

УДК 533.59:621.455:537.534

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С МАГНИТНЫМ ЭКРАНИРОВАНИЕМ СТЕНОК РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ

© 2024 г. В. К. Абгарян¹, Д. С. Демченко¹, А. В. Мельников^{1,*}, О. Д. Пейсахович¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)”,
Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики, Москва, Россия

*E-mail: melnikov.andrey.sp@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.11.2023

После доработки 22.11.2023

Принята к публикации 28.12.2023

Представлены результаты расчетного исследования по оптимизации формы основных элементов высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД) – разрядной камеры и электродов ионно-оптической системы. Рассмотрена возможность повышения интегральных характеристик двигателей и ионных источников данного типа за счет использования дополнительного постоянного магнитного поля в области ВЧ разряда. Проведенная серия расчетов позволила определить оптимальную геометрию разрядной камеры и электродов ионно-оптической системы ВЧИД, а также конфигурацию дополнительного магнитного поля, при которых достигались наилучшие значения интегральных характеристик.

DOI: 10.31857/S0367676524040091, EDN: QIFXQP

ВВЕДЕНИЕ

Электроракетные двигательные установки широко используются для коррекции положения современных космических аппаратов (КА) и поддержания их рабочих орбит. Характерный для подобных двигателей низкий расход рабочего тела в совокупности с достаточно высоким удельным импульсом тяги позволяют обеспечить длительный срок активного существования КА (до 15 лет для некоторых современных КА [1]). Наибольший удельный импульс на сегодняшний день обеспечивают ионные двигатели, в которых ускорение ионов рабочего тела производится с помощью электростатического поля, возникающего за счет прикладываемой разности потенциалов между перфорированными сеточными электродами ионно-оптической системы (ИОС) [2, 3]. Одним из типов ионных двигателей, разрабатываемых в мире и в России, является высокочастотный ионный двигатель (ВЧИД) [4–6]. Отличительной особенностью двигателей этого типа является организация процесса ионизации атомов рабочего тела (РТ) в индуктивном высокочастотном разряде.

Постоянное повышение требований к космической технике требует в том числе и повышения эффективности современных двигательных систем. Это обуславливает актуальность проведения исследований, направленных на улучшение

характеристик существующих моделей электроракетных двигателей с точки зрения надежности и эффективности работы.

В предлагаемой работе с помощью методов расчетного моделирования рассматривается возможность повышения тяговых характеристик ВЧИД с диаметром пучка 80 мм. Использовалась разработанная ранее инженерная физико-математическая модель ВЧ разряда плазмы в ионных источниках и двигателях схемы ВЧИД, позволяющая определить двумерные распределения локальных параметров плазмы – электронной температуры и концентрации заряженных частиц – в разрядной камере (РК), а также некоторые интегральные характеристики двигателя (цену ионизации, коэффициент использования РТ (КиРТ) и величину извлекаемого ионного тока) [7].

В ряде экспериментальных исследований [8, 9] было показано, что геометрические параметры РК заметно влияют на эффективность работы ВЧИД. Это связано с тем, что на внутренней площади поверхности РК во время работы происходит рекомбинация выпадающих на нее заряженных частиц, что является одним из определяющих каналов потерь вкладываемой в плазму индуктивного разряда ВЧ мощности [10]. Поэтому совершенно естественно уменьшать по мере возможности площадь поверхности РК путем снижения ее кривизны. В то же время для эффективной ионизации РТ

требуется обеспечить необходимый внутренний объем РК [11]. То есть задача сводится к оптимизации геометрических параметров этого элемента конструкции двигателя.

Еще одним перспективным и экспериментально подтвержденным методом повышения энергоэффективности ВЧИД является использование дополнительного постоянного магнитного поля в области ВЧ разряда с целью снижения потока заряженных частиц на стенки и сокращения таким образом потерь вкладываемой ВЧ мощности [12, 13]. Такой прием используется, например, в ТОКАМАКах [14].

Основными целями данной работы являлись: определение оптимальной формы объема плазменного разряда, ограниченного разрядной камерой и электродами ИОС, а также оценка возможного повышения интегральных характеристик за счет использования дополнительного постоянного магнитного поля различной конфигурации. Расчеты проводились в программном комплексе COMSOL Multiphysics [15].

