

Совершенствование схемы ионного двигателя. III. Оптимизация ионно-оптической системы

© Н.К. Федянин, А.А. Дьяков

Государственный научный центр Российской Федерации „Исследовательский центр им. М.В. Келдыша“,
125438 Москва, Россия
e-mail: nikita.fedyanin@gmail.com

Поступило в Редакцию 9 октября 2024 г.

В окончательной редакции 22 ноября 2024 г.

Принято к публикации 26 ноября 2024 г.

Описан процесс оптимизации ионно-оптической системы на основе результатов численного моделирования. Основными целями работы являются повышение эффективной прозрачности ионно-оптической системы для ионов и расширение верхней границы диапазона фокусируемых плотностей тока. В качестве способов оптимизации используются изменение формы апертур с круглой на гексагональную, уменьшение ширины перемычек между апертурами и уменьшение ширины межэлектродного зазора. Созданная конфигурация ионно-оптической системы обладает преимуществом перед используемой ранее по всем основным параметрам, за исключением ресурса.

Ключевые слова: электроракетный двигатель, газоразрядная камера, ионно-оптическая система, пучок ионов, цена иона, газовая эффективность.

DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59475.319-24

Введение

Ионный двигатель (ИД) — один из наиболее распространенных типов электроракетных двигателей, обладающий характерными высокими значениями удельного импульса и ресурса. Основными составными частями ИД являются газоразрядная камера (ГРК), отвечающая за формирование плазмы посредством ударной ионизации нейтральной компоненты рабочего тела электронами, ионно-оптическая система (ИОС), извлекающая из плазмы ГРК ионы и создающая тягу посредством их электростатического ускорения, и нейтрализатор, эмитирующий в пучок ускоренных ионов электроны, компенсируя его положительный заряд [1].

Чаще всего ИОС ИД состоит из эмиссионного (ЭЭ) и ускоряющего электродов (УЭ), представляющих собой две пластины, изготовленные из тугоплавкого металла или углерода и перфорированные круглыми апертурами [2]. Извлечение, фокусировка и ускорение пучка ионов происходит за счет приложения к электродам высокой разности потенциалов. Электроны из плазмы ГРК не могут преодолеть данную разность потенциалов, в результате чего вблизи ЭЭ происходит разделение зарядов и формируется плазменная граница, за пределы которой, в пространство между электродами ИОС, проникают только ионы. Хотя и в меньшей концентрации, но за пределами ИД также находится плазма, называемая плазмой пучка. Для предотвращения извлечения из нее электронов в апертурах УЭ создается для них потенциальный барьер за счет подачи на электрод более низкого, чем у плазмы пучка, потенциала [3]. Наиболее распространенная схема единичной ячейки ИОС и распределение потенциала в ней представлены на рис. 1.

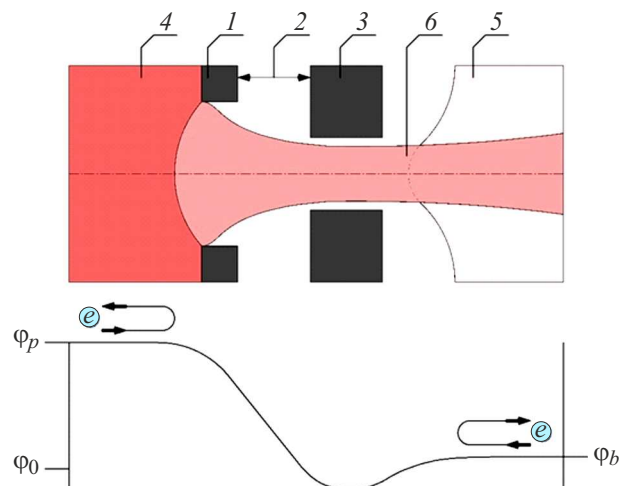


Рис. 1. Схема единичной ячейки ИОС и распределение потенциала в ней: 1 — ЭЭ; 2 — межэлектродный зазор; 3 — УЭ; 4 — плазма ГРК; 5 — плазма пучка; 6 — единичный пучок ионов; ϕ_p — потенциал плазмы ГРК; ϕ_b — потенциал плазмы пучка; ϕ_0 — потенциал корпуса космического аппарата.

