

Исследование характеристик высокочастотного ионного двигателя с внешним магнитным полем для использования в составе воздушного электрореактивного двигателя

© К.В. Вавилин,¹ А.А. Голиков,¹ С.А. Двинин,¹ В.С. Дудин,¹ И.И. Задириев,¹ Е.А. Кралькина,¹
Е.Ю. Локтионов,¹ А.М. Никонов,¹ В.В. Сазонов,¹ А.С. Филатьев,^{1,2} Г.В. Швыдкий¹

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия

² Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
125993 Москва, Россия
e-mail: vsd97@list.ru

Поступило в Редакцию 15 июля 2024 г.

В окончательной редакции 23 сентября 2024 г.

Принято к публикации 4 октября 2024 г.

Изучены характеристики модели высокочастотного индуктивного ионного двигателя (ВЧ ИД) диаметром 10 см, работающего на азоте и кислороде, при наложении на разряд внешнего продольного магнитного поля с индукцией не более 75 Г. Экспериментально показано, что внешнее магнитное поле позволяет уменьшить энергозатраты на генерацию тока ионов до 40%. Численные расчеты параметров разряда в азоте продемонстрировали, что существенный вклад в ионный ток и тягу вносят атомарные ионы. Полученные экспериментальные и расчетные данные позволили оценить параметры прототипа ВЧ ИД, определяющие возможности его использования в составе воздушного электрореактивного двигателя.

Ключевые слова: воздушный электрореактивный двигатель, высокочастотный разряд, ультранизкие околоземные орбиты, плазма, ток ионов, коэффициент использования рабочего тела.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59273.230-24

Введение

Длительные полеты космических аппаратов (КА) на ультранизких околоземных орбитах (УНОО) с высотой 120–250 км открывают широкие перспективы для развития телекоммуникаций, транспортных операций, а также широкого круга научных исследований. Преимуществами полетов КА на УНОО являются уменьшение стоимости и размеров КА, улучшение точности геолокации и разрешения изображений поверхности Земли, увеличение отношения сигнал/шум в задачах радиолокации, а также уменьшение радиационного воздействия на КА. Последнее позволяет использовать дешевую, менее радиационно-стойкую электронику на борту КА [1]. На ультранизких орбитах практически исключается риск столкновения с космическим мусором, а при достижении целевого срока службы КА происходит его самоудаление с орбиты вследствие аэродинамического торможения.

Основная проблема длительного поддержания КА на ультранизких орбитах состоит в аэродинамическом торможении КА, вызванном относительно высокой плотностью остаточной атмосферы. Срок активного существования КА без использования двигателей исчисляется днями. Существенно увеличить срок активного существования возможно при оснащении КА электрореактивным двигателем (ЭРД) с малой тягой, достаточной для компенсации аэродинамического сопротивления.

Расчеты показывают, что запасы топлива (например, ксенона), необходимые для длительной работы ЭРД на ультранизких орбитах, неоправданно велики. В связи с этим появилась идея использовать газы остаточной атмосферы в качестве рабочего тела ЭРД. Воздухозаборник, сопряженный с ЭРД, формирует воздушный электрореактивный двигатель (ВЭРД). Поток газов, поступающий в ВЭРД, должен обеспечить возможность создания тяги, необходимой для компенсации аэродинамического сопротивления КА. Теоретическое обоснование методов сбора атмосферных газов и их применения для создания тяги на орбите проводилось еще в 1950–60-х годах [2,3]. Интерес к разработке систем ВЭРД, предназначенных для полетов КА на ультранизких орбитах, возобновился как в России, так и за рубежом с середины 2000-х гг. Обзоры исследований в данном направлении отражены в [3–19].

В отличие от ЭРД на борту КА с запасом рабочего тела (РТ) расход газа в ВЭРД определяется характеристиками набегающего потока и воздухозаборника. За исключением отдельных работ, в которых предполагается установка в воздухозаборник турбомолекулярных насосов, в большинстве современных проектов рассматриваются пассивные воздухозаборники. Они являются наиболее легко реализуемыми на современном технологическом уровне [3,16]. Их особенностью является открытая конструкция, в силу чего часть газа вылетает обратно навстречу набегающему потоку, а для создания тяги может быть использована лишь часть молекул,

прошедшая в газоразрядную камеру (ГРК) электро-реактивного двигателя. Доля набегающих на входное сечение воздухозаборника молекул, попадающих в ГРК, определяется такой характеристикой, как эффективность забора газа η_c .

В настоящее время часто рассматриваются воздухозаборники с узкими каналами в виде сот. В предположении диффузного отражения молекул и полной термализации при столкновении с поверхностью они позволяют на основе принципа „молекулярной ловушки“ обеспечить повышение плотности газа в ГРК в 100–300 раз по сравнению с окружающей атмосферой. Максимальная η_c для воздухозаборников с диффузным отражением составляет около 0.45 [17–19]. При интегральной оптимизации воздухозаборника и высоты полета $\eta_c \in (0.3, 0.4)$ [3]. В последние годы появляются работы, в которых с целью увеличения η_c рассматриваются воздухозаборники в форме параболоида с зеркальным отражением молекул [4,19,20]. Для них теоретически достижим показатель $\eta_c \approx 0.95$, однако возможность длительного сохранения зеркального отражения в среде атомарного кислорода пока не подтверждена [21]. Кроме того, характеристики воздухозаборника в виде параболоида чувствительны к увеличению тепловой скорости молекул и отклонению вектора средней скорости потока от оси симметрии параболоида.

