

УДК 537.525.7
 EDN: IMPVTF

PACS: 52.80.-s, 52.80.Pi

Влияние внешнего магнитного поля на характеристики прототипа ВЧ индуктивного воздушного электроракетного двигателя

В. С. Дудин, К. В. Вавилин, Е. А. Кралькина, И. И. Задириев, С. А. Двинин, Е. Ю. Локтионов, А. М. Никонов, Г. В. Швыдкий

Изучены характеристики модели ВЧ индуктивного ионного двигателя, работающего на азоте и кислороде, при наложении на разряд внешнего продольного магнитного поля с индукцией не более 75 Гс. Экспериментально показано, что наибольший ток ионов удастся получить, используя магнитные поля с индукцией 18 и 70 Гс. В рабочем диапазоне $f = 10\text{--}25\text{ см}^3/\text{мин}$ для тока 200 мА цена иона, рассчитанная на основании значений мощности ВЧ-генератора, составляет величину 1400–1500 Вт/А. Оценка цены иона по величине вложенной в плазму мощности позволяет определить минимально возможную для рассматриваемого прототипа ВЧ ионного двигателя величину цены иона в 850 Вт/А.

Ключевые слова: ионный двигатель; ВЧ; ИД; воздушный электроракетный двигатель; ВЭРД; индуктивный; высокочастотный; разряд; плазма; ионы; цена иона; СНОО; СНО.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-24-28

Введение

Долговременные полеты космических аппаратов (КА) на сверхнизких околоземных

Дудин Василий Сергеевич, аспирант.

E-mail: vsd97@list.ru

Вавилин Константин Викторович, к.ф.-м.н.

E-mail: viline@inbox.ru

Кралькина Елена Александровна, в.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: ekralkina@mail.ru

Задириев Илья Игоревич, к.ф.-м.н.

E-mail: iizadiriev@yandex.ru

Двинин Сергей Александрович, д.ф.-м.н.

E-mail: sdvinin@mail.ru

Локтионов Егор Юрьевич, к.ф.-м.н.

E-mail: eloktionov@mail.ru

Никонов Александр Михайлович, к.ф.-м.н.

E-mail: nikonov207@mail.ru

Швыдкий Георгий Вячеславович, к.ф.-м.н.

E-mail: laggige@mail.ru

Физический факультет МГУ.

Россия, 111991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 9.07.2024

После доработки 16.08.2024

Принята к публикации 12.09.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9

орбитах (СНОО) (180–250 км) открывают широкие перспективы для развития телекоммуникаций, транспортных операций, а также широкого круга научных исследований. Основная проблема полетов состоит в аэродинамическом торможении КА, вызванном относительно высоким давлением остаточной атмосферы. Увеличение срока активного существования КА возможно в результате их оснащения электроракетным двигателем (ЭРД), способным компенсировать аэродинамическое торможение.

Расчеты показывают, что запасы топлива (ксенона), необходимые для долговременной работы ЭРД на высотах 150–250 км, неоправданно велики. В связи с этим появилась идея использовать газы остаточной атмосферы в качестве рабочего тела ЭРД. Устройства забора атмосферных газов (УЗАГ), сопряженные с ЭРД, формируют воздушный электрореактивный двигатель (ВЭРД).

В нашей стране работы по созданию оборудования для полетов на СНОО ведутся в МАИ и ЦАГИ [1–3]. В работе [1] исследованы характеристики высокочастотного ионного двигателя, использующего в качестве рабочего тела смесь газов верхних слоёв атмосферы,

который может применяться для компенсации аэродинамического торможения низкоорбитального космического аппарата. Проведено моделирование рабочих процессов в двигателе, проанализированы основные его характеристики и с учетом геометрии космического аппарата показана принципиальная возможность существования аппаратов с прямоточным электроракетным двигателем. Представлен вариант конструкции воздухозаборника и параметры прототипа ВЧ ионного двигателя (ВЧ ИД) диаметром 150 мм, работающего на ксеноне, азоте и кислороде. Использование атмосферных газов позволяет получить тягу до 7,5 мН.

Одной из проблем ионных двигателей, рабочий процесс которых основан на индуктивном ВЧ-разряде, являются потери во внешней цепи разряда, связанные с разогревом антенны и генерацией индуцированных токов в металлических элементах конструкции устройств. Эта проблема усугубляется в случае, если ВЧ ИД интегрирован в один блок с металлическим воздухозаборником.

