

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 9. С. 419–429
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 9, pp. 419–429

Научная статья
УДК 621.455.4
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186288>
EDN: <https://www.elibrary.ru/ECIYUH>

Исследования высокочастотного ионного двигателя с четырехэлектродной системой ускорения

О.Д. Пейсахович^{1✉}, А.В. Мельников², А.И. Могулкин³, С.А. Хартов⁴, В.К. Абгарян⁵

^{1,2,3,4,5}НИИ ПМЭ МАИ, Москва, Российская Федерация

^{1,2,4}МАИ, Москва, Российская Федерация

¹oleg_peysakhovich@mail.ru✉

Аннотация. В данной статье представлены результаты отработки лабораторного образца высокочастотного ионного двигателя с четырехэлектродной системой ускорения, который может работать в двух режимах – режиме с повышенной тягой и режиме с повышенным удельным импульсом. Для проведения исследований был доработан лабораторный образец двигателя с цилиндрической газоразрядной камерой и диаметром плазменного пучка 150 мм. Была произведена интеграция четырехэлектродной системы ускорения в классическую конструкцию ионного двигателя с 3-мя электродами. Произведено сравнение интегральных характеристик двигателя с трех- и четырехэлектродными системами ускорения.

Приведены расчеты траекторий ионов в 3-х и 4-х электродных ионно-оптических системах двигателей. Показана принципиальная возможность работы двигателя с 4-х электродной ионной оптикой в двух режимах.

Ключевые слова: четырехэлектродная система ускорения ионов, многорежимный электроракетный двигатель, ионно-оптическая система, высокочастотный разряд, ионный пучок

Для цитирования. Пейсахович О.Д., Мельников А.В., Могулкин А.И., Хартов С.А., Абгарян В.К. Исследования высокочастотного ионного двигателя с четырехэлектродной системой ускорения // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 9. С. 419–429. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186288>

Original article

Research of a high-frequency ion thruster with a four-electrode acceleration system

O.D. Peysakhovich^{1✉}, A.V. Melnikov², A.I. Mogulkin³, S.A. Khartov⁴, V.K. Abgaryan⁵

^{1,2,3,4,5}*Research Institute of PME MAI, Moscow, Russian Federation*

^{1,2,4}*MAI, Moscow, Russian Federation*

¹*oleg_peysakhovich@mail.ru✉*

Abstract. This article presents the results of testing a laboratory prototype of a high-frequency ion thruster with a four-electrode acceleration system, which can operate in two modes - a mode with increased thrust and a mode with increased specific impulse. To conduct the research, a laboratory model of the thruster with a cylindrical gas-discharge chamber and a plasma beam diameter of 150 mm was modified. The four-electrode acceleration system was integrated into the classic design of the ion thruster with 3 electrodes. A comparison of the integral characteristics of the thruster with three- and four-electrode acceleration systems was made. Calculations of ion trajectories in 3- and 4-electrode ion-optical systems of thrusters are given. The fundamental possibility of operating the thruster with 4-electrode ion optics in two modes is shown. The principle of operation of the ion extraction/acceleration system (IES) in ion thrusters is based on an electrostatic acceleration mechanism. The design of the IES is a multiparametric task that requires consideration of plasma parameters in the discharge chamber (DC), which directly affect its geometric configuration. Calculations of ion trajectories in the IES are typically performed using software tools [5] and [6]. The classical three-electrode IES consists of an emission electrode (EE), an accelerating electrode (AE), and an exit electrode (XE), sometimes referred to as a decelerating electrode (DE). The electric field strength between the EE and AE, together with the plasma density in the discharge chamber, determines the shape of the plasma boundary—the plasma meniscus. In qualification and flight ion thruster models, the EE potential typically does not exceed 2000 V, while the AE voltage is set within about 10% of the EE potential. The extraction capability of the IES is significantly influenced by the thickness of the EE [3], whereas the thruster lifetime is largely determined by the thickness of the AE [7]. The use of a four-electrode acceleration system makes it possible to redistribute the accelerating voltage, for example 4 kV, among the emission, extraction, and accelerating electrodes. This reduces the potential drop in the interelectrode gaps, for instance to about 2 kV, thereby providing additional margin against electrical breakdown across the gaps.

Keywords: four-electrode ion acceleration system, multi-mode electric rocket thruster, ion-optical system, high-frequency discharge, ion beam

For citation. Peysakhovich O.D., Melnikov A.V., Mogulkin A.I., Khartov S.A., Abgaryan V.K. Research of a high-frequency ion thruster with a four-electrode acceleration system. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 9, pp. 419–429. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186288>

Введение

В настоящее время одной из перспектив применения электроракетных двигателей (ЭРД) на космических аппаратах (КА) является обеспечение двухрежимности их работы. В одном случае

двигатели могут применяться в режиме повышенной тяги, а в другом случае в режиме повышенного удельного импульса тяги. Режим повышенной тяги необходим при выполнении перелета с минимальными временными затратами.

Например, это задачи по довыведению КА или коррекции его орбиты. Режим повышенного удельного импульса тяги позволит экономить рабочее тело при точном позиционировании КА на орбите. Возможность работы на этих двух режимах позволяет осуществлять с использованием одного двигательного блока как довыведение при межорбитальном маневре КА, так и коррекцию положения КА на целевой орбите.

Одним из типов ЭРД, с помощью которого реализован такой полет КА, является ионный двигатель (ИД) - XIPS-25 [1], рабочий процесс в котором построен по схеме с разрядом постоянного тока. Данный двигатель способен работать на двух режимах с мощностями 2 кВт и 4,2 кВт и тягой 80 мН и 166 мН соответственно. Технические характеристики двигателя XIPS-25 на двух режимах представлены в таблице 1 [1].

