



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012136573/06, 28.08.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
28.08.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.08.2012

(43) Дата публикации заявки: 10.03.2014 Бюл. № 7

(45) Опубликовано: 20.06.2014 Бюл. № 17

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: US 2012085918 A1, 12.04.2012. RU
2088802 C1, 27.08.1997. RU 2211952 C2,
10.09.2003. RU 2134220 C1, 10.08.1999. US
2008072565 A1, 27.03.2008

Адрес для переписки:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, МГУ
имени М.В. Ломоносова, О.Г. Дьяченко

(72) Автор(ы):

Дворкин Владимир Владимирович (RU),
Манкелевич Юрий Александрович (RU),
Минаков Павел Владимирович (RU),
Поройков Александр Юрьевич (RU),
Рахимов Александр Турсунович (RU),
Сень Василий Васильевич (RU),
Ястребов Александр Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова" (МГУ) (RU)

(54) СПОСОБ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА ИОННОГО ПОТОКА

(57) Реферат:

Изобретение относится к пучковым технологиям и может быть использовано для компенсации (нейтрализации) пространственного заряда пучка положительных ионов электроракетных двигателей, в частности, для применения в двигательных установках микро- и наноспутников. Способ нейтрализации объемного заряда ионного потока электроракетной двигательной установки путем эмиссии электронов множественными автоэмиссионными источниками. Источники расположены вокруг каждого из электроракетных двигателей указанной установки. Управление токами эмиссии отдельных автоэмиссионных

источников или групп указанных множественных автоэмиссионных источников производят независимо друг от друга. Техническим результатом является снижение расхода рабочего тела ЭРД, в том числе многорежимного ЭРД или многодвигательной установки, обеспечение минимального времени выхода на рабочий режим нейтрализации и быстрого переключения электронного тока согласовано с режимом работы такого ЭРД, оптимизирование транспорта электронов в область нейтрализации с тем, чтобы уменьшить расходимость ионного пучка

или отклонения его, изменяя таким образом направление ионной тяги. 5 з.п. ф-лы.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 520 270** (13) **C2**

(51) Int. Cl.
F03H 1/00 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2012136573/06, 28.08.2012**

(24) Effective date for property rights:
28.08.2012

Priority:

(22) Date of filing: **28.08.2012**

(43) Application published: **10.03.2014** Bull. № 7

(45) Date of publication: **20.06.2014** Bull. № 17

Mail address:

**119991, Moskva, GSP-1, Leninskie gory, 1, MGU
imeni M.V. Lomonosova, O.G. D'jachenko**

(72) Inventor(s):

**Dvorkin Vladimir Vladimirovich (RU),
Mankelevich Jurij Aleksandrovich (RU),
Minakov Pavel Vladimirovich (RU),
Porojkov Aleksandr Jur'evich (RU),
Rakhimov Aleksandr Tursunovich (RU),
Sen' Vasilij Vasil'evich (RU),
Jastrebov Aleksandr Aleksandrovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
professional'nogo obrazovanija "Moskovskij
gosudarstvennyj universitet imeni M.V.
Lomonosova" (MGU) (RU)**

(54) **METHOD OF NEUTRALISING SPATIAL CHARGE OF ION STREAM**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to beam engineering and can be used to compensate (neutralise) for spatial charge of a beam of positive ions of electro-jet engines, particularly for use in propulsion devices of micro- and nanosatellites. The method of neutralising spatial charge of an ion stream of an electro-jet propulsion device by emitting electrons through multiple autoemission sources. Sources are placed around each of the electro-jet engines of said device. Emission currents of separate autoemission sources or groups of said multiple autoemission sources are controlled indepen-

dent of each other.

EFFECT: reduced consumption the working medium of an electro-jet engine, including a multimode electro-jet engine or a multi-engine apparatus, minimum time for switching to neutralisation operating mode and fast switching of electron current according to the operating mode of said electro-jet engine, optimising transfer of electrons into the neutralisation region in order to reduce divergence of the ion beam or deviation thereof, thereby changing the direction of ion thrust.

6 cl

Область техники.

Изобретение относится к пучковым технологиям и может быть использовано для компенсации (нейтрализации) пространственного заряда пучка положительных ионов электроракетных двигателей, в частности, для применения в двигательных установках микро- и наноспутников.

Предшествующий уровень техники.

В ионных ракетных двигателях для обеспечения нормальной работы в космических условиях необходима инжекция ионов и электронов в равных количествах, чтобы космический аппарат (КА) не заряжался отрицательно и этот заряд не тормозил ионы во время работы ионного двигателя из-за электростатического взаимодействия. Эта задача решается с помощью применения специального устройства - нейтрализатора, являющегося источником электронов, который устанавливается на выходе из ускорительной системы ионного потока электроразрядного двигателя (ЭРД).

