

Совершенствование схемы ионного двигателя.

II. Оптимизация магнитной системы

© Н.К. Федянин, Д.А. Кравченко, М.Ю. Селиванов, А.В. Сабитова

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

Поступило в Редакцию 3 марта 2024 г.

В окончательной редакции 4 июля 2024 г.

Принято к публикации 4 июля 2024 г.

Для оптимизации работы газоразрядной камеры ионного двигателя разработана и изготовлена модифицированная конфигурация магнитной системы, отличительной особенностью которой является использование сдвоенного полюса. Описаны условия и результаты огневых испытаний двигателя при использовании разработанной конфигурации. Коэффициент неоднородности составил 1.35, а цена иона 234 W/A при газовой эффективности 91%, что показывает эффективность сдвоенного полюса и разработанной конфигурации в целом. На основании экспериментальных данных сформулирована необходимость локализации магнитного поля на периферии газоразрядной камеры не только с точки зрения обеспечения высокой однородности распределения плотности тока пучка ионов, но и с точки зрения обеспечения низкой цены иона.

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

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59277.81-24

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].

Классифицируются ИД в основном по типу ГРК. Текущая работа и излагаемый далее материал посвящены ГРК с ионизацией рабочего тела в разряде постоянного тока, представленной в составе схемы ИД на рис. 1. Задача повышения параметров эффективности ГРК данного типа все еще остается актуальной, что во многом обусловлено сложностью разработки достаточно эффективной магнитной системы (МС) [1]. МС — составная часть ГРК, повышающая время пребывания заряженных частиц в объеме плазмы за счет снижения их подвижности в направлении части поверхностей ГРК [2]. МС может быть выполнена на основе электромагнитов или постоянных магнитов. Далее будут рассматриваться только МС на основе постоянных магнитов, так как при их использовании достигались более высокие параметры эффективности [3].

Настоящая работа посвящена продолжению исследования зависимости параметров эффективности ГРК ИД

от характеристик магнитного поля, предыдущие этапы которого представлены в работах [1,4]. По результатам огневых испытаний двигателя ИД-200ПМ было показано, что повышению величины индукции магнитного поля

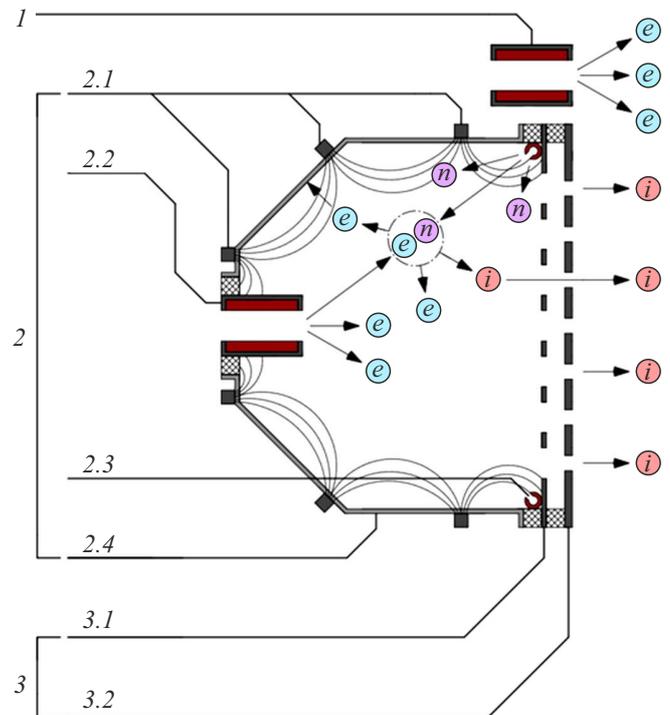


Рис. 1. Схема ИД: 1 — нейтрализатор; 2 — ГРК; 2.1 — МС; 2.2 — катод; 2.3 — анод; 2.4 — коллектор; 3 — ИОС; 3.1 — эмиссионный электрод; 3.2 — ускоряющий электрод [1].

в ГРК соответствовало повышение напряжения разряда, а также снижение однородности распределения плотности тока пучка ионов и цены иона [1]. Очевидно, что в рамках работы [1] оптимизация одного параметра негативно сказывалась на другом. Причиной этого являлось то, что повышение индукции замкнутого контура [1,5,6] сопровождалось повышением модуля индукции магнитного поля во всем объеме ГРК, в том числе и вблизи ИОС, что приводило к снижению однородности распределения плотности тока пучка ионов. Целью настоящей работы является разработка и исследование конфигурации МС, которая вне зависимости от величины индукции замкнутого контура будет обеспечивать вблизи ИОС величину модуля индукции магнитного поля менее 10 G. Разработанная конфигурация и созданные на ее основе аналоги будут обладать возможностью оптимизации параметров эффективности независимо друг от друга, что позволит достигать их наиболее высоких значений.