Исходная модель двигателя включала в себя типовые для данного типоразмера полусферическую РК и плоские электроды ИОС. Упрощенные элементы конструкции исходной конфигурации высокочастотного ионного двигателя в расчетной области показаны на рис. 1.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ И ЭЛЕКТРОДОВ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Поиск оптимальной геометрии производился за счет варьирования высоты РК и глубины прогиба электродов ИОС. Для более наглядного сравнительного анализа использовались безразмерные величины высоты РК $h_{РК}$ и прогиба электродов ИОС h_{Ξ} :

$$h_{РК} = \frac{H_{РК}}{R_0}; \quad (1)$$

$$h_{\Xi} = \frac{H_{\Xi}}{R_0}, \quad (2)$$

где $H_{РК}$ — высота рассматриваемой РК, H_{Ξ} — глубина прогиба электродов ИОС в центре, R_0 — внутренний радиус РК в выходном сечении.

При проведении расчетов предполагалось, что извлекаемый из РК ВЧИД ионный пучок истекает по нормали к поверхности электродов ИОС. Также, необходимо отметить, что в реальном двигателе на величину тяги в общем случае заметное влияние оказывает конфигурация узла ИОС (толщина электродов, расстояние между ними, геометрические параметры отверстий, величина потенциалов

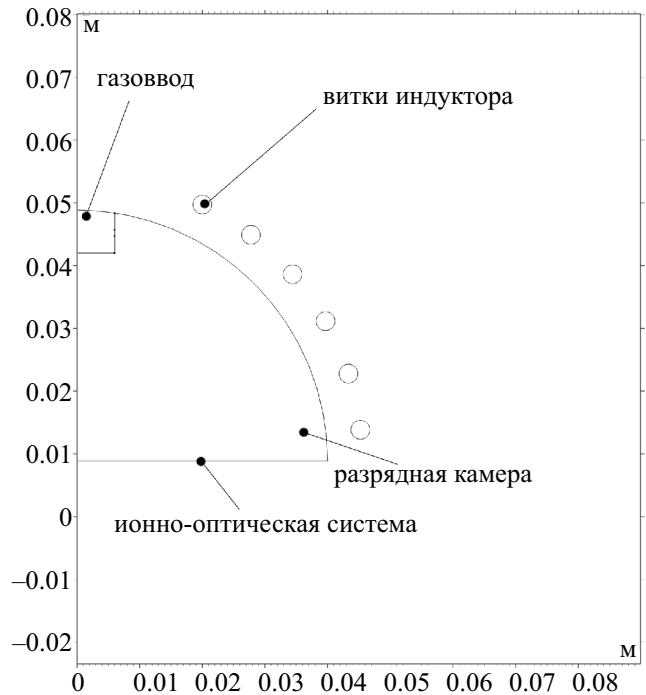


Рис. 1. Упрощенная схема конструкции исходной конфигурации высокочастотного ионного двигателя

на электродах и т.д.). Однако при идеальной (правильной) юстировке ионно-оптической системы тяговые характеристики будут определяться только величиной плотности ионного тока, направленного в сторону эмиссионного электрода из объема плазмы внутри РК. Такое допущение при исследовании возможности повышения эффективности ВЧИД за счет оптимизации процесса генерации плазмы позволяет исключить из рассмотрения достаточно сложный вопрос фокусировки и ускорения извлекаемых из плазмы ионов.

Сравнительный анализ различных конфигураций ВЧИД производился по основным для данных типов электроракетных двигателей интегральным характеристикам — коэффициенту использования РТ, цене ионизации и по величине тяги. Данные характеристики рассчитывались по известным соотношениям и определялись в наибольшей степени распределениями концентрации ионов n_i в объеме разрядной камеры, которые рассчитывались по вышеупомянутой инженерной модели для каждой конфигурации ВЧИД.