Цель предлагаемого изобретения заключается в том, чтобы осуществить нейтрализацию (компенсацию) объемного заряда ионного потока ЭРД таким образом, чтобы дополнительно обеспечить достижение оптимальных функциональных параметров и характеристик ЭРД для малых космических аппаратов, например снизить расход рабочего тела ЭРД и, благодаря этому, продлить срок эксплуатации такого КА, в течение которого возможно осуществлять маневрирование для более точного его позиционирования в пространстве. Особенно важно реализовать указанные цели в случае микро- и наноспутников весом от нескольких десятков до единиц килограммов и менее, поскольку запас рабочего тела ЭРД (обычно, ксенона или, реже, криптона или их смесь) таких КА ограничен. Существенно также, в частности, в многорежимных ЭРД иметь возможность обеспечивать минимальное время выхода на рабочий режим нейтрализации и быстрого переключения электронного тока согласованно с режимом работы такого ЭРД. Желательно также, чтобы реализуемый способ нейтрализации объемного заряда ионного потока ЭРД позволял также за счет электростатического взаимодействия эмитируемого отрицательного заряда с потоком ионов уменьшать расходимость ионного пучка, или же отклонять его, изменяя таким образом направление вектор ионной тяги.

Компенсация (нейтрализация) пространственного заряда пучка положительных ионов в общем случае ионно-пучковых технологий осуществляется введением в поток ионов свободных электронов и/или электроотрицательных молекул или атомов, обладающих высоким сродством к электрону и большими сечениями образования отрицательных ионов при столкновении со свободными электронами соответственно. Потоки свободных электронов и электроотрицательных молекул или атомов поддерживают такими, чтобы плотность положительного заряда пучка, по крайней мере, не превышала плотности его отрицательного заряда присутствующих в нем электронов и образованных отрицательных ионов. Примеры реализации способов нейтрализации положительного заряда ионных пучков для технологических применений, прежде всего в технологиях обработки поверхности ионным пучком и ионной имплантации, подробно описаны, включая содержащиеся многочисленные цитирования, например, в патенте США N5531420 "ION BEAM ELECTRON NEUTRALIZER", опублик. 02.07.1996 г., патенте США N5703375 "METHOD AND APPARATUS FOR ION BEAM NEUTRALIZATION", опублик. 30.12.1997 г., патенте РФ N2105368 "СПОСОБ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ПУЧКА ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ", опублик. 20.02.1998 г., патенте США N 6329650 "SPACE CHARGE NEUTRALIZATION OF AN ION BEAM", опублик. 11.12.2001 г., патенте США N

6359286 "METHOD AND APPARATUS FOR NEUTRALIZING SPACE CHARGE IN AN ION BEAM", опубл. 19.03.2002 г., патенте США N 6515408 "ION BEAM APPARATUS AND A METHOD FOR NEUTRALIZING SPACE CHARGE IN AN ION BEAM", опубл. 04.02.2003 г., патенте США N 6815697 "ION BEAM CHARGE NEUTRALIZER AND METHOD THEREFORE", опубл. 09.11.2004 г., патенте США N 6872959 "THERMOELECTRON GENERATING SOURCE AND ION BEAM RADIATING APPARATUS WITH THE SAME", опубл. 29.03.2005 г., патенте США N 7276711 "BEAM SPACE-CHARGE COMPENSATION DEVICE AND ION IMPLANTATION SYSTEM HAVING THE SAME", опубл. 02.10.2007 г., дающие общее представление о способах нейтрализации

электростатического заряда ионного потока в таких технологиях.

Заметим, что в патенте США N6762423 "METHODS AND APPARATUS FOR ION BEAM NEUTRALIZATION IN MAGNETS", опубл. 13.07.2004 г. описан, в частности, способ нейтрализации объемного заряда ионного пучка электронами, эмитируемыми в направлении перпендикулярно оси ионного пучка расположенными в виде массива или матрицы вдоль пути ионного пучка по всей его ширине множественными автоэмиссионными источниками. Все автоэмиссионные источники подключены к источнику питания и работают в едином для всех режиме автоэмиссии.

В подавляющем большинстве существующих и разрабатываемых электроракетных двигателей (ЭРД) реактивная струя формируется ускоренным потоком положительных ионов, как правило, ксенона или, реже, криптона или аргона. Соответственно, электрический заряд ионного пучка, формируемого таким электроракетным двигателем, должен быть скомпенсирован электронами, эмитируемыми в область существования объемного положительного заряда. Но, в отличие от задачи компенсации положительного заряда ионного потока, решаемой в технологических наземных

установках, в которых актуально предотвратить накопление положительного заряда на обрабатываемой ионным пучком поверхности, в электроракетных двигателях цель нейтрализации заключается в исключении накопления электростатического заряда на корпусе самого космического аппарата (КА), что приводит к определенным отличиям в способах и устройствах нейтрализации потока ионов. Характерные примеры реализации способа описаны, в частности в патенте РФ N 2092983 "ПЛАЗМЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ", опубл. 10.10.1997 г., патенте США N6195980 "ELECTROSTATIC PROPULSION ENGINE WITH NEUTRALIZING ION SOURCE", опубл. 06.03.2001 г. Для целей настоящего изобретения важно отметить, что во всех вышеупомянутых электроракетных двигательных установках применяется способ нейтрализации

объемного заряда ионного потока эмиссией электронов единичным источником - нейтрализатором, как правило, на основе плазмы электрического разряда в полем катоде, иницируемом электронами, эмитируемыми термоэмиссионным катодом.

