

**Модуль с многоканальной плазменной двигательной установкой для малого
космического аппарата**

Область техники

Изобретение относится к космической технике, в частности к электроракетным двигательным установкам с электрическим ракетным двигателем (ЭРД) с безэлектродными источником плазмы и ускорительной ступенью, использующая в качестве рабочего тела широкий круг рабочего тела, предназначенная, главным образом, для установки на малых космических аппаратах (МКА) для их до выведения с опорной на целевую орбиту, коррекции и поддержания орбиты, ориентации, разгрузки систем ориентации, маневрам между орбитами, увода МКА с целевой орбиты в конце его срока активного существования (САС).

Уровень техники

Известен аналог – изобретение More efficient RF plasma electric thruster (патент US6293090B1, опубликован 25.09.2001). Изобретение относится к электро-ракетным двигателями. Изобретение включает ВЧ-генератор, множество излучающих элементов, газоразрядную камеру, определяющую главную ось двигателя, магнитную систему, источник питания магнитной системы, систему подачи рабочего тела, соединению с газоразрядной камерой.

Недостатком является то, что газопровод подсоединен к газоразрядной камере с одного из ее торцов. При этом теряется возможность использовать торец газоразрядной камеры для истечения плазмы и создания тяги в данном направлении. Таким образом, увеличиваются объем, масса и потребляемая мощность двигательной установки при размещении нескольких таких двигателей для управления несколькими осями тяги, что делает неэффективным или не возможным их использование на борту малого космического аппарата. Использование множества излучающих элементов, питающихся от одного ВЧ-генератора, для генерации плазмы в одной газоразрядной камере приведёт к возникновению неустойчивостей в объёме генерируемой плазмы, которые связаны с различием генерируемых излучающими элементами электромагнитных излучений по длине канала, что в свою очередь приведёт к уменьшению тяги и дельного импульса двигателя. Использование множества близко расположенных излучающих элементов, работающих на ВЧ-частотах приведёт возникновению паразитных ВЧ емкостных разрядов

как между самими изучающих элементами, так и между излучающими элементами и магнитной системы двигателя вследствие возникновения ВЧ емкостной связи между этими элементами, что в итоге снизит эффективность работы двигателя, в частности снизит удельные тягу и удельный импульс на единицу подводимой ВЧ-мощности, приведёт к уменьшению ресурса двигателя вследствие разрушения элементов конструкции при их распылении возникающими ВЧ емкостными разводами, приведет к невозможности вклада мощности в плазму, т.е. к отказу работы двигателя, т.к. газоразрядная камера покроется продуктами распыленных металлических антенны и элементов двигателя. Ввод газа в начале газоразрядной камеры приведёт к потерям мощности на процессы повторной ионизации рекомбинировавших частиц рабочего тела по длине газоразрядной камеры, что в свою очередь приведёт к снижению удельных тяги и удельного импульса двигателя на единицу мощности.

Известен аналог – изобретение Helicon plasma electric propulsion device (патент CN104405603B, опубликована 12.04.2017). Изобретение относится к электро-ракетным двигателями. Изобретение включает минимум одно металлическое кольцо, составляющие корпус двигателя, первый и второй металлические фланцы, геликонную антенну, газоразрядную камеру, газопровод, минимум два кольца магнитов.

Недостатком является то, что газопровод подсоединен к газоразрядной камере с одного из ее торцов. При этом теряется возможность использовать торец газоразрядной камеры для истечения плазмы и создания тяги в данном направлении. Таким образом, увеличиваются объем, масса и потребляемая мощность двигательной установки при размещении нескольких таких двигателей для управления несколькими осями тяги, что делает неэффективным или не возможным их использование на борту малого космического аппарата. Ввод газа в начале газоразрядной камеры приведёт к потерям мощности на процессы повторной ионизации рекомбинировавших частиц рабочего тела по длине газоразрядной камеры, что в свою очередь приведёт к снижению удельных тяги и удельного импульса двигателя на единицу мощности. Использование геликонной антенны без защитных диэлектрических колец приведёт возникновению паразитных ВЧ емкостных разрядов на поверхности как самой антенны, так и на поверхностях предлагаемого в изобретении двигателя вследствие возникновения ВЧ емкостной связи между этими элементами, что в итоге снизит эффективность работы двигателя, в частности снизит удельные тягу и удельный импульс на единицу подводимой ВЧ-мощности, приведёт к уменьшению ресурса двигателя вследствие разрушения элементов конструкции при их распылении возникающими ВЧ емкостными разводами, приведет к невозможности вклада

мощности в плазму, т.е. к отказу работы двигателя, т.к. газоразрядная камера покрывается продуктами распыленных металлических антенны и элементов двигателя.