Одним из наиболее важных параметров ИОС является ее эффективная прозрачность для ионов. Ионы, которые попадают на перемычки между апертурами ЭЭ, нейтрализуются на его поверхности и возвращаются в ГРК в виде атомов, на повторную ионизацию которых необходимы дополнительные затраты энергии. Чем выше эффективная прозрачность ИОС для ионов, тем меньше цена иона, и тем выше КПД двигателя [4].

По причине того, что рабочее тело в ГРК ионизируется не полностью, другим крайне важным параметром

Таблица 1. Общие параметры исследуемых конфигураций ИОС

Параметр	d_s, mm	d_a, mm	t_s, mm	t_a, mm	φ_p, V	φ_s, V	φ_a, V
Значение	1.7	1.0	0.5	1.0	2030	2000	-300

Примечание. d_s — диаметр окружности, вписанной в апертуру ЭЭ, d_a — диаметр окружности, вписанной в апертуру УЭ, t_s — толщина ЭЭ, t_a — толщина УЭ, φ_p — потенциал плазмы ГРК, φ_s — потенциал ЭЭ, φ_a — потенциал УЭ.

ИОС является ее прозрачность для нейтральных атомов. Чем ниже данная прозрачность, тем выше газовая эффективность и тем меньший расход рабочего тела необходим двигателю для достижения требуемой тяги. В связи с тем, что часть нейтральных атомов, прошедших через апертуры ЭЭ, после соударения с УЭ возвращается назад в ГРК, снижение прозрачности для них достигается в основном путем снижения геометрической прозрачности УЭ за счет уменьшения диаметра его апертур. Так как ионы в ИОС не только ускоряются, но и фокусируются, снижение геометрической прозрачности УЭ, как правило, не мешает им покинуть двигатель [5].

Каждая ИОС способна фокусировать ограниченный диапазон плотностей тока ионов, при котором их траектории не пересекают поверхность УЭ. В данный диапазон должны попадать как наибольшая, так и наименьшая плотности тока ионов, извлекаемых из ГРК. Наиболее простыми способами расширения диапазона являются увеличение диаметра апертур УЭ и уменьшение его толщины. Чем шире диапазон фокусируемых ИОС плотностей тока, тем больший диапазон тяги может быть обеспечен при неизменных параметрах ИОС [5].

Настоящая работа посвящена продолжению совершенствования схемы ИД, предыдущие этапы которого представлены в работах [1,6]. В рамках более ранних работ цикла были изложены результаты исследования основных зависимостей параметров ГРК от величины индукции магнитного поля и его топологии, а также было разработано и испытано техническое решение, позволяющее оптимизировать данные параметры независимо друг от друга. Наиболее очевидным недостатком ИД-200ПМ, являвшегося объектом испытаний в предыдущих работах, была сравнительно низкая эффективная прозрачность его ИОС для ионов. Таким образом, учитывая имеющийся задел, дальнейшее повышение параметров эффективности ИД, целесообразно проводить путем совершенствования его ИОС. Целью текущей работы является оптимизация ИОС и, в частности, повышение ее эффективной прозрачности для ионов и расширение верхней границы диапазона фокусируемых плотностей тока. Критерий оптимизации заключается в предельном повышении вышеупомянутых параметров, соответствующем актуальным возможностям производственной базы, при котором будут обеспечиваться механическая прочность ИОС, а также ее стойкость к высоковольтным пробоям. Планируемый результат оптимизации с точки зрения параметров ИД представляет собой повышение КПД и плотности тяги.

1. Методика оптимизации

Исследуемые конфигурации ИОС в рамках текущей работы сравнивались по нескольким основным параметрам: эффективной прозрачности для ионов, прозрачности для нейтральных атомов и диапазону фокусируемых плотностей тока. Для расчета параметров единичные ячейки конфигураций ИОС моделировались в программном пакете IOS-3D [7]. Рассчитывались потоки однозарядных ионов ксенона, начальные скорости которых на входе в область моделирования были направлены перпендикулярно плоскости ЭЭ. Модуль начальной скорости задавался равным минимальной скорости критерия Бомы $v_{i0} = \sqrt{kT_e/M_i}$ при тепловой энергии электронов в плазме $kT_e = 5 \text{ eV}$. Основные алгоритмы программы, включая метод моделирования плазменного эмиттера, описаны в работе [8]. Общие параметры ИОС, остающиеся неизменными для всех разработанных конфигураций, представлены в табл. 1. Потенциалы и толщины электродов заимствованы из базовой конфигурации ИОС ИД-200ПМ [9], так как в настоящей работе ведется оптимизация ИОС при фиксированной скорости ионов в пучке. Влияние потенциала УЭ на фокусировку пучка ионов незначительно из-за его малого абсолютного значения, кроме того, диапазон, в котором может варьироваться данное значение, крайне узок, поэтому на данном этапе работ оптимизация потенциала УЭ не проводилась.