1. Методы доработки МС

С точки зрения обеспечения наименьшей цены иона при разработке МС должна выбираться наибольшая индукция замкнутого контура, при которой количество электронов, необходимое для поддержания разряда в ГРК, поглощается анодом [5,7]. С точки зрения обеспечения наибольшей однородности распределения плотности тока пучка ионов вблизи ИОС величина модуля индукции магнитного поля должна составлять менее 10 G [8–10]. Так как поверхности, которые необходимо экранировать магнитным полем, примыкают практически вплотную к ИОС, разработать МС, полностью удовлетворяющую обоим требованиям и обеспечивающую достаточно высокий радиальный градиент модуля индукции магнитного поля вблизи ИОС, крайне сложно.

На текущий момент наиболее широкое распространение получило магнитное поле, представляющее собой равномерную арочную структуру, где области с модулем индукции более 10 G локализованы на периферии ГРК. Такие ИД, как XIPS-8 [11], XIPS-13 [12], XIPS-25 [13], NSTAR [5], NEXIS [6], NEXT [14], T6 [15] и т.д., используют различные модификации данного поля, так как оно обеспечивает совокупность наиболее высоких параметров эффективности. МС и магнитные поля всех вышеупомянутых двигателей в целом схожи, однако заметные различия между ними присутствуют вблизи ИОС. Применение оригинальных технических решений к этой части МС обусловлено тем, что однородность распределения плотности тока пучка ионов зависит в основном от магнитного поля именно вблизи ИОС [2,6,16]. Как правило, для повышения радиального градиента модуля индукции магнитного поля вблизи ИОС применяется один из трех методов.

Первым и наиболее распространенным методом является поворот полюсов постоянного магнита, расположенного вблизи ИОС [5,6,11–13]. Данный магнит при

этом размещается не на корпусе ГРК, а на фланце эмиссионного электрода, а ось его намагничивания находится под углом около 90° к оси ближайшего магнита.

Вторым методом является использование ферромагнитного фланца, представляющего собой некое подобие дополнительного полюса в ГРК на границе с ИОС [1,15]. За счет высокой магнитной проницаемости фланца большинство линий напряженности магнитного поля замыкаются на нем, ослабляя величину модуля индукции вблизи ИОС.

Третьим методом является добавление в МС одного или нескольких дополнительных постоянных магнитов [17]. Линии напряженности, выходящие из полюса одного магнита, замыкаются через полюс другого, вместо того чтобы распространяться вглубь ГРК. Чем ближе друг к другу расположены магниты, тем больший градиент модуля индукции магнитного поля можно с помощью них получить.

Сравнительная оценка эффективности вышеописанных методов проводилась с помощью их поочередного применения к одной и той же ГРК, остальная часть МС которой при этом оставалась неизменной. Результаты расчетов распределения модуля индукции магнитного поля в ГРК представлены на рис. 2. Критерием сравнения являлась величина модуля индукции вблизи ИОС — области, выделенной на рис. 2 пунктирной линией. Чем больше часть данной области, в которой модуль индукции составлял менее 10 G, тем более эффективным считался использовавшийся метод. Так как для наиболее эффективного использования каждого метода остальная часть МС также должна модифицироваться, сравнение носит исключительно оценочный характер.

Оценка результатов расчетов показывает, что наиболее эффективным методом повышения радиального градиента модуля индукции магнитного поля вблизи ИОС является использование сдвоенного полюса. Поворот полюса обладает меньшей эффективностью, однако также оказывает существенное влияние на распределение модуля индукции. В отличие от двух вышеперечисленных методов, при использовании ферромагнитного фланца изначальное распределение модуля индукции, соответствующее базовой МС, остается практически неизменным.

2. Объект испытаний

Объектом испытаний в настоящей работе являлся экспериментальный образец двигателя ИД-200ПМ, внешний вид которого представлен на рис. 3. Данный двигатель был разработан на базе ИД-200КР и имеет мощность 3 kW [4].

ИОС ИД-200ПМ состоит из эмиссионного и ускоряющего электродов, выполненных из углерод-углеродного композиционного материала, имеющих плоскую форму и диаметр перфорированной области 200 mm. Прозрачность ИОС ИД-200ПМ для нейтральных атомов со-