Условие баланса сопротивления и тяги КА на ультранизких орбитах определяет требование к удельному импульсу истекающего из ВЭРД потока газов [1–3]. Среди известных классов ЭРД наибольший удельный импульс характерен для ионных двигателей (ИД), оснащенных системой электростатического ускорения ионов [3]. В связи с этим в настоящей работе в качестве ЭРД для применения в ВЭРД рассматривается высокочастотный (ВЧ) ИД, способный длительно работать на химически активных газах.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования параметров прототипа ВЧ ИД диаметром 10 см, работающего на кислороде и азоте при наличии внешнего магнитного поля. Ранее в работе [22] было показано, что приложение внешнего магнитного поля к разряду при работе ВЧ ИД на ксеноне (частота 13.56 MHz) позволяет существенно улучшить параметры двигателя. Полученные новые экспериментальные данные дают объективное основание рассчитывать на перспективу использования ВЧ ИД в составе ВЭРД.

1. Требования к характеристикам ВЧ ИД для использования в ВЭРД

Условия, необходимые для длительного полета КА на ультранизких орбитах, рассмотрены в работах [1–3]. Одним из условий является компенсация аэродинамического сопротивления D тягой, развиваемой двигателем, T .

Сопротивление определяется выражением (1):

$$D = \rho \frac{v_k^2}{2} C_{xa} A_{ref} = \mu_{in} \frac{v_k}{2} C_{xa} \frac{A_{ref}}{A_{in}}, \quad (1)$$

где ρ и v_k — плотность и скорость атомов и молекул, составляющих остаточную атмосферу, $v_k \approx 7.8$ km/s (орбитальная скорость КА), C_{xa} — коэффициент аэродинамического сопротивления КА, A_{ref} — характерная площадь поперечного сечения КА, A_{in} — площадь поперечного сечения входных каналов воздухозаборника, $\mu_{in} = v_k A_i \sum_j M_j n_j$ — масса частиц, поступающих в воздухозаборник в единицу времени, n_j — концентрация нейтральной компоненты остаточной атмосферы с молекулярной массой M_j .

Часть потока частиц, поступающих в воздухозаборник, отражается от его стенок и выходит навстречу потоку. Доля набегающих на входное сечение воздухозаборника молекул, которые далее проходят в ГРК ЭРД, определяется массовым потоком частиц, поступающих в воздухозаборник, и эффективностью забора газа η_c , т.е. массовый поток частиц μ_{IT} , поступающих в ИД, равняется

$$\mu_{IT} = \eta_c \mu_{in}. \quad (2)$$

Этот массовый поток равен сумме массовых потоков нейтралов μ_{out}^0 и ионов μ_{out}^+ , исходящих из ионно-оптической системы (ИОС) ИД:

$$\mu_{IT} = \mu_{out}^0 + \mu_{out}^+. \quad (3)$$

Нейтральные частицы выходят из ИД с тепловыми скоростями v_t , а ионы со скоростями v_{ex} , определяемыми потенциалом V на эмиссионном электроде ИОС, причем $v_t \ll v_{ex}$. Последнее неравенство означает, что основной вклад в тягу вносят ионы.

Массовый поток ионов определяется суммой массовых потоков молекулярных и атомарных ионов, извлекаемых из ИД:

$$\mu_{out}^+ = \sum_j \frac{M_j}{e} i_j, \quad (4)$$

где e — заряд электрона, i_j ток j -й компоненты ионного потока. Тяга двигателя в случае многокомпонентного рабочего тела равна

$$T = \sum_j M_j \frac{i_j}{e} v_{exj}. \quad (5)$$

В земных экспериментах, когда в прототип ИД поступают молекулярные азот или кислород, возможны два предельных случая: 1) поток извлекаемых ионов состоит только из молекулярных ионов, 2) поток извлекаемых ионов состоит только из атомарных ионов. Принимая во внимание, что массы кислорода и азота близки, получим в первом случае

$$T = v_{exM} M_M \frac{i_{beam}}{e} = v_{exM} \gamma \mu_{IT}, \quad (6a)$$

где i_{beam} — ток ионного пучка, M_M — масса молекулярных ионов, а M_{in} — масса частиц на входе в

воздухозаборник, M_{out} — масса частиц на выходе из ИД, $\gamma = \frac{v_{out}^+ M_{in}}{\mu_{IT} M_{out}}$ — коэффициент использования рабочего тела, т.е. отношение потока вылетающих из ИД ускоренных ионов к потоку нейтральных частиц, поступающих в газоразрядную камеру ионного двигателя.

Во втором случае имеем

$$T = v_{exA} M_A \frac{i_{beam}}{e} = \frac{1}{2} v_{exA} \gamma \mu_{IT}, \quad (6b)$$

где M_A — масса атомарных ионов. Множитель $1/2$ появляется за счет того, что масса частиц, создающих тягу в два раза меньше массы частиц, поступающих в воздухозаборник.

Известно [22,23], что при работе ИД на ксеноне коэффициент γ близок к единице, однако замена ксенона на азот и кислород сопровождается заметным понижением γ [24].

Из условия $T \geq D$ следует, что для успешной работы ИД в составе ВЭРД в первом случае необходимо, чтобы

$$\gamma \geq \frac{v_k}{\eta_c v_{exM}} \frac{C_{xa}}{2} \frac{A_{ref}}{A_{in}}. \quad (7a)$$

а, во втором,

$$\gamma \geq \frac{v_k}{\eta_c v_{exA}} C_{xa} \frac{A_{ref}}{A_{in}}. \quad (7b)$$

Наименьшие требования соответствуют случаю, когда A_{in} равно площади поперечного сечения КА, а C_{xa} минимален. Для КА „компактной“ формы (с длиной корпуса, равной характерному размеру поперечного сечения) в свободномолекулярном потоке можно принять традиционное для оценки сопротивления КА значение $C_{xa}^0 \approx 2.2$. Однако рациональной для длительного полета на ультранизких орбитах является „удлиненная“ форма КА с отношением длины к размеру поперечного сечения более 3 [3,19,25]. Это определяется возможностью снижения силы аэродинамического сопротивления и потребляемой мощности двигателя для его компенсации за счет уменьшения площади поперечного сечения КА при постоянном объеме корпуса КА. Например, у КА GOCE отношение длины к диаметру поперечного сечения составляло около 4 [26], и для такой формы КА с учетом дополнительных панелей солнечных батарей $C_{xa}^1 \approx 3.5$ [26,27].