Таблица 1. Характеристики ИД XIPS-25

Параметр	Режим пониженной мощности (коррекция и ориентация)	Режим повышенной мощности (довыведение и межорбитальный маневр)
Диаметр пучка, мм	250	
Мощность ЭРД, кВт	2,0	4,2
Удельный импульс, км/с (с)	34 (3420)	35,5 (3550)
Тяга, мН	80	166
КПД, %	67	68,8
Коэффициент использования рабочего тела (КИРТ), %	80	82,5
Энергия пучка, эВ	1215	1215
Ток пучка, А	1,45	3,05

В зависимости от режима работы мощность ЭРД меняется более чем в 2 раза. Двухрежимность XIPS-25 обеспечивается путем изменения расхода рабочего тела, вкладываемой в результате этого в плазменный разряд мощности, при сохранении постоянной величины ускоряющего напряжения в ионно-оптической системе – около 1200 В.

В исследуемом в рамках данной работы лабораторном образце четырехэлектродного высокочастотного ионного двигателя ВЧИД-15М регулировка осуществлялась варьированием подводимой ВЧ мощностью, расходом рабочего тела, а также мощностью пучка при изменении уско-

ряющего напряжения от 2 кВ до 4 кВ. Технические характеристики рассматриваемого в работе двигателя, разработанного в НИИ ПМЭ МАИ, сравнивались с характеристиками отечественных ИД с разрядом постоянного тока разработки ведущего предприятия России АО ГНЦ «Центр Келдыша», а также с характеристиками двигателя RIT-15 LP, разработанного в Гессенском университете Германии. Последняя модель двигателя является наилучшей по заявленным характеристикам моделью двигателя средней мощности на основе ВЧ разряда. Характеристики данных моделей двигателей приведены в табл. 2 [2, 3]. Во всех упомянутых двигателях применяется традиционная 3-х электродная ИОС.

Таблица 2. Параметры современных моделей ИД [4, 5]

Параметр:	ИД-200	ИД-200КР	RIT-15 LP
Диаметр пучка, мм	200	200	150
Мощность ЭРД, кВт	5	3	1,275–1,325
Удельный импульс, км/с (с)	63,7 (6370)	44,1 (4410)	29-36 (2900–3600)
Тяга, мН	100	85	2,5–50

1. Системы ускорения ионов в ионных двигателях

Принцип работы системы ускорения ионов рабочего тела ИОС – в ионных двигателях основан на электростатическом механизме ускорения. Подробное описание и сравнения различных конфигураций ИОС представлены в работе [4]. Проектирование ИОС является многопараметрической задачей, в которой должны быть учтены параметры плазмы в газоразрядной камере (ГРК), непосредственно влияющие на ее геометрическую конфигурацию. Определяющим критерием эффективности ИОС является форма плазменного мениска, который образуется вблизи отверстий эмиссионного электрода и является границей раздела сред между плазмой ГРК ионным потоком. В зависимости от плотности плазмы в РК и распределения электростатического поля в ИОС мениск может менять радиус кривизны и даже смещаться вглубь отверстия эмиссионного электрода. Расчеты траекторий ионов в ИОС обычно проводятся в программных продуктах, например, описанных в [5] и [6].

Классическая трехэлектродная ИОС состоит из эмиссионного (ЭЭ), ускоряющего (УЭ) и вы-

ходного электродов (ВЭ), иногда называемого замедляющим (ЗЭ). Напряженность электрического поля между ЭЭ и УЭ совместно с плотностью плазмы РК задает форму границы плазмы – плазменного мениска. Обычно в квалификационных и летных ионных моделях ИД потенциал ЭЭ не превышает 2000 В, а напряжение на УЭ задается в пределах 10 % от потенциала ЭЭ. На извлекающую способность ИОС существенное влияние оказывает толщина ЭЭ [3], а ресурс ИД определяется в значительной мере толщиной УЭ [7]. В современных ИД ресурс заявлен более 30 тыс. часов [1].

Классическая трехэлектродная ИОС может быть выполнена из трех перфорированных электродов, или двух перфорированных и третьим замедляющим электродом (ЗЭ), выполненным в виде кольца. Во втором случае поверхность УЭ, обращенная к плазме по потоку, подвержена сильной эрозии за счет бомбардировки ионами перезаряди и образовавшимся в области нейтрализации потока. Отличием четырех электродной ИОС является добавление извлекающего электрода (ИЭ) между ЭЭ и УЭ.

Обычно при испытаниях ИД производят отработку двигателя во всем диапазоне расходов и мощностей и регистрируют интегральные характеристики по постоянному току пучка при заданном ускоряющем напряжении. Так, для оценки эффективности ВЧИД в [3], были получены интегральные характеристики двух двигателей RIT-15 и RIT-15LT, ускоряющее напряжение на всех режимах работы составляло 900 В. Графики зависимости ВЧ мощности от расхода рабочего тела представлены на рис. 1.

Оптимальная область работы ВЧИД находится в зоне, где отношение мощности к расходу, т.е. цены одного ампера ионного тока, имеет минимальное значение и стремится к значению 300 Вт/А и даже меньше [3]. В работе [3] было показано, что на величину извлекаемого ионного тока влияет толщина ЭЭ. На рис. 2 представлены зависимости цены иона от коэффициента использования рабочего тела (КИРТ) для двух моделей ИД RIT-15 (на графике обозначен как «Двигатель I») и RIT-15LT (на графике обозначен как «Двигатель II») при различной толщине эмиссионного электрода (ток пучка 400 мА, тяга 20 мН).