При тех параметрах плазмы, которые реализуются в РК ВЧИД плотность ионного тока j_i в сторону ИОС будет определяться амбиполярной диффузией следующим образом:

$$j_i = e \cdot n_i \cdot \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}}, \quad (3)$$

Таблица 1. Исходные данные для расчетов

Параметр	Значение
Диаметр ионного пучка, см	8
Рабочее тело	ксенон
Расход рабочего тела, мг/с	0.3
Вкладываемая в разряд ВЧ мощность, Вт	75
Частота тока в индукторе, МГц	2
Прозрачность эмиссионного электрода ИОС	0.5
Прозрачность ускоряющего электрода ИОС	0.4

$$\beta = \frac{I_i \cdot M_i}{e \cdot \dot{m}}, \tag{4}$$

где I_i — ток извлекаемого ионного пучка, $\dot{m}$ — массовый расход РТ. Цена ионизации C_i определяется следующим выражением:

$$C_i = \frac{N_{ВЧ}}{I_i}, \tag{5}$$

где $N_{ВЧ}$ — вкладываемая в разряд ВЧ мощность.
Для определения уровня повышения тяговых характеристик и упрощения сравнительного анализа использовалась величина “эффективной тяги” T , которая определялась интегрированием по поверхности электродов ИОС значения плотности извлекаемого ионного тока:

$$T \sim \iint S_{ИОС}(\vec{j}_i, \vec{n}_z) d\sigma, \tag{6}$$

где плотность тока j_i определяется из (3), $\vec{n}_z$ — единичный вектор, параллельный оси двигателя.

Исходные данные для расчетов представлены в табл. 1.

На первом этапе производился поиск оптимальной формы РК. При этом рассматривался диапазон значений $h_{РК}$ от 0.5 до 1. Зависимости коэффициента использования РТ, цены ионизации и прироста “эффективной тяги” ΔT относительно исходной конфигурации от $h_{РК}$ представлены на рис. 2. Согласно результатам расчета, уменьшение высоты РК до определенной величины позволяет приблизительно на 4% повысить коэффициент использования РТ и примерно на ту же величину снизить цену ионизации (затраты ВЧ мощности на создание извлекаемого ионного тока пучка). При оптимальном значении $h_{РК} = 0.65$ прирост тяги ΔT составил более 4%.

На втором этапе оптимизации с использованием найденного наилучшего значения $h_{РК}$ уже менялась величина прогиба электродов ИОС $h_э$. При этом значение $h_э$ рассматривалось в диапазоне от 0.025 до 0.15. Выбор для поиска оптимальной формы только диапазона значений $h_э$, соответствующего прогибу электродов наружу, был связан с тем, что по предварительным расчетам конфигурация с вогнутыми внутрь РК электродами приводит только к снижению эффективной тяги двигателя. Это объясняется тем, что вогнутые электроды способствуют уменьшению объема плазменного образования, который необходим для обеспечения эффективной ионизации атомов рабочего тела в ВЧ разряде. На рис. 3 представлены зависимости β , C_i и прироста “эффективной тяги” ΔT от $h_э$. Расчеты показали, что оптимальное значение $h_э$ составляет 0.125. При этом, в совокупности с оптимальной формой РК ($h_{РК} = 0.65$) коэффициент