Во всех исследуемых конфигурациях ИОС предполагается использование титана в качестве материала ЭЭ. Переход от углерод-углеродного композиционного материала к титану обусловлен более высокими прочностными свойствами тугоплавких металлов и, как следствие, более высокой предельной геометрической прозрачностью ЭЭ. Изменение материала ЭЭ не оказывает какого-либо негативного влияния на параметры ИОС и двигателя в целом, однако требует учета тепловых деформаций при разработке конструкции, так как титан имеет температурный коэффициент линейного расширения около $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а углерод — менее $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. При разработке ИД с малым диаметром перфорированной области ИОС данными деформациями можно пренебречь. В том случае, если диаметр составляет более 100 мм, для поддержания стабильности зазора между электродами при нагреве двигателя им придают выпуклую форму, чтобы их стрелы прогиба были направлены в одну сторону.

Таблица 2. Параметры конфигураций ИОС с различными перфорациями

Параметр	Форма апертур ЭЭ и УЭ	l_a, mm	w_s, mm	$\Delta j_{Xe}, \text{A/m}^2$	$\tau_n, \%$
Конфигурация С	Круг	1.0	0.5	10–190	8.5
Конфигурация 5	Гексагон	1.0	0.5	10–170	9.5
Конфигурация 4	Гексагон	1.0	0.4	10–180	10.5
Конфигурация 3	Гексагон	1.0	0.3	10–170	11.6
Конфигурация 2	Гексагон	1.0	0.2	10–180	12.9
Конфигурация 1	Гексагон	1.0	0.1	10–170	14.8

Примечание. l_a — ширина межэлектродного зазора, w_s — ширина перемычки между апертурами ЭЭ, Δj_{Xe} — диапазон фокусируемых плотностей тока ионов ксенона, τ_n — прозрачность для нейтральных атомов.

Материал УЭ в настоящей работе менее важен в связи с тем, что повышение геометрической прозрачности данного электрода не проводится. Предполагаемым материалом УЭ всех исследуемых конфигураций также является титан, однако он может быть впоследствии заменен на какой-либо материал на основе углерода, в случае необходимости обеспечения ИОС более длительного ресурса.

2. Перфорация электродов

Эффективная прозрачность для ионов зависит от множества параметров, в числе которых соотношение между плотностью тока ионов и разностью потенциалов между электродами, толщина ЭЭ, ширина межэлектродного зазора, разность потенциалов между ЭЭ и плазмой ГРК и т.д. Наиболее явно эффективная прозрачность зависит от геометрической прозрачности ЭЭ, для повышения которой в настоящей работе исследовалась возможность и целесообразность изменения формы апертур и уменьшения ширины перемычек между ними.

В настоящее время наиболее широкое распространение получила перфорация ЭЭ круглыми апертурами, центры которых находятся в узлах гексагональной решетки. Данная форма апертур является традиционной и используется более 60 лет [10]. Выбор круглой формы связан, в первую очередь, с тем, что перфорация электродов ранее осуществлялась, как правило, методом сверления. В связи с тем, что самым распространенным способом перфорации на сегодняшний день является лазерная резка, апертуры современных ИОС имеют гораздо более широкий диапазон возможных форм. Учитывая, что апертуры находятся в узлах гексагональной решетки, очевидным преимуществом с точки зрения геометрической прозрачности ЭЭ будут обладать апертуры, имеющие гексагональную форму, так как площадь гексагона примерно на 10% выше площади вписанной в него окружности.