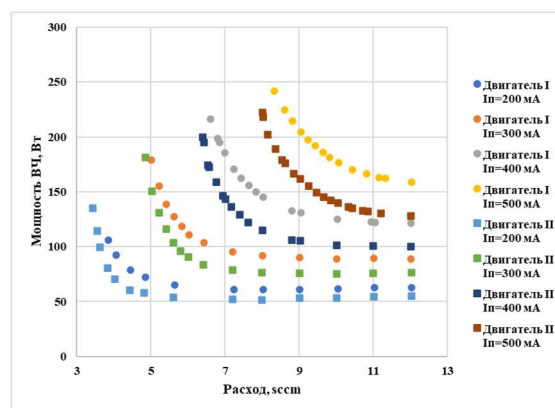


Рис. 1. Интегральные характеристики двигателей RIT-15 и RIT-15LT

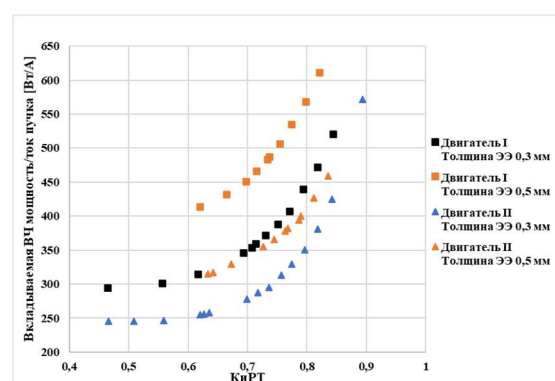


Рис. 2. Сравнение эффективности двух моделей двигателей RIT-15 и RIT-15LT при различной толщине ЭЭ

Из представленных зависимостей видно, что использование эмиссионного электрода толщиной 0,3 мм, вместо 0,5 мм, позволяет снизить величину вкладываемой ВЧ мощности для того же извлекаемого тока ионного пучка приблизительно на 20 %. То есть при неизменной ВЧ мощности уменьшение толщины ЭЭ позволит извлечь больше ионного тока.

На величину извлекаемого тока из ИОС также влияет величина межэлектродного зазора между ЭЭ и УЭ. Уменьшение зазора позволяет повысить предельную плотность тока $j_{пр}$, оцениваемую с помощью закона Чайлда–Ленгмюра [7]:

$$j_{пр} = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{M}} \frac{U_{\Sigma}^{3/2}}{\delta^2 + \frac{d^2}{4}}, \quad (1)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; $e = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл – элементарный электрический заряд; M – масса иона рабочего тела, кг; $U_{\Sigma} = U_+ + U_-$ – ускоряющая разность потенциа-

лов, B ; δ – величина межэлектродного зазора, м; d – диаметр отверстия эмиссионного электрода, м.

Во время работы ионных двигателей электроды ИОС могут быть подвержены значительным температурным деформациям [8], что накладывает определенные ограничения на уменьшение межэлектродного зазора. Еще одним ограничивающим фактором при выборе межэлектродного зазора является пробойное напряжение. Значения минимального межэлектродного зазора с учетом запаса в 35 % для основных материалов электродов ИОС ИД (молибден – Мо, углерод-углеродные композитные материалы – УУКМ, пиролитический графит – ПГ) представлены на рис. 3. На рисунке видно, что допустимый межэлектродный зазор при напряжении 2 кВ лежит в диапазоне от 0,9 до 1,4 мм, а при напряжении 4 кВ – от 1,3 до 2,1 мм. При работе в режиме повышенного удельного импульса с ускоряющим напряжением 4 кВ, минимально допустимый зазор при использовании молибденовых электродов составляет порядка 1,3 мм. В летных образцах двигателей межэлектродные зазоры обычно составляют около 0,7 мм – 1,2 мм.

Очевидно, что при сохранении тех же зазоров между ЭЭ и УЭ вероятность нестабильной работы из-за возможных пробоев возрастает при переходе на более высокие разности потенциалов между электродами ИОС. Использование четырехэлектродной системы ускорения позволяет перераспределить ускоряющее напряжение, например, в 4 кВ между эмиссионным, извлекающим и ускоряющим электродами, снизив падение потенциала в межэлектродных зазорах, например, до 2 кВ, и обеспечив таким образом запас по пробойной прочности зазоров.

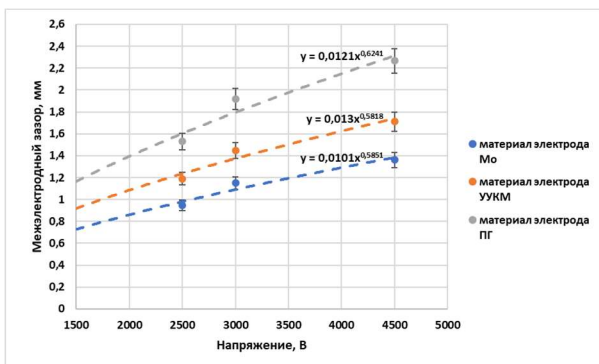


Рис. 3. Зависимости предельного межэлектродного зазора от напряжения пробоя для различных материалов ИОС

2. Расчет траекторий положительных ионов в трех- и четырехэлектродной ИОС

В работе были произведены сравнительные расчеты траекторий ионов в трех- и четырехэлектродной ИОС ВЧИД-15М. Расчеты выполнялись в программе IGUN [6] для определения конфигурации ионного пучка на четырех режимах работы двигателя. Геометрические параметры расчетной ячейки ИОС приведены в табл. 3.

Таблица 3. Геометрические параметры ячейки ИОС ВЧИД-15М с четырехэлектродной системой ускорения

Параметр:	Значение:
Диаметр отверстия ЭЭ, мм	2,5
Диаметр отверстия ИЭ, мм	1,6
Диаметр отверстия УЭ, мм	2,5
Диаметр отверстия ВЭ, мм	3,0
Межэлектродный зазор ЭЭ-ИЭ, мм	1
Межэлектродный зазор ИЭ-УЭ, мм	1
Межэлектродный зазор УЭ-ВЭ, мм	1
Толщина ЭЭ, мм	0,8
Толщина ИЭ, мм	1
Толщина УЭ, мм	1

Концентрация плазмы в разрядной камере двигателя на всех режимах работы задавалась равной 2×10^{17} 1/м³, что по примерным оценкам соответствует предельному рассматриваемому току пучка 0,5 А. Температура электронов в плазме разряда принималась равной 3 эВ.