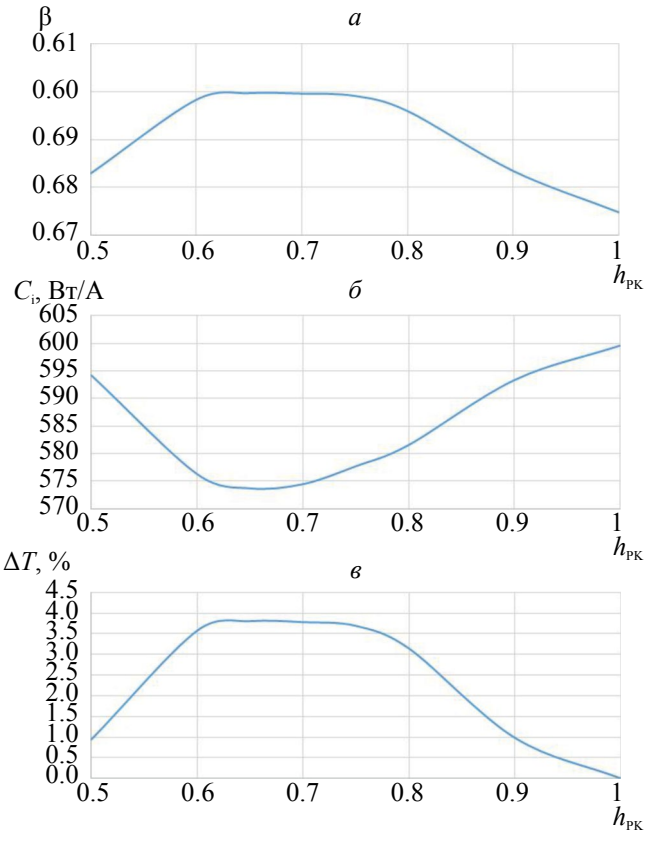


Рис. 2. Зависимости коэффициента использования рабочего тела (а), цены ионизации (б) и прироста «эффективной тяги» (в) от относительной высоты разрядной камеры

где e — элементарный заряд, n_i — концентрация ионов, k — постоянная Больцмана, T_e — температура электронов, M_i — масса иона РТ.

Коэффициент использования РТ β в расчетах оценивался с помощью следующего соотношения [16]:

использования РТ и цена ионизации улучшились на более чем 7%, а прирост тяги ΔT составил 5.2%. Стоит отметить, что дальнейшее увеличение прогиба электродов ИОС за счет увеличения площади поверхности, с которой извлекается ионный ток, естественно приводит к дальнейшему росту извлекаемого тока. Однако, учитывая, что в данной работе рассматривается случай, когда ионный ток извлекается по нормали к поверхности электродов, увеличение прогиба приведет к снижению тягового усилия вдоль оси двигателя за счет расходимости ионного пучка (см. рис. 3в).

Причинами ожидаемого повышения интегральных характеристик ВЧИД являются: снижение площади внутренней поверхности РК, на которой происходит интенсивная рекомбинация заряженных частиц, увеличение площади электродов ИОС, через которую извлекается ионный ток, а также перераспределение локальных параметров плазмы. Для наглядного сравнения на рис. 4 представлены распределения концентрации заряженных частиц (ионов и электронов) для исходной и для оптимизированной геометрии РК и электродов ИОС.

Согласно проведенной серии расчетов оптимальная высота РК для рассматриваемого типоразмера ВЧИД с диаметром ионного пучка 80 мм составляет 26 мм, а глубина прогиба электродов ИОС наружу – 5 мм.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Магнитное поле в плазме влияет на диффузию заряженных частиц, изменяя коэффициент диффузии примерно обратно пропорционально величине индукции магнитного поля B , что принято в различных моделях плазменного разряда. В этом, собственно, и состоит принцип магнитного экранирования стенок от плазмы. С другой стороны, чрезмерное увеличение величины индукции поля приводит к “замагничиванию” электронов, что затрудняет их перемещение в объеме плазмы. Учитывая, что ионизация атомов рабочего газа производится именно электронным ударом, необходимо обеспечить возможность перемещения электронов по объему разрядной камеры, иначе разряд плазмы гаснет. В использованной инженерной модели одним из параметров при расчете распределений концентраций заряженных частиц является коэффициент диффузии, зависящий от величины магнитного поля.

Дополнительное постоянное магнитное поле вводилось в разряд плазмы с помощью катушки индуктивности, располагаемой на оси двигателя на некотором удалении от вершины разрядной камеры с тем, чтобы максимально уменьшить