Различные конструкционные особенности плазменной камеры нейтрализатора ЭРД, применяемого в реализациях такого способа нейтрализации объемного заряда ионного потока, детально описываются, например, в патентах РФ N2168793 "КАТОД-КОМПЕНСАТОР", опубл. 10.06.2001 г., N 2173001 "КАТОД-КОМПЕНСАТОР", опубл. 27.08.2001 г., N 2173002 "КАТОД-КОМПЕНСАТОР", опубл. 27.08.2001 г., в патенте США N 6336318 "ION THRUSTER HAVING A HOLLOW CATHODE ASSEMBLY WITH AN ENCAPSULATED HEATER, AND ITS FABRICATION", опубл. 08.01.2002 г., в патентах РФ N 2287203 "ПЛАЗМЕННЫЙ КАТОД-КОМПЕНСАТОР", опубл. 10.11.2006 г., N 2454046 "ПЛАЗМЕННЫЙ ЭМИТТЕР ЭЛЕКТРОНОВ", опубл. 27.01.2011 г., N 2410567 "БЛОЧНЫЙ КАТОД-КОМПЕНСАТОР", опубл. 13.01.2011 г. Известны также варианты реализации способа на основе использования плазменного источника электронов на

основе емкостного высокочастотного (ВЧ) дугового разряда. Например, в патенте США N6870321 "HIGH-FREQUENCY ELECTRON SOURCE", опубл. 22.03.2005 г. описывается нейтрализатор на основе ВЧ плазмы с частотой в диапазоне 100 кГц-50 МГц. Следует отметить, однако, что такой способ возбуждения разряда требует использования согласующего волновую нагрузку устройства, что усложняет конструкцию нейтрализатора. Полностью исключить использование электродов при создании плазмы в источнике электронов можно благодаря возбуждению ВЧ плазмы не в емкостном, а в магнитно-индукционном разряде, как это предложено в патентах США N 7498592 "NON-AMBIPOlar RADIO-FREQUENCY PLASMA ELECTRON SOURCE AND SYSTEMS AND METHODS FOR GENERATING ELECTRON BEAMS", опубл. 03.03.2009 г. и N 7875867 "NON-AMBIPOlar RADIO-FREQUENCY PLASMA ELECTRON SOURCE AND SYSTEMS AND METHODS FOR GENERATING ELECTRON BEAMS", опубл. 25.01.2011 г. Недостатком такого решения является то, что использование магнитной системы в таком источнике значительно увеличивает его массогабаритные характеристики. Кроме того, для поддержания плазмы расходуется рабочий газ, что делает эту технологию малоприменимой на малых КЛ из-за жестких ограничений по массе и энергопотреблению.

Варианты осуществления способов нейтрализации объемного заряда ионных пучков применительно к ионным ЭРД без использования термоэмиссионного катода описываются также, например, в патенте РФ N 2429591 "СПОСОБ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА ИОННЫХ ПУЧКОВ В ИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ (ВАРИАНТЫ)", опубл. 20.09.2011 г. и N2458490 "СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ (ВАРИАНТЫ)", опубл. 10.08.2012 г. Способ основан на возбуждении с помощью вспомогательного источника энергии в автономной полости нейтрализатора газоразрядной плазмы и использовании плазмы для эмиссии электронов в зону нейтрализации объемного заряда ионных пучков. В качестве вспомогательного источника энергии используют импульсный лазер. Луч лазера с фокусировкой направляют в автономную полость нейтрализатора, наполняемого притоком газа рабочего вещества ионного двигателя, где в зоне вблизи фокуса в объеме газопотока рабочего вещества возбуждают разряд, создают плазму и осуществляют эмиссию электронов в ускоряемый ионный пучок с границы внутренней плазмы под действием внешнего электрического поля. В варианте способа дополнительно направляют в автономную полость нейтрализатора пары цезия. Устройство нейтрализации объемного заряда ионных пучков содержит вспомогательный источник энергии на основе импульсного лазера. Недостатком такого подхода является избыточное усложнение конструкции, что потенциально снижает его отказоустойчивость.

Разработки электроракетных двигателей, в которых реализуется способ нейтрализации заряда ионного потока эмиссией электронов из единичного нейтрализатора, активно продолжают и, в частности, отрабатывается применение новых материалов с целью увеличить ресурс электроракетного двигателя при сохранении эффективности создания реактивной тяги, как это описано, например, в заявке на получение патента США 2012/0117938 "HALL EFFECT PLASMA THRUSTER", опубл. 17.05.2012 г., или способы оптимизации конфигурации и параметров магнитной системы, учет топологии магнитного поля и размещение катода-компенсатора в зоне минимального воздействия ускоренного потока плазмы, как это описано, например,

в патенте РФ N 2426913 "СПОСОБ РАЗМЕЩЕНИЯ КАТОДА-КОМПЕНСАТОРА В ПЛАЗМЕННОМ ДВИГАТЕЛЕ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ", опубл. 20.08.2011 г.