В работе [4] было показано, что наложение на индуктивный ВЧ-разряд слабого магнитного поля сопровождается при некоторых резонансных значениях поля значительным повышением электронной плотности. Причина эффекта состоит в существенном улучшении способности плазмы поглощать ВЧ-мощность вследствие возбуждения в разряде волн и проникновения ВЧ-полей в объем плазмы [5]. Использование внешнего магнитного поля позволило авторам [4] улучшить параметры ксенонового ВЧ ИД.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния внешнего магнитного поля на параметры прототипа ВЧ ИД диаметром 10 см, работающего на кислороде и азоте – преобладающих на орбите 200 км остаточных атмосферных газов.

Методика эксперимента

Схема лабораторного прототипа ВЧ ионного двигателя, основанного на индуктивном разряде, показана на рисунке 1. Прототип ВЧ ИД состоит из кварцевой газоразрядной камеры (ГРК), ионно-оптической (ИОС) и

магнитной систем (МС). Диаметр ГРК равен 10 см, высота – 7 см. Одна торцевая поверхность ГРК закрыта ИОС, на второй расположен газоввод, по которому рабочий газ поступает в ИД. На боковой поверхности ГРК смонтирована соленоидальная антенна, имеющая 3,5 витка. Охлаждаемая проточной водой антенна изготовлена из медной трубки диаметром 3 мм.

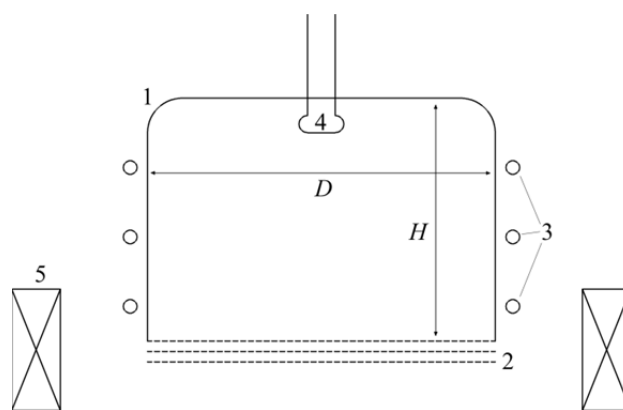


Рис. 1. Схема лабораторного источника ионов. 1 – ГРК, 2 – ИОС, 3 – индуктор, 4 – газоввод, 5 – электромагнит. $D = 10$ см, $H = 7$ см

ИОС состоит из трех перфорированных электродов (эмиссионный, ускоряющий и замедляющий) толщиной 1 мм каждый. Расстояние между сетками равняется 0,7 мм. Прозрачность сеток составляет 0,14 для нейтральных частиц и 0,6 для ионов. На электроды ИОС подавались постоянные напряжения, соответствующие схеме «ускорение – замедление». В настоящих экспериментах напряжение на эмиссионном электроде равняется 1200 В. Замедляющий электрод заземлен.

МС состоит из электромагнита, расположенного в области ИОС. Электромагнит позволяет создавать в области ГРК продольное магнитное поле с индукцией B в центре ИОС 0–75 Гс.

Для поджига и поддержания ВЧ-разряда в ГРК ВЧ ИД антенна была соединена с ВЧ-генератором (HF Power GKA-0K5.13M56.1.0.0) через систему согласования L-типа. Мощность генератора могла плавно изменяться от 0 до 500 Вт, рабочая частота равнялась 13,56 МГц.

Для измерения расхода газов в пределах от 4 до 40 см³/мин использовался шариковый расходомер Koflock 1600R. Исследуемый диапазон расходов газа выбирался исходя из про-

ведённых оценок условий работы двигателя в КА на СНОО, возможности компенсации аэродинамического сопротивления и стабильного горения разряда в ГРК.

Для нахождения величины мощности, вкладываемой в плазму, P_{pl} в настоящей работе использовалась методика [5], основанная на измерении тока, текущего через антенну, и мощности ВЧ-генератора при отсутствии и наличии разряда.

В работе выполнены две серии экспериментов.

В первой серии проводились измерения зависимости извлекаемого тока ионов I_{beam} от индукции магнитного поля B при фиксированной мощности ВЧ-генератора $P_{gen} = 160$ Вт и расходе исследуемого газа $f = 24$ см³/мин. Одновременно с помощью пояса Роговского проводились измерения текущего через индуктор тока I_{ant} , которые позволили вычислить вложенную в разряд мощность P_{pl} . По результатам первой серии экспериментов были найдены значения магнитного поля (МП) B^* , при которых извлекаемый ток был максимален.