Основные параметры конфигураций с различными перфорациями и зависимости их эффективной прозрачности для ионов ксенона от плотности их тока из ГРК на ЭЭ, полученные по результатам численного

моделирования, представлены в табл. 2 и на рис. 2 соответственно.

Для оценки технологической возможности использования гексагональной формы апертур и уменьшения ширины перемычек между апертурами ЭЭ были изготовлены образцы с перфорациями, соответствующими ЭЭ конфигураций 3, 2 и 1. Образцы были изготовлены из титана и имели толщину 0.5 mm. Перфорация образцов выполнялась на трехкоординатном лазерном станке в среде аргона. В связи с тем, что в процессе резки у образца с толщиной перемычки 0.1 mm часть перемычек между апертурами полностью перегорела, конфигурация 1 была исключена из дальнейшего рассмотрения. Внешний вид перфорированных образцов с толщинами перемычек 0.2 mm (ЭЭ Конфигурации 2) и 0.3 mm (ЭЭ Конфигурации 3) представлен на рис. 3.

По результатам осмотра на обоих перфорированных образцах был обнаружен грат, характерный для лазерной резки. В связи с тем, что в Конфигурации 2 присутствовала очень высокая вероятность нарушения целостности ЭЭ при удалении грата, для дальнейшей оптимизации на текущем этапе была выбрана Конфигурация 3. Несмотря на то, что данная конфигурация является лишь промежуточным звеном в процессе оптимизации, ее параметры уже существенно превосходят параметры

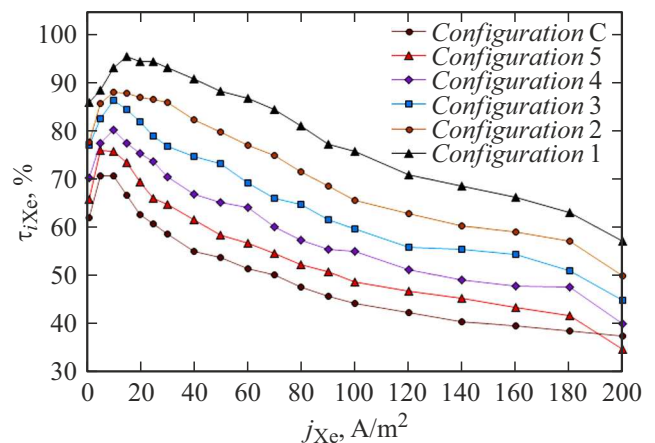


Рис. 2. Зависимости эффективной прозрачности конфигураций ИОС с различными перфорациями для ионов ксенона τ_{Xe} от плотности их тока из ГРК на ЭЭ j_{Xe} .