Однако с развитием концепции использования микро и наноспутников весом до единиц килограммов появилась необходимость создания специализированных двигательных установок, которые должны отличаться низким энергопотреблением, малой массой и высокой эффективностью использования рабочего тела. Пример такого электроракетного двигателя описан, например, в патенте США N 6960888 "METHOD OF PRODUCING AND ACCELERATING AN ION BEAM" опубл. 01.10.2005 г. Очевидно, что традиционные способы компенсации объемного положительного заряда ионного потока в электроракетной двигательной установке микро- и наноспутников и реализующие эти способы нейтрализаторы на основе плазмы электрического разряда малопригодны, поскольку массогабаритные характеристики таких нейтрализаторов становятся сопоставимы с самим двигателем и не могут быть существенно улучшены. Кроме того, их функционирование подразумевает расход неиспользуемого для создания тяги рабочего газа, что также ограничивает применимость реализуемых с их помощью способов нейтрализации объемного заряда ионного потока ЭРД микро- и наноспутников.

Способ нейтрализации объемного заряда ионного потока ЭРД, осуществляемый при помощи нейтрализатора на основе автоэмиссионного катода, позволяет реализовать более эффективные электроракетные двигатели малой тяги с требуемыми массогабаритными параметрами и энергопотреблением, недостижимыми при использовании стандартных способов нейтрализации заряда ионного потока. Например, известен способ нейтрализации объемного заряда ионного потока в электроракетной двигательной установке эмиссией электронов множественными автоэмиссионными источниками, расположенными в виде матрицы отдельных эмиттеров. В статьях "Field emission performance of multiwalled carbon nanotubes for a low-power spacecraft neutralizer", Acta Astronautica, v.64 (2009), pp.875-881, "Field emission cathode with electron optics for use in Hall thrusters", J.Appl.Phys. v.108, 054507 (2010) и заявке на получение патента США N 2011/0005191 "COLD CATHODES AND ION THRUSTERS AND METHODS OF MAKING AND USING SAME", опубл. 13.01.2011 г. для реализации способа использованы автоэмиссионные эмиттеры на основе массивов углеродных нанотрубок, а в статье "Use of coated silicon field emitters as neutralizers for fundamental physics space missions", Advances in Space Research, v.48 (2011), pp.1265-1273 - эмиттеры на основе кремниевых nanoострий, на которые осаждены улучшающие автоэмиссию и теплоотвод пленочные покрытия. Однако отметим, что использование микроострийных автоэмиссионных катодов не позволило создать нейтрализаторы, обеспечивающие достаточно длительный срок службы из-за того, что микроострие в процессе эмиссии подвергается сильному нагреву и бомбардировке ионами, что при работе при давлении окружающего газа выше 10^{-5} Торр приводит к быстрому его туплению и, тем самым, к уменьшению локальной напряженности электрического поля и падению тока автоэмиссии. В патенте США N 8080930 "SELF-REGENERATING NANOTIPS FOR LOW-POWER ELECTRIC PROPULSION (EP) CATHODES", опубл. 20.12.2011 г. предложен способ восстановления микроострия подачей на него по микрокапилляру капли легкоплавкого металла, которая застывает в приложенном электрическом поле, формируя требуемый профиль микроострия для продолжения его функционирования в режиме эффективной автоэмиссии. Недостаток этого способа заключается в том, что для поддержания оптимальных условий необходим резервуар с легкоплавким металлом, импульсный

нагреватель для его расплавления и система энергоснабжения для нагревателя и формирователя профиля острия при застывании капли в сильном поляризирующем поле. Все эти узлы увеличивают массу и энергопотребление нейтрализатора, что ограничивает возможности применения этой технологии на микро- и наноспутниках. Кроме того, при работе с множественными автоэмиссионными микроострийными источниками технически сложно реализовать индивидуальное восстановление отдельных микроострий или групп микроострий.

Еще один, выбранный в качестве прототипа, аналог предлагаемого способа нейтрализации объемного заряда ионного потока в электроракетном двигателе эмиссией электронов множественными источниками описан в заявке на получение патента США N 2012/0085918 "ION BEAM IRRADIATION DEVICE AND METHOD FOR SUPPRESSING ION BEAM DIVERGENCE", опублик. 12.04.2012 г., включающий размещение два или более автоэмиссионных источников электронов вокруг ионного потока электроракетного двигателя направление эмитированных электронов по касательной к направлению линий магнитного поля в область градиента магнитного поля. Реализация такого способа нейтрализации объемного заряда ионного потока в электроракетном двигателе позволяет уменьшить расходимость ионного пучка, что позволяет улучшить эффективность ЭРД. Недостатком этого способа является невозможность управлять автоэмиссионными источниками таким образом, чтобы иметь возможность формировать области локально избыточного объемного отрицательного заряда, располагающегося вдоль и вне оси ионного пучка, причем переменным по времени в импульсном, импульсно-периодическом режимах или режиме постоянного тока, что позволит за счет электростатического взаимодействия такого локально избыточного объемного отрицательного заряда эмитированных электронов и объемного положительного заряда ионного потока фокусировать или отклонять ионный поток, оперативно варьируя тем самым направление вектора тяги ЭРД.

