

УДК 621.455.4

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТОДА-НЕЙТРАЛИЗАТОРА С ГЕЛИКОННЫМ РАЗРЯДОМ

© 2019 г. В. В. Кожевников^{1, *}, П. Е. Смирнов¹, С. А. Хартов¹¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

*e-mail: k208@mai.ru

Поступила в редакцию 13.05.2019 г.

После доработки 20.05.2019 г.

Принята к публикации 24.05.2019 г.

Полые катоды уже много лет демонстрируют эффективную и качественную работу в качестве источников электронов для различных типов электроракетных двигателей в составе двигательных установок космических аппаратов. Однако, они же являются одним из элементов двигательной установки, ограничивающим ее ресурс, а кроме того обладают рядом проблем, связанных с потерей их эффективности при взаимодействии с химически активными газами, присутствующими в рабочем теле и окружающей аппарат остаточной атмосфере. В настоящее время было предпринято несколько разработок, нацеленных на избавление от этих ограничений, таких как переход к “безкатодным” двигательным установкам, а также создание катодов с разрядом безэлектродной схемы.

В предыдущих работах авторы представили конструкцию такого катода-нейтрализатора, основанного на индуктивном высокочастотном разряде, провели изучение его вольт-амперных характеристик и эффективности. В настоящем исследовании предприняты попытки миниатюризации данного устройства, а также повышения его эффективности за счет перехода к геликонному разряду.

Ключевые слова: источник электронов, высокочастотный индуктивный разряд, катод ионного двигателя, катод-нейтрализатор, геликонный разряд

DOI: 10.1134/S0002331019030142

Во множестве миссий космических аппаратов (КА) в настоящее время применяются, или планируются к применению электроракетные двигатели, использующие электростатический способ ускорения заряженных частиц. К таким устройствам относятся ионные двигатели (ИД), двигатели, работа которых основана на замкнутом дрейфе электронов (стационарные плазменные двигатели (СПД), двигатели с анодным слоем (ДАС)). Они обладают высоким удельным импульсом, а также значительным, в сравнении с другими двигателями, ресурсом работы, что позволяет применять их в миссиях дальних космических перелетов, для коррекции орбиты космических аппаратов, а кроме того прорабатываются идеи создания двигательных установок (ДУ) способных использовать в качестве рабочего тела окружающую атмосферу при полетах на низких орбитах [1–4].

Источники электронов являются неотъемлемой частью ДУ с электростатическим способом ускорения рабочего тела. Они необходимы для процессов ионизации в разряде двигателя и нейтрализации ионного пучка. Наиболее часто используемым источником электронов являются полые катоды благодаря высокой плотности генерируемого тока и низкому потреблению рабочего тела и электрической мощности [2]. Ре-

курс полых катодов ограничен деградацией и испарением термоэмиссионной вставки, выполненной из материалов с низкой работой выхода электрона. Вставка-эмиттер должен избегать контакта с активными газами, что вызывает повышенные требования к обращению с ним. Кроме того, большие затраты энергии идут на значительный нагрев катода внешним нагревателем перед началом его работы [4].

Чтобы избавиться от данных недостатков полых катодов, в настоящее время идут активные разработки ДУ и катодов, основанных на безэлектродном разряде. Так, например, в двигателе “ $\mu 10$ ” (в составе маршевой ДУ на КА *Hayabusa*) для нейтрализации струи ионов вместо классического полого катода использован нейтрализатор на базе сверхвысокочастотного разряда. Кроме того, ионный двигатель, не использующий в своей работе катод, разрабатывается компанией *ThrustMe* по проекту “*Neptune*”. Однако такие устройства обладают относительно низкой эффективностью [5, 6].

В настоящем исследовании была предложена схема безэлектродного высокочастотного катода с индуктивным разрядом (ВЧК/ИР). Конструкция такого устройства очень проста и не требует электрода-кипера, нагревателя, а, следовательно, и источников постоянного тока в своей работе. Кроме того, ожидается получить высокий ресурс таких устройств благодаря использованию более устойчивых к химическим воздействиям материалов. Конструкция катода такова, что его элементы мало подвержены воздействию высокоэнергетических потоков частиц. Запуск такого катода прост и не требует предварительного термического нагрева.

