



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013117479/07, 17.04.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
17.04.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 17.04.2013

(45) Опубликовано: 10.09.2014 Бюл. № 25

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU2139647 C1, 10.10.1999. RU2139646
C1, 10.10.1999. FR2782884 A1, 03.03.2000.
EP0463408 A3, 02.01.1992

Адрес для переписки:

119454, Москва, пр-кт Вернадского, 24, кв. 12,
Патентному поверенному РФ N 1048 Белоусько
С.Н.

(72) Автор(ы):

Бугрова Антонина Ивановна (RU),
Бугров Глеб Эльмирович (RU),
Давыдов Василий Андреевич (RU),
Сафронов Александр Аркадьевич (RU),
Харчевников Вадим Константинович (RU),
Бишаев Андрей Михайлович (RU),
Козинцева Марина Валентиновна (RU),
Десятков Алексей Васильевич (RU),
Гордеев Иван Сергеевич (RU),
Смирнов Павел Германович (RU),
Шапошников Михаил Игоревич (RU),
Ильинова Анжелика Игоревна (RU),
Липатов Александр Семенович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

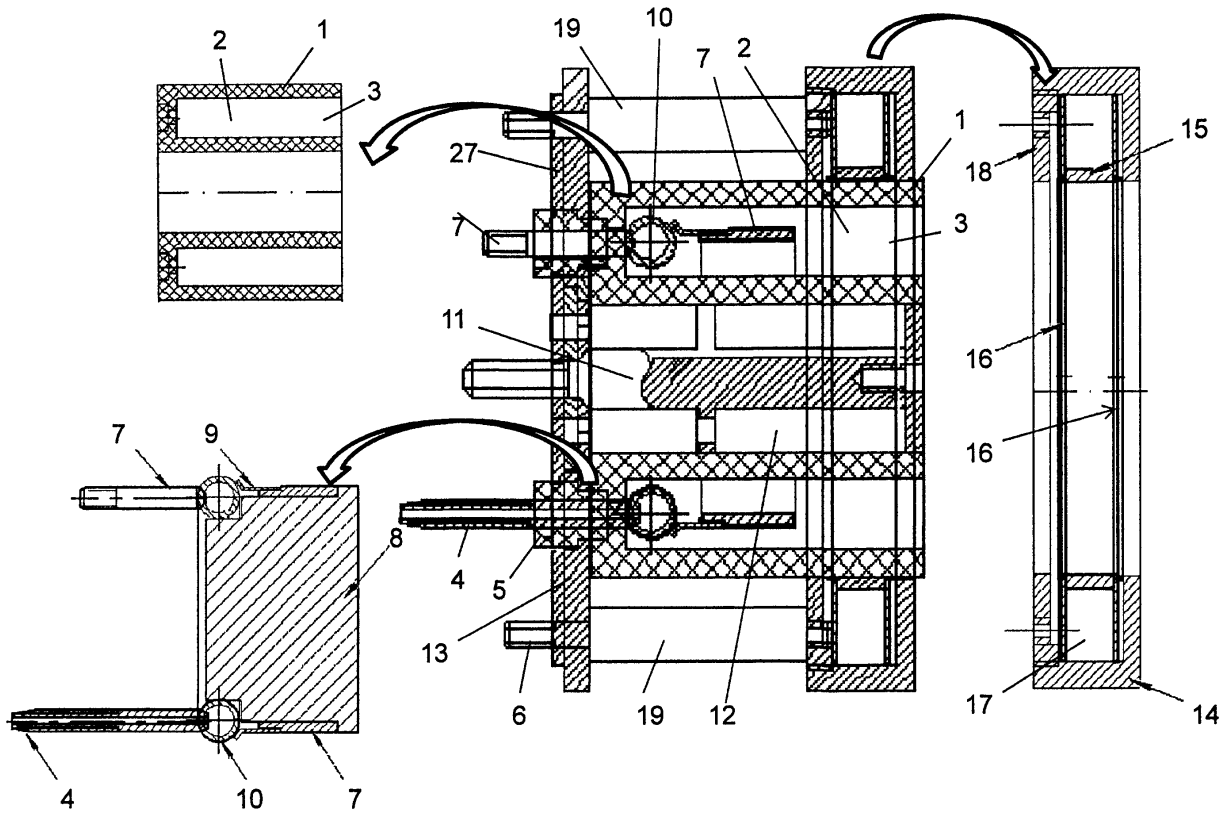
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Московский государственный технический
университет радиотехники, электроники и
автоматики" (RU)

(54) СТАЦИОНАРНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к плазменной технике. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов содержит главный кольцевой канал ионизации и ускорения, ограниченный конструктивными элементами из изолирующего материала и открытый на своем выходном конце. По крайней мере один полый катод сообщен с линией для подачи ионизируемого газа. Кольцевой анод, концентричный главному каналу, расположен на расстоянии от его открытого конца. Во входной части главного канала за зоной расположения анода размещена

кольцевая буферная камера, размер которой в радиальном направлении превышает радиальный размер главного кольцевого канала. Трубы для подачи ионизируемого газа сообщаются в направлении к аноду через кольцевой распределитель с зоной, отличной от зоны расположения анода. Техническим результатом является повышение тяговой характеристики стационарного плазменного двигателя малой мощности и упрощение конструкции при обеспечении гарантированного времени непрерывной работы. 17 ил.



ФИГ. 1

RU 2527898 C1

RU 2527898 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2013117479/07, 17.04.2013

(24) Effective date for property rights:
17.04.2013

Priority:

(22) Date of filing: 17.04.2013

(45) Date of publication: 10.09.2014 Bull. № 25

Mail address:

119454, Moskva, pr-kt Vernadskogo, 24, kv. 12,
Patentnomu poverennomu RF N 1048 Belous'ko
S.N.

(72) Inventor(s):

**Bugrova Antonina Ivanovna (RU),
Bugrov Gleb Ehl'mirovich (RU),
Davydov Vasilij Andreevich (RU),
Safronov Aleksandr Arkad'evich (RU),
Kharchevnikov Vadim Konstantinovich (RU),
Bishaev Andrej Mikhaĭlovich (RU),
Kozintseva Marina Valentinovna (RU),
Desjatskov Aleksej Vasil'evich (RU),
Gordeev Ivan Sergeevich (RU),
Smirnov Pavel Germanovich (RU),
Shaposhnikov Mikhail Igorevich (RU),
Il'inova Anzhelika Igorevna (RU),
Lipatov Aleksandr Semenovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
professional'nogo obrazovaniya "Moskovskij
gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet
radiotekhniki, ehlektroniki i avtomatiki" (RU)**

(54) **LOW-OUTPUT STATIONARY PLASMA ENGINE**

(57) Abstract:

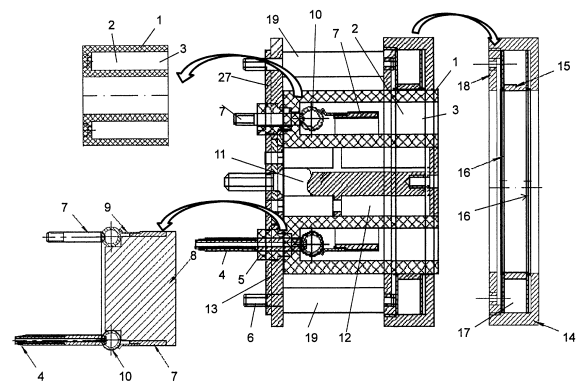
FIELD: engines and pumps.

SUBSTANCE: plasma engine with closed electron drift comprises primary circular ionisation channel confined by structural elements from insulating materials and exposed at its outlet. At least one hollow cathode is connected with ionising gas feed line. Ring anode concentric with primary channel is spaced from its exposed end. Circular buffer chamber is arranged at primary channel inlet part, behind anode zone, its radial size exceeding that of the primary circular channel. Pipes to feed ionising gas are communicated in direction towards anode via circular distributor with zone different from that of anode.

EFFECT: higher thrust, simplified design,

guaranteed operating cycle.

17 dwg



Фиг. 1

RU 2 527 898 C1

RU 2 527 898 C1

Изобретение относится к плазменной технике и преимущественно предназначено для использования в космической технике в качестве исполнительного органа электрореактивной двигательной установки. Изобретение относится к плазменным двигателям, применяемым на космических аппаратах, в частности к плазменным двигателям с замкнутым дрейфом электронов, называемых двигателями со стационарной плазмой или "холловскими двигателями".

Такие двигатели предназначены в основном для применения при движении в условиях космоса. В качестве источников ионов или плазмы они также используются для наземного применения, в частности для ионной обработки. Благодаря их высокому удельному импульсу (от 1500 до 6000 с) они обеспечивают в спутниках значительный выигрыш по массе в сравнении с химическими реактивными двигателями.