Дополнительной целью настоящего изобретения является возможность при его осуществлении реализовать изменение направления вектора ионной тяги. Возможность изменять направление вектора тяги является одной из важных характеристик, учитываемой при разработке перспективных электроракетных двигательных установок для космических аппаратов.

Известен широко применяемый способ управления величиной и направлением вектора тяги, создаваемой электроракетной двигательной установкой, который заключается в объединении в единый модуль нескольких ЭРД, размещаемых обычно под некоторым углом друг к другу и управляемых независимо друг от друга. Изменяя конфигурацию и режим работы отдельных ЭРД двигательной установки, можно управлять величиной и направлением вектора создаваемой тяги. Варианты реализации такого способа описаны, например, в патенте РФ N 2134220 "

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ТЯГОВАЯ СИСТЕМА (ВАРИАНТЫ), КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ (ВАРИАНТЫ) И СПОСОБ ПРИЛОЖЕНИЯ ВЫБИРАЕМЫХ ТЯГОВЫХ УСИЛИЙ (ВАРИАНТЫ)", опублик. 10.08.1999 г., в патенте США N 6279314 "CLOSED ELECTRON DRIFT PLASMA THRUSTER WITH A STEERABLE THRUST VECTOR", опублик. 28.08.2001 г., в патенте РФ N 2196396 "СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЕКТОРА ТЯГИ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ", опублик. 10.01.2003 г., в патенте США N 7459858 "HALL THRUSTER WITH SHARED MAGNETIC STRUCTURE", опублик. 02.12.2008 г., в заявке на получение патента США N 2009/0308049 "ELECTRIC PROPULSION SYSTEM", опублик. 17.12.2009 г., в патенте США N 7690187 "MODULAR MICROPROPULSION DEVICE AND SYSTEM",

опубл. 06.04.2010 г., в заявке на получение патента США N 2011/0073713 "DRIVE ARRANGEMENT IN A SPACECRAFT", опубл. 31.03.2011 г.

Недостатками указанных аналогов является неоптимальность реализации режима малой тяги, которая в этой схеме формируется как разность векторов тяги разноразнонаправленных импульсов отдельных ЭРД. Однако в случае малых космических аппаратов размещение нескольких двигательных установок может быть не всегда оправданно из-за значительного увеличения массы и габаритов двигательной установки. Поэтому в некоторых случаях целесообразно использовать отклоняющие ионный поток системы. Так, например, патент РФ N 2196397 "СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ИОНОВ В ПЛАЗМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ ХОЛЛОВСКОГО ТИПА", опубл. 10.01.2003 г. и заявка на получение патента США N 2012/0167548 "PLASMA THRUSTERS", опубл. 05.07.2012 г., описывают варианты способа управления направлением ионного потока и, соответственно, вектора тяги ЭРД изменением конфигурации магнитного поля изменениями тока в системе электромагнитов. Ближайшим аналогом является способ отклонения ионного потока, реализованный в ЭРД, описанном в патенте РФ 2088802 "ХОЛЛОВСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ", опубл. 27.08.1997 г., в котором у выходного среза двигателя устанавливаются дополнительные электроды и при подаче на них потенциала и одновременного подключения дополнительных электромагнитных источников магнитного поля создается радиальное электрическое поле, отклоняющее ионный поток. Такая конструкция ЭРД позволяет отклонять вектор ионной тяги в пределах нескольких градусов, но отличается избыточной сложностью.

По предлагаемому способу нейтрализации объемного заряда ионного потока электроракетных двигателей возможно корректирование направления ионов благодаря оптимизации транспорта электронов автоэмиссии в область нейтрализации, что достигается тем, что электроны могут эмитироваться всеми или частью автоэмиссионных источников. В зависимости от режима управления работой множественных автоэмиссионных источников, располагаемых вокруг ЭРД, возможно формирование области локально избыточного объемного отрицательного заряда вдоль или вне осей ионных пучков, включенных ЭРД, обеспечивая за счет электростатического взаимодействия избыточного отрицательного заряда эмитированных электронов и объемного положительного заряда ионного потока дополнительно фокусировать или отклонять ионный поток, оперативно подстраивая тем самым направление вектора тяги ЭРД. Поэтому важным отличительным признаком предлагаемого способа нейтрализации заключается в том, что он осуществляется размещаемыми вокруг каждого из электроракетных двигателей двигательной установки на ионной тяге множественными автоэмиссионными источниками с возможностью управления токами эмиссии отдельных автоэмиссионных источников или групп автоэмиссионных источников независимо друг от друга и согласованно с режимом работы отдельных ЭРД двигательной установки. Дополнительная установка вокруг сопла подобных электроракетных двигателей множественных автоэмиссионных источников с возможностью управления токами эмиссии отдельных автоэмиссионных источников или групп автоэмиссионных источников независимо друг от друга позволит формировать область локально избыточного объемного отрицательного заряда преимущественно вдоль оси ионного пучка, согласованно с изменением направления потока ионов ЭРД или вне оси ионного пучка, причем переменным по времени в импульсном, импульсно-периодическом режимах или режиме постоянного тока, что позволит за счет электростатического взаимодействия фокусировать или отклонять ионный поток ЭРД, тем самым одновременно осуществляя