Во второй серии экспериментов фиксировался ток ионов I_{beam} и проводились измерения зависимости мощности ВЧ-генератора, необходимой для поддержания заданного значения I_{beam} от расхода газа при выбранных значениях магнитного поля B^* . По результатам второй серии экспериментов был найден диапазон расходов азота и кислорода Δf , в котором энергозатраты на получение I_{beam} минимальны.

Результаты экспериментов

Зависимости извлекаемого ионного тока и вложенной в плазму мощности от индукции приложенного МП представлены на рисунке 2. Как видно, в рассмотренной области магнитных полей зависимость $I_{beam}(B)$ является немонотонной: при $B_1^* \sim 18$ и $B_2^* \sim 70$ Гс наблюдаются локальные максимумы ионного тока. В области первого локального максимума величина ионного тока I_{beam} , полученная в разряде кислорода, примерно на 10 % превышает аналогичную величину, полученную в азоте. Положения локальных максимумов I_{beam} , т. е. значения B_1^* и B_2^* для двух рассмотренных рабочих газов, совпадают в пределах

погрешности измерения магнитного поля $\Delta B = 1,2$ Гс. Необходимо подчеркнуть, что положение локальных максимумов ионного тока совпадает с положением локальных максимумов зависимости доли мощности ВЧ-генератора, поступающей в разряд, P_{pl} от B . Таким образом, становится очевидно, что причиной роста ионного тока при магнитных полях B_1^* и B_2^* является увеличение способности плазмы поглощать ВЧ-мощность и увеличение значений мощности, поступающей в разряд.

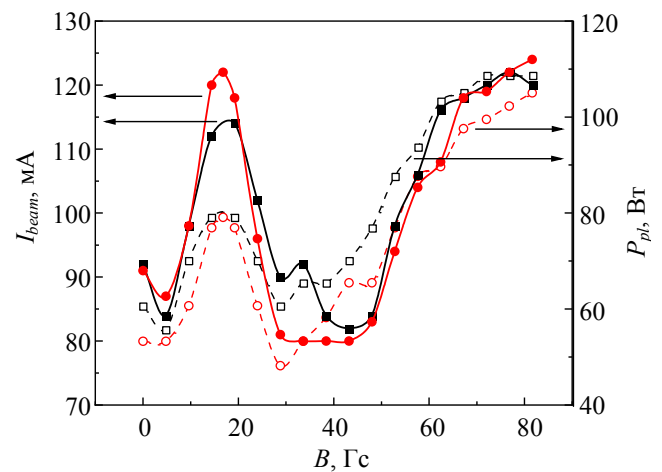


Рис. 2. Зависимость ионного тока I_{beam} (сплошные линии) и вложенной в плазму мощности P_{pl} (пунктир) от магнитного поля B . Квадраты — N_2 , кружки — O_2 . Расход газов $f = 24$ см³/мин. Мощность генератора $P_{gen} = 160$ Вт

Во второй серии экспериментов были измерены зависимости мощности ВЧ-генератора P_{gen} , требуемой для извлечения ионного тока заданной величины от расхода газов. Кривые были получены при магнитных полях B_1^* и B_2^* . Результаты измерений показаны на рисунке 3.

Из рисунка видно, что зависимости $P_{gen}(f)$ имеют типичный вид: в исследуемом диапазоне токов от 100 мА до 200 мА существует оптимальный рабочий диапазон ($\Delta f = 10-25$ см³/мин), в котором требуемая ВЧ-мощность слабо зависит от расхода газа, а цена иона C_i , определяемая как отношение P_{gen}/I_{beam} , минимальна. В области малых расходов, при $f < f_{crit}^-$, зависящем от величины извлекаемого тока, происходит резкое возрастание требуемой мощности P_{gen} . В области больших расходов при $f \gg f_{crit}^+$ значения P_{gen}

в азоте так же возрастают, хоть и слабо. Последняя тенденция становится особенно заметной при анализе зависимостей требуемой вложенной в ВЧ разряд мощности P_{pl} от расхода газа f (см. рис. 4).