На рис. 4–7 представлены результаты численного моделирования траекторий ионов в ячейке ИОС ВЧИД-15М на четырех режимах работы двигателя. На рис. 4 представлен расчет траекторий ионов в ячейке четырехэлектродной ИОС экспериментального режима с повышенным удельным импульсом и ускоряющим напряжением, равным 4 кВ.

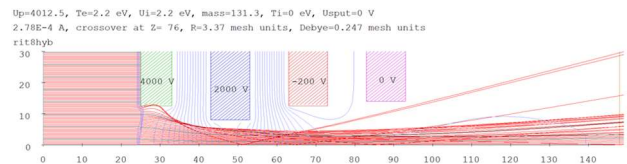


Рис. 4. Результаты расчета траекторий ионов в четырехэлектродной ИОС ВЧИД-15М в режиме 4 кВ

На рис. 5 приведен расчет траекторий ионов в четырехэлектродной ячейке ИОС, которая работает в режиме «трехэлектродной», что достигается если потенциал ИЭ задается равным нулю. Как видно из рис. 5, в этом случае наблюдается прогиб плазменного мениска в сторону ИЭ, что

связано с недостаточной напряженностью электрического поля в силу увеличения межэлектродного зазора с 1 мм до 3 мм. Однако прямого попадания ионного пучка (перехвата ионов) на УЭ не обнаружено. Часть ионов, как видно на рисунке, формально попадает на ВЭ. Однако этим обстоятельством можно пренебречь, так как ВЭ выполнен в виде кольцевого фланца, а для работы использованной программы Igun формально ЗЭ должен быть геометрически размещен при задании граничных условий.

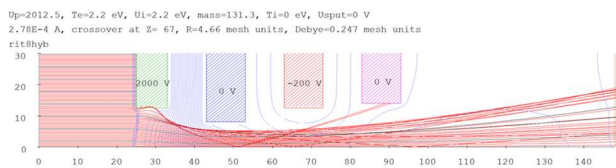


Рис. 5. Траекторий ионов в четырехэлектродной ИОС двигателя ВЧИД-15М в режиме 2 кВ

На рис. 6 представлен расчет траекторий ионов в ячейке трехэлектродной ИОС экспериментального режима с повышенным удельным импульсом, при ускоряющем напряжении 4 кВ.

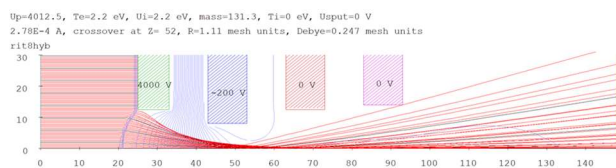


Рис. 6. Траекторий ионов в трехэлектродной ИОС двигателя ВЧИД-15М в режиме 4 кВ

На рис. 7 представлен классический режим работы трехэлектродной ИОС, с ускоряющим напряжением 2 кВ.

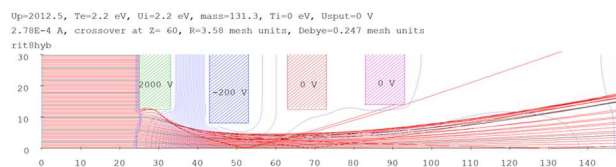


Рис. 7. Траектории ионов в трехэлектродной ИОС двигателя ВЧИД-15М в режиме 2 кВ

Проведенные расчеты траекторий ионов продемонстрировали достаточно приемлемый вид выходящего из двигателя ионного пучка с допустимым по величине углом расходимости и отсутствием перехвата ионного пучка ускоряющим электродом, что дало основание для проведения экспериментальной отработки четырехэлектродной ИОС на указанных четырех режимах работы.

3. Экспериментальная часть

В рамках экспериментальных исследований была проведена оценка интегральных характеристик по постоянному току пучка лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя ВЧИД-15М с четырехэлектродной системой ускорения при ее работе на ксеноне. Целью исследования была апробация работы четырехэлектродной ИОС в составе ВЧИД и получение полного спектра характеристик двигателя. Фотография лабораторного образца ВЧИД-15М, работающего в вакуумной камере, представлена на рис. 8.



Рис. 8. ВЧИД-15М в вакуумной камере во время работы

Исходный ВЧИД-15 представлял собой лабораторный образец ионного двигателя с ИОС, имеющей три перфорированных электрода. Эмиссионный электрод (ЭЭ) контактирует с плазмой ГРК, за ним расположен ускоряющий электрод (УЭ), затем замедляющий электрод (ЗЭ). Принципиальная схема элементарной ячейки и распределение потенциала в ней представлены на рис. 9.

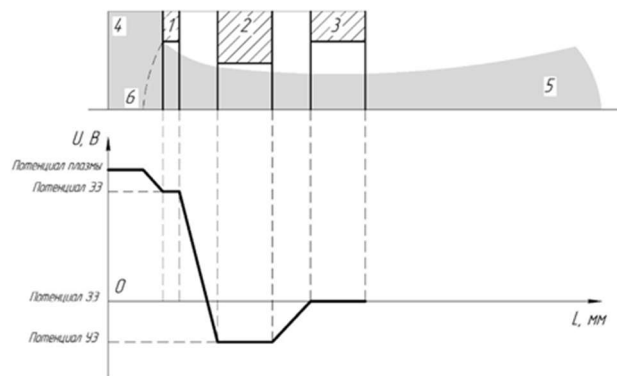


Рис. 9. Принципиальная схема элементарной ячейки трехэлектродной ИОС: 1 – эмиссионный электрод, 2 – ускоряющий электрод, 3 – замедляющий электрод, 4 – плазма РК, 5 – плазма ионного пучка, 6 – плазменный мениск

Для создания четырехэлектродной системы ускорения в конструкцию ИОС ВЧИД-15 был интегрирован четвертый кольцевой электрод. Это обеспечило возможность подвода необходимого потенциала к трем перфорированным электродам, а четвертый при этом выполнял роль ВЭ.