В предыдущем исследовании была продемонстрирована устойчивая работа ВЧК/ИР и выявлено влияние на его характеристики некоторых конструктивных параметров, а также приведено сравнение разработанного устройства с устройствами, представленными в работах других исследовательских коллективов [7].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Основываясь на результатах предыдущих исследований, было решено рассмотреть возможность работы катода более миниатюрной конструкции, перейдя от газоразрядной камеры диаметром 4 см к камере диаметром 2 см, а также изучить влияние типа разряда на извлекаемый электронный ток, перейдя от обычного индуктивного к геликонному разряду.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТРОЙСТВА

Схема высокочастотного катода представлена на рис. 1. В качестве газоразрядной камеры (ГРК) используется трубка из кварцевого стекла, закрытая с одной стороны газораспределителем, а с другой стороны сопловой пластиной, выполненными из керамики Масог. Конструктивные параметры этих элементов позволяют поддерживать необходимое давление рабочего тела в разряде, а также осуществлять эмиссию электронов. Десяти-витковый медный индуктор, навитый на ГРК, при подаче на него ВЧ тока индуцирует в полости камеры переменное магнитное поле высокой частоты. Магнитное поле генерирует вихревое электрическое поле, ускоряющее электроны, которые при соударении с атомами рабочего тела ионизируют их. Для запуска катода нужны первичные электроны. Внутри камеры вдоль ее стенок расположен коллектор ионов из нержавеющей стали, необходимый для поддержания квазинейтральности плазмы. Коллектор имеет разрез, параллельный оси катода, что позволяет снизить потери ВЧ мощности на наведение в нем вихревых токов. Под действием потенциала ионного пучка за срезом сопла катода электроны покидают газоразрядную камеру. Ионы с эквивалентным разрядом выпадают на поверхность коллектора, где нейтрализуются, а также, вылетая за пределы ГРК, совместно с ионным пучком двигателя создают зону повышенной проводимости (т.н. “плазменный мост”). На внешней части

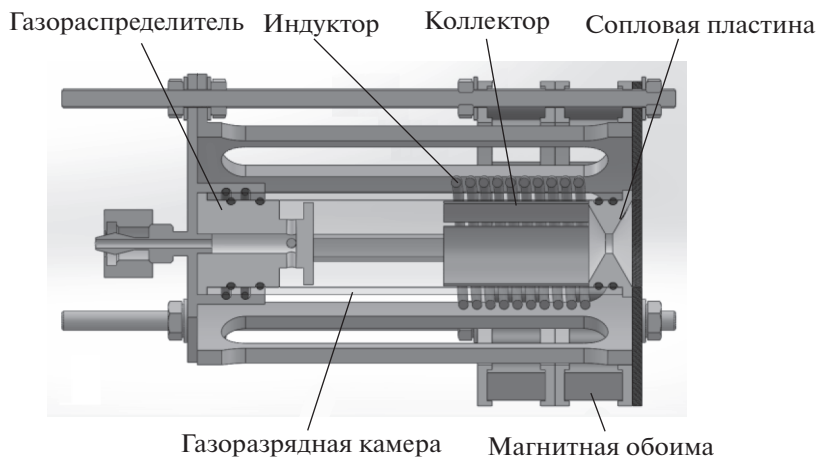


Рис. 1. Конструктивная схема катода.

катода предусмотрены установочные места для облойки с постоянными магнитами, позволяющими перейти от обычного индуктивного разряда к геликонному.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились на экспериментальном стенде института плазменной технологии и основ электротехники (ЕИТ1.1) университета вооруженных сил Мюнхена (рис. 2). Стенд включает в себя вакуумную камеру объемом 0.15 м^3 , трехступенчатая