Плазменные двигатели с замкнутым дрейфом электронов характеризуются низкой энергетической ценой тяги за счет создания условий, благоприятных для ионизации, при этом создаваемый ими ионный поток квазинейтрален, что снимает ограничения величины плотности ионного тока за счет действия объемного заряда. В связи с этим такой плазменный двигатель может работать в широком диапазоне ускоряющих напряжений. Ионный ток в хороших моделях плазменных ускорителей такого типа близок к разрядному и определяется лишь величиной массового расхода рабочего тела. Таким образом, в известных плазменных ускорителях с замкнутым дрейфом электронов, в отличие от ионных, имеется возможность независимо изменять массовый расход и ускоряющее напряжение, то есть тягу и скорость истечения при высоком к.п.д двигателя.

В статье Л.А. Арцимовича и др. "Разработка стационарного плазменного двигателя и его испытание на ИСЗ "Метеор" ("Космические исследования", Москва, 1974 г., т. XII, вып. 3, стр. 451-468) описан общий принцип построения плазменного двигателя (ускорителя) с замкнутым дрейфом электронов. Он состоит из разрядной камеры с кольцевым каналом ионизации и ускорения с открытым выходом, выполненной из электроизоляционного материала, газоразрядного полого катода, установленного со стороны открытого выхода из кольцевого канала и подключенного к отрицательному полюсу источника постоянного напряжения. К положительному полюсу источника напряжения подключен полый кольцевой анод-газораспределитель, установленный на входе в кольцевой канал, соосно с ним. Плазменный ускоритель содержит также средства для подвода ионизируемого газа к газоразрядному полюсу катода и к полюсу кольцевому аноду-газораспределителю, имеющему отверстия для подвода к нему газа и для подачи ионизируемого газа в разрядную камеру. В состав ускорителя входит система для создания магнитного поля в полости разрядной камеры, включающая источник магнитного поля и магнитопровод, состоящий из центрального сердечника, торцевой части со стороны, противоположной выходу из кольцевого канала, и кольцевой части, размещенной снаружи кольцевого канала и образующей выходной торец ускорителя. Торцевые части магнитопровода скреплены с помощью периферийных магнитопроводящих стержневых элементов, равномерно расположенных вокруг разрядной камеры, соосно с ней. Источник магнитного поля известного ускорителя состоит из восьми последовательно соединенных и включенных в электрическую цепь электромагнитных катушек, намотанных на стержневых магнитопроводящих элементах.

Известен плазменный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов, содержащий магнитную систему с тремя парами магнитных полюсов (US 4703222, H05H 1/00, опубл. 1987). Известный плазменный ускоритель содержит разрядную камеру с кольцеобразным каналом ионизации и ускорения, выполненную из электроизоляционного материала и имеющую открытый выход, полую буферную камеру, сообщенную со входом

кольцеобразного канала, катод, размещенный со стороны открытого выхода канала, и кольцеобразный анод, соосно установленный на входе в канал разрядной камеры. Кольцеобразное газораспределительное устройство размещено в буферной камере без перекрытия входа в кольцеобразный канал и выполнено с отверстиями для подачи ионизируемого газа в буферную камеру в радиальном направлении. Магнитная система известного плазменного ускорителя состоит из источников магнитного поля, магнитопровода и трех пар кольцеобразных магнитных полюсов, расположенных соответственно со стороны внешних и со стороны внутренних стенок разрядной камеры. Первая пара магнитных полюсов охватывает кольцеобразный канал со стороны его открытого выхода и образует торцевую часть ускорителя. В состав магнитопровода входит центральный цилиндрический сердечник, установленный коаксиально каналу разрядной камеры вместе с внутренними магнитными полюсами и источниками магнитного поля, которые размещаются между внутренними магнитными полюсами. Внешние элементы магнитопровода соединяют внешние магнитные полюса. Остальные источники магнитного поля расположены вокруг внешней стенки кольцеобразного канала между внешними магнитными полюсами.

Данное выполнение магнитной системы позволяет создать оптимальную для ионизации и ускорения ионов конфигурацию магнитного поля, что обеспечивает повышение газовой эффективности ускорителя и его к.п.д в целом. Кроме того, использование предиионизации в буферной камере ускорителя наряду с повышением эффективности использования рабочего тела обеспечивает регулирование характеристик плазменного ускорителя в широких пределах.

Однако присущие решению преимущества не исключают недостатки, касающиеся, в первую очередь, расходимости ионного пучка, недостаточно высокого к.п.д, ограниченной надежности, сложности конструкции, достаточно большого веса и больших габаритов плазменного ускорителя, который должен использоваться в составе космической двигательной установки.

Известен стационарный плазменный двигатель малой мощности с замкнутым дрейфом электронов, содержащий разрядную камеру с кольцеобразным каналом ионизации и ускорения, выполненную из электроизоляционного материала и имеющую открытый выход, полую буферную камеру, сообщенную со входом кольцеобразного канала, катод, размещенный со стороны открытого выхода канала, кольцеобразный анод, соосно установленный на входе в канал разрядной камеры, кольцеобразное газораспределительное устройство, размещенное в буферной камере без перекрытия входа в кольцеобразный канал и выполненное с отверстиями для подачи ионизируемого газа в буферную камеру, и магнитную систему с источниками магнитного поля, магнитопроводом и тремя парами кольцеобразных магнитных полюсов, расположенных соответственно со стороны внешних и со стороны внутренних стенок разрядной камеры, при этом первая пара магнитных полюсов охватывает кольцеобразный канал со стороны его открытого выхода и образует торцевую часть ускорителя, в состав магнитопровода входит центральный цилиндрический сердечник, установленный коаксиально каналу разрядной камеры вместе с внутренними магнитными полюсами и первым источником магнитного поля, размещенным между внутренними магнитными полюсами, и внешние элементы, соединяющие внешние магнитные полюса, а второй источник магнитного поля расположен вокруг внешней стенки кольцеобразного канала между внешними магнитными полюсами, отличающийся тем, что межполюсный зазор второй пары полюсов закрыт кольцевым немагнитным элементом, образующим вместе с указанными полюсами торцевую часть ускорителя со стороны буферной камеры, причем внешний

полюс третьей пары магнитных полюсов установлен между буферной камерой и внешним полюсом первой пары, внутренний полюс третьей пары образован на центральном сердечнике и расположен напротив буферной камеры со смещением относительно плоскости внешнего полюса этой же пары полюсов в сторону газораспределителя, первый источник магнитного полюса размещен между внутренними полюсами первой и третьей пары, а второй источник магнитного поля установлен между внешними полюсами первой и третьей пары (RU 2139647, H05H 1/54, F03H 1/00, опубл. 10.10.1999). Принято в качестве прототипа.

В известном решении применение буферной камеры позволило добиться однородности поступающего в канал потока нейтральных частиц, а следовательно, и ионов. При работе патентуемого плазменного ускорителя требуемая топология магнитного поля, близкая к идеальной, достигается простым и эффективным конструктивным решением, за счет чего появилась возможность использовать для решения этой задачи лишь два источника магнитного поля. Это было достигнуто путем оптимального расположения третьей пары магнитных полюсов, позволяющего наиболее простым способом создать выпуклые магнитные силовые линии у стенок канала разрядной камеры в его выходной части. В результате проведенных экспериментов было установлено, что требуемый профиль магнитного поля в буферной камере организуется путем оптимизации ее размеров согласно приведенным в этом патенте соотношениям. Наклон сепаратрис и выпуклость магнитных силовых линий корректируется положением внешнего и внутреннего магнитных полюсов третьей пары. Такое конструктивное выполнение определяет создание близкой к идеальной (для управления формой ускоряемого потока ионов) конфигурации магнитного поля, при этом из энергонапряженной зоны внутреннего магнитопровода исключаются излишние источники магнитного поля. Данные возможности позволяют упростить конструкцию плазменного ускорителя, снизить его вес и габариты, уменьшить полуугол расходимости пучка ионов до значения $\leq \pm 15$ и повысить к.п.д. до 65-72%.