Эксперимент проходил в три этапа. Первый этап включал в себя отработку ИОС в классическом трехэлектродном режиме. Такая схема была реализована путем заземления третьего электрода. На втором этапе был использован дополнительный источник питания в цепи ИЭ, на которой поддерживался нулевой потенциал (см. рис. 10 а). Этот режим являлся аналогом трехэлектродной схемы. Третий этап экспериментального исследования заключался в испытании четырехэлектродной ИОС в режиме повышенного удельного импульса с ускоряющим напряжением 4 кВ (см. рис. 10 б).

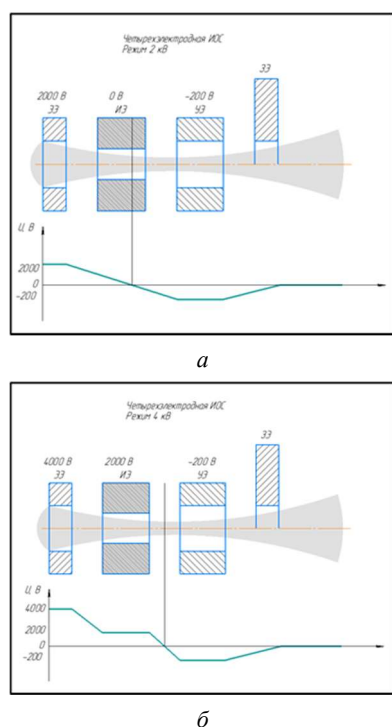


Рис. 10. Схема режимов работы ИОС: а – режим трехэлектродной ИОС; б – режим четырехэлектродной ИОС

Интегральные характеристики по постоянному ионному току определялись, начиная с максимальной ВЧ мощности и минимального расхода рабочего тела. Постоянство извлекаемого ионного тока пучка контролировалось измерениями тока в цепи ЭЭ. Также проводились измерения тока в цепях ИЭ и УЭ. В эксперименте использовались высоковольтные источники пи-

тания производства ООО НТЦ «Платар». Регистрация параметров производилась вольтметрами В7-78/2, погрешность которых составляет $\pm 0,008\%$. Для питания индуктора лабораторной модели использовался ВЧ генератор Seren R1001, который в диапазоне частот от 1,7 до 2,1 МГц, позволяет работать с мощностью до 1000 Вт. Стоит упомянуть, что ВЧ потери в согласующем устройстве могут достигать 40–50 % от вкладываемой ВЧ мощности [2]. Во всех интегральных зависимостях по постоянному току пучка отраженная ВЧ мощность не превышала 20 Вт. Погрешность измерения исходящей ВЧ мощности у R1001 составляла $\pm 2\%$. Для управления расходом использовался регулятор расхода газа (РРГ) MKS Instruments 1179C с цифровым блоком управления и индикации MKS 247D Readout. Погрешность этих приборов по величине расхода РТ составляет $\pm 0,1 \dots 0,35$ ст. см³/мин. Во всех этапах эксперимента в качестве рабочего тела использовался ксенон.

Интегральные характеристики ВЧИД-15М с ИОС, работающей в трехэлектродном режиме при ускоряющем напряжении 2 кВ, представлены на рис. 11, а при напряжении 4 кВ – на рис. 12.

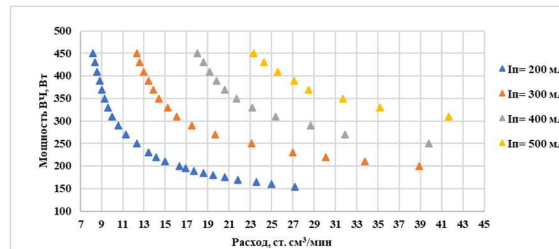


Рис. 11. Интегральные характеристики ВЧИД-15М с ИОС, работающей в трехэлектродном режиме (ускоряющее напряжение – 2 кВ)

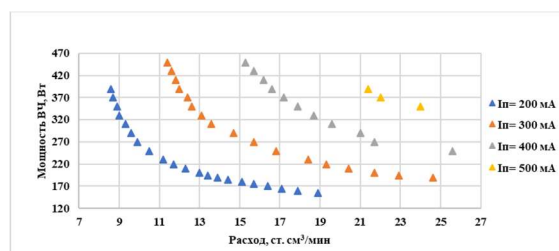


Рис. 12. Интегральные характеристики ВЧИД-15М с ИОС, работающей в трехэлектродном режиме (ускоряющее напряжение – 4 кВ)

При извлекаемом ионном токе равном 500 мА наблюдалась нестабильная работа ИОС. Диапазон работы двигателя по расходу рабочего газа был ограничен расходами от 21 до 24 ст. см³/мин.

Интегральные характеристики ВЧИД-15М с ИОС, работающей в четырехэлектродном режиме при ускоряющих напряжениях 2 кВ и 4 кВ, представлены на рис. 13 и на рис. 14 соответственно. Режим с ускоряющим напряжением 2 кВ был организован следующим образом. ЭЭ находился под потенциалом 2 кВ, а на источнике питания ИЭ устанавливалось нулевое значение напряжения, УЭ находился под потенциалом – «минус» 200 В. Целью исследования режима была проверка возможности работы четырехэлектродной ИОС в режиме «трехэлектродной», т.е. при организации ускоряющей разности потенциалов между ЭЭ и УЭ. При этом межэлектродный зазор оценивался как расстояние между ЭЭ и УЭ и составлял 3 мм. При работе на ускоряющем напряжении 2 кВ двигатель работал стабильно при величине ионного пучка от 200 до 300 мА. Переход на ионные токи со значениями более 300 мА выполнить не удалось, так как наблюдалось замыкание цепей ЭЭ и ИЭ, что может свидетельствовать о проникновении плазмы ГРК в межэлектродный между ЭЭ и УЭ ввиду недостаточной напряженности электрического поля в области ЭЭ, что влекло за собой прогиб плазменного мениска в область ИЭ.