Известен ближайший аналог (прототип) – изобретение Ракетный двигатель малой тяги для космического летательного аппарата (патент RU2445510C2, опубликован 20.03.2012). Изобретение относится к ракетным двигателям малой тяги. Изобретение по п. 24 формулы изобретения включает газоразрядную камеру (главную камеру), определяющую ось сил тяги, инжектор для введения ионизируемого газа в главную камеру, антенну, генераторы магнитного поля, генератор электромагнитного поля, генератор для изменения направления магнитного поля.

Недостатком является то, что в изобретении есть только одно направления тяги газоразрядного канала. Инжектор ввода ионизируемого газа закрывает один из концов газоразрядной камеры, что в свою очередь приводит к неэффективности ее использования, т.к. при применении предложенного способа ионизации газа – электромагнитный, плазма может истекать из двух концов газоразрядной камеры. При разработке двигателя для малого космического аппарата (МКА), в частности, двигателя с более чем одним вектором тяги, предложенного на фиг. 40 и описанного в п. 60 формулы рассматриваемого изобретения, использование только одного торца газоразрядной камеры приведет к увеличению массы и габаритов двигателя, что вследствие приведет к удорожанию разработки и запуска МКА или к невозможности использовать предложенное в рассматриваемом изобретении устройство для использования на борту МКА. Предлагаемое устройство антенны, в частности использование в нем емкостно связанных электродов, является нецелесообразным для использования на борту МКА. Это связано с тем, что паразитный емкостной разряд начнет возникать на всех элементах двигательной установки и МКА, близко расположенных к емкостно связанным электродам, при этом емкостной разряд будет разрушать как сами электроды, так и элементы конструкции двигателя и МКА. Проблема возникновения и последствий паразитного емкостного разряда описана в работе Takahashi, K. (2012). Radiofrequency antenna for suppression of parasitic discharges in a helicon plasma thruster experiment. Review of Scientific Instruments, 83(8), 083508 (doi.org/10.1063/1.4748271). Также использование емкостного разряда для ионизации рабочего тела является неэффективным способом генерации плазмы для космических двигателей, так как плазма высокочастотного емкостного разряда имеет низкую плотность (не выше 10^{16} м^{-3}) при низком давлении и низкой мощности, которой будет недостаточно для эффективной работы двигателя. Данные по плотности плазмы емкостного разряда представлены в работе Chabert, P., & Braithwaite, N. (2011). Physics of radio-frequency plasmas. Cambridge University Press. Предлагаемое устройство антенны, в

частности использование в нем индуктивно связанной катушки, является нецелесообразным для использования на борту МКА. Это связано с тем, что в данном случае энергия от индуктора в плазму будет передаваться как в трансформаторе, при этом коэффициент трансформации будет не выше 0,5. Учитывая потери мощности на линии ВЧ-генератор-Индуктор и потери в антенне, для генерации плотной плазмы (выше 10^{18} м^{-3}) потребуется высокая мощность (выше 800 Вт), делая невозможным использование двигателя с таким источником плазмы на МКА, которые обладают низкой энерговооруженностью. Предлагаемое устройство антенны, в частности использование в нем антенн типов Double-Saddle и Loop, также является нецелесообразным для использования на борту МКА. Это связано с тем, что как и в случае с применением емкостно связанных электродов, при низких мощностях будут возникать паразитные емкостные разряды на поверхности самой антенны и на элементах конструкции двигателя и МКА. При этом при долгой продолжительности этих процессов, вследствие распыления металлической антенны и металлических элементов конструкции двигателя, внешняя поверхность газоразрядной трубки покроется металлической пленкой, которая будет поглощать генерируемое антенной электромагнитное излучение и процесс ионизации рабочего тела внутри газоразрядной камеры будет невозможным, т.е. двигатель выйдет из строя. Предлагаемое местоположение инжектора для ввода газа в газоразрядную камеру является неэффективным с точки зрения вложения мощности в плазму и ионизации рабочего тела. При ионизации рабочего тела в начале газоразрядной камеры и при использовании в ионизаторе антенны, которая генерирует электромагнитные волны в плазме (предложенные в рассматриваемом изобретении антенны Double-Saddle и Loop), будет затрачиваться больше мощности на ионизацию и будет вкладываться меньше мощности в плазму, т.к. образование волн в плазме происходит за антенной, а именно волны эффективно ионизируют газ и вкладывают мощность в плазму. Использование большого количества магнитных систем является нецелесообразным, т.к. для ускорения плазмы достаточно одного магнитного сопла на выходе из газоразрядной камеры. Большое количество магнитных систем утяжеляет массу двигателя и занимает полезный объем, что делает непригодным использование такого двигателя на борту МКА. В изобретении отсутствует система электромагнитного экранирования. Устройство, использующее электромагнитные волны и магнитное поле для генерации и ускорения плазмы, создает электромагнитное излучение, которое при поглощении элементов конструкции МКА может вызвать возникновение магнитного момента, который начнет вращать МКА, а также вызвать сбои в работе целевой нагрузки МКА или вывести ее из строя.