Стационарные плазменные двигатели (СПД) находят широкое применение на борту современных космических аппаратов. В настоящее время значительно вырос интерес к СПД малой мощности (меньше 200 Вт) как в России (Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов // О.А. Горшков, В.А. Муравлев, А.А. Шагайда; под ред. Академика РАН А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2008, с. 31-42, 184-189; К.Н. Козубский, В.М. Мурашко, Ю.П. Рылов и др. СПД работают в космосе // Физика плазмы, 2003, т. 29, №3, с. 277-292; Г.Э. Бугров, А.В. Десятков, М.В. Козинцева, А.С. Липатов. Интегральные параметры стационарного плазменного двигателя АТОН малой мощности в стационарном и "пулеметном" режимах // Космонавтика и ракетостроение, 2008, 3(52), с. 69-74; М.Б. Беликов, О.А. Горшков, Е.Н. Дышлюк и др. Разработка холловского двигателя малой мощности с ресурсом до 3000 часов // Космонавтика и ракетостроение, 2008, 3(52), с. 131-141; Bugrova A.I., Desiatskov A.V., Kaufman H.R. et al. "Design and experimental investigation of a small closed drift thruster", 27th International Electronic Propulsion Conference, 2001. -IEPC-2001-344), так и за рубежом (Polk J. "Electric propulsion in the USA", 30th International Electronic Propulsion Conference, Florence, Italy, 2007, -IEPC-2007-368; Polzin K.A., Markusie T.E., Stanoev B.J. et al. "Performance of a low power cylindrical Holl thruster", 29th International Electronic Propulsion Conference, 2005, -IEPC-2005-011; Biagioni L., Cesari U., Saverdi M., "Development status of the HT-100 miniaturized hall effect thruster system", 41th Join Propulsion Conference, 2005, -AIAA-2005-3875; Tahara H., Fujioka T., Kitano T. et al., "Optimization on magnetic field and acceleration

channel for low power hall thrusters", 28th International Electronic Propulsion Conference, 2003, -IEPC-2003-015).

Это связано, в основном, с расширением работ по созданию малых космических аппаратов нового поколения, которые могут быть использованы для решения задач телекоммуникации и дистанционного зондирования Земли. Функции, которые выполняет СПД на борту космического аппарата - это коррекция орбит космических аппаратов, удержание его на заданной орбите, сохранение нужной ориентации аппарата в пространстве.

Создание современных стационарных плазменных двигателей малой мощности идет как по пути масштабирования двигателей классической схемы, так и на основе модификации их магнитной системы. В первом случае работы выполняются в кооперации ОКБ "Факел" с Исследовательским центром им. М.В. Келдыша (Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов // О.А. Горшков, В.А. Муравлев, А.А. Шагайда; под ред. Академика РАН А.С. Коротева. - М.: Машиностроение, 2008, с. 31-42, 184-189; М.Б. Беликов, О.А. Горшков, Е.Н. Дышлок и др. Разработка холловского двигателя малой мощности с ресурсом до 3000 часов // Космонавтика и ракетостроение, 2008, 3(52), с. 131-141). Во втором случае работы выполняются ОКБ "Факел" совместно с НИИ прикладной механики и электродинамики (К.Н. Козубский, В.М. Мурашко, Ю.П. Рылов и др. СПД работают в космосе // Физика плазмы, 2003, т. 29, №3, с. 277-292). Многочисленные экспериментальные данные в приведенных публикациях показывают, что с уменьшением потребляемой СПД мощности анодный тяговый к.п.д. классических СПД снижается и при мощностях 100-200 Вт не превышает 30.

В МГТУ МИРЭА при конструировании плазменных двигателей, потребляющих малую мощность, используется как метод масштабирования, основанный на критерии Меликова - Морозова, подробно описанном в публикациях (А.И. Бугрова, Н.А. Масленников, А.И. Морозов. Законы подобия интегральных характеристик в УЗДП // ЖТФ, 1991, том 61, вып. 6, с. 45-51; А.И. Бугрова, А.В. Десятков, А.С. Липатов и др. Экспериментальные исследования стационарных плазменных двигателей семейства АТОН // Физика плазмы, 2010, т. 36, №4, с. 395-400), так и метод оптимизации магнитного поля, запатентованный в 1999 г. (RU 2139647).

Однако прямое использование метода масштабирования для получения действующей модели, уменьшенной по габаритам по отношению к аналогу, не обеспечивает получение требуемого результата.

Как показывают оценки, при мощности, потребляемой СПД, равной 140-160 Вт, необходим расход ксенона через анод ~ 0.7-0.9 мг/с. Разрядное напряжение должно быть порядка 170-200В. При таких входных параметрах снижение эффективности классических двигателей, потребляющих малую мощность по сравнению с СПД средней мощности (1-1.5 кВт) с 50% до 30% можно объяснить следующим образом. Из приведенных выше работ следует что, анодный к.п.д. двигателя связан с эффективностью процесса ионизации, который определяется коэффициентом использования газа и, потерями напряжения на ионизацию атомов ксенона АУ и параметром обмена который определяет величину разрядного тока. К.п.д. двигателя с учетом мощности, потребляемой магнитными катушками равен:

$$\eta_{\alpha\Sigma} = \frac{F^2}{2\dot{m}_a (N_p + N_k)}, (1)$$

где \dot{m}_a - расход газа через анод

Тяга развиваемая двигателем равна

$$F = \mu \dot{m}_a \sqrt{\frac{2e}{M} (U_p - \Delta U)}, \quad (2)$$

где M - масса иона ксенона, U_p - разрядное напряжение, коэффициент использования газа определяется как отношение ионного тока, выходящего из канала к массовому току:

$$\mu = \frac{I_i}{I_{\dot{m}}} \quad (3)$$

Мощность разряда:

$$N_p = I_p U_p, \quad (4)$$

$$\text{где } I_p = \xi I_{\dot{m}}, \quad (5)$$

$$I_{\dot{m}} = \frac{B}{M} \dot{m}_a \quad \text{- массовый ток.}$$

N_k - мощность, потребляемая катушками намагничивания:

$$N_k = I_B U_B + I_H U_H, \quad (6)$$

где I_B , I_H - токи во внутренней и наружной катушках, U_B , U_H - напряжения, подаваемые на катушки.

$$\text{Анодный удельный импульс тяги определяется по формуле: } P_{уд} = F / \dot{m}_a g \quad (7)$$

где g - ускорение свободного падения. Важной характеристикой для любого СПД является цена тяги, которая определяется как: $St = N_{\Sigma} / F$, (8)

где $N_{\Sigma} = N_p + N_k$ - суммарная мощность, потребляемая двигателем. St определяет мощность, затраченную на 1 мН тяги.

μ , ΔU и ξ зависят от одного параметра подобия β , который, в свою очередь зависит от расхода и радиальных размеров разрядного канала ускорителя [10]:

$$\beta = \frac{\dot{m}_a}{\pi(D_H - B)}, \quad (9)$$

где D_H - внутренний диаметр наружного канала, B - ширина канала.

Экспериментально установлено (А.И. Бугрова, Н.А. Масленников, А.И. Морозов. Законы подобия интегральных характеристик в УЗДП // ЖТФ, 1991, том 61, вып. 6, с. 45-51), что если β приближается к величине $2 \cdot 10^{-2}$ мг/с*мм, то значения μ и ξ стремятся к единице, ΔU - к цене ионизации, которая для ксенона составляет ~ 50 В, что равно примерно четырехкратному потенциалу ионизации атома ксенона. При этом эффективность работы СПД максимальна. Получить такое большое значение β для моделей малой мощности нельзя. Даже для расхода 0,8 мг/с, $B=8$ мм и $D_H=26$ мм получим $\beta=1.4 \cdot 10^{-2}$ мг/с*мм. Эта величина параметра подобия достаточна для эффективной работы двигателя (А.И. Бугрова, А.В. Десятков, А.С. Липатов и др. Экспериментальные исследования стационарных плазменных двигателей семейства АТОН // Физика плазмы, 2010, т. 36, №4, с. 395-400).

Однако реализовать конструкцию с таким малым диаметром разрядной камеры при использовании традиционных материалов невозможно. Действительно, для эффективной

работы двигателя любых размеров необходимо, чтобы на срезе величина радиальной компоненты магнитного поля была ~ 0.02 Тл. Для создания такого поля необходимы как минимум две катушки намагничивания - внутренняя и наружная. Эти катушки запитываются от автономных источников, так как токи в них для получения

5 необходимой величины магнитного поля должны быть значительно больше тока разряда, и мощность, потребляемая катушками намагничивания, дает существенный вклад в суммарную мощность $N_{\Sigma} = N_p + N_k$, потребляемую СПД. Внутренняя катушка наматывается на сердечник. Эксперименты показывают, что минимальный радиус сердечника, при котором нет насыщения железа, составляет ~ 3 мм. При четырехслойной

10 намотке внутренней катушки проводом ПОЖ с диаметром жилы 1 мм необходима высота намотки 5 мм. Кроме указанных размеров для обеспечения ресурса в 2500 часов с использованием керамики БГП-10 толщина стенки внутреннего изолятора должна быть не менее 3 мм. Таким образом, минимальный диаметр разрядной камеры при ширине канала 8 мм равен $D_H = 38$ мм. При этом критериальный коэффициент для

15 расхода $0,8$ мг/с равен $\beta = 0,008$ мг/с \cdot мм. Эта величина меньше необходимой и этим объясняется уменьшение к.п.д. двигателей малой мощности. Приведенные формулы и комментарии к ним относятся как к классическим СПД, так и к СПД нового поколения. Однако в СПД нового поколения типа АТОН (А.И. Бугрова, А.В. Десятков, А.С. Липатов и др. Экспериментальные исследования стационарных плазменных двигателей

20 семейства АТОН // Физика плазмы, 2010, т. 36, №4, с. 395-400) можно эффективно формировать оптимальную конфигурацию силовых линий магнитного поля внутри канала. Это обусловлено, в основном, отсутствием магнитных экранов, которые характерны для классических СПД.