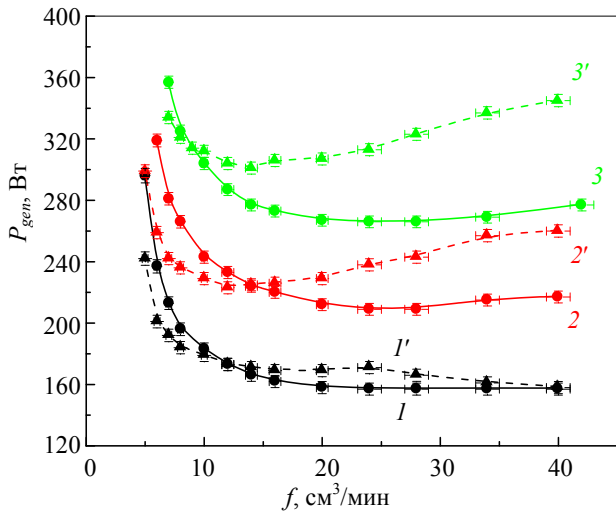


Рис. 3. Зависимость мощности ВЧ-генератора, необходимой для поддержания заданного значения I_{beam} от расхода азота f при значениях магнитного поля 18 Гс (сплошные линии) и 70 Гс (пунктирные линии). 1, 1' – 100 мА; 2, 2' – 150 мА; 3, 3' – 200 мА

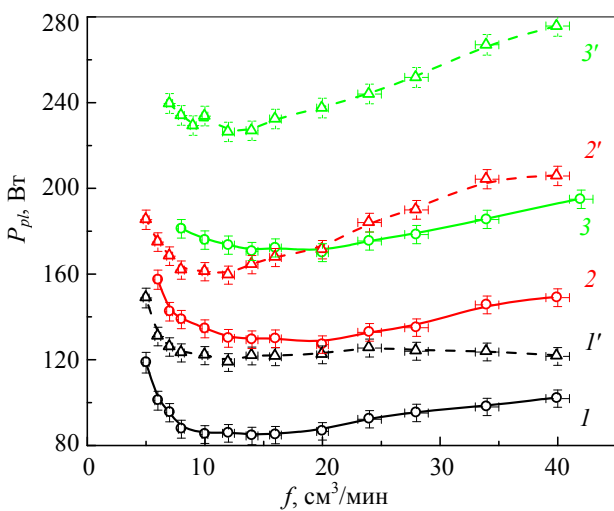


Рис. 4. Зависимость вложенной в плазму мощности P_{pl} от расхода азота при значениях магнитного поля 18 Гс (сплошные линии) и 70 Гс (пунктирные линии). 1, 1' – 100 мА; 2, 2' – 150 мА; 3, 3' – 200 мА

Сравнение характеристик источника ионов, измеренных при двух значениях магнитного поля (рис. 3), демонстрирует, что при токах более 100 мА цена иона при магнитном

поле $B = B_1^*$, меньше, чем при $B = B_2^*$. Например, в азоте, в рабочем диапазоне $f = 10-25 \text{ см}^3/\text{мин}$ для тока 200 мА цена иона для $B = B_1^*$ составляет $C_i^I \approx 1400 \text{ Вт/А}$, в то время как для $B = B_2^*$ она составляет $C_i^{II} \approx 1500 \text{ Вт/А}$.

Результаты, представленные на рисунке 4, позволяют оценить минимально возможные значения цены иона $C_{i0} = P_{pl}/I_{beam}$, которые можно получить, используя рассматриваемую модель ВЧ ИД. В азоте, в рабочем диапазоне $f = 10-25 \text{ см}^3/\text{мин}$ для тока 200 мА цена иона составляет $C_{i0}^I \approx 850 \pm 20 \text{ Вт/А}$ при $B = B_1^*$, при $B = B_2^*$ цена иона выше и составляет $C_{i0}^{II} \approx 1130 \pm 40 \text{ Вт/А}$. Значения C_{i0}^I и C_{i0}^{II} для кислорода близки к полученным в азоте и составляют $C_{i0}^I \approx 900 \text{ Вт/А}$ и $C_{i0}^{II} \approx 1100 \text{ Вт/А}$. Полученные результаты удовлетворяют требованиям для использования данной модели двигателя на СНОО.