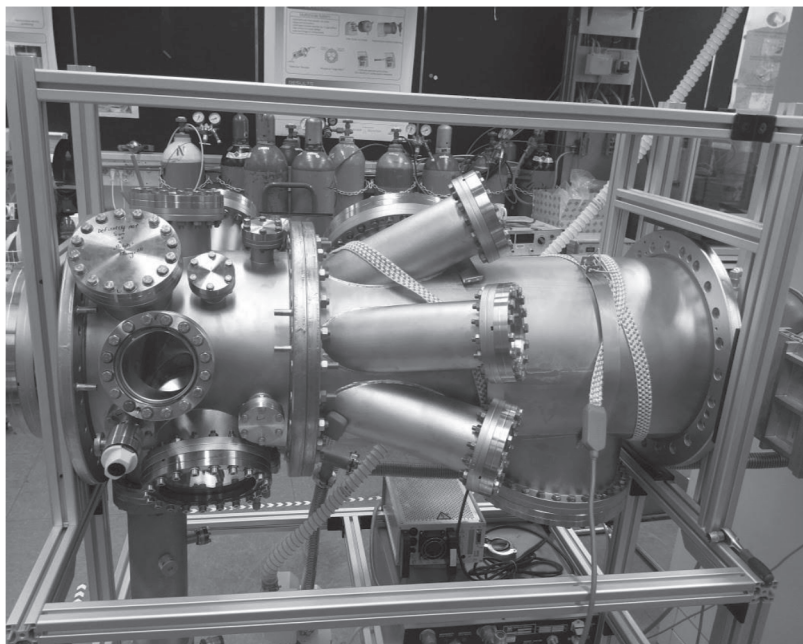


Рис. 2. Экспериментальный стенд института ЕИТ 1.1.

откачная система которого имеет суммарную производительность 6500 л/с, что обеспечивает динамический вакуум на уровне 10^{-6} мбар при объемном расходе рабочего тела 3 ст.см³/мин (*sccm*).

Исследуемая лабораторная модель высокочастотного катода имела диаметр сопла 4 мм и площадь собирающей поверхности коллектора — 1800 мм². В качестве рабочего тела использовался ксенон.

Схема эксперимента изображена на рис. 3. Индуктор катода был запитан от ВЧ генератора, спроектированного для работы с устройством такой конструкции. Рабочая частота генератора составляла 3 МГц. Источник постоянного тока создавал разность потенциалов между коллектором катода и мишенью, симулирующей ионный пучок двигателя. Мишень располагалась напротив катода на расстоянии 50 мм. Все системы кроме источника постоянного тока были смонтированы вне вакуумной камеры.

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕЛИКОННОГО РАЗРЯДА

Для реализации режима геликонного разряда, характеризующегося эффективным вкладом ВЧ мощности в плазму, необходимое соотношение рабочей частоты и индукции внешнего магнитного поля рассчитывались исходя из представленных ниже соотношений [4, 8]:

$$\omega_{ci} < \omega_{НГ} < \omega < \omega_{ce} < \omega_p,$$

где ω_{ce} — циклотронная электронная частота, ω_{ci} — циклотронная ионная частота, ω_p — плазменная частота, а $\omega_{НГ}$ — нижняя гибридная частота. ω — частота геликонного разряда.

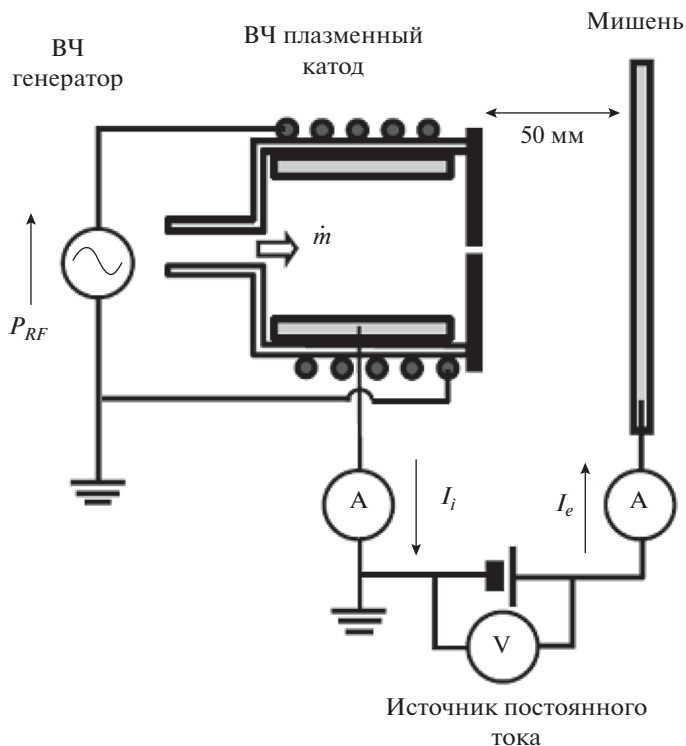


Рис. 3. Схема эксперимента.