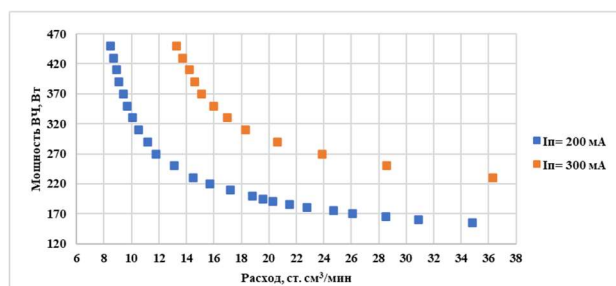


Рис. 13. Интегральные характеристики ВЧИД-15М с ИОС, работающей в четырехэлектродном режиме (ускоряющее напряжение – 2 кВ)

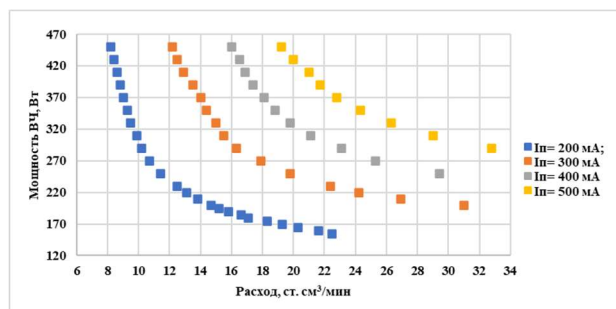


Рис. 14. Интегральные характеристики ВЧИД-15М с ИОС, работающей в четырехэлектродном режиме (ускоряющее напряжение – 4 кВ)

Работа двигателя на ускоряющем напряжении 4 кВ была стабильной во всем диапазоне извлекаемых токов. Это обусловлено тем, что ИОС работала в оптимальном режиме, а межэлектродные зазоры были расчетными и равными 1 мм. При выходе на режим с ионным током равным 500 мА при расходе ксенона от 21 до 32 ст. см³/мин., наблюдалась более стабильная работа по сравнению с работой на таком же режиме на трехэлектродной ИОС. Это могло быть связано с тем, что разница потенциалов 4 кВ перераспределена между ЭЭ, ИЭ и УЭ, в то время как на трехэлектродной ИОС 4 кВ распределены в межэлектродном зазоре между ЭЭ и УЭ.

4. Анализ результатов эксперимента

Полученные в экспериментах результаты позволили провести сравнение основных параметров модели двигателя ВЧИД-15М в двух режимах работы с трех- и четырехэлектродной ИОС.

Одними из основных параметров работы ИД являются цена иона C_i , определяющая эффективность вклада ВЧ мощности в разряд, и коэффициент использования рабочего тела β , который показывает эффективность использования рабочего тела, подаваемого в ГРК. Данные параметры выражаются следующим образом:

$$C_i = \frac{N_{ВЧ}}{I_i}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{I_i M_{Xe}}{e \dot{m}}, \quad (3)$$

где $N_{ВЧ}$ – ВЧ мощность, Вт; I_i – ток извлекаемого ионного пучка, А; M_{Xe} – масса иона ксенона, кг; \dot{m} – массовый расход ксенона, кг/с.

Тягу двигателей ВЧИД определяют только по ионной компоненте:

$$P = \dot{m}_i V_i. \quad (4)$$

При этом массовый расход ионов РТ \dot{m}_i через ИОС можно найти по известной величине извлекаемого тока ионного пучка I_i :

$$\dot{m}_i = \frac{I_i M_i}{e}, \quad (5)$$

где M_i – масса иона РТ, кг.

Скорость ионов V_i зависит от значения заданного потенциала на эмиссионном электроде U_+ и определяется из следующего соотношения:

$$V_i = \sqrt{\frac{U_+ 2e}{M_i}}. \quad (6)$$

Зная массовый расход ионов, можно оценить величину удельного импульса тяги:

$$I_{уд} = \frac{P}{\dot{m}_{РТ}} = \frac{\dot{m}_i V_i}{\dot{m}_{РТ}} = \beta V_i. \quad (7)$$

Полный КПД двигателя определяется следующим образом:

$$\eta_T = \frac{P^2}{2\dot{m}_{РТ}N}, \quad (8)$$

где в общем случае полная потребляемая ВЧИД электрическая мощность может быть представлена следующим образом:

$$N = N_{ВЧ} + N_{П} + N_{КН}, \quad (9)$$

где $N_{ВЧ}$ – приходящая от ВЧ генератора мощность; $N_{П} = I_i U_+$ – мощность, затрачиваемая на ускорение ионного пучка; $N_{КН}$ – мощность, потребляемая катодом-нейтрализатором. В рамках данной серии экспериментов $N_{КН} = 0$, ввиду того работа двигателя происходила без использования катода-нейтрализатора.

Плотность тяги классического ВЧИД, определяется следующим соотношением:

$$P_S = \frac{P}{S_{эл}}, \quad (10)$$

где $S_{эл}$ – площадь УЭ.

Результаты расчетов основных параметров работы двигателя представлены в виде диаграмм на рис. 15–18. Сравнение ведется при значении равенности потенциалов в первом межэлектродном зазоре 2 кВ для обеих систем ускорения. Результаты, полученные в данной работе, сравниваются с результатами исследований ВЧИД-15-1 на рабочем теле ксенон, проведенными автором работы [10].

