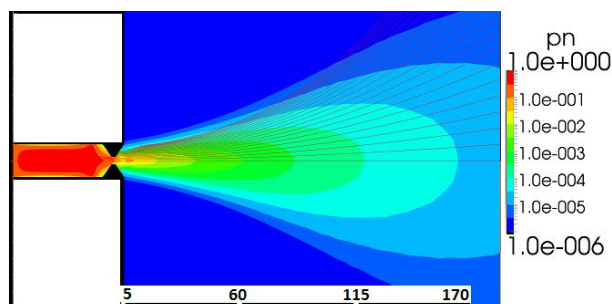


Рис. 6. Распределение плотности ионов

На рис. 6 распределение плотности отображено в относительных единицах. Плотность ионов в РК,

равная единице, составляет  $6 \cdot 10^{18}$ , что эквивалентно 4 % степени ионизации.

На рис. 7 представлено распределение скорости ионов в струе ИМ двигателя в числах Маха.

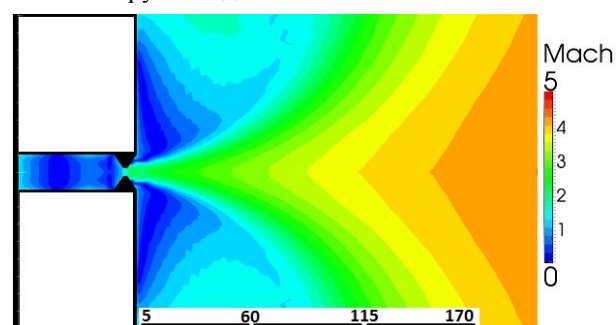


Рис. 7. Распределение скорости ионов

На рис. 8 представлено распределение потенциала в струе ИМ двигателя. Значения потенциала плазмы указаны в относительных единицах, показывающих степень падения потенциала в струе модели.

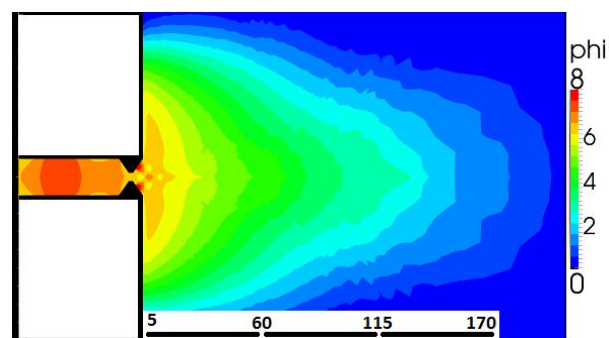


Рис. 8. Изменение потенциала плазмы

### Обсуждение и выводы

Математическая модель показала хорошее соответствие (различие менее 10 %) между измененными и рассчитанными распределениями плотности ионного тока. Физической нестыковкой является наличие двух максимумов ионного тока при расходах более 0,2 мг/с, в то время как при моделировании распределение ионов при данной конфигурации магнитного поля при различных расходах имеет однопиковую топографию. Данный вопрос требует дополнительного исследования.

Полученная на расстоянии 250 мм средняя скорость ионов составляет порядка 5,6 скорости звука, что немногим больше скорости полученной при моделировании (около 5М). Длина зоны ускорения составила порядка 200–250 мм в обоих случаях.

Разработанная модель показала свою адекватность при расчете параметров разряда двигателя и после доработки (устранения нестыковки по скоростям и перепаду потенциала) может применяться в ходе дальнейшей работы над двигателем.

При проектировании прототипа двигателя было принято решение увеличить величину внешнего магнитного поля до величины близкой к нижнегибридному резонансу (около 110 мТл при 11,5 МГц), тем самым снизить плазменные потери на стенки РК, улучшить поглощение ВЧ мощности плазмой и обеспечить более эффективное истечение плазмы.

Конфигурацию магнитного поля было решено оставить прежней, поскольку представленная конфигурация обеспечивала высокую температуру электронов, а, следовательно, значительный перепад потенциала в ДЭС и высокую (более 5М) скорость ионов.

Автор выражает благодарность своим коллегам – участникам программы FP-7 НРН.Com – сотрудникам лаборатории ЭРД ХАИ, ONERA (Франция) и CISAS (Италия).

### 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] / А.И. Цаглов, А.В. Лоян, Н.Н. Кошелев, О.П. Рыбалов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7(84). – С. 115-119.

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

4. Wiebold, Matt. Experimental observation of ion beams in the Madison Helicon Experiment [Text] / Matt Wiebold, Yung-Ta Sung, John E. Scharer // *Physics of plasmas*. – 2011. – V. 18. – 063501.

5. Pavarin, D. 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. Curreli, D. Melazzi, D. Packan, P. Elias, J. Bonnet, A. Cardinali, O. Tuddisco, Y. Protsan, A. Loyan, A. Tsaglov, A. Selmo, K. Katsanis, Ch. Berenguer, M. Pessana, V. Lancelotti // *Space Propulsion Conference, France*. – 2012 – P. 231 – 241.

6. Takahashi, Kazunori Double Layer Formation in a Low-Pressure Argon Plasma [Text] / Kazunori Takahashi, Kaoru O Guni, Hiroshi Yamada, Tamiya Fujiwara // *J. Plasma Fusion Res. SERIES*. – 2009. – V. 8. – P. 1269-1272.

Поступила в редакцию 30.06.2012

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

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУЇ БЕЗЕЛЕКТРОДНОГО ЕРД З ВЧ ІОНІЗАЦІЄЮ РТ

**О.І. Цаглов**

Предметом дослідження є безелектродне прискорення плазми ВЧ розряду у зовнішньому магнітному полі визначеної конфігурації моделі перспективного безелектродного ЕРД. На основі отриманих результатів іспитів інженерної моделі двигуна розраховані й оцінені основні параметри плазми в РК двигуна, необхідні в якості початкових даних для моделювання процесів прискорення плазми за допомогою магнітогідродинамічного методу на основі коду ХООПІС. В роботі наводяться результати моделювання, порівняльний аналіз експериментальних та розрахункових даних, обмірковуються параметри (величина перепаду потенціалу й довжина зони прискорення) подвійного електричного шару. На основі отриманих даних зроблено висновок о степені придатності моделі для подальшої розробки двигуна й об ефективності застосованої конфігурації магнітного поля.

**Ключові слова:** безелектродний ЕРД, ВЧ іонізація, геліконний розряд, подвійний електричний шар.

### PLUME PARAMETERS INVESTIGATION OF ELECTRODELESS ELECTRIC PROULSION THRUSTER WITH RF IONSZATION OF WORKING MEDIUM

**A.I. Tsaglov**

The subject of investigation is electrodeless RF discharge plasma acceleration in outer longitudinal special configuration magnetic field of perspective electrodeless electric propulsion thruster model. On the ground of engineering model testing results main plasma parameters in thruster discharge chamber were calculated. These parameters are source data for plasma acceleration modeling by magneto hydrodynamic method based on code XOOPIС. Results of modeling, comparative analysis of experimental and calculated data, discussion of double electric layer parameters (potential drop value and length of acceleration zone) are given in this article. On the ground of obtained data conclusion about model applicability for further thruster development and about efficiency of applied magnetic field was done.

**Key words:** electrodeless electric propulsion thruster, RF ionization, helicon discharge, double electric layer.

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