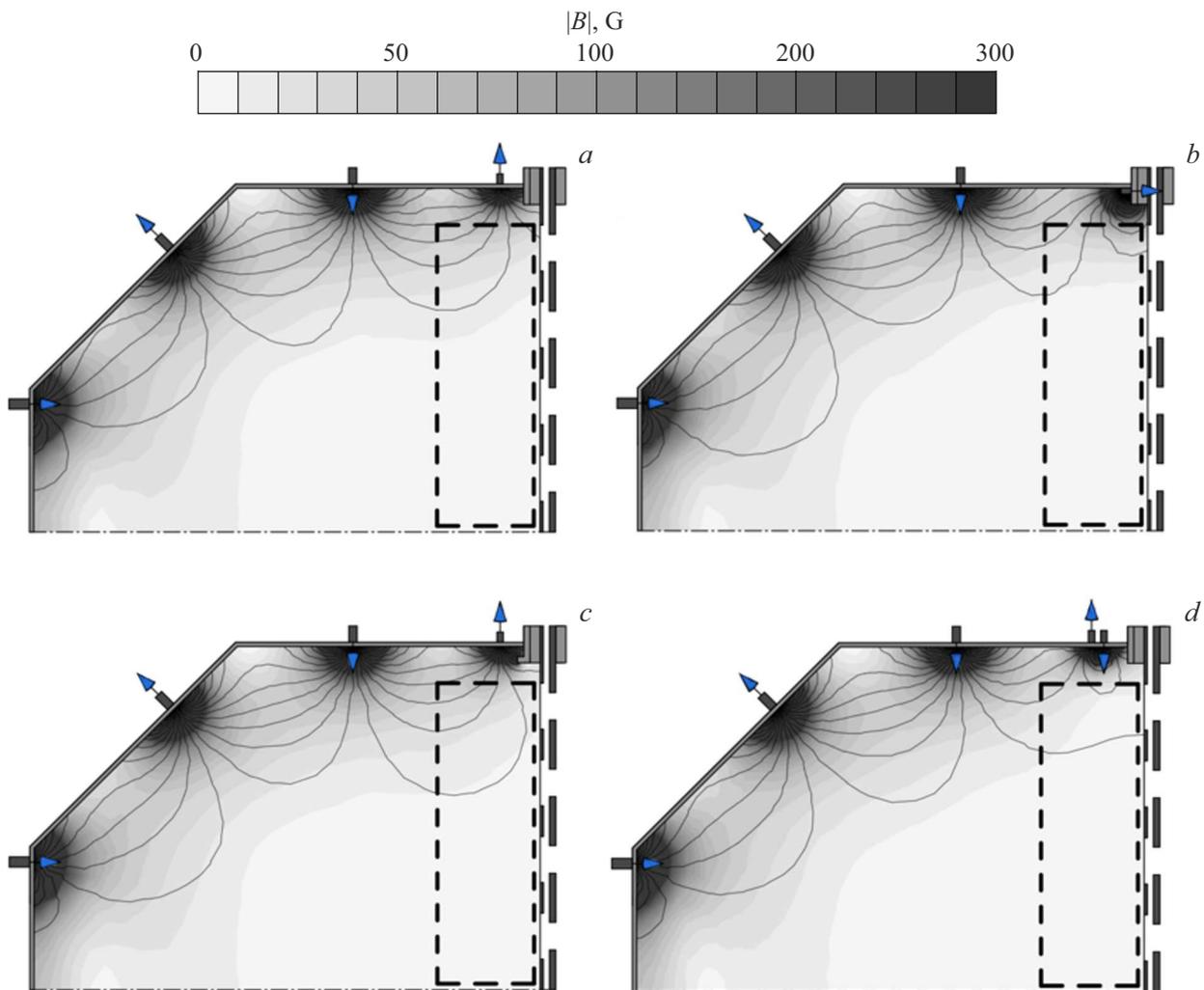


Рис. 2. Распределения модуля индукции магнитного поля $|B|$ в ГРК при использовании методов повышения радиального градиента модуля индукции магнитного поля вблизи ИОС: *a* — базовая МС; *b* — поворот полюса; *c* — ферромагнитный фланец; *d* — двоянный полюс.

ставляет 17%. Рассчитанная эффективная прозрачность ИОС для ионов ксенона в ходе огневых испытаний составляла около 63%. Катод ГРК и нейтрализатор двигателя являются полыми катодами с эмиттерами из пористого вольфрама, пропитанного соединениями бария. В качестве анода в ИД-200ПМ используется корпус ГРК, состоящий из цилиндрической и конической частей. Диаметр корпуса составляет 240 мм. Основная часть расхода рабочего тела подается в ГРК через коллектор, расположенный вблизи ИОС, кроме того, фиксированное значение расхода поступает в камеру через катод [1].

Конфигурация МС, исследуемая в настоящей работе (далее Конфигурация D), разработана на основе двоянного полюса и конфигураций, описываемых ранее в работе [1]. Ферромагнитный фланец при этом также остался в составе МС. Его исключение потребовало бы переработки конструкции ИД, но, как было показано выше, не оказывало бы существенного влияния

на распределение модуля индукции магнитного поля в ГРК. Основными задачами Конфигурации D являлись экспериментальное исследование эффективности двоянного полюса и демонстрация возможности создания конфигурации МС, соответствующей требованиям, сформулированным в цели работы.