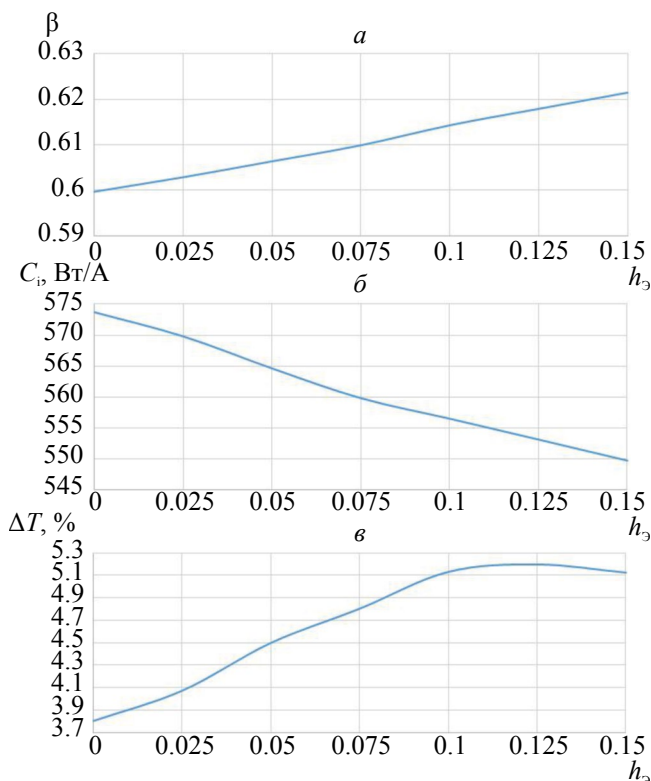


Рис. 3. Зависимости коэффициента использования рабочего тела (а), цены ионизации (б) и прироста «эффективной тяги» (в) от относительного прогиба электродов

индукционные токи Фуко, генерируемые ВЧ индуктором в катушке, приводящие к нежелательным потерям ВЧ мощности. Число витков в катушке равнялось 200. Значения индукции B в объеме разрядной камеры находились в диапазоне сотых долей Тесла, что на порядок выше, чем амплитуда высокочастотных колебаний магнитного поля, генерируемого ВЧ индуктором.

При оценке влияния дополнительного постоянного магнитного поля на интегральные характеристики ВЧИД было рассмотрено три топологии магнитного поля, различающиеся радиальным распределением индукции. При этом во всех трех случаях максимум индукции дополнительного постоянного магнитного поля находился в центре РК. В каждой конфигурации дополнительная обмотка располагалась на расстоянии 5 мм от РК, имела внутренний диаметр 10 мм и толщину 5 мм. При этом в зависимости от конфигурации менялся только внешний диаметр обмотки: у конфигурации № 1 он составлял 30 мм, у конфигурации № 2 – 50 мм, а у конфигурации № 3 – 70 мм. Для примера, на рис. 5 представлено распределение дополнительного постоянного магнитного поля по объему РК, которое обеспечивалось обмоткой первой конфигурации.