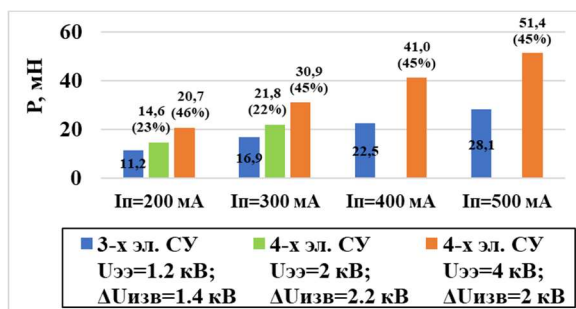


Рис. 15. Оценка прироста тяги

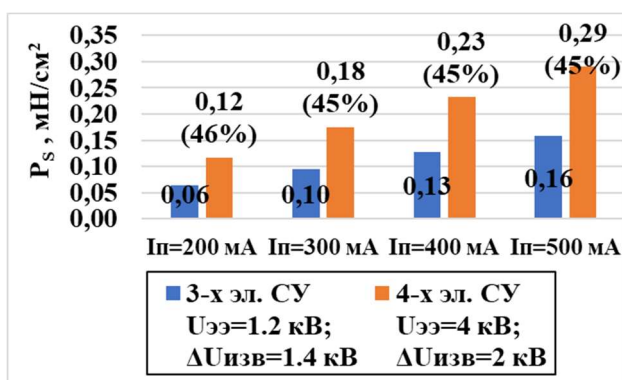


Рис. 16. Оценка прироста плотности тяги

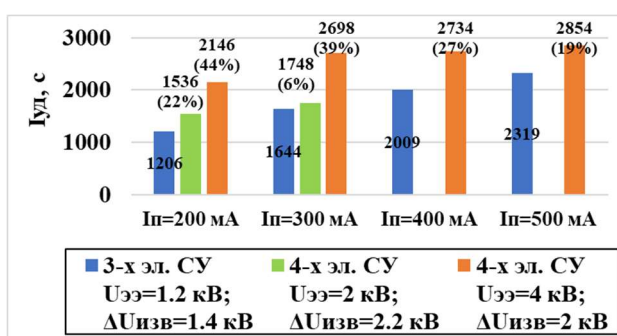


Рис. 17. Оценка прироста удельного импульса

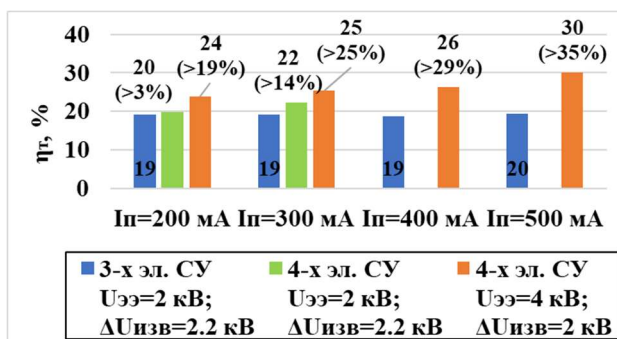


Рис. 18. Оценка прироста КПД

5. Расчетная оценка характеристик перспективного ВЧИД с повышенным удельным импульсом

С целью оценки возможных характеристик перспективного ВЧИД выбранного типоразмера с четырехэлектродной системой ускорения, который потенциально можно будет использовать в миссиях, где требуются удельные импульсы свыше 7500 с, был проведен ряд расчетов. Геометрические параметры ИОС такого двигателя представлены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры ИОС перспективного ВЧИД-15М с четырехэлектродной системой ускорения

Параметр:	Значение:
Диаметр отверстия ЭЭ, мм	2,5
Диаметр отверстия ИЭ, мм	1,6
Диаметр отверстия УЭ, мм	2,5
Диаметр отверстия ВЭ, мм	3,0
Межэлектродный зазор ЭЭ-ИЭ, мм	0,8
Межэлектродный зазор ИЭ-УЭ, мм	1,5
Межэлектродный зазор УЭ-ВЭ, мм	1
Толщина ЭЭ, мм	0,3
Толщина ИЭ, мм	1
Толщина УЭ, мм	1

Используя характерные для данного двигателя значения концентрации плазмы 2×10^{17} 1/м³ и температуры электронов ~ 3 эВ в программном продукте IGUN [4] была рассчитана конфигурация ионного пучка в единичной ячейке ИОС. По сравнению с лабораторным образцом, на котором проводились экспериментальные исследования, толщина ЭЭ была уменьшена с 0,8 мм до 0,3 мм, что позволило увеличить извлекаемый ток с единичной ячейки с $2,78 \times 10^{-4}$ А до $3,35 \times 10^{-4}$ А. Результаты моделирования ионного пучка представлены на рис. 19–20.

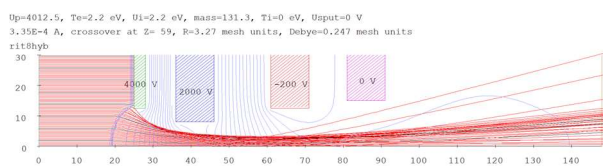


Рис. 19. Режим с ускоряющим напряжением 4 кВ

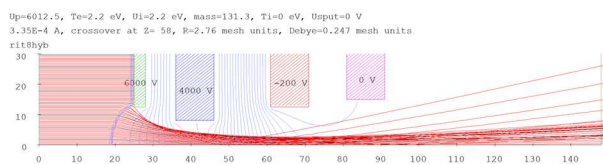


Рис. 20. Режим с ускоряющим напряжением 6 кВ

Наглядно положение характеристик перспективного ВЧИД-15М среди уже существующих ИД можно увидеть на графике зависимости удельного импульса от тяги на рис. 21.