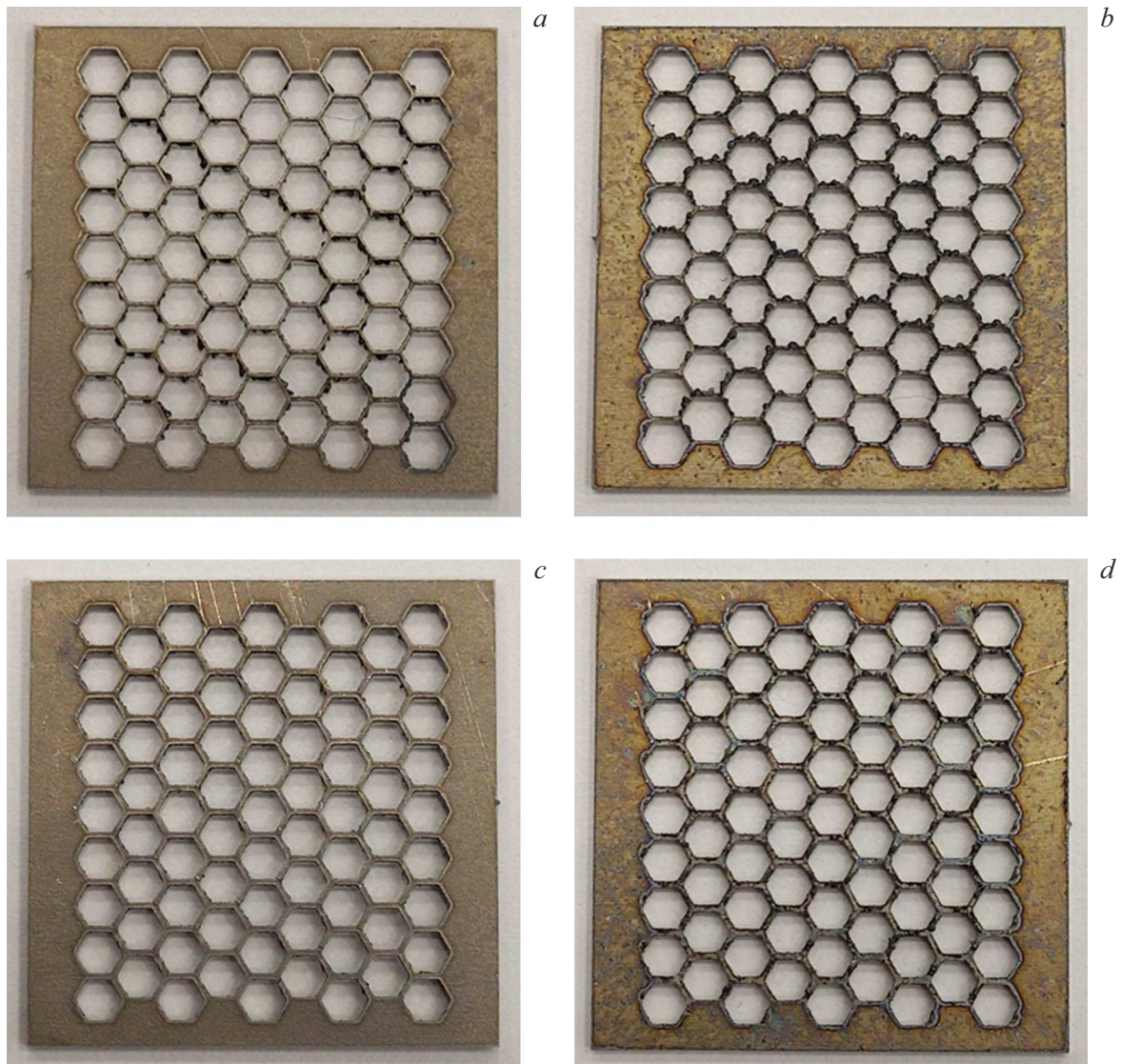


Рис. 3. Внешний вид перфорированных образцов с различными толщинами перемычек: *a* — 0.2 mm, передняя сторона; *b* — 0.2 mm, задняя сторона; *c* — 0.3 mm, передняя сторона; *d* — 0.3 mm, задняя сторона.

ИОС, использованной в работах [1,6]: прозрачность для нейтральных атомов снижена с 17 до 11.6%, а эффективная прозрачность для ионов повышена более чем на 5%.

3. Ширина межэлектродного зазора

Второй этап оптимизации ИОС заключался в уменьшении ширины межэлектродного зазора с целью увеличения напряженности электрического поля в ускоряющем слое. С ростом напряженности растет эффективная прозрачность ИОС для ионов, а диапазон фокусируемых плотностей тока расширяется в область более высоких значений, что позволяет увеличить плотность тяги двигателя. Максимальная напряженность ограничивается несколькими факторами, наиболее важным из которых

является стойкость ИОС к высоковольтным пробоям: напряженность электрического поля в межэлектродном зазоре не должна превышать некоторую предельную величину, при которой между ЭЭ и УЭ возникают регулярные пробои или загорается разряд.

Экспериментальные исследования показывают, что ИОС с электродами, изготовленными из молибдена или углерода, способны исправно функционировать при напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре как минимум до 5 kV/mm [5,11–13]. В то же время у большинства современных ИД, таких, например, как NSTAR [14], T6 [15], RIT-10 [16], IT-200KR [9] и т.д. напряженность электрического поля между ЭЭ и УЭ не превышает 2.5–2.7 kV/mm. Выбор таких значений чаще всего обусловлен необходимостью обеспечения стойкости к высоковольтным пробоям при неконтролируемом уменьшении зазора, вызванном тепловыми деформация-

Таблица 3. Параметры конфигураций ИОС с различной шириной межэлектродного зазора

Параметр	Форма апертур ЭЭ и УЭ	l_a , mm	w_s , mm	Δj_{Xe} , A/m ²	τ_n , %
Конфигурация 3	Гексагон	1.0	0.3	10–170	11.6
Конфигурация S	Гексагон	0.5	0.3	10–280	12.0

Примечание. l_a — ширина межэлектродного зазора, w_s — ширина перемычки между апертурами ЭЭ, Δj_{Xe} — диапазон фокусируемых плотностей ионов ксенона, τ_n — прозрачность для нейтральных атомов.