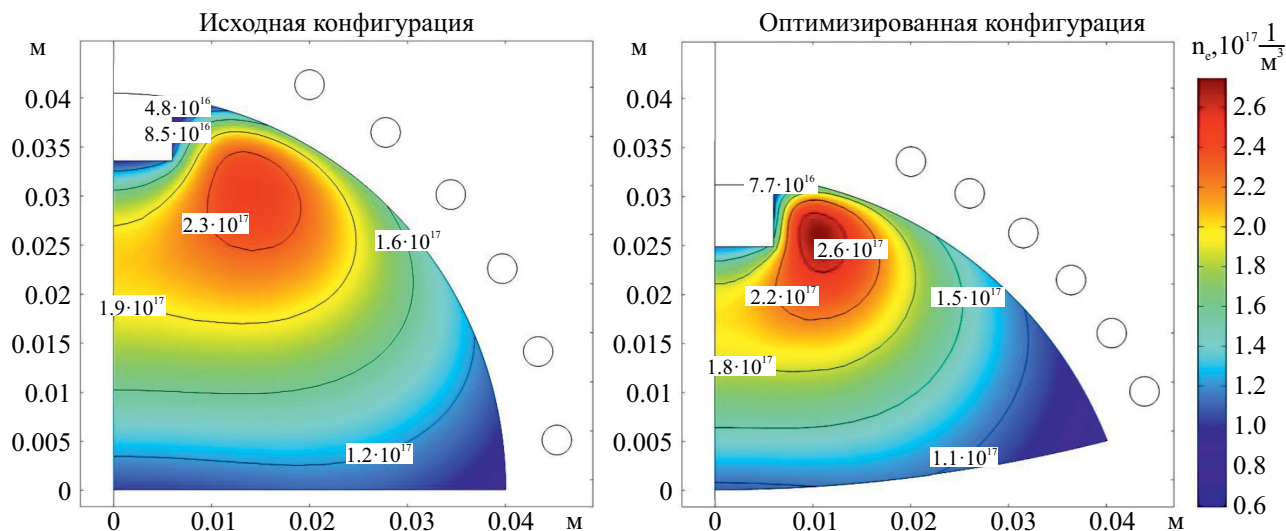


Рис. 4. Двумерные распределения концентрации заряженных частиц

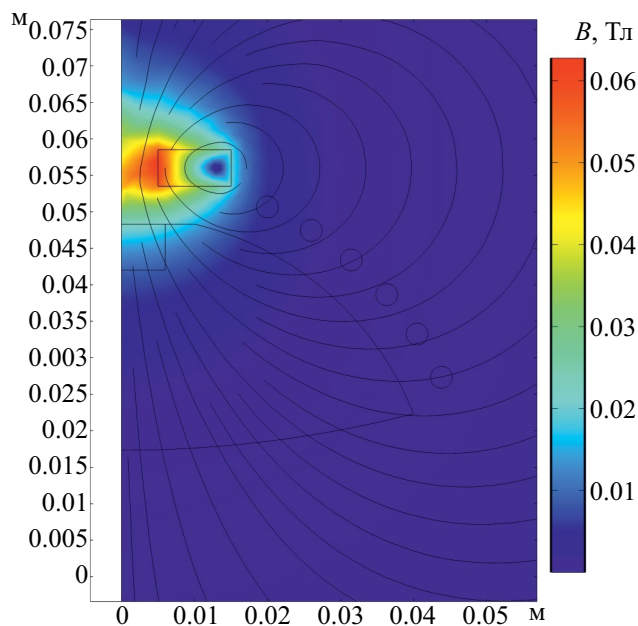


Рис. 5. Распределение индукции дополнительного постоянного магнитного поля с обмоткой первой конфигурации (ток в обмотке 5.5 А)

Изменение ширины обмотки приводило к изменению радиального градиента индукции магнитного поля в области РК.

Полученные при оценке зависимости ΔT от средней индукции дополнительного постоянного магнитного поля в объеме РК $B_{\text{ср}}$ для каждого рассмотренного случая представлены на рис. 6. Согласно результатам расчетов, снижение радиального градиента индукции дополнительного магнитного поля приводит к повышению возможного

улучшения тяговых характеристик. С использованием третьей конфигурации обмотки постоянного тока ожидаемый прирост тяги уже составляет почти 12%. Наличие участков немонотонного повышения характеристик при увеличении индукции магнитного поля связано с перераспределением локальных параметров плазмы (концентрации и температуры электронов) по объему РК.

При использовании 3 конфигурации обмотки оптимальная средняя индукция дополнительного постоянного магнитного поля в объеме РК почти в 4.5 раза больше, чем в конфигурации № 1. Это позволяет более эффективно удерживать электроны в плазме, снижая таким образом потоки заряженных частиц, уходящих на стенки РК, а, следовательно, уменьшить потери в ВЧ разряде.

Для наглядного сравнения на рис. 7 представлены двумерные распределения концентрации заряженных частиц в РК при отсутствии и при наличии дополнительного постоянного магнитного поля с оптимальной конфигурацией в области ВЧ разряда. Как видно из рисунка при наличии дополнительного постоянного магнитного поля в случае использования конфигурации обмотки № 3 концентрация плазмы возрастает приблизительно в 3 раза, что и является причиной повышения интегральных характеристик ВЧИД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования были определены оптимальные формы разрядной камеры и электродов ионно-оптической системы для высокочастотного ионного двигателя с диаметром ионного пучка 80 мм. Согласно расчетам, для данного двигателя оптимальными являются