2. Методика эксперимента

Схема лабораторного прототипа ВЧ ионного двигателя, основанного на индуктивном разряде, показана на рис. 1. Прототип ВЧ ИД состоит из кварцевой ГРК, 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 внешней боковой поверхности ГРК смонтирована соленоидальная антенна, имеющая 3.5 витка. Охлаждаемая проточной водой антенна изготовлена из медной трубки диаметром

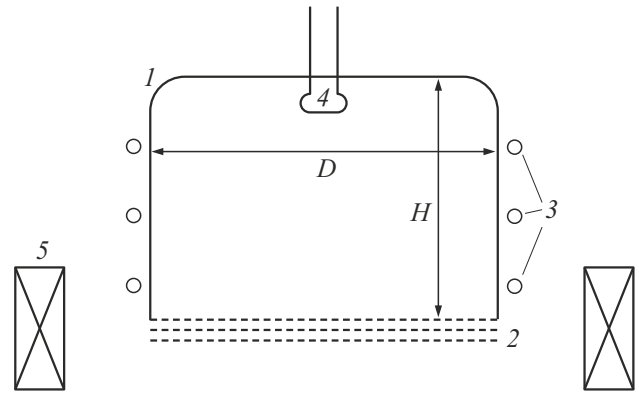


Рис. 1. Схема лабораторного источника ионов: 1 — ГРК, 2 — ИОС, 3 — индуктор, 4 — газоввод, 5 — электромагнит. Диаметр ГРК $D = 10$ см, высота ГРК $H = 7$ см.

3 mm. Антенна используется для поджига и поддержания индуктивного ВЧ разряда в диэлектрической кварцевой газоразрядной камере.

ИОС состоит из трех перфорированных электродов (эмиссионный, ускоряющий и замедляющий) толщиной 1 mm каждый. Расстояние между электродами равняется 0.7 mm. Прозрачность сеток составляет 0.15 для нейтральных частиц и 0.6 для ионов. На электроды ИОС подаются постоянные напряжения, соответствующие схеме „ускорение-замедление“. В настоящих экспериментах напряжение на эмиссионном электроде равнялось $V = 1200$ V. Замедляющий электрод был заземлен.

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

Прототип ВЧ ИД крепился на фланце вакуумной камеры объемом 0.8 m^3 . Откачка вакуумной камеры осуществлялась с помощью форвакуумного и турбомолекулярного насосов. Остаточное давление в вакуумной камере не превышало $3 \cdot 10^{-5}$ Torr. При работающем ВЧ ИД давление в камере не превышало $2 \cdot 10^{-4}$ Torr.

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 W, рабочая частота равнялась 13.56 MHz.

Для измерения расхода газов в пределах от 4 до $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ использовался шариковый расходомер Koflock 1600R. Исследуемый диапазон расходов газа выбирался, исходя из проведенных оценок условий работы двигателя в КА на СНОО.

Известно, что в индуктивном ВЧ разряде часть мощности теряется во внешней цепи ВЧ генератора, при этом баланс мощности имеет вид [28]:

$$P_{gen} = \frac{1}{2} I_{ant}^2 (R_{ant} + R_{pl}), \quad (8)$$

где P_{gen} — мощность ВЧ генератора, I_{ant} — ток, текущий через антенну, R_{ant} — эффективное сопротивление

внешней цепи, R_{pl} — эквивалентное сопротивление плазмы. Величина мощности, поступающая в плазму, P_{pl} , определяется выражением

$$P_{pl} = \frac{1}{2} I_{ant}^2 R_{pl}. \quad (9)$$

Для нахождения P_{pl} в настоящей работе использовалась следующая методика [28]:

1. Сначала определялось эффективное сопротивление внешней цепи по формуле:

$$R_{ant} = 2 \frac{P_{gen}}{I_0^2}, \quad (10)$$

где I_0 — ток, текущий через антенну без разряда.

2. Затем, используя значения R_{ant} , мощность ВЧ генератора и ток через антенну, измеренные при конкретных условиях экспериментов, с помощью формул (8), (9) находились R_{pl} и P_{pl} .

В первой серии проводились измерения зависимости извлекаемого тока ионов i_{beam} от индукции магнитного поля B при фиксированной мощности ВЧ генератора $P_{gen} = 160 \text{ W}$ и расходе исследуемого газа $f = 24 \text{ cm}^3/\text{min}$. Одновременно с помощью пояса Роговского проводились измерения тока I_{ant} , текущего через индуктор, которые позволили вычислить вложенную в разряд мощность P_{pl} . По результатам первой серии экспериментов были найдены значения магнитного поля 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^* .

Измеренные значения ионного тока и расхода газа были использованы для расчета следующих величин:

- цены иона

$$C_i = \frac{P_{gen}}{i_{beam}}; \quad (11)$$

- нижней границей достижимых (при использовании данной модели прототипа ВЧ ИД) значений цены иона

$$C_{i0} = \frac{P_{pl}}{i_{beam}}; \quad (12)$$

- коэффициента использования рабочего тела

$$\gamma = \frac{i_{beam}}{ef}; \quad (13)$$

- удельного импульса

$$I_{sp} = \gamma \frac{v_{ex}}{g}, \quad (14)$$

где e — заряд электрона, M — масса иона, V — потенциал эмиссионного электрода ИОС, v_{ex} — скорость истечения ускоренных ионов, $v_{ex} = \sqrt{\frac{2eV}{M}}$.

Эксперименты проводились на частоте 13.56 МГц при мощностях ВЧ генератора менее 500 W, магнитных полях с индукцией 0–75 G, расходах азота и кислорода 4–40 cm³/min.