Настоящее изобретение направлено на достижение технического результата, заключающегося в повышении тяговой характеристики СПД малой мощности, работающего на ксеноне, и упрощении конструкции при обеспечении гарантированного времени непрерывной работы.

25

Указанный технический результат достигается тем, что в стационарном плазменном двигателе малой мощности, содержащем разрядную камеру с кольцеобразным каналом

30 ионизации и ускорения, выполненную из электроизоляционного материала и имеющую открытый выход, полую буферную камеру, сообщенную со входом кольцеобразной камеры, катод, размещенный со стороны открытого выхода канала и сообщенный с линией для подачи ионизируемого газа, кольцеобразный анод, соосно установленный каналу разрядной камеры, кольцеобразное газораспределительное устройство,

35 размещенное в буферной камере без перекрытия входа в кольцеобразный канал и выполненное с отверстиями для подачи ионизируемого газа в буферную камеру, и магнитную систему из двух кольцеобразных магнитных устройств с источниками магнитного поля, расположенных соответственно со стороны внешних и со стороны

40 внутренних стенок разрядной камеры для создания магнитного поля в главном канале, обеспечивают наличие в этом канале радиально направленного магнитного поля с определенным градиентом для получения максимальной индукции на выходе главного канала, кольцевой анод, концентричный кольцеобразному каналу ионизации и ускорения, расположен на расстоянии от его открытого конца, во входной части главного канала за зоной расположения анода размещена кольцевая буферная камера, размер которой

45 в радиальном направлении превышает радиальный размер кольцеобразного канала ионизации и ускорения, газопроводы для подачи ионизируемого газа сообщены в направлении к аноду через кольцевой распределитель с зоной, отличной от зоны расположения анода, при этом со стороны заднего фланца закреплено кольцо из

немагнитной нержавеющей стали для формирования симметричной конфигурации силовых линий магнитного поля с помощью двух разнесенных в поперечном направлении относительно разрядной камеры источников магнитного поля кольцеобразных магнитных устройств магнитной системы.

5 Указанные признаки являются существенными и взаимосвязаны с образованием устойчивой совокупности существенных признаков, достаточной для получения требуемого технического результата.

Настоящее изобретение - модель поясняется конкретным примером исполнения, который, однако, не является единственно возможным, но наглядно демонстрирует
10 возможность достижения требуемого технического результата.

На фиг.1 - конструкция плазменного двигателя с замкнутым дрейфом электронов;
фиг.2 - показана конфигурация силовых линий модели СПД;

фиг.3 - приведен вольтамперные характеристики разряда от разрядного напряжения для трех расходов ксенона 0,7 мг/с, 0,8 мг/с и 0,9 мг/с;

15 фиг.4 - приведена зависимость тяги от разрядного напряжения для трех расходов ксенона 0,7 мг/с, 0,8 мг/с и 0,9 мг/с;

фиг.5 - приведена зависимость анодного удельного импульса от разрядного напряжения для трех расходов ксенона 0,7 мг/с, 0,8 мг/с и 0,9 мг/с;

фиг.6 - приведена зависимость тягового к.п.д. от разрядного напряжения для трех
20 расходов ксенона 0,7 мг/с, 0,8 мг/с и 0,9 мг/с;

фиг.7 - показана зависимость к.п.д. от суммарной мощности N_{Σ} для трех расходов ксенона 0,7 мг/с, 0,8 мг/с и 0,9 мг/с;

фиг.8 - показана зависимость удельного импульса $P_{уд}$ от суммарной мощности N_{Σ}
25 для трех расходов ксенона 0,7 мг/с, 0,8 мг/с и 0,9 мг/с;

фиг.9 - приведена экспериментальная зависимость разрядного тока, потребляемого
СПД;

фиг.10 - приведена экспериментальная зависимость суммарной мощности;

фиг.11 - приведена экспериментальная зависимость отношения мощности,
30 потребляемой катушками намагничивания, к мощности разряда;

фиг.12 - приведена экспериментальная зависимость параметра обмена от тока в
катушках намагничивания;

фиг.13 - показана зависимость удельного анодного импульса тяги от токов в катушках
намагничивания;

35 фиг.14 - показана зависимость к.п.д. от токов в катушках намагничивания;

фиг.15 - показан график изменения уровня колебаний разрядного тока;

фиг.16 - показан график изменения цены тяги;

фиг.17 - показана зависимость потока ионов первой, второй кратности (\dot{m}_1, \dot{m}_2) и
40 частиц гибнущих на стенках (\dot{m}_g) от тока в катушках намагничивания. \blacklozenge - \dot{m}_1 , \blacksquare - \dot{m}_2 ,

\blacktriangle - \dot{m}_g , $\dot{m}_a = 0.8 \text{ мг/с}$, $U_p = 180 \text{ В}$.

Согласно настоящему изобретению рассматривается конструкция плазменного двигателя с замкнутым дрейфом электронов. Этот двигатель содержит главный
45 кольцевой канал ионизации и ускорения, ограниченный конструктивными элементами из изолирующего материала и открытый на своем выходном конце. По крайней мере один полый катод сообщен с линией для подачи ионизируемого газа. Кольцевой анод, концентричный главному каналу, расположен на расстоянии от его открытого конца. Во входной части главного канала за зоной расположения анода размещена кольцевая

буферная камера, размер которой в радиальном направлении превышает радиальный размер главного кольцевого канала. Трубы для подачи ионизируемого газа сообщаются в направлении к аноду через кольцевой распределитель с зоной, отличной от зоны расположения анода. Средства для создания магнитного поля в главном канале
5 обеспечивают наличие в этом канале радиально направленного магнитного поля с определенным градиентом для получения максимальной индукции на выходе главного канала.

Патентуемый СПД содержит (фиг.1) разрядную камеру 1, выполненную из изолирующего (электроизоляционного) материала (БПП-10) с главным кольцевым
10 каналом 2 ионизации и ускорения, имеющую открытый выход 3. С кольцевым каналом 2 со стороны его входа сообщается полость буферной камеры, выполненной так же из изолирующего материала (электроизоляционного - БПП-10). В рассматриваемом примере буферная камера выполнена в разрядной камере и составляет конструкционную часть последней. Со стороны закрытой части кольцевого канала 2 установлен по
15 крайней мере один полый анод, сообщенный с линией для подачи ионизируемого газа (немагнитная газопроводная трубка 4 (сталь 12Х18Н10Т), закрепленная посредством изолирующей втулки 5 (БПП-10) в стенке, несущей немагнитные шпильки 6 (сталь 12Х18Н10Т) для прикрепления СПД к опоре).

Кольцевой анод 7 выполнен в виде втулки (сталь 12Х18Н10Т). При этом анод 7
20 расположен на расстоянии от его открытого конца. Кольцевой анод 7 через прижимную лапку 9 прижат (контактирует) с поверхностью кольцевой камеры 10 из немагнитного материала (сталь 12Х18Н10Т), имеющей отверстия для впрыска газового агента (например, газа ксенона), поступающего из газопроводной трубки 4 в полость кольцевой камеры 10 и из нее в канал 2. Кольцеобразный анод 7 устанавливается с помощью
25 жестких лапок 9 прижима к корпусу кольцевой камеры 10. Выполнение прижимных лапок 9 из электропроводного материала обеспечивает электрическое соединение анода с линией электропитания от положительного полюса источника постоянного напряжения.

Катод и анод 7 соответственно подключены к отрицательному и положительному
30 полюсам источника постоянного напряжения, образуя цепь электропитания. Кольцевая камера 10 размещена в полости буферной камеры и представляет собой кольцеобразное газораспределительное устройство без перекрытия входа в кольцеобразный канал 2. Ионизируемый газ подается в полый катод и в газораспределительное устройство 7 от отдельных или от общего источника сжатого газа. В качестве рабочего ионизируемого
35 газа используется инертный газ, в рассматриваемом случае ксенон (Xe). В кольцевом газораспределительном устройстве (камере 10) выполнено отверстие для подачи в него ионизируемого газа посредством подводной газопроводной трубки 4. Ионизируемый газ подается в буферную камеру через отверстия в камере 10, которые ориентированы перпендикулярно оси симметрии разрядной камеры 1, по окружности максимального
40 диаметра. Выполнение отверстий для подвода ионизируемого газа в буферную камеру, радиально направленными, способствует созданию равномерной по плотности рабочего газа зоны, занимающей практически весь объем буферной камеры.