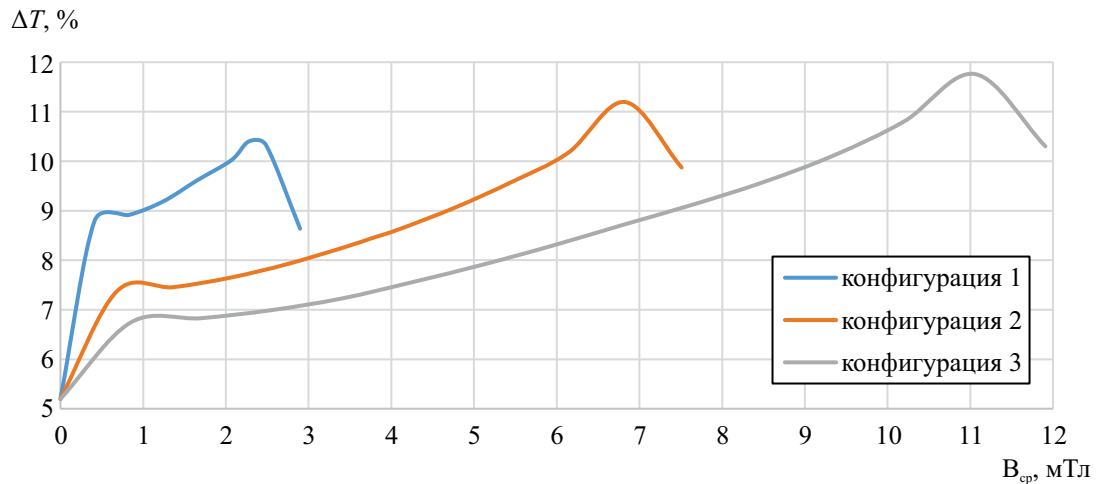


Рис. 6. Зависимость прироста «эффективной тяги» от средней индукции дополнительного постоянного магнитного поля

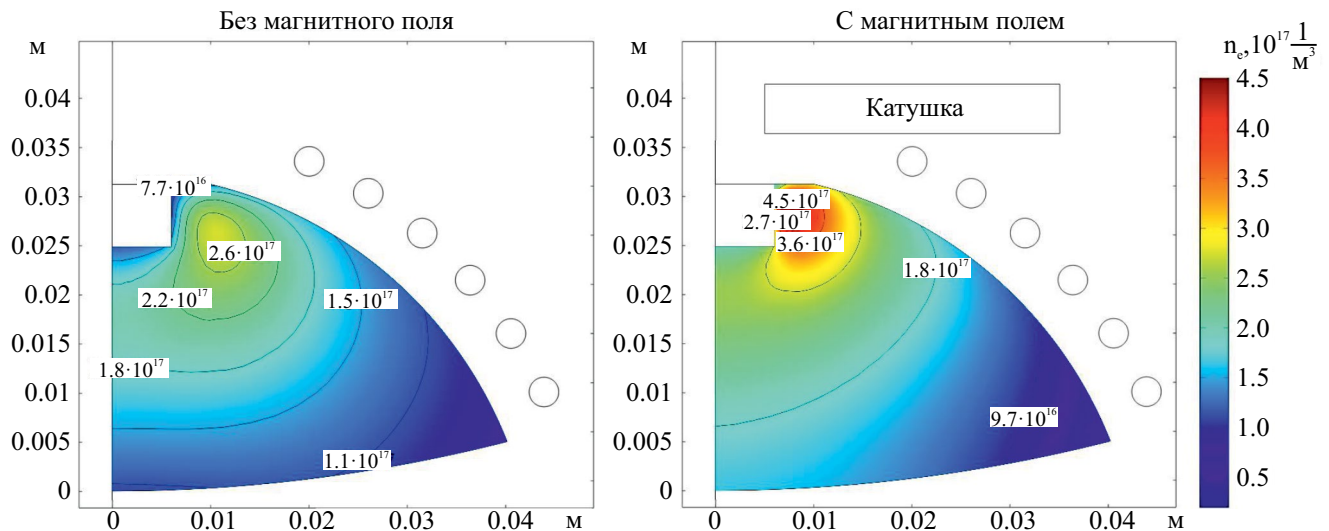


Рис. 7. Двумерные распределения концентрации заряженных частиц

относительная высота разрядной камеры, равная 0.65 по отношению к радиусу камеры, и относительный прогиб электродов ионно-оптической системы, равный 0.125 также по отношению к радиусу камеры, при использовании выпуклых электродов. Ожидаемый прирост тяги при такой конфигурации составляет 5.2%.