нейтрализацию объемного заряда ионного потока и, дополнительно, оперативно подстраивая направление вектора ионной тяги.

При таком способе нейтрализации ионного потока необходимо обеспечить возможность независимого управления током электронов автоэмиссии. Причем, в
5 общем случае осуществления способа, в различных режимах и их комбинациях, в том числе переменного по времени в импульсном, импульсно-периодическом режимах или режиме постоянного тока.

Известны способы независимого управления питанием отдельных узлов
10 электроракетной двигательной установки. Так, в патенте США N 6724160 "ION-SOURCE NEUTRALIZATION WITH A HOT-FILAMENT CATHODE-NEUTRALIZER", опублик.
20.04.2004 г. описывается автоматическая система подстройки интенсивности источника электронов на основе термоэмиссионного катода нейтрализатора ионного заряда ЭРД при динамическом изменении величины положительного заряда, который необходимо
15 скомпенсировать, а в патенте США N 6948305 "METHOD AND APPARATUS FOR BALANCING THE EMISSION CURRENT OF NEUTRALIZERS IN ION THRUSTER AR-
RAYS", опублик. 27.09.2005 г. описываются способы оптимизации режимов работы нейтрализаторов в мультидвигательных реактивных системах так, чтобы при
уменьшении ионного потока некоторых из двигателей, производить соответствующее
20 перераспределение электронного тока отдельных нейтрализаторов так, чтобы электронный ток отдельных нейтрализаторов уменьшился при сохранении
интегрального значения электронного тока. Учитывая существенно нелинейную зависимость срока жизни термокатода от его рабочей температуры, такой способ
управления током отдельных нейтрализаторов приводит к увеличению их ресурса и,
соответственно, двигательной установки в целом. В общем случае используются
25 многофункциональные источники питания, которые одновременно обеспечивают работу и самого ЭРД, и нейтрализатора - всех каналов энергопотребления: и на создание и поддержание плазмы, создание магнитного поля, работу нейтрализатора. Такой
подход, в частности, описан в патенте США N 8024917 "MULTI-FUNCTIONAL POWER
SUPPLY FOR A HALL THRUSTER", опублик. 27.09.2011 г., или в заявке на получение
30 патента США N 2011/0258981 "MICRO-CATHODE THRUSTER AND A METHOD OF INCREASING THRUST OUTPUT FOR A MICRO-CATHODE THRUSTER", опублик. 27.10.2011
г. Однако все такие системы предполагают, что каждый нейтрализатор является единым устройством, для которого поэтому не предусмотрены варианты многорежимной
работы отдельных составляющих его источников при сохранении интегрального
35 значения электронного тока нейтрализатора.

Известно также, что при использовании автоэмиссионных источников на основе углеродных нанотрубок существуют проблемы срока их безотказной работы, что
описано, например, в статье "Lifetime and failure mechanisms of an arrayed carbon nanotube
field emission cathode", IEEE Transaction on Electron Devices, v.57 (2010), pp.3163-3168.

Исходя из вышесказанного, оптимальным материалом для формирования
40 автоэмиссионных источников и обеспечения надежной и бесперебойной работы нейтрализатора объемного заряда ионного потока в электроракетной двигательной
установке является нанокристаллический графит тонкопленочный материал, осаждаемый по технологии газофазного синтеза из разряда постоянного тока без
использования катализаторов роста и обладающих характерной микрошероховатой
45 текстурой, образованной преимущественно вертикально ориентированными графитовыми
пластинками разной толщины и содержащими также некоторое количество нанотрубок и нановискеров (усов) ("Нанокристаллический графит - перспективный автоэмиссионный

материал", Интеграл, №3(65), 2012, стр.14-16). В состав нанокристаллической графитовой пленки могут входить образования следующей морфологии: кристаллы графита, графеновые плоскости, углеродные нанотрубки, наноалмазные кристаллы, аморфный углерод.