Кольцевая буферная камера расположена в входной части главного канала за зоной
45 расположения анода, размер кольцевой буферной камеры в радиальном направлении превышает радиальный размер главного кольцевого канала 2.

Магнитное поле в полостях буферной и разрядной камер создается с помощью магнитной системы из двух магнитных устройств. Первое магнитное устройство включает в себя центральный цилиндрический сердечник 11 из Ст3-10, с источниками

магнитного поля 12 (внутренняя катушка) и магнитными полюсами 13. Второе магнитное устройство включает в себя корпус 14 из Ст3-10 Г-образной формы, внутри которого установлена кольцевая опора 15, по бокам которой расположены два дисковых ограничителя 16 из немагнитного материала (сталь 12Х18Н10Т). Таким образом, образуется кольцевая полость для источника магнитного поля 17 (наружная катушка).
 5 Вся сборка укрепляется опорным диском 18, несущим элементы присоединения магнитопроводящих стержневых элементов 19 из Ст3-10. Второе магнитное устройство выполнено в виде кольцевой сборки, которая одевается на разрядную камеру 1 со стороны открытого выхода 3. Посредством магнитопроводящих стержневых элементов
 10 19 идет скрепление магнитной системы. Внешние стержневые элементы 19 равномерно расположены вокруг камеры 10 и канала 2 по окружности и скрепляют торцевые части плазменного ускорителя.

Конструкция магнитной системы СПД позволяет создать путем подбора внутренних диаметров магнитных полюсов и взаимного расположения полюсов требуемую
 15 конфигурацию магнитного поля, которая характеризуется заданным градиентом поля (не менее 100 Э/см) от нулевого значения в области размещения анода до максимального значения на выходе из кольцеобразного канала 2 и углом между ветвями сепаратрис силовых линий поля, равным примерно 90°, причем сепаратрисы пересекают стенки канала 2 под углом примерно 45°. Такая конфигурация магнитного поля обеспечивает
 20 создание фокусирующей ионы геометрии магнитных силовых линий в выходной части канала 2 и положительного градиента магнитного поля от анода до выхода из канала. Причем вблизи анода создается магнитное поле с направлением сепаратрис под углом 45°, что обеспечивает условия для отрыва потока ионов от стенок канала и его фокусировку на срединную поверхность разрядной камеры.

25 Моделирование магнитного поля проводилось по стандартной компьютерной программе с использованием табличных характеристик магнитных материалов двигателя. Определялось положение полюсов магнитопровода, плотности токов во внутренней и наружной катушках намагничивания, толщина полюсов, а также
 30 положение и размер магнитной «дырки» в заднем фланце модели, наличие которой необходимо для моделей нового поколения типа "α" (RU 2139647). В результате была получена конфигурация силовых линий магнитного поля модели, изображенная на фиг.2, на котором следующими цифрами обозначены следующие элементы СПД: 20 - буферный объем, 21 - передний фланец, 22 - задний фланец, 23 - магнитная "дырка", 24 - наружная катушка, 25 - внутренняя катушка, 26 - шпилька. Этот рисунок соответствует
 35 плотностям токов во внутренней катушке $j_{KB}=2,4 \text{ МА/м}^2$ и наружной $j_{KH}=0,9 \text{ МА/м}^2$. При этом r - компонента поля на срезе модели по средней линии канала $V_r=0,0182 \text{ Тл}$, а на расстоянии 10 мм от среза вглубь канала $V_r=0,0092 \text{ Тл}$, то есть градиент поля на срезе по средней линии канала составляет 0,009 Тл/см. Эти величины близки к
 40 оптимальным.

Магнитная "дырка" представляет собой кольцо 27 (фиг.1) из немагнитной нержавеющей стали, вставленной в задний фланец модели. Она нужна для формирования симметричной конфигурации силовых линий магнитного поля с помощью только двух катушек намагничивания. Как видно из фиг.2, в модели реализован "фигурный"
 45 магнитопровод, позволяющий уменьшить ее габариты.

При эквипотенциализации силовых линий магнитного поля можно считать, что поток ионов движется почти перпендикулярно касательным к ним. Из симметрии картины силовых линий, изображенных на фиг.2 следует, что поток ионов в канале ускорителя

будет симметричным. В отличие от классических СПД здесь имеется сепаратриса магнитных силовых линий. Положение нуля магнитного поля совпадает с точкой пересечения ветвей сепаратрисы. Анод располагается напротив нуля магнитного поля и крепится на внешнем изоляторе. Таким образом, форма силовых линий магнитного поля является фокусирующей для ионного потока, и струя на выходе из модели оторвана от стенок изоляторов. Все это должно приводить к повышению к.п.д. анодного блока СПД.

В результате проведенной оптимизации была сконструирована и изготовлена лабораторная модель СПД (фиг.1). Габаритные размеры модели: диаметр ~70 мм, длина ~60 мм. Модель была испытана как на стенде МГТУ МИРЭА, так и на стенде ОКБ "Факел". Экспериментально измеренные интегральные параметры, полученные на обоих стендах, практически совпали.

Интегральные характеристики лабораторной модели СПД измерялись на стендах, вакуумные камеры которых откачивались диффузионными насосами. Расход ксенона в экспериментах изменялся в пределах от 0,7 мг/с до 0,9 мг/с. При этом динамическое давление не превышало $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. по воздуху. Потребляемая моделью суммарная мощность, включающая мощность, затрачиваемую на катушки намагничивания, изменялась в диапазоне от 125Вт до 200Вт.

Для трех расходов ксенона $\dot{m} = 0,7$ мг / с, 0,8 мг/с и 0,9 мг/с измерялись вольтамперные характеристики разряда и тяга, создаваемая ускорителем. Токи в катушках намагничивания подбирались по минимуму разрядного тока. Оказалось, что для всех расходов оптимальные токи во внутренней и наружной катушках равны $I_B = I_H = 5$ А. По формулам (1-7) рассчитывался анодный к.п.д. с учетом суммарной потребляемой мощности анодного блока $N_{\Sigma} = N_p + N_k$ и удельный импульс тяги. На фиг.3-6 приведены вольтамперные характеристики разряда (фиг.3), зависимость тяги (фиг.4), анодного удельного импульса (фиг.5) и тягового к.п.д. (фиг.6) от разрядного напряжения для трех указанных расходов. Из фиг.3 видно, что вольтамперные характеристики разряда для всех расходов практически вертикальны, что характеризует хорошую степень ионизации атомов ксенона. Тяга и удельный импульс (фиг.4 и 5) растут с ростом напряжения разряда по линейному закону. Максимальные значения тяги, полученные при $U_p = 210$ В равны 9,4 мН, 10,6 мН и 12,5 мН для расходов 0,7 мг/с, 0,8 мг/с и 0,9 мг/с соответственно. Удельный импульс при этом напряжении равен 1370с, 1380с и 1410с и тяговый анодный к.п.д достигает величины 43,8% при расходе 0,9 мг/с. Однако мощность, потребляемая ускорителем при этом расходе превышает 150 Вт. Это видно из фиг.7 и 8, где для этих режимов изображены кривые зависимости к.п.д. и удельного импульса $P_{уд}$ от суммарной мощности N_{Σ} . Из этого чертежа видно, что при расходе ксенона $\dot{m}_g = 0,7$ мг / с и напряжении 210В суммарная мощность не превышает 150Вт, при этом к.п.д. равен 41%, удельный импульс достигает значения $P_{уд} = 1370$ с, тяга равна 9,4 мН. Другим режимом с мощностью $N_{\Sigma} = 150$ Вт является режим с расходом 0,8 мг/с, к.п.д. 39%, $P_{уд} = 1240$ с, $F = 9,7$ мН, $U_p = 190$ В.

Было проверено влияние величины магнитного поля на интегральные параметры СПД при входных параметрах $\dot{m}_a = 0,8$ мг / с, $U_p = 180$ В. Для этого изменялись токи в катушках намагничивания от 3А до 5А с шагом 0.25А, причем как во внутренней, так и в наружной катушках токи были одинаковы, поэтому конфигурация силовых линий не менялась.

На рис.9-12 приведены экспериментальные зависимости разрядного тока (фиг.9), суммарной мощности, потребляемой СПД (фиг.10), отношения мощности, потребляемой катушками намагничивания к мощности разряда (фиг.11) и параметра обмена (фиг.12) от тока в катушках намагничивания. Из рисунков видно, что с увеличением магнитного поля ток разряда и, соответственно, суммарная мощность, потребляемая СПД, сначала резко падают, а затем выходят на «полку». Относительная доля мощности, потребляемая катушками намагничивания, растет практически по линейному закону (фиг.11). Параметр обмена асимптотически убывает до значения 1,23 (фиг.12).