Распределение модуля индукции магнитного поля в ГРК ИД-200ПМ, соответствующее Конфигурации D, представлено на рис. 4. Конфигурация D обеспечивает индукцию замкнутого контура для цилиндрической и конической частей корпуса 30 и 50 G соответственно. Различия в величинах индукции между частями корпуса связаны с тем, что двоянный полюс имеет высокий в сравнении с обычным постоянным магнитом градиент модуля индукции, и его использование потребовало усиления остальной части МС. Значения индукции выбраны, исходя из результатов исследования [1], где наиболее низкие цены иона были достигнуты при индукции замкнутого контура более 30 G.



Рис. 3. Внешний вид экспериментального образца ИД-200ПМ [1].

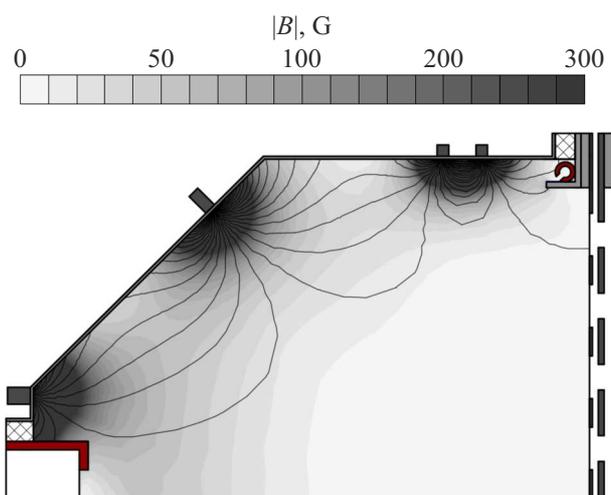


Рис. 4. Распределение модуля индукции магнитного поля $|B|$ в ГРК ИД-200ПМ, соответствующее Конфигурации D.

Испытания в рамках настоящей работы проводились на стенде АО ГНЦ „Центр Келдыша“ КВУ-90, предназначенном для испытаний электроракетных двигателей. В ходе испытаний использовалась система управления ИД с двумя контурами стабилизации: первый контур, регулируя ток разряда, поддерживал ток пучка ионов на уровне 1.25 А, второй контур, регулируя расход рабочего тела в коллектор, поддерживал напряжение разряда на заданном уровне. Потенциалы эмиссионного и ускоряющего электродов составляли 2000 В и –300 В соответственно. Ток поддержки катода ГРК равнялся нулю, ток поддержки нейтрализатора составлял 1 А.

В качестве рабочего тела использовался ксенон. Давление в вакуумной камере не превышало $5.0 \cdot 10^{-3}$ Па [1].

В ходе испытаний проводились измерения напряжения разряда и трех основных параметров, характеризующих эффективность ГРК ИД: цены иона, газовой эффективности и однородности распределения плотности тока пучка ионов, которая оценивалась с помощью коэффициента неоднородности, равного отношению наибольшей плотности тока к средней по площади ИОС. Используемая в настоящей работе методика испытаний и расчета параметров эффективности идентична представленной в работе [1]. Оценка параметров эффективности разработанной конфигурации МС проводилась методом сравнения с испытанными ранее в рамках работы [1] конфигурациями. Распределения модуля индукции магнитного поля в ГРК ИД-200ПМ, соответствующие данным конфигурациям, представлены на рис. 5.

3. Результаты испытаний

Для упрощения сравнительной оценки представленные далее результаты испытаний Конфигурации D, исследуемой в настоящей работе, дополнены результатами испытаний конфигураций МС, исследованных ранее в рамках работы [1]. На рис. 6 приведены кривые эффективности при расходах РТ в катод 0.3, 0.35, 0.4 и 0.45 mg/s соответственно. Интервалы изменения напряжений разряда, обеспечивающие диапазон газовой эффективности от 75 до 95%, представлены в таблице. Результаты измерений радиального распределения плотности тока пучка ионов представлены на рис. 7. Коэффициенты неоднородности, соответствующие полученным радиальным распределениям плотности тока пучка ионов, также представлены в таблице.

4. Обсуждение полученных результатов

Измерения показали, что при использовании Конфигурации D ИД-200ПМ достигается наиболее высокой однородности распределения плотности тока пучка ионов. Среди исследованных ранее конфигураций МС схожее распределение было получено при использовании Конфигурации 1. Различаются Конфигурация D и Конфигурация 1 как величиной индукции замкнутого контура, так и топологией магнитного поля. Схожи конфигурации величиной модуля индукции вблизи ИОС, которая для обеих почти во всей области составляет менее 10 Г. Таким образом, полученный результат согласуется с использовавшимся ранее в настоящей работе утверждением о том, что однородность распределения плотности тока пучка ионов зависит в основном от магнитного поля именно вблизи ИОС.