5 В целом важно подчеркнуть, что использование при осуществлении способов нейтрализации объемного заряда ионного потока источников электронов на основе плазмы в ЭРД малой тяги приводит к тому, что массогабаритные параметры
нейтрализатора и ЭРД становятся сопоставимыми. Кроме того, из-за того, что работа
10 нейтрализатора на основе плазменного источника электронов подразумевает
определенный расход рабочего газа, который не используется для создания тяги, в
ЭРД малой тяги увеличивается относительная доля нефункциональных его потерь.
Реализация способа нейтрализации объемного заряда ионного потока источников
электронов на основе множественных автоэмиссионных катодов позволяет реализовать
15 более эффективные ЭРД малой тяги с функциональными параметрами, недостижимыми
при использовании стандартных технических решений.

Раскрытие изобретения.

Нейтрализация (компенсация) объемного заряда ионного потока ЭРД по
предлагаемому способу реализуется таким образом, чтобы снизить расход рабочего
тела ЭРД, в том числе многорежимном ЭРД или многодвигательной установке,
20 обеспечивать минимальное время выхода на рабочий режим нейтрализации и быстрого
переключения электронного тока согласованно с режимом работы такого ЭРД,
оптимизировать транспорт электронов в область нейтрализации с тем, чтобы уменьшить
расходимость ионного пучка, или отклонить его, изменяя таким образом направление
вектор ионной тяги.

25 Для достижения указанных целей предлагается способ нейтрализации объемного
заряда ионного потока электроракетной двигательной установки эмиссией электронов
множественными автоэмиссионными источниками, располагаемыми вокруг каждого
из электроракетных двигателей указанной установки, отличающийся тем, что,
управление токами эмиссии отдельных автоэмиссионных источников или групп
30 указанных множественных автоэмиссионных источников производят независимо друг
от друга.

При этом эмиссию электронов отдельными автоэмиссионными источниками или
группами автоэмиссионных источников независимо друг от друга производят, в общем
случае осуществления способа, в различных режимах и их комбинациях, в том числе
35 переменного по времени в импульсном, импульсно-периодическом режимах или режиме
постоянного тока в импульсном, импульсно-периодическом режимах или режиме
постоянного тока.

Кроме того, пучки электронов, эмитируемых отдельными автоэмиссионными
источниками или группами автоэмиссионных источников, ориентируют в направлении
40 движения ионов таким образом, чтобы сформировать вблизи оси ионного пучка области
локально избыточного объемного отрицательного заряда.

В первом варианте применения способа нейтрализации объемного заряда ионного
потока сформированные эмитированными электронами области локально избыточного
объемного отрицательного заряда располагают вдоль оси потока ионов
45 электроракетного двигателя, компенсируя за счет электростатического взаимодействия
с потоком ионов его расходимость.

В другом варианте применения способа нейтрализации объемного заряда ионного
потока сформированные эмитированными электронами области локально избыточного

объемного отрицательного заряда располагают вне оси потока ионов электроракетного двигателя, отклоняя поток ионов за счет электростатического взаимодействия.

Наконец, для реализации указанного способа нейтрализации объемного заряда ионного потока множественные автоэмиссионные источники предпочтительно выполнены на основе нанокристаллического графита.

Осуществление изобретения.

В оптимальном варианте реализации предлагаемого способа нейтрализации объемного заряда ионного потока множественные автоэмиссионные источники предпочтительно выполнены на основе нанокристаллического графита (НКГ), формируемого на токопроводящей подложке методом плазмохимического синтеза формируется пленка (слой) нанокристаллического графита в виде трехмерной наноуглеродной структуры, в состав которой входят образования различной морфологии: кристаллы графита, графеновые плоскости, углеродные нанотрубки, наноалмазные кристаллиты, аморфный углерод и т.п.

В качестве токопроводящей подложки могут быть использованы: стеклоуглерод, углеродная ткань, фольга из титана, а также из металлов переходных групп и их сплавов.

Синтез НКГ пленки осуществляется в плазме электрического разряда постоянного тока в камере, снабженной системой газораспределения, обеспечивающей подачу и контроль рабочей газовой смеси, содержащей углеродосодержащий газ и водород.

Разряд постоянного тока зажигается между двумя металлическими электродами, присоединенными к системе электрического питания. Подложка, на которой предполагается синтезировать НКГ пленку, располагается на аноде. Например, разряд постоянного тока зажигают с плотностью тока $0,15 \div 1 \text{ А/см}^2$, осаждение НКГ пленки производят при давлении паров газовой смеси 50-300 Тор и температуре подложки 800-1400°C. При этом концентрация углеродосодержащего газа в рабочей смеси варьируется от 3% до 15%. В качестве углеродосодержащего газа могут быть выбраны: метан, пропан и другие углеводороды или их смеси. В состав рабочей газовой смеси могут также входить пары спиртов. Также рабочая газовая смесь может быть разбавлена до 75% инертным газом, например аргоном, при сохранении полного давления рабочего газа в реакторе плазмохимического синтеза.

Оптимальная трехмерная наноуглеродная структура пленки НКГ представляют собой упорядоченный или неупорядоченный массив преимущественно нормально ориентированных к подложке графитовых нано- и микроребер с характерной высотой до 300 мкм и плотностью расположения на подложке $0,1 \div 100 \text{ мкм}^{-2}$. В состав нанокристаллической графитовой пленки могут входить образования следующей морфологии: кристаллы графита, графеновые плоскости, углеродные нанотрубки, наноалмазные кристаллы, аморфный углерод и т.д.