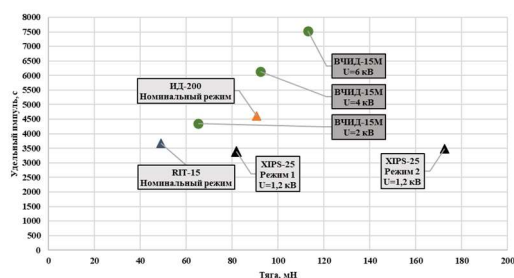


Рис. 21. Параметры ВЧИД-15М относительно существующих ИД

Плотность тяги лабораторного образца ВЧИД-15-4 составила 0,29 мН/см², в то время как плотность тяги летного образца ИД XIPS-25 с трехэлектродной СУ составляет от 0,163 до 0,338 мН/см². Для данного типоразмера ИД это предельное значение, так как прозрачность электродов уже выведена на предельную технологичность и не может быть увеличена, а предельно достижимая плотность плазмы ограничена предельной мощностью разряда. Концепция четырехэлектродной СУ заключается в повышении плотности тяги путем увеличения ускоряющего напряжения во втором межэлектродном зазоре, что невозможно сделать в классической трехэлектродной СУ. Таким образом интеграция четырехэлектродной СУ в уже существующие ИД позволит повысить плотность тяги путем увеличения ускоряющего напряжения с 900 В – 2 кВ в существующих ИД до 4 кВ и выше. Например, такое решение позволит увеличить плотность тяги XIPS-25 до 0,617 мН/см² при ускоряющем напряжении 4 кВ.

Заключение

Проведены исследования лабораторного образца высокочастотного ионного двигателя с четырехэлектродной системой ускорения. Показана возможность более стабильной работы на ускоряющем напряжении 4 кВ. Получены зависимости ВЧ мощности разряда от массового расхода рабочего тела при постоянных токах пучка в диапазоне от 200 мА до 500 мА. Проведены расчеты траекторий ионов в ячейках обоих вариантов ИОС, в том числе и в перспективном ИД с удельным импульсом тяги 7500 с и выше. Основной вывод, который можно сделать после проведенного исследования, состоит в том, что при ускоряющих напряжениях более 4 кВ использование четырехэлектродных ионно-оптических систем вместо трехэлектродных дает существенный выигрыш в основных технических характеристиках ионных двигателей, таких как тяга, плотность тяги, коэффициент использования рабочего тела, удельный импульс и др.

Список источников

1. Goebel D.M., Polk J.E., Wirz R.E. et al. Qualification of Commercial XIPS Ion Thrusters for NASA Deep Space Missions Jet Propulsion Laboratory. Pasadena: California Institute of Technology.

2. Ловцов А.С., Селиванов М.Ю., Томилин Д.А. и др. Основные результаты разработок Центра Келдыша в области ЭРДУ // Известия РАН. Энергетика. 2020. № 2. С. 3–15. DOI: 10.31857/S0002331020020077
3. Leiter H.J. et al. Performance Improvement of Radiofrequency Ion Thrusters - The Evolution of the RIT 15 Ion Thruster. IEPC-99-154 // 26th International Electric Propulsion Conference (17-21 Oct. 1999, Kitakyushu, Japan).
4. Пейсахович О.Д., Мельников А.В., Могулкин А.И. и др. Высокочастотный ионный двигатель с четырехэлектродной ионно-оптической системой // Инженерный журнал: наука и инновации. 2025. №4.
5. Программа «Моделирование потоков заряженных частиц в ионно-оптических системах ионных двигателей (IOS-3D)». Версия 6.4.0.1 // Государственный научный центр Российской Федерации – федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша».
6. Программный комплекс IGUN.
7. Goebel D.M., Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters (JPL Space Science & Technology Series). John Wiley & Sons, 2008. 486 p.
8. Могулкин А.И. Механико-математическая модель деформаций профилированных электродов ионных двигателей. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2015.
9. Свотина В.В. Высокочастотный ионный двигатель системы бесконтактной транспортировки объектов космического мусора. Дисс. ... канд. техн. наук: Москва, 2023.
10. Coletti M., Gessini P., Gabriel S.B. A 4-gridded ion thruster for high impulse mission // 31st International Electric Propulsion Conference (Ann Arbor, MI, USA, 2009).
11. Суворов М.О. Тяговый узел прямоточного воздушного электроракетного двигателя: Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2018. 154 с.

References

1. Goebel DM, Polk JE, Wirz RE et al. *Qualification of Commercial XIPS Ion Thrusters for NASA Deep Space Missions Jet Propulsion Laboratory*. Pasadena: California Institute of Technology.
2. Lovtsov AS, Selivanov MYu, Tomilin DA et al. Main Results of the Keldysh Center's Developments in the Field of ERDU. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2020;(2):3–15. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0002331020020077
3. Leiter HJ et al. Performance Improvement of Radiofrequency Ion Thrusters - The Evolution of the RIT 15 Ion Thruster. IEPC-99-154. *26th International Electric Propulsion Conference (17-21 Oct. 1999, Kitakyushu, Japan)*.
4. Peisakhovich OD, Mel'nikov AV, Mogulkin AI et al. High-frequency ion engine with a four-electrode ion-optical system. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*. 2025;(4). (In Russ.).
5. *Modeling of charged particle flows in ion-optical systems of ion engines (IOS-3D)*. 6.4.0.1. Gosudarstvennyi nauchnyi tsentr Rossiiskoi Federatsii – federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie «Issledovatel'skii tsentr imeni M.V. Keldysha». (In Russ.).
6. The software package IGUN. (In Russ.).
7. Goebel DM, Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters (JPL Space Science & Technology Series). John Wiley & Sons; 2008. 486 p.
8. Mogulkin AI. *Mechanical and mathematical model of deformations of profiled electrodes of ion engines*. PhD. thesis. Moscow. 2015. (In Russ.).
9. Svitina VV. *High-frequency ion engine for the non-contact transportation of space debris*. PhD. thesis. Moscow. 2023. (In Russ.).
10. Coletti M, Gessini P, Gabriel SB. A 4-gridded ion thruster for high impulse mission. *the 31st International Electric Propulsion Conference (Ann Arbor, MI, USA, 2009)*.
11. Suvorov MO. *Direct-flow air electric rocket engine traction unit*. PhD. thesis. Moscow. 2018. 154 p. (In Russ.).