Так как Конфигурация D имеет на один полюс больше, чем остальные, ожидалось, что ей будут соответствовать несколько большие поверхностные потери заряженных

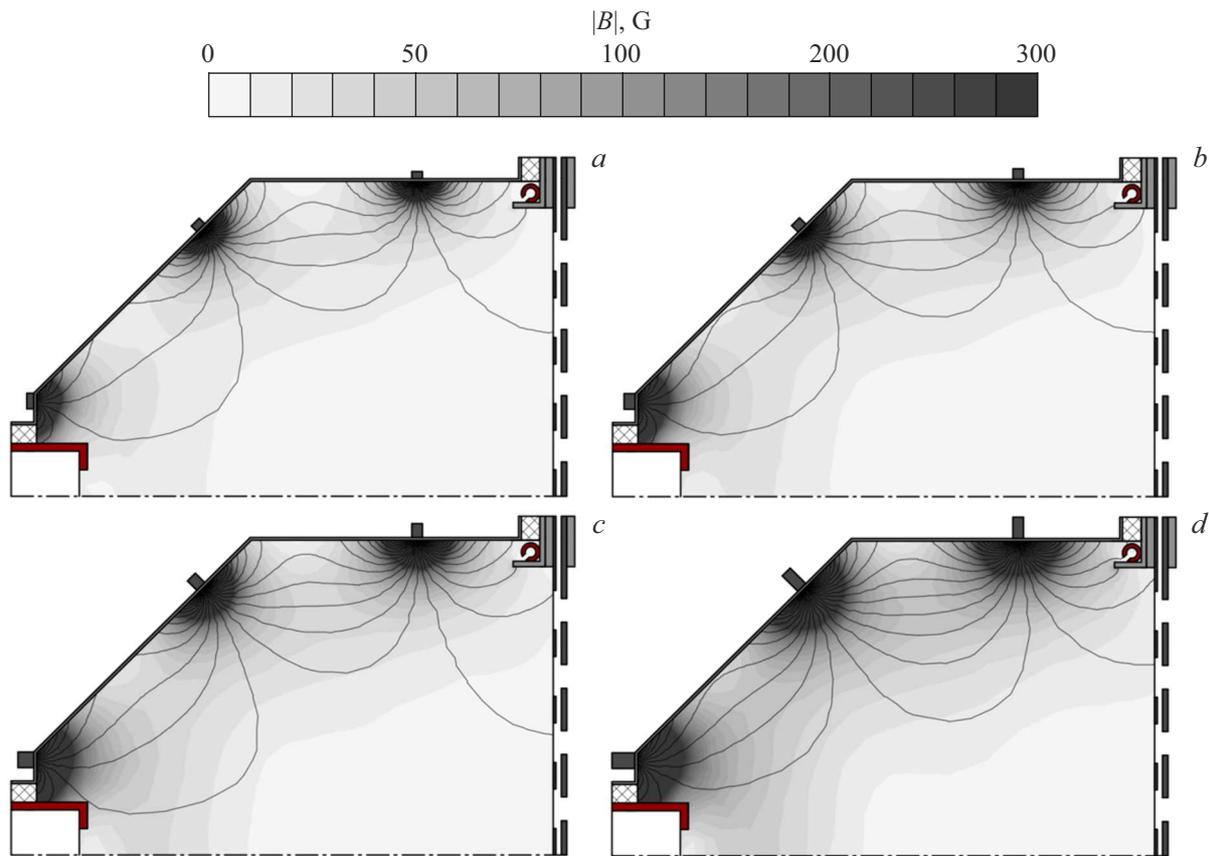


Рис. 5. Распределения модуля индукции магнитного поля $|B|$ в ГРК ИД-200ПМ, соответствующие конфигурациям МС: *a* — Конфигурация 1; *b* — Конфигурация 2; *c* — Конфигурация 3; *d* — Конфигурация 4 [1].

частиц, и, как следствие, цена иона в сравнении с Конфигурацией 3 и Конфигурацией 4 [3,18]. Несмотря на это, по результатам испытаний при использовании Конфигурации D цена иона была в среднем на 10 W/A ниже, чем при использовании вышеупомянутых конфигураций МС.

Помимо сдвоенного полюса, наиболее заметным отличием Конфигурации D от Конфигурации 3 и Конфигурации 4 является объем области ГРК, в котором модуль индукции магнитного поля составляет менее 10 G. Объем данной области при использовании Конфигурации D в 1.5 раза выше, чем при использовании Конфигурации 3 и почти в 3 раза выше, чем при использовании Конфигурации 4. Наиболее вероятно, что полученный в ходе испытаний по измерению цены иона результат связан именно с этим различием.

В соответствии с 0-мерной численной моделью ГРК, представленной в работе [19], скорость ионизации, т.е. количество ионов, образующееся в ГРК в единицу времени I_g , вычисляется по формуле

$$I_g = n_e \cdot n_n \cdot (\sigma_i \cdot v_e) \cdot V + n_p \cdot n_n \cdot (\sigma_i \cdot v_p) \cdot V, \quad (1)$$

где n_n — концентрация нейтральной компоненты рабочего тела, $[m^{-3}]$; n_p — концентрация первичных электронов, $[m^{-3}]$; n_e — концентрация вторичных электронов,

$[m^{-3}]$; σ_i — усредненное по распределению энергий электронов сечение ионизации нейтральной компоненты рабочего тела, $[m^2]$; v_p — средняя скорость первичных электронов, $[m/s]$; v_e — средняя скорость вторичных электронов, $[m/s]$; V — объем плазмы, $[m^3]$.