Раскрытие изобретения

Задачами предлагаемого изобретения являются:

- устранение недостатков аналогов и прототипа, а именно:
- возникновение паразитных разрядов, разрушающих элементы конструкции двигателя и малого космического аппарата;
- потери при вкладе мощности в плазму на электромагнитной линии связи антенна- плазма;
- влияние электромагнитного излучения на элементы конструкции двигательной установки и элементы конструкции малого космического аппарата, приводящее к вращению малого космического аппарата в пространстве;
- и улучшение следующих характеристик:
- уменьшение занимаемых двигательной установкой массы и объема для выполнения маршевых операций, коррекции и поддержания орбиты МКА, его ориентации, маневров между орбитами, увода МКА в конце его срока активного существования;
- увеличение удельных тяги и удельного импульса двигателя на единицу потребляемой мощности.

Для решения задач и достижения технического результата предлагается модуль с многоканальной плазменной двигательной установкой для малого космического аппарата, содержащий:

- элементы жесткой конструкции модуля, состоящие из стержней, составляющих ферму, представляющую собой параллелепипед, к которой крепятся элементы конструкции и модули плазменной двигательной установки, грани которой закрыты элементами системы электромагнитного экранирования, при этом на двух гранях фермы модуля двигательной установки находится минимум два отверстия для концов газоразрядных камер, на трех – минимум по одному, еще одна грань свободна от отверстий для концов газоразрядной камеры;
- минимум три газоразрядных камеры, выполненные из диэлектрического материала в виде цилиндра со стенками, толщина которых может быть в разном исполнении, но такой, чтобы на оси цилиндра был сквозной цилиндрический тракт, расположенные внутри объема модуля не пересекаясь, по центру на внешней поверхности каждой из которых расположена антенна, генерирующая электромагнитное поле внутри газоразрядного канала для ионизации рабочего тела, каждый конец газоразрядных камер открыт во внешнее пространство, выходящие на внешнюю поверхность модуля так, как описано в предыдущем пункте, с каждого конца которых расположены магнитные системы, при этом каждый конец герметично соединен с радиальными газопроводами, которые соединяются с каждым

концом газоразрядной камеры до места расположения на каждом конце газоразрядных камер магнитных систем;

-минимум три антенны (по количеству газоразрядных камер), соединенные по линиям связи с модулем из ВЧ-генераторов, расположенные по центру на внешней поверхности каждой из газоразрядных камер, при этом с внешней стороны антенны закрыты кольцами из диэлектрического материала;

-минимум три кольца из диэлектрического материала (по количеству антенн), закрывающие антенны с их внешней стороны от остального объема модуля плазменной двигательной установки;

-систему хранения и подачи рабочего тела, состоящую из минимум одного бака для хранения рабочего тела, минимум шести радиальных газопроводов, которые соединены с элементами подачи рабочего тела;

-минимум шесть радиальных газопроводов (по удвоенному количеству газоразрядных камер), которые герметично соединены с каждым из концов газоразрядных камер до места расположения электромагнитов магнитных систем экранирования с одной стороны, каждый из которых соединен с элементами подачи рабочего тела;

-модуль из ВЧ-генераторов, состоящий из минимум трех ВЧ-генераторов (по количеству антенн) для независимого регулирования мощности, вкладываемой в плазму в каждой газоразрядной камере, электрически соединенные с модулем преобразования бортового питания;