3. Результаты экспериментов

Ранее в работе [22] было показано, что параметры ксенонного ВЧ ИД, работающего на частоте 13.56 МГц, существенно улучшаются при наложении на индуктивный ВЧ разряд внешнего магнитного поля B с индукцией менее 100 G. Причина эффекта состоит в улучшении вложения в разряд ВЧ мощности при некоторых резонансных значениях B . Предварительные эксперименты показали [29], что влияние внешнего магнитного поля на индуктивный разряд в азоте и кислороде аналогично влиянию на разряд в ксенеоне. Было обнаружено, что при магнитных полях $B_1^* \sim 18 \text{ G}$ и $B_2^* \sim 70 \text{ G}$ токи ионов при той же мощности ВЧ генератора существенно превышают ионный ток, полученный в отсутствие магнитного поля. Дальнейшие измерения характеристик ВЧ ИД были выполнены при наложении на разряд внешнего магнитного поля с индукцией B_1^* и B_2^* . Эксперименты показали [29], что зависимости $P_{gen}(f)$ имеют вид, типичный для ИД: существует оптимальный рабочий диапазон ($\Delta f = 10 - 25 \text{ cm}^3/\text{min}$), в котором требуемая ВЧ мощность слабо зависит от расхода газа, а цена иона C_i минимальна. При уменьшении расхода газа до некоторой величины f_{crit} происходит резкое возрастание требуемой мощности P_{gen} . Значения расхода f_{crit} тем ниже, чем меньше извлекаемый ток ионов. Увеличение магнитного поля также сопровождается понижением f_{crit} . Это связано с интенсификацией процессов ионизации в разряде при условии, что ларморовский радиус электронов становится много меньше радиуса ГРК.

Рассмотрим далее интересные для оценки возможности использования рассматриваемого ВЧ ИД в качестве основы ВЭРД зависимости мощности ВЧ генератора, цены иона C_i и C_{i0} от коэффициента использования рабочего тела γ , рассчитанного на основании экспериментально измеренных i_{beam} и f по формуле (13). Рассчитанные зависимости представлены на рис. 2 и 3.

Погрешность измерения расхода газа f связана с ценой деления шкалы аналогового расходомера и составляет 5%, погрешность измерения тока i_{beam} составляет 2%, погрешность измерения мощности P_{gen} составляет порядка 5%. Также при расчетах вложенной мощности P_{pl} учитывается дополнительная погрешность измерения тока в индукторе, которая составляла 3%.

Мы видим, что увеличение извлекаемого тока ионов позволяет существенно продвинуться в область больших значений коэффициента использования рабочего тела и понизить цену иона в области $0.2 < \gamma < 0.4$. Сравнение характеристик источника ионов, измеренных при двух значениях магнитного поля, демонстрирует, что при увеличении γ выше некоторой величины γ^* цена иона при магнитном поле $B = B_1^*$ становится выше, чем при $B = B_2^*$. Значения γ^* увеличиваются с ростом извлекаемого тока. При токе пучка ионов 200 мА и $\gamma = 0.3$ цена иона C_i составляет 1500 W/A при использовании азота.

Как отмечалось выше, не вся мощность ВЧ генератора поглощается плазмой, часть мощности теряется

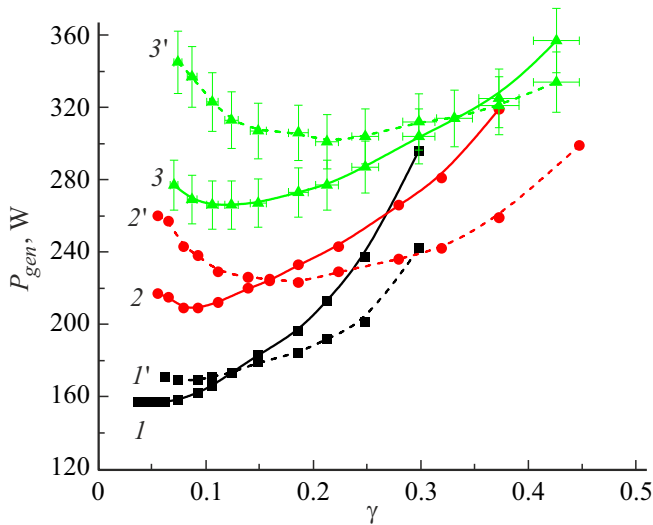


Рис. 2. Зависимость мощности ВЧ генератора P_{gen} , необходимой для поддержания заданного значения i_{beam} при работе на азоте, от коэффициента использования рабочего тела γ при значениях магнитного поля 18 G (сплошные линии) и 70 G (штриховые линии): I, I' — 100; $2, 2'$ — 150; $3, 3'$ — 200 mA.

во внешней цепи разряда. На рис. 3, b показаны зависимости цены иона $C_{i0}(\gamma)$, рассчитанные на основании величин мощности P_{pl} , поглощенной плазмой. Они представляют собой наилучшие теоретически возможные характеристики рассматриваемого прототипа ВЧ ИД. В отличие от $C_i(\gamma)$ (рис. 3, a) значения $C_{i0}(\gamma)$ ниже при магнитном поле $B = B_1^*$, чем при $B = B_2^*$. В азоте, при $\gamma > 0.15$, $B = B_1^*$ и $i_{beam} = 200$ mA цена иона составляет $C_{i0}^I \approx 875$ W/A, при $B = B_2^*$ цена иона выше и составляет $C_{i0}^{II} \approx 1150$ W/A. Значения C_{i0}^I и C_{i0}^{II} для кислорода близки к полученным в азоте и составляют $C_{i0}^I \approx 900$ W/A и $C_{i0}^{II} \approx 1100$ W/A соответственно. Отметим, что полученные наилучшие значения C_{i0}^I значительно выше величин, характерных для ВЧ ИД, работающих на ксеноне.

В реальности вклад в измеренный ионный ток вносят как атомарные, так и молекулярные ионы. Соотношения между концентрациями указанных компонент плазмы было оценено на основании численной модели разряда в ВЧ ИД в азоте.