Исходя из результатов зондовой диагностики и численного моделирования, объем плазмы V в формуле (1) определяется в первую очередь не объемом ГРК, а магнитным полем, так как концентрация заряженных частиц на периферии существенно ниже, чем в центре ГРК [14,20–22]. Чем сильнее магнитное поле локализовано на периферии ГРК, тем больший объем камеры занимает плазма. В соответствии с формулой (1), возможно, что при снижении объема плазмы обратно пропорционально ему возросла бы концентрация электронов, и скорость ионизации осталась бы неизменной. При этом, однако, исследования показывают, что в областях с наиболее высокой концентрацией заряженных частиц происходит существенное снижение концентрации нейтральной компоненты рабочего тела за счет высокой скорости ионизации [14,22–24]. ГРК с меньшим объемом плазмы в таком случае потребует либо большего расхода рабочего тела, либо большей энергии электронов для создания требуемого количества ионов, что, в любом случае, негативно скажется на кривой

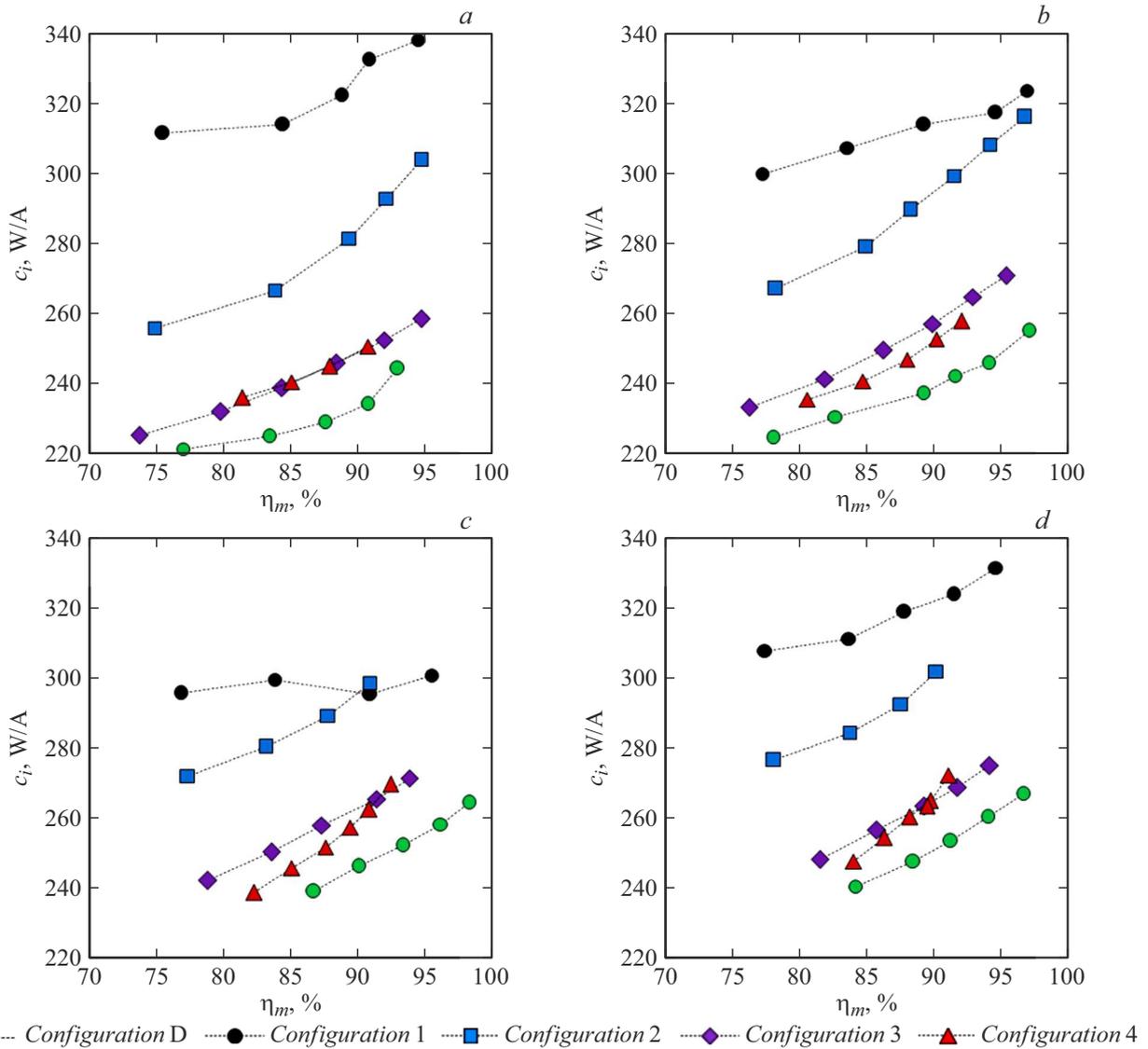


Рис. 6. Зависимости цены иона c_i от газовой эффективности η_m (кривые эффективности) для исследуемых конфигураций МС при расходах рабочего тела в катод: $a - 0.3$; $b - 0.35$; $c - 0.4$; $d - 0.45$ mg/s.