$$\omega_{ce} = \frac{eB}{m_e},$$

где e — заряд электрона, m_e — масса электрона, B — величина индукции магнитного поля.

$$\omega_{ci} = \omega_{ce} \frac{m_e}{m_i},$$

где m_i — масса электрона

$$\omega_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}},$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, n_e — концентрация электронов.

$$\omega_{\text{НГ}} = \left(\frac{1}{\omega_{ce}\omega_{ci}} + \frac{1}{\omega_p^2} \right)^{-\frac{1}{2}}.$$

ЦЕНА ЭЛЕКТРОНА И КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА

Важными параметрами для оценки эффективности работы катода являются цена электрона и коэффициент использования рабочего тела. Коэффициент использования рабочего тела учитывает затраты массы рабочего тела на получение единицы электронного тока. Иными словами, он показывает среднее количество поочередных циклов ионизации в разряде, рекомбинации на поверхности коллектора и возвращения в разряд для повторной ионизации для каждого отдельного атома рабочего тела. Он может быть выражен через отношение электронного тока к массовому расходу рабочего тела, пересчитанному в эквивалентные амперы:

$$\beta = \frac{I}{km},$$

где I — электронный ток катода [mA], m — объемный расход рабочего тела [sccm], а k — коэффициент, пересчета расхода в эквивалентный ток, создаваемый однократно заряженными атомами рабочего тела при расходе 1 sccm [mA/sccm]. Для ксенона $k = 72.19$ (mA/sccm).

Цена электрона определяет мощность, затраченную на создание единицы электронного тока, и определяется формулой:

$$C = U + \frac{P}{I},$$

где U — напряжение между коллектором и мишенью [В], P — подведенная ВЧ мощность [Вт], I — сила электронного тока [А].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Работа катода с индуктивным разрядом

На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики, полученные при работе катода с индуктивным разрядом. Мощность ВЧ генератора в работе составляла 50 Вт. При этом 2 см катод, так же как и 4 см, демонстрировал малый ток на напряжениях до ~25 В для различных расходов. Далее кривая, так же как и в предыдущих исследованиях, делает скачок до 0.78 А на расходе 7 sccm [7]. Несмотря на уменьшение объема ГРК в 8 раз, а коллектора в 2.5 раза, достигнутый электронный ток на тех же параметрах имеет значения сопоставимые с величинами тока в 4 см конструкции.

На рис. 5 представлены характеристики эффективности исследуемого катода. Эти кривые цены электрона в зависимости от коэффициента газовой эффективности также

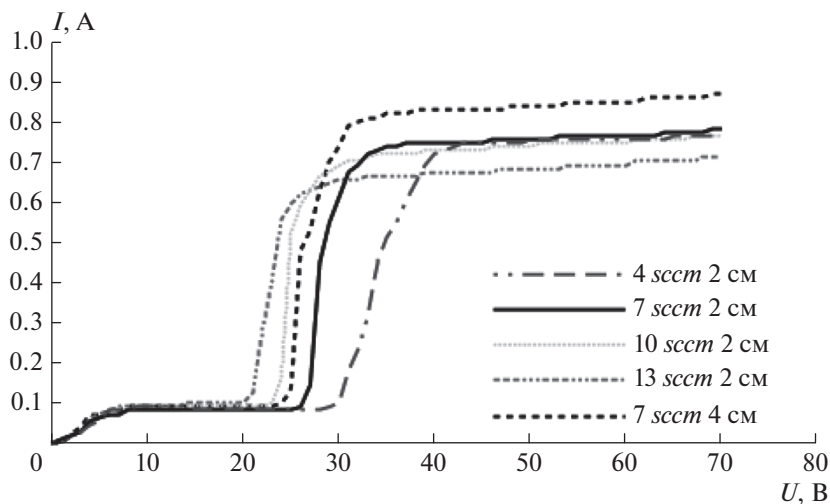


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики индуктивного катода при ВЧ мощности 50 Вт для различных расходов рабочего тела.