4. Результаты расчетов параметров прототипа ВЧ ИД

Численная модель разряда в азоте в ВЧ ИД, позволяющая рассчитать концентрацию основных компонент плазмы, ионный ток, тягу и удельный импульс при заданных геометрии ГРК, параметрах ИОС, величинах B и f , основана на следующих предположениях:

- плазма состоит из нейтральных молекул и атомов азота в основном состоянии, молекулярных и атомарных ионов азота, электронов;

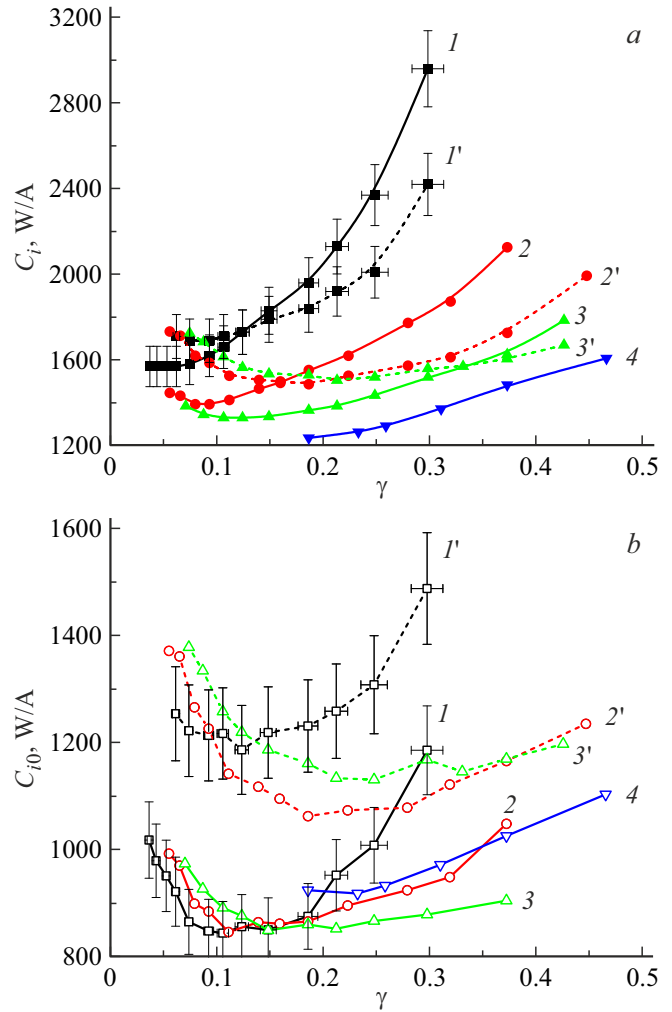
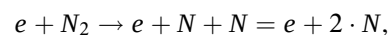


Рис. 3. Зависимость цены иона C_i (a) и C_{i0} (b) при работе на азоте при значениях магнитного поля 18 G (сплошные линии) и 70 G (штриховые линии) от γ коэффициента использования PT: I, I' — 100; $2, 2'$ — 150; $3, 3'$ — 200; 4 — 250 mA.

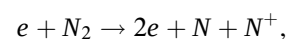
- функция распределения электронов по энергиям является максвелловской;
- плазма однородна как по радиусу, так и по длине ГРК.

Предполагалось, что в плазме идут следующие реакции при столкновениях электронов с тяжелыми частицами:

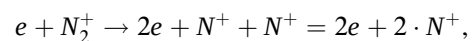
диссоциация молекул азота:



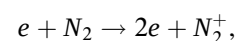
диссоциативная ионизация молекул азота:



диссоциативная ионизация молекулярного иона азота:



ионизация молекул азота:



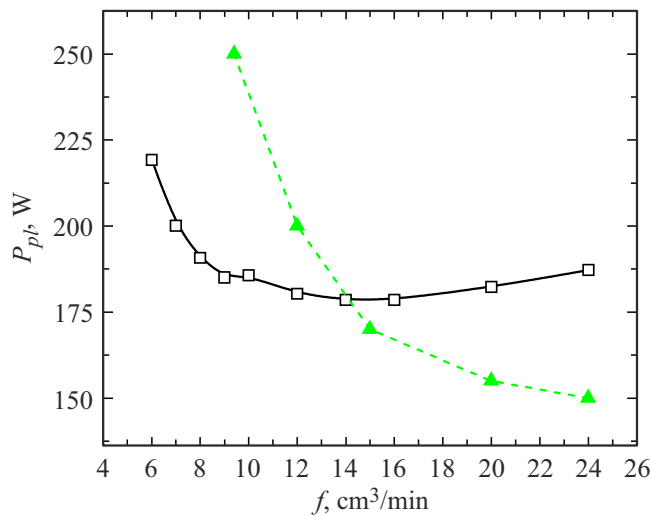
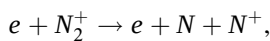
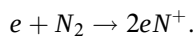


Рис. 4. Измеренная и рассчитанная (сплошная и штриховая кривые) зависимости ВЧ мощности, требуемой для извлечения ионного тока 200 мА, от расхода азота.

диссоциация молекулярного иона азота:



ионизация атомов азота:



Расчет концентраций молекул и атомов азота, молекулярных и атомарных ионов азота проводился на основе системы уравнений баланса, описывающих рождение и гибель компонент плазмы [30]. Столкновения тяжелых частиц между собой, а также кинетика процессов, происходящих с участием вращательных и колебательных мод молекул, не рассматривались, так как давление в ГРК не превышает 1 мТорр.

Результаты численных расчетов зависимостей концентраций молекул и атомов азота n_{N_2} , n_N , молекулярных и атомарных ионов $n_{N_2^+}$, n_{N^+} , а также параметров прототипа ВЧ ИД — тока ионов i_{beam} , тяги T и т.д. от расхода азота, выполненные на основании параметров использованной в экспериментах ИОС, показали качественное согласие результатов расчета и экспериментов (рис. 4).

Как видно, при больших расходах азота рассчитанные значения P_{pl} оказываются ниже экспериментальных примерно на 10%, однако при уменьшении расхода резкий рост требуемой мощности в расчетах начинается существенно раньше, чем в экспериментах. Это может быть связано с ростом емкостной компоненты разряда с уменьшением f .