-минимум три линии связи ВЧ-генераторов с антеннами (по количеству антенн), которые электрически связывают ВЧ-генераторы с антеннами;

- минимум шесть магнитных системы (по удвоенному количеству газоразрядных камер), которые располагаются на каждом из двух концов газоразрядных камер, состоящие из электромагнитов, соединенных с источниками питания электромагнитов, при этом электромагниты создают осевое, совпадающее с осью соответствующей газоразрядной камеры, и перпендикулярное осевой линии соответствующей газоразрядной камеры магнитные поля на концах каждой газоразрядной камеры, ускоряющие плазму, генерируемую в газоразрядных камерах при помощи четырех механизмов - электростатического, электромагнитного, газодинамического, Джоулева нагрева;

- модуль преобразования бортового питания, электрически соединенную с источниками бортового питания на борту малого космического аппарата, модулем ВЧ- генераторов, источниками питания магнитной системы;

- управляющий модуль, задающий управляющие воздействия на систему преобразования бортового питания, систему хранения и подачи рабочего тела, модуль ВЧ-генераторов,

источники питания магнитной системы, собирающий информацию о характеристиках систем модуль многоканальной плазменной двигательной установки, передающий эту информацию на борт малого космического аппарата для ее дальнейшей передачи на командный пункт;

- систему электромагнитного экранирования, состоящую из тонких элементов из материала, экранирующего электромагнитное и магнитное излучения.

Модуль с многоканальной плазменной двигательной установкой для малого космического аппарата предлагается использовать на малых космических аппаратах для их до выведения с опорной на целевую орбиту, коррекции и поддержания орбиты, прецизионной ориентации, разгрузки систем ориентации, маневрам между орбитами, увода МКА с целевой орбиты в конце его срока активного существования (САС).

Перечень фигур

На фиг. 1 представлена конструктивная блок-схема предлагаемого модуля с многоканальной плазменной двигательной установкой для малого космического аппарата.

Осуществление изобретения

Устройство состоит из следующих элементов с их функциями:

- элементов жесткой конструкции модуля (1), которые выполняют функцию поддержания составных частей многоканальной плазменной двигательной установки, таких как газоразрядные камеры (2), система хранения и подачи рабочего тела (3), модуль из ВЧ-генераторов (4), магнитные системы (5), модуль преобразования бортового питания (6), управляющий модуль (7), система электромагнитного экранирования (8). Элементы жесткой конструкции модуля (1) жестко соединяются с малым космическим аппаратом. Элементы жесткой конструкции модуля (1) воспринимают силы тяги, передающиеся элементам модуля (1) от магнитных систем (5), которым силы тяги передаются от плазмы, выходящей из газоразрядных камер (2) по линиям осевых магнитных полей, генерируемых магнитными системами (5). Элементы жесткой конструкции модуля (1) передают воспринимаемые ими силы тяги на корпус малого космического аппарата по жесткой связи между элементами модуля (1) и корпусом малого космического аппарата, тем самым приводя его в движение в космическом пространстве;

- минимум трех газоразрядных камер (2), жестко соединенных с элементами жесткой конструкции модуля (1). По центру на внешней поверхности каждой из газоразрядных камер (2) закреплены антенны (9). На каждом конце каждой газоразрядной камеры (2) расположены два электромагнита магнитных систем (5) - электромагнит (10), создающий

осевое, совпадающее с осью соответствующей газоразрядной камеры (2), и электромагнит (11), создающий перпендикулярное оси соответствующей газоразрядной камеры (2) магнитные поля. Газоразрядные камеры (2) являются каналами, где генерируется плазма. Оси газоразрядных камер (2) совпадают с осями управляющих воздействий на малый космический аппарат, т.е. оси газоразрядных камер (2) совпадают с векторами сил тяги, создаваемой ускоренными потоками плазмы, выходящей из газоразрядных камер (2). Из каждой газоразрядной камеры (2) ускоренный поток плазмы может выходить по двум направлениям, т.е. каждая газоразрядная камера (2) имеет по два вектора тяги, имеющих общую ось, являющуюся осью соответствующей газоразрядной камеры (2), но противоположных по направлению. На каждом конце газоразрядной камеры (2) до места расположения электромагнитов (10) и (11) магнитной системы (5) имеется место герметичного соединения с радиальными газоводами (12), каждый из которых герметично соединен с системой хранения и подачи рабочего тела (3);