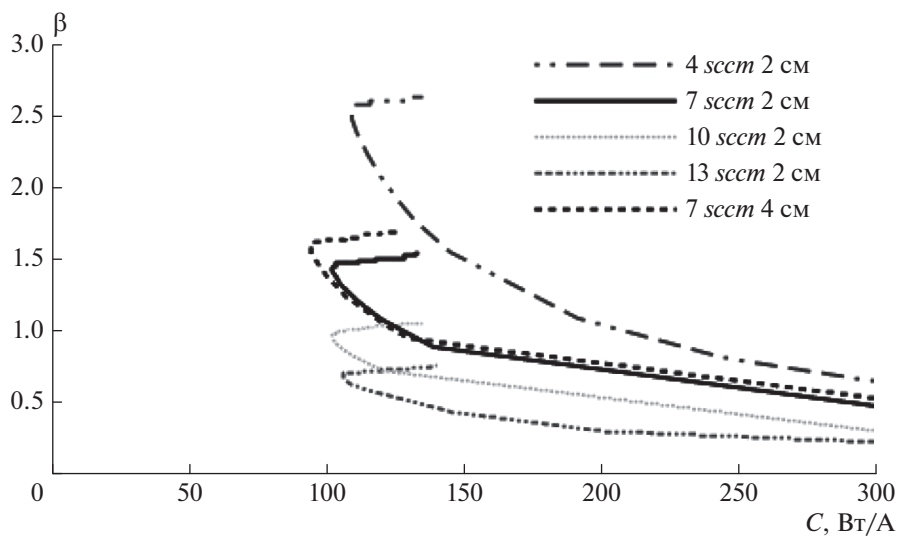


Рис. 5. Характеристика зависимости коэффициента использования рабочего тела от цены электрона индуктивного катода при ВЧ мощности 50 Вт для различных расходов рабочего тела.

имеют форму характерную ранним исследованиям [7]. Как видно из графика, 2 см катод также сравним по характеристикам с лабораторным образцом большего размера.

Работа катода с геликонным разрядом.

Для работы катода с геликонным разрядом в конструкции была установлена обойма постоянных магнитов. Значение магнитной индукции в центре камеры, замерен-

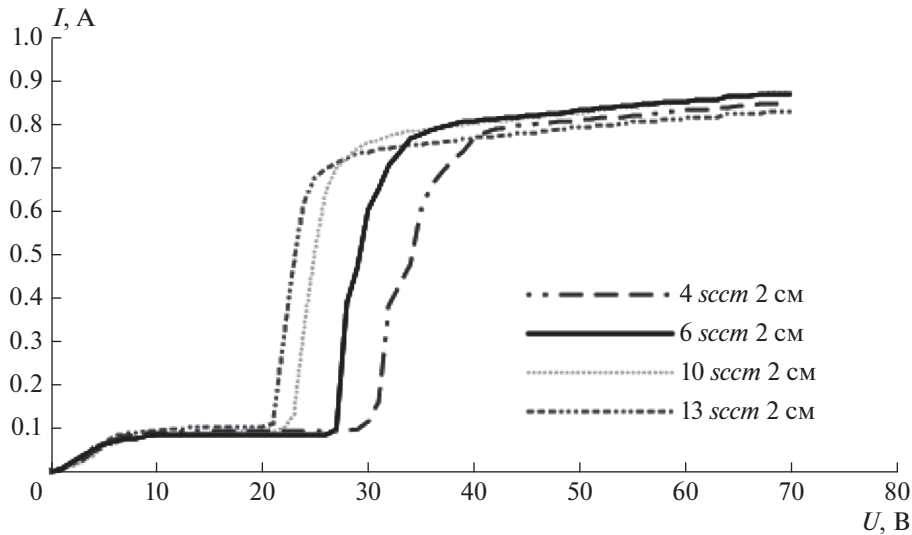


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики геликонного катода при ВЧ мощности 50 Вт для различных расходов рабочего тела.