В каждой экспериментальной точке была измерена тяга и рассчитаны зависимости удельного анодного импульса тяги и к.п.д. от токов в катушках намагничивания. Эти кривые представлены на фиг.13 и 14. Обращает на себя внимание тот факт, что тяга и, соответственно, удельный импульс в указанном диапазоне изменения величины магнитного поля меняются незначительно (фиг.13). На фиг.14 η_a - анодный к.п.д. без учета потерь в катушках намагничивания, $\eta_{a\Sigma}$ - к.п.д. анодного блока с учетом этих потерь. Из фиг.14 видно, что $\eta_{a\Sigma}$ сначала резко возрастает, достигая максимума, а затем незначительно падает, в то время как η_a монотонно возрастает и выходит на «полку». Поэтому снижение эффективности работы модели $\eta_{a\Sigma}$ можно объяснить увеличением разогрева катушек намагничивания при пропускании через них большего тока. На фиг.15 показано как меняется уровень колебаний разрядного тока, а на фиг.16 - цена тяги. Видно, что уровень колебаний с увеличением тока в катушках убывает от 4.5% до 2.5%. Цена тяги также уменьшается от 18 Вт/мН до 16 Вт/мН. Из фиг.13-16 следует, что при увеличении токов в магнитных катушках до оптимальных значений (минимум разрядного тока) эффективность работы двигателя по основным параметрам возрастает.

Объяснить поведение интегральных параметров с увеличением тока в магнитных катушках, а значит с увеличением магнитного поля в зоне ионизации, можно, исходя из следующих соображений. Плазменный поток, выходящий из СПД, является полностью ионизованной средой, состоящей из ионов ксенона первой и второй кратности и частиц, выпавших из ускорения. Доля последних может быть связана с различными причинами: пролет без ионизации в ускорителе, гибель ионов на стенках и превращение их в нейтралы. Согласно (А.И. Бугрова, А.С. Липатов, А.И. Морозов, С.В. Баранов. Влияние соотношения долей ионов разной кратности на интегральные параметры СПД типа АТОН // Письма в ЖТФ, том 31, вып. 21, 2005, стр. 87-94) эти потоки связаны с интегральными параметрами соотношениями:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_g \quad (10)$$

$$F = \sqrt{\frac{2}{M}(U_p - \Delta U)} (\dot{m}_1 + \sqrt{2\dot{m}_2}) \quad (11)$$

$$I_p = \frac{B}{M} (1 + k) (\dot{m}_1 + 2\dot{m}_2 + \dot{m}_g) \quad (12)$$

где \dot{m}_a - суммарный расход ксенона, \dot{m}_1 и \dot{m}_2 - поток однократно и двукратно ионизованных атомов, \dot{m}_g - поток частиц, гибнущих на стенках, k - коэффициент, определяющий вклад сквозного тока в ток разряда ($k \approx 0,1$). На фиг.17 приведены зависимости \dot{m}_1 , \dot{m}_2 и \dot{m}_g , от тока в катушках намагничивания ($I_B = I_H$), который меняется в пределах от 3А до 5А. Из чертежа видно, что при увеличении тока в катушках доля однократно ионизованных ионов возрастает от 31% до 64%, а доля ионов второй

кратности убывает от 39% до 15%. Кроме того, уменьшается доля частиц, гибнущих на стенках разрядной камеры. Уменьшение доли двухзарядных ионов и частиц, гибнущих на стенках, приводит к увеличению к.п.д. (В. Ким, В.И. Козлов, В.М. Мурашко и др. Исследование особенностей работы стационарных плазменных двигателей при

5 повышенных разрядных напряжениях // Космонавтика и ракетостроение, 2008, 3(52), сс. 21-27) и незначительному уменьшению удельного импульса. Это связано с тем, что при уменьшении количества ионов второй кратности снижается средняя скорость истечения струи, а значит, уменьшается удельный импульс. При этом уменьшаются потери на ионизацию.

10 Важным параметром СПД является расходимость истекающей из двигателя струи, которая определяется телесным углом, в который попадает 90% направленного потока ионов. Для классических моделей М-70 и СПД-100 полуугол расходимости составляет $\pm 45^\circ$ (К.Н. Козубский, В.М. Мурашко, Ю.П. Рылов и др. СПД работают в космосе // Физика плазмы, 2003, т. 29, №3, с. 277-292).

15 Для определения расходимости модели α -40 были сняты профили направленного ионного тока на двойной зонд. В результате обработки этих кривых был получен полуугол расходимости, равный $\pm 25^\circ$, который существенно меньше, чем у классических моделей. Уменьшение расходимости струи у СПД объясняется смещением «центра тяжести» зоны ионизации вглубь канала. Это реализовано с помощью буферного

20 объема, где происходит изотропизация нейтральных атомов, и создания фокусирующей геометрии силовых линий магнитного поля в канале. Следует отметить, что при уменьшении угла расходимости струи происходит увеличение ширины поясков эрозии как на наружном, так и внутреннем канале разрядной камеры. Это означает, что, возможно, расходимость струи влияет на ресурс двигателя.

25 По установленным критериям ресурс определяется временем непрерывной работы двигателя, при котором толщина изоляторов на срезе становится равной нулю. Для расчета толщины стенок изолятора по данному ресурсу необходимо определить скорость эрозии на срезе в радиальном направлении. Были проведены кратковременные ресурсные испытания СПД, работающей в режиме $U_p=210В$, $\dot{m}_g = 0,7 \frac{мг}{с}$ при

30 вкладываемой мощности $N_\Sigma \approx 150Вт$ в течение 50 часов.

Эксперименты показали, что средняя скорость эрозии на срезе СПД для внутренней стенки составила 3 мкм/час, наружной - 2,25 мкм/час. По этим данным, используя логарифмическую аппроксимацию, было получено, что для ресурса 2500 часов толщина

35 внутренней керамики должна составлять 2,9 мм, наружной - 2,2 мм.

Сравнительные характеристики СПД малой мощности, разработанные разными организациями, приведены в таблице.

40

Таблица		Модель (разработчик)		
Параметр	Модель (разработчик)			
	СПД-50М "Центр Келдыша"	СПД по настоящему изобретению	ХНТ 100 НЕТ Европа	
Напряжение разряда, В	200	210	160	
Ток разряда, А	0,72	0,63	1	
Мощность, Вт	147,5	147	160	
Тяга, мН	9,4	9,4	10	
45 Анодный удельный импульс тяги, с	1090	1370	950	
Анодный к.п.д., %	34,2	41,4	31,2	
Ресурс разрядной камеры, час	>1800	2500*	-	

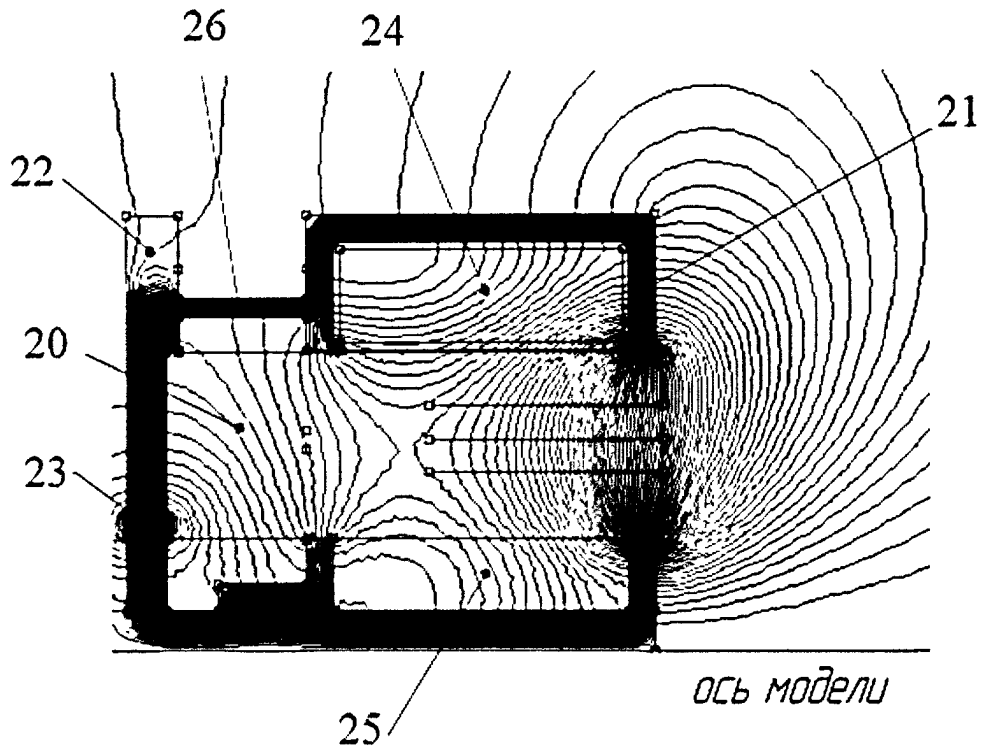
* - прогнозируемый ресурс.