ми электродов и неточностью сборки. В случае если качество сборки позволяет установить требуемую ширину зазора с достаточной точностью, а тепловые деформации малы или поддаются точному расчету, напряженность электрического поля между электродами может быть установлена существенно выше 2.5 kV/mm.

Для определения предельной напряженности электрического поля между электродами, изготовленными из титана, был проведен эксперимент с набором титановых пластин. В эксперименте использовались как пластины с перфорацией, так и без нее. Перед началом эксперимента пластины были отполированы для снижения количества концентраторов напряжения на их поверхностях. Пластины в вакуумной камере фиксировались друг относительно друга на определенном расстоянии, после чего между ними прикладывалась разность потенциалов. Разность потенциалов увеличивалась от 0 до значения, при котором происходил пробой, с шагом 500 V. Предварительно на пластины подавалась избыточная разность потенциалов для инициирования множественных пробоев с целью очистки шероховатостей, окисных пленок и примесей. В диапазоне давлений от $5 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ Pa предельная разность потенциалов, при которой не регистрировались пробои между пластинами, составила 6 и 10 kV при зазорах между пластинами 0.5 и 1 mm соответственно. Полученный результат практически идентичен как для пластин с перфорацией, так и для пластин без нее и схож с результатами описываемого в работе [5] аналогичного эксперимента с набором молибденовых пластин. В соответствии с количественными оценками, представленными в работе [5], при переходе от пластин к электродам ИОС должен использоваться коэффициент запаса, значение которого находится в диапазоне от 1.5 до 2. При коэффициенте запаса, равном 2, предельная напряженность электрического поля для титана будет составлять 6 kV/mm при межэлектродном зазоре 0.5 mm и 5 kV/mm при зазоре 1 mm.

Так как разность потенциалов между ЭЭ и УЭ в настоящей работе составляет 2.3 kV, с учетом результатов проведенных измерений ширина межэлектродного зазора в разрабатываемой конфигурации ИОС может быть уменьшена вплоть до значения 0.4 mm. Тем не менее в дальнейших расчетах зазор был снижен только до 0.5 mm для компенсации неточностей, которые могут возникнуть при последующей сборке ИОС.

Оценка эффективности уменьшения ширины зазора проводилась путем сравнения конфигураций 3 и S. Основные параметры конфигураций и зависимости их эффективной прозрачности для ионов ксенона от плотности их тока из ГРК на ЭЭ, полученные по результатам численного моделирования, представлены в табл. 3 и на рис. 4 соответственно.

По результатам сравнения очевидно преимущество Конфигурации S. Данная конфигурация позволяет более чем на 10% повысить эффективную прозрачность для ионов и на 65% поднять верхнюю границу диапазона фокусируемых плотностей тока, не оказывая существенного негативного влияния на прочие параметры ИОС. Основным недостатком Конфигурации S является возросший в среднем на 5° полуугол расходимости пучка ионов, что, однако, не оказывает существенного влияния на параметры ИД в целом.

Более наглядно преимущества Конфигурации S продемонстрированы на рис. 5. Первая зависимость цены иона от газовой эффективности получена экспериментально и соответствует наиболее низким значениям цены иона, достигнутым ИД-200ПМ в рамках работ [1,6]. Прозрачность исходной конфигурации ИОС ИД-200ПМ для нейтральных атомов и ее эффективная прозрачность для ионов ксенона в ходе огневых испытаний составляли около 17 и 63% соответственно. Вторая кривая получена расчетным методом и соответствует двигателю ИД-200ПМ, в котором его исходная конфигурация ИОС