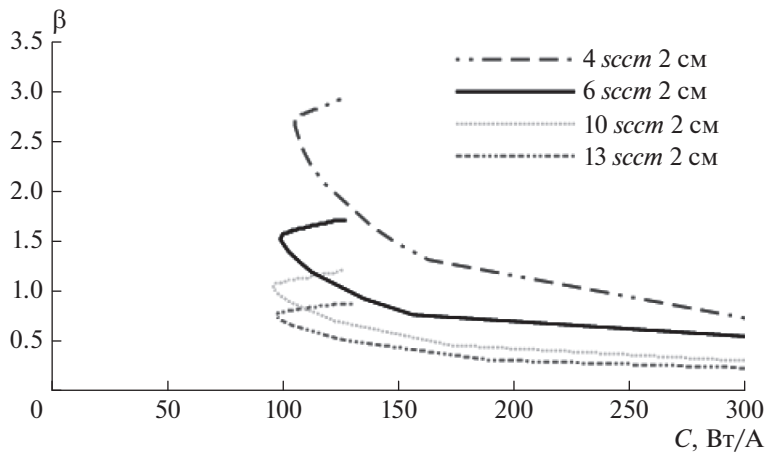


Рис. 7. Характеристика зависимости коэффициента использования рабочего тела от цены электрона геликонного катода при ВЧ мощности 50 Вт для различных расходов рабочего тела.

ное теслометром, составляло 0.6 мТл, что удовлетворяет, приведенным выше, условиям существования геликонного разряда.

На рис. 6 представлена вольт-амперная характеристика полученная при работе катода в таком режиме. При мощности ВЧ генератора 50 Вт, удалось достигнуть тока 0.87 А на расходе ксенона 6 сссм. Результаты свидетельствуют о незначительном смещении значения “оптимального” расхода катода по сравнению с индуктивным разрядом, а кроме того об увеличении тока катода.

На рис. 7 также представлены характеристики эффективности катода в геликонном разряде, где ясно видно, что значения цены электрона и газовой эффективности улучшились, что свидетельствует о более эффективном поглощении ВЧ мощности плазмой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований разработан лабораторный образец ВЧ катода с индуктивным/геликонным разрядом. Проведены эксперименты по изучению характеристик данного образца. Нужно отметить, что ВЧ разряд в устройствах малого диаметра обладает повышенной эффективностью при работе с ВЧ генераторами большей частоты, поэтому в дальнейшем планируется провести серию дополнительных экспериментов с генераторами на других частотах. И хотя эффективность 2 см катода оказалось немного ниже, чем у 4 см, можно уже сделать некоторые выводы о возможностях масштабирования устройства.

Использование геликонного разряда ожидаемо дало прирост эффективности работы катода, однако необходимо помнить, что масса используемой магнитной системы весьма существенна по сравнению с общей массой устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожевников В.В., Смирнов П.Е., Суворов М.О., Хартов С.А. Разработка высокочастотного ионного двигателя, работающего на атмосферных газах // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 3. С. 5–12.
2. Горшков О.А., Муравлёв В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / Под ред. А.С. Коромеева. М.: Машиностроение, 2008. 278 с.
3. Shabshelowitz Adam. Study of RF Plasma Technology Applied to Air-Breathing Electric Propulsion – dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Aerospace Engineering) in the University of Michigan. 2013. 188 p.
4. Goebel Dan M., Katz Ira. Fundamentals of electric propulsion: Ion and Hall Thruster. JPL Space Science and Technology Series. Jhon Wiley & Sons. 2008. 508 p.
5. Raites Y., Hendryx J.K., Fisch N.J. A Parametric Study of Electron Extraction from a Low Frequency Inductively coupled RF-Plasma Source. IEPC-2009-024 // Proc. of 31st International Electric Propulsion Conference, 20–24 Sept. 2009, Ann Arbor, Michigan, USA. http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2009index/IEPC-2009-024.pdf.
6. Dmytro Rafalskyi, Ane Aanesland. A Neutralizer-Free Gridded Ion Thruster Embedded Into A 1U Cubesat Module. IEPC-2017-94 // Proc. of 35-th International Electric Propulsion Conference, 8–12 Sept. 2017, Atlanta, Georgia, USA. http://erps.spacegrant.org/IEPC_2017/IEPC_2017_94.pdf.
7. Кожевников В.В., Смирнов П.Е., Суворов М.О., Хартов С.А. Экспериментальное исследование работы катода-нейтрализатора с высокочастотным разрядом // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2018. № 3. С. 12–21.
8. Loya A.V., Roshanpour S. Helicon Electron source for operation with aggressive propellant. IEPC-2011-256 // Proc. of 32-nd International Electric Propulsion Conference, 11–15 Sept. 2011, Wiesbaden, FRG. http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2011index/IEPC-2011-256.pdf.
9. Jun Sato, Natsumi Torii, Satoshi Kasagami, Chisato Ota, Junichiro Aoyagi, Haruki Takegahara. Effect on Electron Emission of Inductively Coupled Plasma Cathode's Length. IEPC-2013-435 // Proc. of 33-th International Electric Propulsion Conference, 6–10 Oct. 2013, Washington, USA, http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2013index/psuhn12d.pdf.
10. Hitoshi Kuninaka, Kazutaka Nishiyama, Yukio Shimizu, Tetsuya Yamada, Ikko Funaki, Satoshi Hosoda, Hiroyuki Koizumi. Re-ignition of Microwave Discharge Ion Engines on Hayabusa for Homeward Journey. IEPC-2007-9 // Proc. of 30-th International Electric Propulsion Conference, 17–20 Sept. 2007, Florence, Italy. http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2007index/IEPC-2007-009.pdf.
11. Кралькина Е.А. Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе / Успехи физических наук. 2008. Т. 178. № 5. С. 519–540.
12. Lotz B. Plasma physical and material physical aspects of the application of atmospheric gases as a propellant for Ion-Thruster of the RIT Type assessment – dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (Natural Sciences). University of Giessen (FB-07 Physics). May 2013. 139 p.
13. Loeb H.W., Scharfner K.H., Meyer B.K., Feili D., Weis St., Kirmse D. Forty Years of Giessen EP-Activities and the Recent RIT-Microthruster Development. IEPC-2005-031 // Proc. of 29th International Electric Propulsion Conference, 31 Oct. – 5 Nov. 2005, Princeton University, Princeton, USA. http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2005index/031.pdf.