На рис. 5 показаны зависимости тока ионов на выходе из ВЧ ИД от расхода азота, рассчитанные при ВЧ мощностях $P_{pl} = 100, 150, 200$ и 250 Вт. i_{beam} растет с увеличением ВЧ мощности и падает с уменьшением расхода. Падение тока ионов связано с резким ростом

рассчитанных значений температуры электронов при уменьшении f .

Рассмотрим далее, как ведут себя компоненты азотной плазмы при изменении расхода газа и ВЧ мощности. Результаты расчетов приведены на рис. 6.

Как видно, в разряде при всех рассмотренных расходах азота наблюдается интенсивная диссоциация молекул, причем концентрация атомов выше концентрации молекул. Отношение $n_N/(n_{N_2} + n_N)$ слабо зависит от расхода азота и изменяется от величины порядка 0.5 до 0.75 при увеличении ВЧ мощности от 100 до 250 Вт.

При мощности 100 Вт число ионов азота меньше, чем число молекулярных ионов. Однако при увеличении P_{pl} до 200 Вт концентрация n_{N^+} в разряде становится преобладающей. Это приводит к тому, что при мощностях более 200 Вт основной вклад в тягу вносят атомарные ионы (рис. 7). Суммарно при вкладываемой в плазму мощности 250 Вт и при расходе азота $12 \text{ cm}^3/\text{min}$ можно получить тягу порядка 7 мН.

5. Оценка применимости модели ВЧ ИД в качестве составной части ВЭРД

Полученные экспериментальные данные позволяют оценить основные характеристики рассмотренной модели ВЧ ИД. В качестве базовых значений величины η_c , характеризующей эффективность забора нейтральных компонент остаточной атмосферы воздухозаборником, целесообразно рассмотреть диапазон с минимальной границей $\eta_{c \min} = 0.3$ и максимальной $\eta_{c \max} = 0.45$.

При проведении оценок примем, что $v_k = 7.8 \cdot 10^3 \text{ m/s}$, скорость ионов v_{ex} определяется потенциалом эмиссионного электрода $V = 1500 \text{ V}$.

Рассмотрим сначала наиболее простой случай, когда $C_{\chi a} \approx 2.2$, а $\frac{A_{ref}}{A_{in}} = 1$. Если весь поток ионов состоит из атомарных ионов азота и кислорода, скорость v_{ex} будет примерно равна $130 \cdot 10^3 \text{ m/s}$. Простые вычисления по формулам (7) показывают, что для компенсации сопротивления остаточной атмосферы необходимы режимы работы ВЧ ИД, при которых $\gamma_a \geq 0.26$ в случае $\eta_c = 0.45$ и $\gamma_a \geq 0.4$ при $\eta_c = 0.3$. Сравнивая полученные значения с достигнутыми экспериментально, можно видеть, что условие (7b) выполняется при токах пучка ионов 150, 200 и 250 мА при расходах газа менее 6, 7 и $9 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Скорость молекулярных ионов ниже атомарных и составляет примерно $90 \cdot 10^3 \text{ m/s}$, однако их молекулярная масса в 2 раза больше, вследствие этого предельно допустимые значения газовой эффективности составляют $\gamma_m \geq 0.18$ и $\gamma_m \geq 0.29$ для $\eta_c = 0.45$ и 0.3 соответственно. Здесь для компенсации сопротивления остаточной атмосферы необходимы режимы работы ВЧ ИД, позволяющие получить ионные токи 150, 200 и 250 мА при расходах газа менее 7.5, 10 и $12.5 \text{ cm}^3/\text{min}$.

При наличии в пучке извлекаемых ионов как молекулярных, так и атомарных ионов требуемые значения

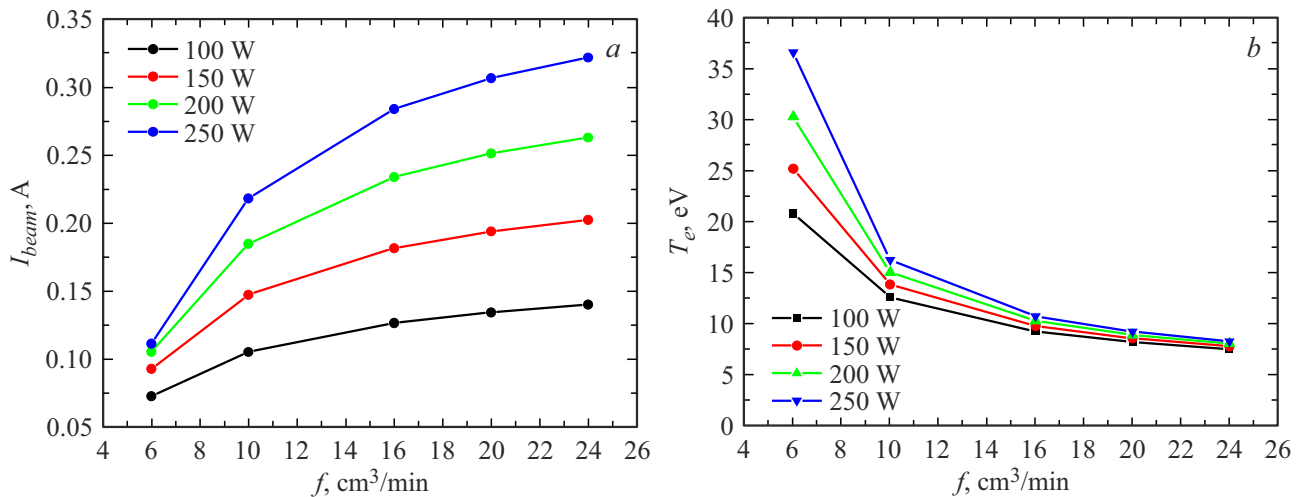


Рис. 5. Рассчитанные зависимости тока ионов на выходе из ВЧ ИД (а) и температуры электронов (b) от расхода азота, рассчитанные при ВЧ мощностях $P_{pl} = 100, 150, 200, 250$ W.