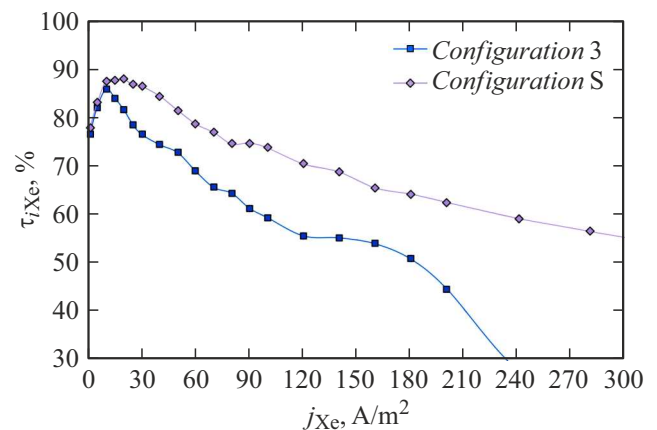


Рис. 4. Зависимости эффективной прозрачности конфигураций ИОС с различной шириной межэлектродного зазора для ионов ксенона τ_{iXe} от плотности их тока из ГРК на ЭЭ j_{Xe} .

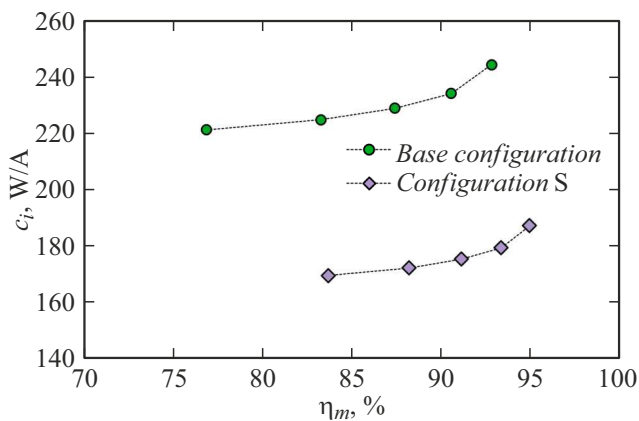


Рис. 5. Зависимости цены иона c_i от газовой эффективности η_m (кривые эффективности) для различных конфигураций ИОС.

была заменена на Конфигурацию S. При расчете данной кривой использовалась линейная зависимость цены иона от эффективной прозрачности для ионов, описанная в работе [4].

Оценка показывает, что при газовой эффективности 90% Конфигурация S может снизить цену иона ИД-200ПМ на 25%. В таком случае ИД-200ПМ будет обладать наименьшей ценой иона среди всех существующих аналогов с диаметром перфорированной области ИОС до 300 мм за исключением ИД XIPS-25, информации о котором недостаточно для анализа достигнутых им параметров.

Совокупность повышенной эффективной прозрачности для ионов и высокого верхнего диапазона фокусируемых плотностей тока разработанной конфигурации ИОС, вероятно, также позволит ИД достичь существенно более высоких плотностей тяги. При несоосности апертур ЭЭ и УЭ, составляющей 0.1 мм, наибольшая плотность тока пучка, которую может извлечь из ГРК исходная конфигурация ИОС ИД-200ПМ, составляет 73 А/м². Конфигурация S при аналогичной несоосности может извлечь 115 А/м², что больше на 57%. В случае успешного внедрения разработанной конфигурации ИОС на некоторых режимах работы ИД смогут достичь тяги, практически идентичной соразмерному ХД.

Наиболее актуальной на данный момент остается задача оценки ресурса разработанной конфигурации ИОС. При равных плотностях тока пучка ионов и идентичных материалах УЭ Конфигурация S и базовая конфигурация ИОС ИД-200ПМ будут иметь практически идентичный ресурс. Так как диаметр апертуры УЭ в Конфигурации S меньше, оптимизация потенциала УЭ на последующих этапах работы позволит повысить ресурс.

Осталась не решенной проблема обеспечения ресурса ИОС при повышенных плотностях тока пучка ионов, которые позволяет извлекать из ГРК Конфигурация S. Для обеспечения ресурса более 10 000 h при плотности тока пучка ионов ксенона более 50 А/м² потребуются

внедрение в конфигурацию новых технических решений или использование УЭ изготовленного из материала на основе углерода.