эффективности. Таким образом, повышение объема ГРК, в котором модуль индукции магнитного поля составляет менее 10 G, будет сопровождаться повышением скорости ионизации и снижением цены иона. Кроме того, чрезмерное удержание электронов в центре ГРК сопровождается повышением количества двухзарядных ионов, что также приведет к росту цены иона, так как для создания двухзарядного иона требуются существенно большие затраты энергии, чем для создания однозарядного [5,16,22,25].

Так как при использовании Конфигурации D ИД-200ПМ достиг наиболее высоких параметров эффективности как в совокупности, так и по отдельности, очевидно превосходство данной конфигурации над остальными. В связи с тем, что единственной отличительной особенностью Конфигурации D является наличие сдвоенного полюса, также очевидна высокая

эффективность данного метода повышения радиально-го градиента модуля индукции магнитного поля вблизи ИОС. При этом постоянные магниты, образующие сдвоенный полюс в Конфигурации D, находятся на сравнительно большом расстоянии друг от друга, что связано с ограничениями конструкции ГРК ИД-200ПМ. Сближение магнитов в дальнейшем может обеспечить более высокий радиальный градиент модуля индукции магнитного поля, а, соответственно, и несколько более высокую однородность распределения плотности тока пучка ионов. Кроме того, так как, по всей видимости, сдвоенный полюс может обеспечивать постоянную однородность вне зависимости от величины индукции замкнутого контура, конфигурации, созданные на его основе, вероятно, будут обладать возможностью оптимизации параметров эффективности независимо друг от друга.

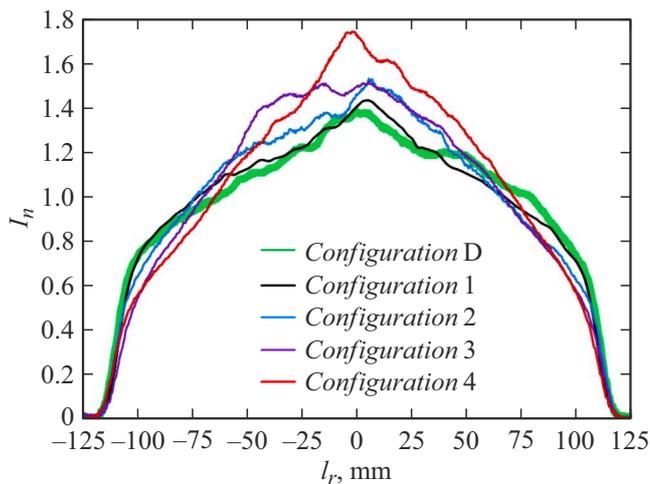


Рис. 7. Зависимость нормированного тока на зонд I_n от расстояния от оси ИД l_r для исследуемых конфигураций МС.

Одной из приоритетных целей последующих исследований является дальнейшее повышение параметров эффективности ИД. С учетом накопившегося теоретического и экспериментального заделов, наиболее простым способом повышения является не продолжение совершенствования МС, а модернизация используемой схемы ГРК. Вероятно, совмещение в области полюсов удержания заряженных частиц с помощью эффекта магнитного зеркала и электростатического удержания, позволило бы снизить отношение поверхностных потерь первичных электронов к поверхностным потерям вторичных, а, соответственно, и цену иона.

Заключение

В работе описаны результаты исследований параметров эффективности ИД с модифицированной конфигурацией МС, разработанной на основе сдвоенного полюса — наиболее эффективного метода повышения радиального градиента модуля индукции магнитного поля вблизи ИОС. Основная часть исследований представляет собой огневые испытания разработанной конфигурации МС в составе ГРК ИД. Объектом испытаний является экспериментальный образец двигателя ИД-200ПМ. Оценка параметров эффективности разработанной конфигурации МС проводилась методом сравнения с испытанными ранее в рамках работы [1] конфигурациями. Сравнение проводилось по напряжению разряда и трем основным параметрам, характеризующим эффективность ГРК ИД: цене иона, газовой эффективности и однородности распределения плотности тока пучка ионов.