14. Tomoyuki Hatakeyama, Masatoshi Irie, Hiroki Watanabe, Aasami Okutsu, Junichiro Aoyagi, Haruki Takegahara. Preliminary study on Radio Frequency Neutralizer for Ion Engine. IEPC-2007-226 // Proc. of 30th International Electric Propulsion Conference, 17–20 Sept. 2007, Florence, Italy. http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2007/index/IEPC-2007-226.pdf.
15. Feili D., Collingwood C.M., Lotz B., Loeb H.W., Musso F., Di Cara D. Radio-Frequency Micro Thrusters and Their Applications // Труды МАИ, 2012. № 60. http://mai.ru/upload/iblock/57e/radio_frequency-micro-thrusters-and-their-applications.pdf.
16. Sina Jahanbakhsh, Murat Celik. Theoretical Investigation and Modeling of Current Extraction from a Radio-Frequency Cathode. AIAA 2014-3402 // AIAA Propulsion and Energy Forum, 28–30 July, Cleveland, Ohio, USA. <https://doi.org/10.2514/6.2014-3402>
17. Hans J. Leiter, Horst W. Loeb, Karl-Heinz Schartner. The RIT15 Ion Engines – A survey of the present state of Radio-Frequency Ion Thruster technology and its future potentiality // Spacecraft Propulsion, Third International Conference held 10–13 October, 2000 at Cannes, France. Edited by R.A. Harris. European Space Agency ESASP-465, 2001. 423–432 p.

Investigation of Cathode-Neutralizer Based on Helicon Discharge

V. V. Kozhevnikov^{a, *}, P. E. Smirnov^a, and S. A. Khartov^a

^aMoscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*e-mail: k208@mai.ru

Hollow cathodes demonstrate efficient and quality operation as the sources of electrons for electric propulsion of spacecraft for many years. However, they are also among the propulsion system elements, which limit its lifetime; besides, a number of problems are associated with them, which result in their efficiency loss due to the interaction with active gases of propellant and residual spacecraft environment. Several concepts were presented by now, the main purpose of which is getting rid of mentioned limitations, such as development of cathodeless thrusters, or development of cathodes with electrodeless discharge.

In earlier publications we presented the design of such cathode-neutralizer based on the inductively coupled radio-frequency discharge, as well as its current-voltage and efficiency characteristics. Current study is an attempt to miniaturize such device and to raise its efficiency by transition to the helicon discharge.

Keywords: electron source, radio-frequency discharge, ion thruster cathode, cathode-neutralizer, helicon discharge