Исследование влияния дополнительного постоянного магнитного поля в области ВЧ разряда на интегральные характеристики ВЧИД показало, из трех рассмотренных конфигураций поля наибольший прирост тяги на 7% достигается при использовании конфигурации поля с наименьшим радиальным градиентом индукции в РК вблизи стенок разрядной камеры.

Рассчитанные зависимости тяги, ионного тока, коэффициента использования рабочего тела, цены ионного тока и других параметров позволили определить оптимальные геометрические параметры РК и электродов ИОС, а также выбрать наилучшую конфигурацию дополнительного постоянного магнитного поля в области ВЧ разряда. Использование предложенных методов повышения эффективности работы высокочастотного ионного двигателя с диаметром ионного пучка данного типа размера может в общей сложности на 12% повысить тягу двигателя по сравнению с традиционной конфигурацией двигателя с полусферической РК и плоскими электродами ИОС. Примерно на ту же величину увеличивается коэффициент

использования рабочего тела и снижается цена ионного тока.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://archive.satcomrus.ru/2022/presentations/5_%20%D0%A3%D1%80%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B8%D1%87_27102022.pdf.
2. *Важенин Н.А., Обухов В.А., Плохих А.П., Попов Г.А.* Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи. М.: Физматлит, 2013. 432 с.
3. *Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А.* Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2008. 278 с.
4. *Антропов Н.Н., Ахметжанов Р.В., Богатый А.В. и др.* // Изв. РАН. Энергетика. 2016. № 2. С. 4.
5. *Abgaryan V.K., Kruglov K.I., Mogulkin A.I. et al.* // J. Surface Inv. 2017. V. 11. No. 6. P. 1239.
6. *Abgaryan V.K., Riaby V.A., Yamashev G.G.* // J. Surface Inv. 2017. V. 11. No. 5. P. 1008.
7. *Kanev S., Melnikov A., Nazarenko I., Khartov S.* // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. V. 868. Art. No. 012010.
8. *Leiter H.J., Loeb H.W., Schartner K.H.* // Proc. 3rd Int. Conf. Spacecraft Propulsion (Cannes, 2000). P. 423.
9. *Walther R., Geisel J., Pinks W. et al.* // Proc. 11th Elect. Propulsion Conf. (New Orleans, 1975). Art. No. AIAA-75-367.
10. *Tsay M.M.T.* Two-dimensional numerical modeling of radio-frequency ion engine discharge. PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2010.
11. *Абгарян В.К., Мельников А.В., Купреева А.Ю., Пейсахович О.Д.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 5. С. 103.
12. *Melnikov A.V., Khartov S.A.* // Thermal Eng. 2018. V. 65. No. 13. P. 980.
13. *Кожевников В.В., Мельников А.В., Назаренко И.П., Хартов С.А.* // Изв. РАН. Энергетика. 2019. № 3. С. 40.
14. *Арцимович Л.А.* Управляемые термоядерные реакции. М.: Физматлит, 1961. 467 с.
15. <https://www.comsol.com>.
16. *Григорьян В.Г., Демидов А.С., Хартов С.А.* Расчет и конструкция электроракетных двигателей: Уч. пособие. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. 88 с.

Radio-frequency ion thruster with magnetic shielding of the discharge chamber walls

V. K. Abgaryan, D. S. Demchenko, A. V. Melnikov*, O. D. Peisakhovich

Moscow Aviation Institute (National Research University), Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow, 125080 Russia

**e-mail: melnikov.andrey.sp@yandex.ru*

We presented the results of a computational study on optimizing the shape of the main elements of a radio-frequency ion thruster — the discharge chamber and the ion-extraction system grids. The possibility of improving the integral characteristics of thrusters and ion sources due to the use of an additional magnetostatic field in the RF discharge region was considered. The performed series of calculations made it possible to determine the optimal geometry of the discharge chamber and of the RIT ion-extraction system grids, as well as the configuration of the additional magnetic field, at which the best values of the integral characteristics were achieved.