По результатам испытаний при использовании модифицированной конфигурации МС ИД-200ПМ достиг наиболее высоких параметров эффективности. Коэффициент неоднородности составил 1.35, а цена иона

234 W/A при газовой эффективности 91%, что показывает эффективность сдвоенного полюса и разработанной конфигурации в целом. На основании экспериментальных данных, использовавшихся ранее при проектировании МС ГРК список критериев был дополнен. Сформулирована необходимость локализации магнитного поля на периферии газоразрядной камеры не только с точки зрения обеспечения высокой однородности распределения плотности тока пучка ионов, но и с точки зрения обеспечения низкой цены иона.

Одной из приоритетных целей дальнейших исследований является совмещение в области полюсов удержания заряженных частиц с помощью эффекта магнитного зеркала и электростатического удержания, что, вероятно, позволит снизить цену иона.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

Список литературы

- [1] Н.К. Федянин, М.Ю. Селиванов, Д.А. Кравченко, А.В. Сабитова. ЖТФ, **94** (11), 1897 (2024). DOI: 10.21883/0000000000
- [2] A. Sengupta. J. Appl. Phys., **105** (9), 2009. DOI: 10.1063/1.3106087
- [3] T. Ogunjobi, J.A. Menart. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2006–4489, 2006. DOI: 10.2514/6.2006-4489
- [4] M.Y. Selivanov, A.S. Lovtsov. 36th International Electric Propulsion Conference, 2019–339, 2019.
- [5] R.E. Wirz, D.M. Goebel. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2006–4487, 2006. DOI: 10.2514/6.2006-4487
- [6] D.M. Goebel, J.E. Polk, A. Sengupta. 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2004–3813, 2004. DOI: 10.2514/6.2004-3813
- [7] A. Sengupta. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2005–4069, 2005. DOI: 10.2514/6.2005-4069
- [8] D.M. Goebel, J.E. Polk, I. Sandler, I.G. Mikellides, J.R. Brophy, W.G. Tighe, K. Chien. 36th International Electric Propulsion Conference, 2009–152, 2009
- [9] J.R. Anderson, J.S. Snyder, J.L. Van Noord, G.C. Soulas. 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2007–5217, 2007. DOI: 10.2514/6.2007-5217
- [10] J.E. Polk, D.M. Goebel, J.S. Snyder, A.C. Schneider, L.K. Johnson, A. Sengupta. Rev. Sci. Instrum., **83** (7), 2012. DOI: 10.1063/1.4728415
- [11] W.G. Tighe, K. Chien, J. Ahn, J. Hurtado, E. Solis, R. Spears. 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2008–4912, 2008. DOI: 10.2514/6.2008-4912
- [12] J.R. Beattie, R.R. Robson, J.D. Williams. 22nd International Electric Propulsion Conference, 1991-10, 1991
- [13] J.R. Beattie, J.N. Matossian, R.R. Robson. J. Propulsion Power, **6** (2), 1990. DOI: 10.2514/3.23236

- [14] S. Mahalingam, Y. Choi, J. Loverich, P.H. Stoltz, B. Bias, J.A. Menart. 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2011–6071, 2011.
DOI: 10.2514/6.2011-6071
- [15] M. Coletti, N.C. Wallace, S.B. Gabriel, D. Frollani, H. Simpson. 30th International Electric Propulsion Conference, 2015–130, 2015
- [16] R.E. Wirz, D.M. Goebel. Plasma Sources Sci. Technol., **17** (3), 2008. DOI: 10.1088/0963-0252/17/3/035010
- [17] B. Dankongkakul, R.E. Wirz. J. Appl. Phys., **122** (24), 2017.
DOI: 10.1063/1.4995638
- [18] W. Bennett, T. Ogunjobi, J.A. Menart. 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2007–5248, 2007. DOI: 10.2514/6.2007-5248
- [19] D.M. Goebel, I. Katz. *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters* (John Wiley & Sons, Inc., USA, 2008),
DOI: 10.1002/9780470436448
- [20] B. Dankongkakul. *Overcoming the Scaling Limitations of Ring-Cusp DC Ion Thruster Discharge* (Dissertation, 2017)
- [21] D.A. Herman. *The Use of Electrostatic Probes to Characterize the Discharge Plasma Structure and Identify Discharge Cathode Erosion Mechanisms in Ring-Cusp Ion Thrusters* (Dissertation, 2005)
- [22] S. Mahalingam, J.A. Menart. 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2008-4733, 2008.
DOI: 10.2514/6.2008-4733
- [23] B. Bias, B. Penkal, M. Jonell, J.A. Menart, S. Mahalingam. 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2011–5660, 2011.
DOI: 10.2514/6.2011-5660
- [24] D.A. Kravchenko, A.A. Shagayda, M.Y. Selivanov, A.S. Shashkov, D.A. Tomilin, I.A. Khmelevskoi, A.S. Lovtsov. J. Propulsion and Power, **38** (3), 2022.
DOI: 10.2514/1.b38405
- [25] A. Sengupta, D.M. Goebel, A. Owens. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2006–4491, 2006. DOI: 10.2514/6.2006-4491