Заключение

В работе описан процесс оптимизации ИОС на основе результатов численного моделирования. Основными целями работы являются повышение эффективной прозрачности ИОС для ионов и расширение верхней границы диапазона фокусируемых плотностей тока. Процесс оптимизации делится на два этапа. На первом этапе, за счет изменения формы апертур с круглой на гексагональную и уменьшения ширины перемычек между апертурами, повышается геометрическая прозрачность ЭЭ. На втором — уменьшается ширина межэлектродного зазора.

Созданная в рамках работы конфигурация ИОС обладает преимуществом перед используемой ранее по всем основным параметрам, за исключением ресурса. Оценка показывает, что замена исходной конфигурации ИОС ИД-200ПМ на Конфигурацию S может при газовой эффективности 90% снизить цену иона двигателя на 25%. Совокупность повышенной эффективной прозрачности для ионов и высокого верхнего диапазона фокусируемых плотностей тока разработанной конфигурации ИОС, вероятно, также позволит ИД достигать существенно более высоких плотностей тяги. При этом, однако, осталась не решенной проблема обеспечения ресурса ИОС при извлечении из ГРК повышенных плотностей тока пучка ионов.

Благодарности

Авторы благодарят А.А. Шагайду за помощь в проведении расчетов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Н.К. Федеянин, М.Ю. Селиванов, Д.А. Кравченко, А.В. Сабитова. *ЖТФ*, **94** (11), 1897 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.11.59107.80-24
- [2] M. Sangregorio, K. Xie, N. Wang, N. Guo, Z. Zhang. *Chinese J. Aeronautics*, **31** (8), 1635 (2018). DOI: 10.1016/j.cja.2018.06.005
- [3] E.V. Pawlik, P.M. Margosian, J.F. Staggs. *NASA Tech. Note, NASA TN D-2804*, 1965.
- [4] D.M. Goebel, J.E. Polk, A. Sengupta. 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. and Exhibit, 2004-3813, 2004. DOI: 10.2514/6.2004-3813
- [5] D.M. Goebel, I. Katz. *Fundamentals of Electric Propulsion* (John Wiley & Sons, Inc., 2008), DOI: 10.1002/9780470436448

- [6] Н.К. Федянин, Д.А. Кравченко, М.Ю. Селиванов, А.В. Сабитова. ЖТФ, **94** (12), 2159 (2024).
- [7] А.А. Шагайда. *Моделирование потоков заряженных частиц в ионно-оптических системах ионных двигателей (IOS-3D)*, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, номер свидетельства RU 2014612703, 2014. [A.A. Shagayda. *Simulation of charged particles in the ion-optical systems of ion engines (IOS-3D)*, Software Package, Ver. 2.0. Certificate of official registration № 2014610277, 2014.]
- [8] A.A. Shagayda, V.V. Nikitin, D.A. Tomilin. *Vacuum*, **123**, 140 (2016). DOI: 10.1016/j.vacuum.2015.10.030
- [9] С.В. Мадеев. *Экспериментальное исследование электродов ионно-оптических систем ионных двигателей из перспективных углеродных материалов* (Диссертация, 2020)
- [10] W.R. Kerslake, E.V. Pawlik. NASA Technical Note, NASA TN D-1411, 1963.
- [11] M. Nakano, Y. Kajimura, I. Funaki. *Transactions Jpn. Society Aeronautical Space Sci.*, **10** (ists28), Pb_85 (2012). DOI: 10.2322/tastj.10.pb_85
- [12] I. Funaki, H. Watanabe, M. Nakano, Y. Kajimura, T. Miyasaka, Y. Nakayama, H. Kuninaka, I. Shinohara. 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. and Exhibit, 2012 (2012). DOI: 10.2514/6.2012-3797
- [13] M. Nakano, K. Nakamura, Y. Naito, Y. Nakagawa, Y. Takao, H. Koizumi. *AIP Advances*, **9** (3), 035343 (2019). DOI: 10.1063/1.5090413
- [14] J. Wang, J.E. Polk, J.R. Brophy, I. Katz. *J. Propulsion and Power*, **19** (6), 1192 (2003). DOI: 10.2514/2.6939
- [15] N. Fazio, S.B. Gabriel, I.O. Golosnoy. *Space Propulsion Conf.*, SP2018_00102, 2018.
- [16] M. Tartz, H. Neumann. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. and Exhibit, 2006-5001, 2006. DOI: 10.2514/6.2006-5001