Из таблицы видно, что модель СПД по настоящему изобретению обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогичными СПД, разработанными как в РФ, так и за рубежом. Так, при вкладываемой мощности ~150 Вт, напряжении разряда 210В, расходе ксенона 0,7 мг/с тяга составила 9.4 мН, анодный удельный импульс тяги равен ~1370 с, анодный к.п.д. с учетом мощности, потребляемой катушками намагничивания, равен 41%. Другой режим с большей тягой (9.7 мН), но с меньшим удельным импульсом (1240 с) при такой же вкладываемой мощности, был получен при расходе 0.8 мг/с и напряжении 190 В. При этом к.п.д. составил 39%. В этом режиме уровень колебаний разрядного тока 2.5%. Для мощности 140 Вт проведены исследования влияния величины магнитного поля на интегральные параметры модели. Показано, что интегральные характеристики определяются соотношением долей одно- и двухзарядных ионов атомов ксенона, которое зависит не только от конфигурации силовых линий, но и от его величины. Полуугол расходимости струи равен $\pm 25^\circ$. Прогнозируемый ресурс составляет 2500 часов. Приведенные в работе данные показывают, что эффективность СПД выше, чем у известных аналогов.

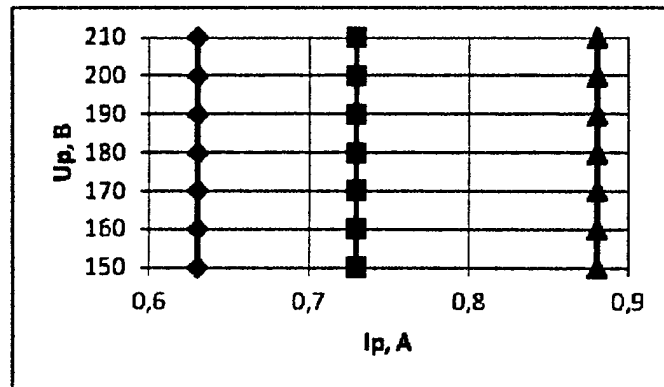
Такой плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов согласно патентуемому изобретению может использоваться, в первую очередь, в космической технике в качестве исполнительного органа электрореактивной двигательной установки. Кроме того, плазменный ускоритель может применяться в научных исследованиях, для моделирования направленных плазменных потоков.

Формула изобретения

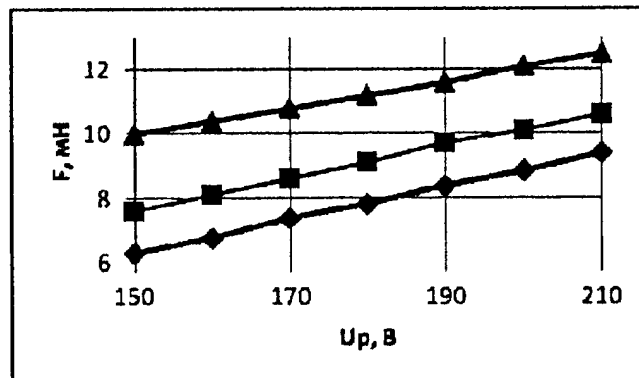
Стационарный плазменный двигатель малой мощности, содержащий разрядную камеру с кольцеобразным каналом ионизации и ускорения, выполненную из электроизоляционного материала и имеющую открытый выход, полую буферную камеру, сообщенную со входом кольцеобразной камеры, катод, размещенный со стороны открытого выхода канала и сообщенный с линией для подачи ионизируемого газа, кольцеобразный анод, соосно установленный каналу разрядной камеры, кольцеобразное газораспределительное устройство, размещенное в буферной камере без перекрытия входа в кольцеобразный канал и выполненное с отверстиями для подачи ионизируемого газа в буферную камеру, и магнитную систему из двух кольцеобразных магнитных устройств с источниками магнитного поля, расположенных соответственно со стороны внешних и со стороны внутренних стенок разрядной камеры для создания магнитного поля в главном канале, обеспечивающих наличие в этом канале радиально направленного магнитного поля с определенным градиентом для получения максимальной индукции на выходе главного канала, отличающийся тем, что кольцевой анод, концентричный кольцеобразному каналу ионизации и ускорения, расположен на расстоянии от его открытого конца, во входной части главного канала за зоной расположения анода размещена кольцевая буферная камера, размер которой в радиальном направлении превышает радиальный размер кольцеобразного канала ионизации и ускорения, газопроводы для подачи ионизируемого газа сообщены в направлении к аноду через кольцевой распределитель с зоной, отличной от зоны расположения анода, при этом со стороны заднего фланца закреплено кольцо из немагнитной нержавеющей стали для формирования симметричной конфигурации силовых линий магнитного поля с помощью двух разнесенных в поперечном направлении относительно разрядной камеры источников магнитного поля кольцеобразных магнитных устройств магнитной системы.