Заключение

Выполненные эксперименты подтвердили предположение, что наложение слабого внешнего магнитного поля приведет к увеличению тока ионов при заданном уровне ВЧ-мощности. Как показано в [5], этот эффект связан с возбуждением волн в разряде и проникновением ВЧ-полей в плазменный объем. Предпочтительно использовать внешнее магнитное поле индукции порядка 18 Гс. При указанном магнитном поле достигается наилучшая цена иона C_{i0} , рассчитанная по мощности, вложенной в плазму. Рост C_{i0} при $B \sim 70 \text{ Гс}$, по-видимому, связан с перераспределением плотности плазмы по объему газоразрядной камеры ВЧ ИД. В рабочем диапазоне $f = 10-25 \text{ см}^3/\text{мин}$ для тока 200 мА цена иона составляет величину 1400–1500 Вт/А. Оценка цены иона по величине вложенной в плазму мощности позволяет оценить минимально возможную для рассматриваемого прототипа ВЧ ионного двигателя величину цены иона при работе на остаточных атмосферных газах на частоте 13,56 МГц в 850 Вт/А.

ЛИТЕРАТУРА

Работа выполнена в рамках программы поддержки Междисциплинарных научно-образовательных школ Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Соглашение № 23-ШО1-02.

Исследование выполнялось с использованием оборудования, приобретённого МГУ им. М. В. Ломоносова в рамках закупок «Диагностический комплекс для системы управления параметрами специализированных реакторов с ВЧ и СВЧ активацией плазмы» и «Оборудование для комплектации лаборатории по изучению и разработке широкого спектра методов создания новых наноструктурированных функциональных материалов и устройств на их основе».

1. Erofeev A. I., Nikiforov A. P., Popov G. A., Suvorov M. O., Syrin S. A., Khartov S. A. / Solar System Research. 2017. № 51. P. 639–645.
2. Гордеев С. В., Канев С. В., Суворов М. О., Хартов С. А. / Труды МАИ. 2017. № 96.
3. Чернышев С. Л., Локтионов Е. Ю., Сагалakov А. Э., Скворцов В. В., Филатьев А. С., Успенский А. А. / Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2021. Т. 501. № 1. С. 19–22.
4. Kralkina E. A., Vavilin K. V., Zadiriev I. I., Nekliudova P. A., Shvydkiy G. V. / Vacuum. 2019. № 167. P. 136–144.
5. Кралькина Е. А. / УФН. 2008. Т. 178. № 5. С. 519–540.

PACS: 52.80.-s, 52.80.Pi

The influence of the external magnetic field on the characteristics of the prototype RF air-breathing inductive electric propulsion thruster

V. S. Dudin, K. V. Vavilin, E. A. Kralkina, I. I. Zadiriev, S. A. Dvinin, E. Yu. Loktionov, A. M. Nikonov and G. V. Shvydkiy

Department of Physics, Moscow State University
Bd. 1, 2 Leninskie gory, Moscow, 11991, Russia

Received 9.07.2024; revised 16.08.2024; accepted 12.09.2024

The characteristics of a model of an RF inductive ion engine operating on nitrogen and oxygen with external longitudinal magnetic field applied to the discharge with magnetic induction up to 75 G have been studied. It has been experimentally shown that the highest ion current can be obtained using magnetic fields with an induction of 18 and 70 G. In the operating range $f = 10\text{--}25$ sccm for a current of 200 mA the ion cost, calculated based on the power values of the RF generator, is 1400–1500 W/A. Estimation of the ion cost based on the amount of power absorbed by the plasma allows us to determine the minimum possible value of the ion cost of 850 W/A for the prototype of RF ion engine.

Keywords: ion thruster; RF; IT; Air-breathing electric propulsion; ABEP; inductive; radiofrequency; discharge; plasma; ions; ion cost; VLEO.

REFERENCES

1. Erofeev A. I., Nikiforov A. P., Popov G. A., Suvorov M. O., Syrin S. A. and Khartov S. A., Solar System Research, № 51, 639–645 (2017).
2. Gordeev S. V., Kanev S. V., Suvorov M. O. and Khartov S. A., Proceedings of MAI, № 96 (2017) [in Russian].
3. Chernyshev S. L., Loktionov E. Y., Sagalakov A. E., Skvortsov V. V., Filatyev A. S. and Uspensky A. A., Doklady Physics, **66** (11), 307–310 (2021).
4. Kralkina E. A., Vavilin K. V., Zadiriev I. I., Nekliudova P. A. and Shvydkiy G. V., Vacuum, № 167, 136–144 (2019).
5. Kralkina E. A., Advances in Physical Sciences **178** (5), 519–540 (2008) [in Russian].