Предлагаемый способ нейтрализации пространственного заряда ионного потока электроракетных двигателей на основе автоэммиттеров из нанокристаллического графита и индивидуально-группового управления такими автоэммиттерами, располагающимися вокруг генерирующих ионные потоки узлов и компонентов электроракетной двигательной установки, реализует в себе наиболее прогрессивные технические решения, способные обеспечить достижение оптимальных функциональных параметров и характеристик ЭРД для малых КА, прежде всего, минимизировать расход рабочего тела ЭРД и, благодаря этому, продлить срок эксплуатации КА, особенно микро и наноспутников весом от нескольких десятков до единиц килограммов и менее, в течение которого возможно осуществлять маневрирование для более точного его позиционирования в пространстве.

Управление множественными автоэмиссионными источниками на основе описанных выше НКГ автокатодов, расположенных вокруг электроракетных двигателей двигательной установки с ионной тягой, с возможностью управления токами эмиссии отдельных автоэмиссионных источников или групп автоэмиссионных источников независимо друг от друга и согласованно с режимом работы отдельных ЭРД двигательной установки, реализуется при помощи специализированной электронной схемы. В примере реализации способа система управления множественными автоэмиссионными источниками электронов имеет в своем составе 40 токозадающих высоковольтных ключей. Каждый ключ управляет отдельным автокатодом или группой автокатодов и режим его работы задается независимо. С целью компенсации возможного разброса параметров отдельных автоэмиссионных источников предусмотрено задание тока для каждого ключа. Задание тока ключа осуществляется 8-канальным цифро-аналоговым преобразователем, который динамически загружается программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС). ПЛИС также обеспечивает управление высоковольтными ключами с заданными временными параметрами.

Значения токов и временных параметров импульсов задаются однокристалльным микроконтроллером. Предусмотрено также задание указанных параметров с центрального компьютера через оптически изолированный интерфейс RS-232. Микроконтроллер также измеряет в реальном времени значения токов, что позволяет контролировать работу системы. Все указанные функции реализованы в адаптированном под микроконтроллер программном обеспечении.

Разработанная система управления множественными автоэмиссионными источниками предусматривает возможность работы нескольких таких модулей в одной системе. Для этого предусмотрена синхронизация модулей системы управления с помощью оптоволоконного канала. Совокупность реализованных технических решений позволяет оптимизировать работу нейтрализатора на основе множественных автоэмиссионных источников электронов благодаря многорежимности его работы при сохранении суммарного значения электронного тока автоэмиссии.

Таким образом, при реализации описанного способа достигается оптимизация транспорта электронов автоэмиссии в область нейтрализации, в том числе имеется возможность формировать избыточный объемный отрицательный заряд в требуемой области, в частности, преимущественно вдоль или вне осей ионных пучков включенных ЭРД, причем в общем случае осуществления способа, в различных режимах и их комбинациях, в том числе переменного по времени в импульсном, импульсно-периодическом режимах или режиме постоянного тока, что дополнительно позволяет за счет электростатического взаимодействия локально избыточного объемного отрицательного заряда эмитированных электронов и объемного положительного заряда ионного потока фокусировать или отклонять ионный поток, изменяя тем самым направление вектора тяги ЭРД.

Формула изобретения

1. Способ нейтрализации объемного заряда ионного потока электроракетной двигательной установки эмиссией электронов множественными автоэмиссионными источниками, расположенными вокруг каждого из электроракетных двигателей указанной установки, отличающийся тем, что управление токами эмиссии отдельных автоэмиссионных источников или групп указанных множественных автоэмиссионных источников производят независимо друг от друга.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что эмиссия электронов отдельными

автоэмиссионными источниками или группами автоэмиссионных источников независимо друг от друга производят в импульсном, импульсно-периодическом режимах или режиме постоянного тока.

3. Способ по п.1 или 2, отличающийся тем, что пучки электронов, эмитируемых отдельными автоэмиссионными источниками или группами автоэмиссионных источников, ориентируют в направлении движения ионов таким образом, чтобы сформировать вблизи оси ионного пучка области локально избыточного объемного отрицательного заряда.

4. Способ по п.3, отличающийся тем, что сформированные эмитированными электронами области локально избыточного объемного отрицательного заряда располагают вдоль оси потока ионов электроракетного двигателя, компенсируя за счет электростатического взаимодействия с потоком ионов его расходимость.

5. Способ по п.3, отличающийся тем, что сформированные эмитированными электронами области локально избыточного объемного отрицательного заряда располагают вне оси потока ионов электроракетного двигателя, отклоняя поток ионов за счет электростатического взаимодействия.

6. Способ по п.1, отличающийся тем, что указанные множественные автоэмиссионные источники выполнены на основе нанокристаллического графита.