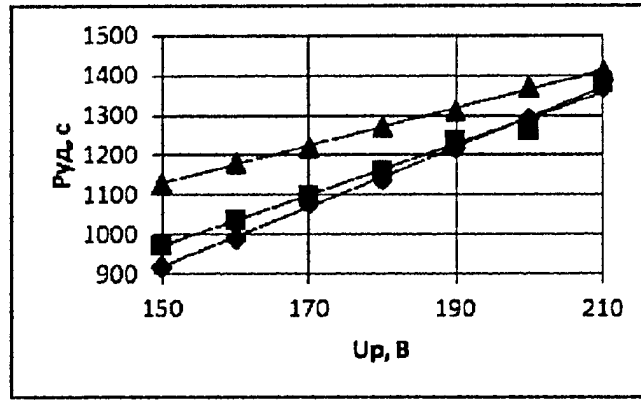
ФИГ. 2



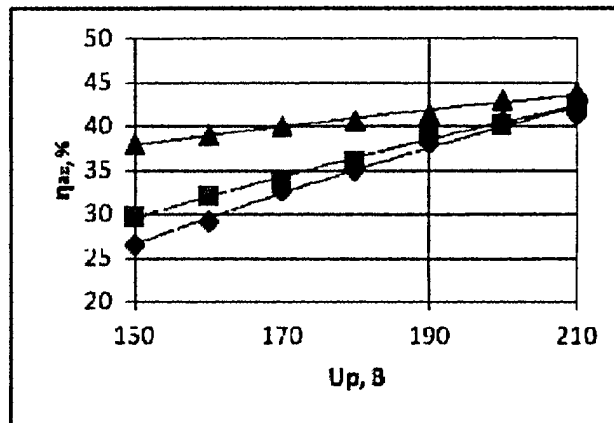
ФИГ. 3



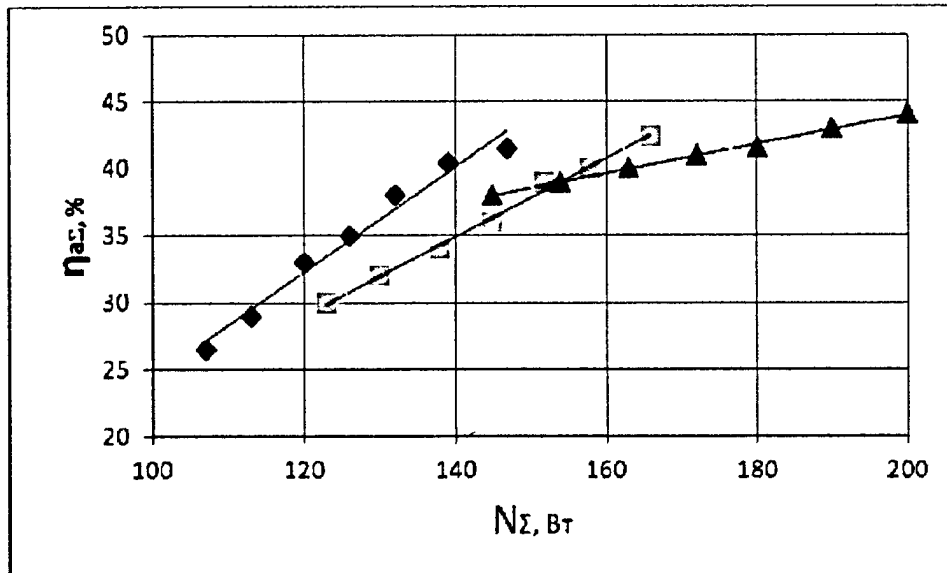
ФИГ. 4



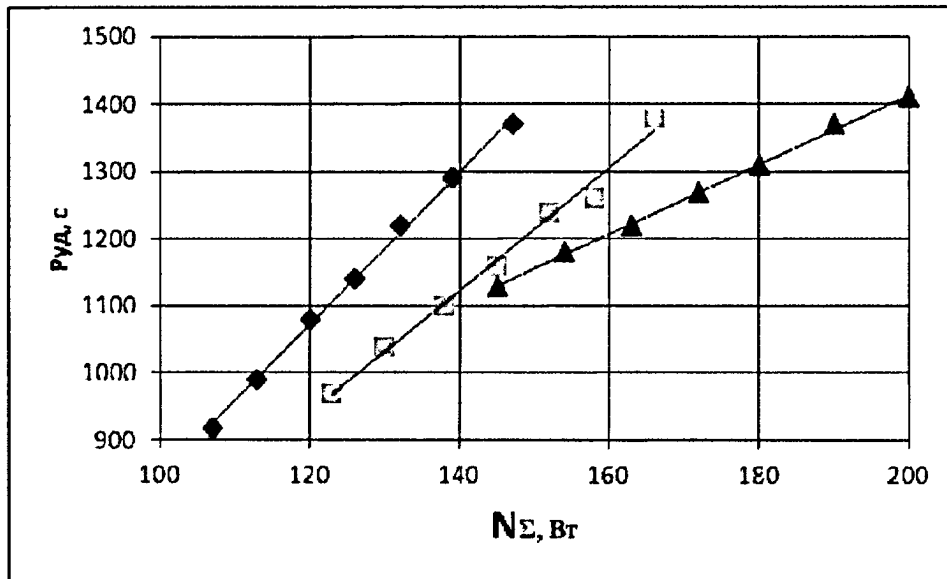
ФИГ. 5



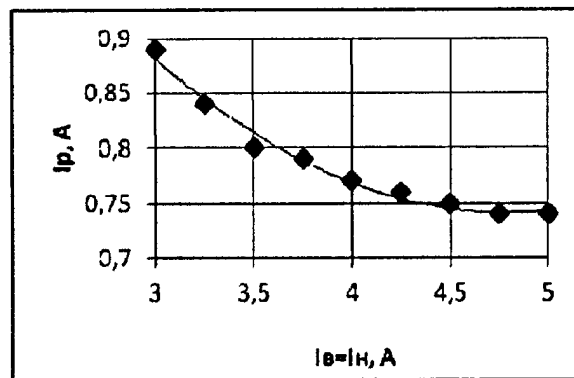
ФИГ. 6



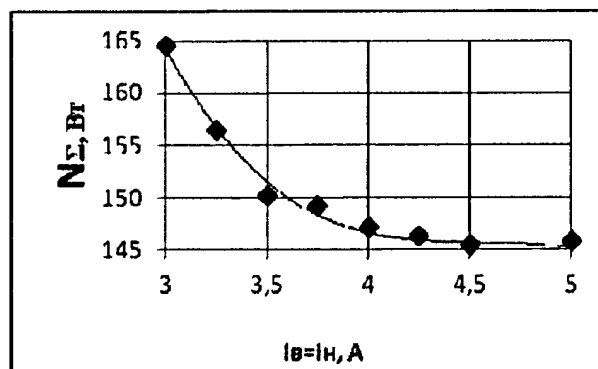
ФИГ. 7



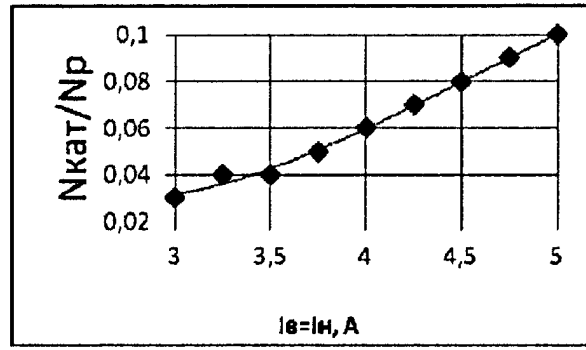
ФИГ. 8



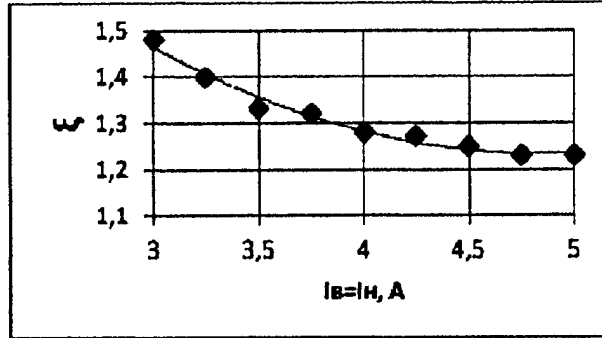
ФИГ. 9



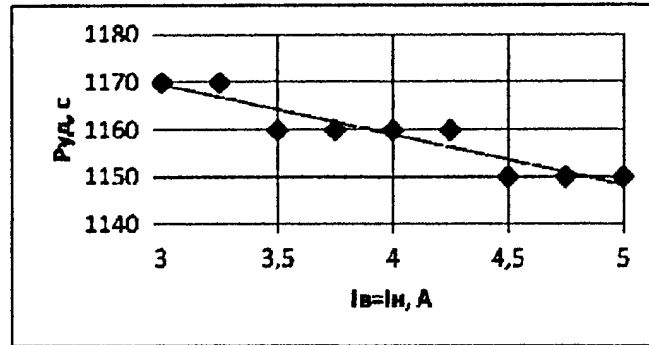
ФИГ. 10



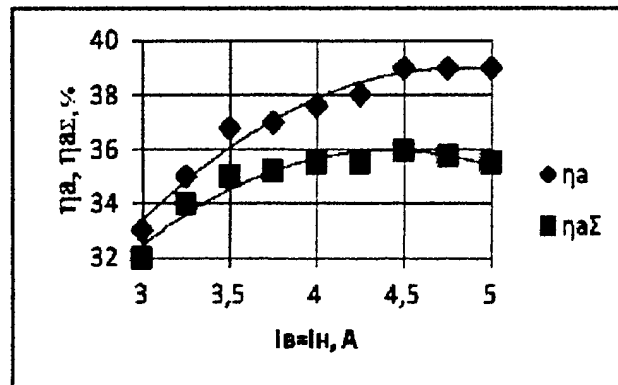
ФИГ. 11



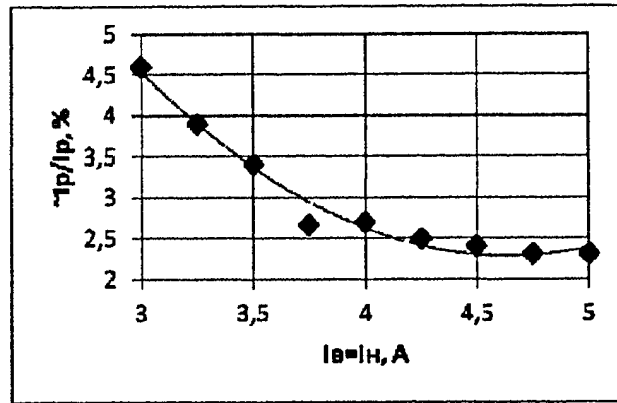
ФИГ. 12



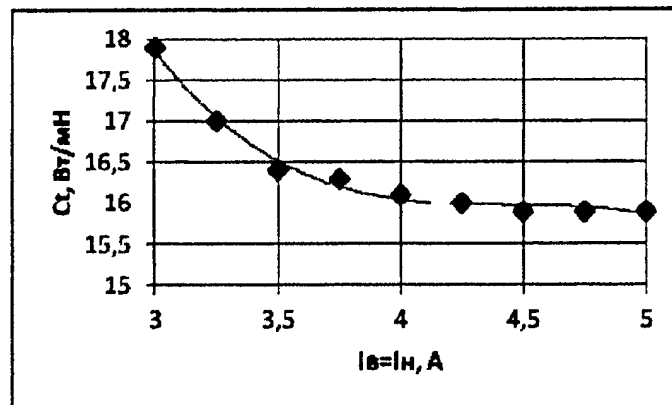
ФИГ. 13



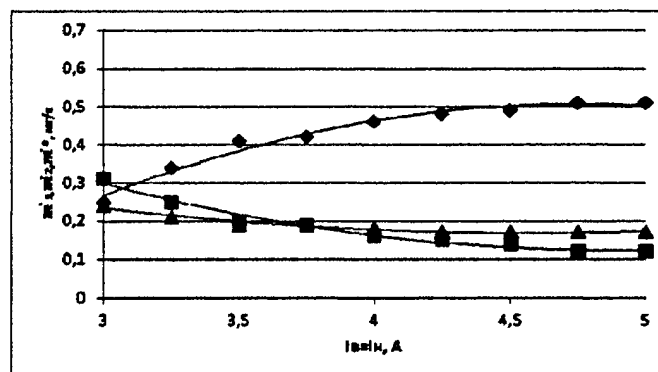
ФИГ. 14



ФИГ. 15



ФИГ. 16



ФИГ. 17