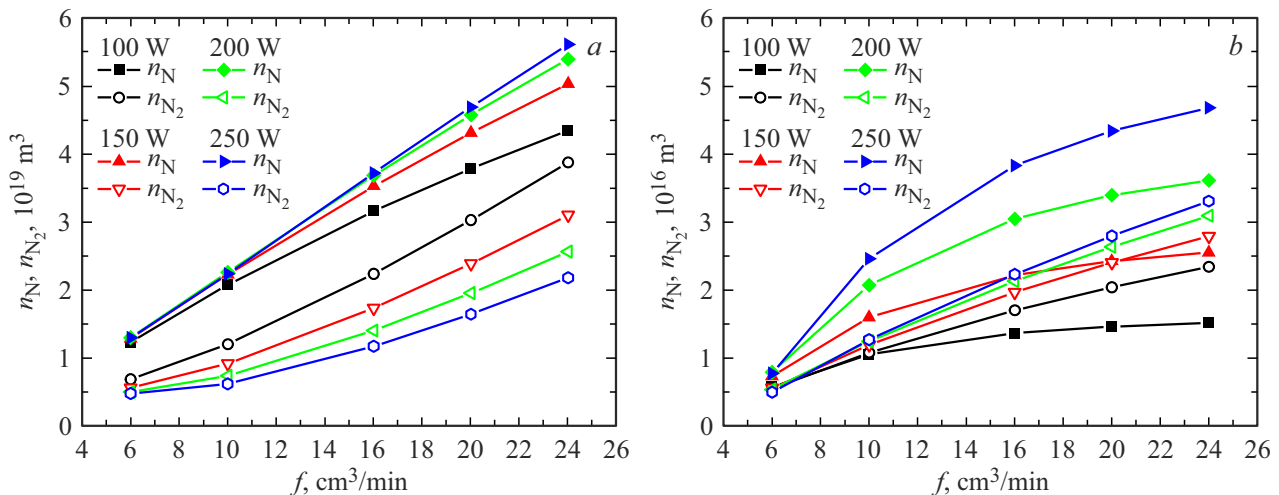


Рис. 6. Рассчитанные зависимости концентраций молекул и атомов (а), молекулярных и атомарных ионов (b) от расхода азота, рассчитанные при ВЧ мощностях $P_{pl} = 100, 150, 200, 250$ W.

газовой эффективности лежат в промежутке между значениями расхода газа, рассчитанными при условии, что в потоке находятся только молекулярные или атомарные ионы.

В случае, если $C_{xa} \approx 3.5$, требования к газовой эффективности существенно повышаются: $\gamma_m \geq 0.32$, $\gamma_a \geq 0.46$. Достижение последней величины возможно только при использовании ионных токов 250 mA и более, что может привести к снижению времени жизни ИОС.

Заключение

В работе рассмотрена возможность использования прототипа ВЧ ИД диаметром 10 см с рабочей частотой 13.56 MHz в составе воздушного ЭРД. Эксперимен-

тально показано, что наложение на разряд внешнего продольного магнитного поля с индукцией не более 75 G позволяет существенно улучшить характеристики двигателя. Измеренные зависимости мощности ВЧ генератора, требуемые для поддержания заданной величины ионного тока, от расхода азота и кислорода имеют вид, типичный для ИД: существует оптимальный рабочий диапазон, в котором требуемая ВЧ мощность слабо зависит от расхода газа. При уменьшении расхода газа до некоторой величины f_{crit} происходит резкое возрастание требуемой мощности P_{gen} . Значения расхода f_{crit} тем ниже, чем меньше извлекаемый ток ионов. Оценки показывают, что для преодоления силы аэродинамического сопротивления остаточной атмосферы необходим расход газа менее 9 или 13 cm³/min при условии, что поток ионов состоит только из атомарных или молекулярных ионов.

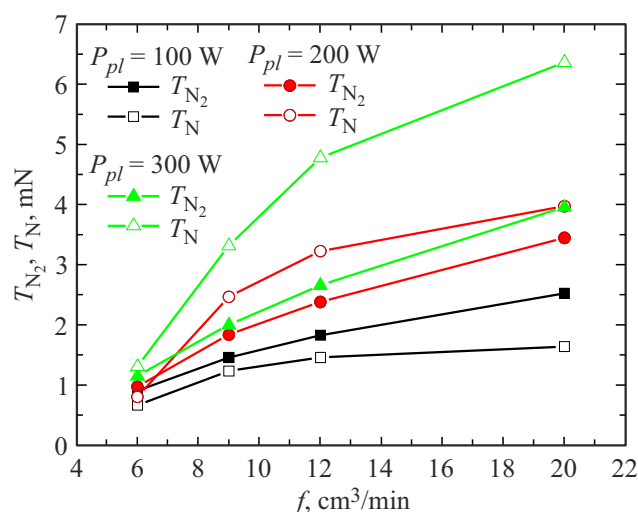


Рис. 7. Рассчитанные зависимости тяги, создаваемой молекулярными и атомарными ионами от расхода азота, рассчитанные при ВЧ мощностях $P_{pl} = 100, 200, 300$ W. Энергия ионов предполагалась равной 1500 V.

Численные расчеты параметров разряда в азоте продемонстрировали, что существенный вклад в ионный ток и тягу вносят атомарные ионы. Полученные экспериментальные и расчетные данные позволили оценить параметры прототипа двигателя, в частности достигаемые значения удельного импульса, определяющие возможности использования ВЧ ИД в качестве составной части воздушного ЭРД.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках программы поддержки Междисциплинарных научно-образовательных школ Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Соглашение № 23 Ш01 02. Исследование выполнялось с использованием оборудования, приобретенного 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“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

Список литературы

- [1] А.С. Филатъев, А.А. Голиков. Докл. РАН. Физика, технические науки, **508**, 68 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686740023010030>

- [2] В.Я. Маров, А.С. Филатъев. Космические исследования, **56** (2), 137 (2018). <https://doi.org/10.7868/S0023420618020061>
- [3] A.S. Filatyev, A.A. Golikov, A.I. Erofeev, S.A. Khartov, A.S. Lovtsov, D.I. Padalitsa, V.V. Skvortsov, O.V. Yanova. Progr. Aerospace Sci. **136**, 100877 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2022.100877>
- [4] Peng Zheng, Jianjun Wu, Yu Zhang, Biqi Wu. Intern. J. Aerospace Eng. Article ID 8811847, 21 (2020). <https://doi.org/10.1155/2020/8811847>.
- [5] F. Romano, R.F. Helicon. *Plasma Thruster for an Atmosphere-Breathing Electric Propulsion System (ABEP)*. (PhD thesis, Institute of Space Systems (IRS), University of Stuttgart, 2021)
- [6] K. Fujita. Transactions Jpn. Society Mechan. Eng. B, **70** (700), 3038 (2004). <http://ci.nii.ac.jp/naid/110004999698/en/>
- [7] Y. Hisamoto, K. Nishiyama, H. Kuninaka. *Development Statue of Atomic Oxygen Simulator for Air Breathing Ion Engine* (32nd Intern. Electric Propulsion Conf., Wiesbaden, Germany, September 11–15, 2011), IEPC-2011-294
- [8] Y. Hisamoto, K. Nishiyama, H. Kuninaka. *Design of air intake for air breathing ion engine* (in: 63rd Intern. Astronautical Congress, IAC-12, Naples, Italy, 1–5 October 2012), IAC-12-C4.4.10
- [9] M. Tagawa, K. Yokota, K. Nishiyama, H. Kuninaka, Y. Yoshizawa, D. Yamamoto, T. Tsuboi. J. Propulsion and Power, **29** (3), 501 (2013). <http://dx.doi.org/10.2514/1.B34530>
- [10] K. Diamant, *A 2-stage cylindrical hall thruster for air breathing electric propulsion* (in: 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Nashville, TN, 25–28 July 2010), AIAA 2010-6522
- [11] G. Cifali, T. Misuri, P. Rossetti, M. Andrenucci, D. Valentian, D. Feili, B. Lotz. *Experimental characterization of HET and RIT with atmospheric propellants* (32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11–15, 2011), IEPC-2011-224
- [12] A. Shabshelowitz. *Study of RF plasma technology applied to air-breathing electric propulsion* (Ph.D. thesis, University of Michigan, 2013)
- [13] K. Hohman. *Atmospheric breathing electric thruster for planetary exploration* (Busek Co. Inc. 11, 2012), p. 01760–1023.
- [14] A.I. Erofeev, A.P. Nikiforov, G.A. Popov, M.O. Suvorov, S.A. Syrin, S.A. Khartov. Solar System Research, **51** (7), 639 (2017). <https://doi.org/10.1134/S0038094617070048>
- [15] С.В. Гордеев, С.В. Канев, М.О. Суворов, С.А. Хартов. *Оценка параметров прямоточного высокочастотного ионного двигателя* (Труды МАИ. В. № 96)
- [16] S. Barral, G. Cifali, R. Albertoni, M. Andrenucci, L. Walpot. *Conceptual Design of an Air-Breathing Electric Propulsion System, Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science* (34th Intern. Electric Propulsion Conf. and 6th Nano-satellite Symposium, Hyogo-Kobe, Japan, July 4–10, 2015), IEPC-2015-271/ISTS-2015-b-271
- [17] Jianjun Wu, Peng Zheng, Yu Zhang, Haibin Tang. Prog. Aero. Sci., **133**, 100848 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2022.100848>
- [18] C. Rapisarda, P.C. Roberts, K.L. Smith. Acta Astronaut., **202**, 77 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.09.047>

- [19] G. Herdrich et al., *Plasma Thruster*, **215**, 245 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.11.009>
- [20] P. Zheng, J. Wu, Y. Zhang, Y. Zhao. *Vacuum*, **195**, 110652 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110652>
- [21] T. Andreussi, E. Ferrato, V. Giannetti. *J. Electr. Propuls.*, **9**, 1 (2022). <https://doi.org/10.1007/s44205-022-00024-9>
- [22] E.A. Kralikina, K.V. Vavilin, I.I. Zadiriev, P.A. Nekliudova, G.V. Shvydkiy. *Vacuum*, **167**, 136 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.05.041>
- [23] D.M. Goebel, I. Katz. *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters* (John Wiley & Sons, 2008),
<http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9780470436448>
- [24] B. Lotz. *Plasma physical and material physical aspects of the application of atmospheric gases as a propellant for Ion-Thruster of the RIT-Type* (Inaugural dissertation to graduate to the doctor's degree in natural sciences at the Justus-Liebig-University of Giessen, May 2013)
- [25] M. Tisaev, E. Ferrato, V. Giannetti, C. Paissoni, N. Baresi, A. Lucca Fabris, T. Andreussi. *Acta Astronaut.*, **191**, 374 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.11.011>
- [26] G. Koppenwallner. *AIP Conf. Proceed.*, **1333**, 1307 (2011).
<https://doi.org/10.1063/1.3562824>
- [27] Y. Ko, S. Kim, G. Moon, M. Yi, K. Park, Y. Kim, E. Jun. *Acta Astronaut.*, **212**, 198 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.07.043>
- [28] Е. Кралькина. *УФН*, **178** (5), 519 (2008).
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0178.200805f.0519>
- [29] В.С. Дудин, К.В. Вавилин, И.И. Задириев, С.А. Двинин, Е.А. Кралькина, Е.Ю. Локтионов, А.М. Никонов, Г.В. Швыдкий. *Прикладная физика*, (в печати).
- [30] Yukikazu, Itikawa. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **35**, 31 (2006).
<https://doi.org/10.1063/1.1937426>