- минимум трех антенн (по количеству газоразрядных камер) (9), электрически соединенных с минимум тремя линиями связи ВЧ-генераторов с антеннами (13) соответственно, т.е. каждая антенна (9) соединена с одной линией связи ВЧ-генератора с антенной (13), которые соединяются с одним из ВЧ-генераторов (14), расположенных в модуле из ВЧ-генераторов (4). Антенны (9) расположены по центру на внешней поверхности каждой из газоразрядных камер (2) соответственно, т.е. каждой газоразрядной камере (2) соответствует одна антенна (9). На антенны (9) по линиям связи ВЧ-генераторов с антеннами (13) от ВЧ-генераторов (14), расположенных в модуле из ВЧ-генераторов (4), подается ВЧ-мощность, которая преобразуется антеннами (9) в переменное электромагнитное поле внутри газоразрядных камер (2). Переменные электромагнитные поля, создаваемые антеннами (9) внутри газоразрядных камер (2), вызывают колебания электронов рабочего тела, вводимого в газоразрядные камеры (2) радиальными газоводами (12). Колебания электронов рабочего тела внутри газоразрядных камер (2) вызывают лавинную ионизацию рабочего тела, т.е. происходит процесс плазмообразования внутри газоразрядных камер (2). При наличии осевого магнитного поля, создаваемого электромагнитами (10) магнитной системы (5), электромагнитные поля, генерируемые антеннами (9), вызывают процесс образования собственных электромагнитных волн в плазме, в частности геликонных волн, которые в свою очередь создают волны Трайвеллписа-Гоулда или косые волны Ленгмюра, которые увеличивают степень ионизации плазмы внутри газоразрядных каналов (2) и эффективно вкладывают мощность, передаваемую антеннами (9), в плазму внутри газоразрядных камер (2). На внешней поверхности каждой из антенн (9) закреплены кольца из диэлектрического материала (15);

- минимум трех колец из диэлектрического материала (15) (по количеству антенн), закрепленных на внешней поверхности каждой из антенн (9), т.е. каждой антенне (9) соответствует одно кольцо из диэлектрического материала (15). Кольца из диэлектрического материала (15) препятствуют распространению электромагнитного излучения, создаваемого антеннами (9), в объем модуля многоканальной плазменной двигательной установки. Кольца из диэлектрического материала (15) препятствуют образованию паразитных емкостных разрядов на поверхности антенны (9), на элементах конструкции двигательного модуля;

- системы хранения и подачи рабочего тела (3), включающего минимум один бак для хранения рабочего тела (16), минимум шести радиальных газоводов (12), которые герметично соединены с элементами подачи рабочего тела (17) системы хранения и подачи рабочего тела (3), которые имеют герметичное соединение с минимум одним баком для хранения рабочего тела (16). Система хранения и подачи рабочего тела (3) жестко закреплена на элементах жесткой конструкции модуля (1). Система хранения и подачи рабочего тела (3) служит для хранения рабочего тела в баке (16), подготовки и регулировании расхода рабочего тела в элементах подачи рабочего тела (17), ввода рабочего тела в газоразрядные камеры (2) при помощи радиальных газоводов (12);

- минимум шести радиальных газоводов (12) (по удвоенному количеству газоразрядных камер), которые герметично соединены с каждым из концов газоразрядных камер (2) до места расположения электромагнитов (10) и (11) магнитных систем (5), каждый из которых герметично соединен с элементами подачи рабочего тела (17);

- модуля из ВЧ-генераторов (4), состоящий из минимум трех ВЧ-генераторов (14) (по количеству антенн). В модуле из ВЧ-генераторов (4) находится минимум три ВЧ-генераторов (14) для обеспечения независимого регулирования мощности, вкладываемой в плазму в каждой газоразрядной камере (2) при помощи антенн (9). Независимое регулирование мощности, вкладываемой при помощи антенн (9) в плазму, в каждой из газоразрядных камер (2) необходимо для того, чтобы регулировать направление главного вектора тяги, являющегося суммой векторов тяги F_T , соответствующих осям и направлениям выхода плазмы из газоразрядных камер

- минимум трех линий связи ВЧ-генераторов с антеннами (13) (по количеству антенн), которые электрически связывают ВЧ-генераторы (14) модуля из ВЧ-генераторов (4) с антеннами (9);

- минимум шести магнитных системы (5) (по удвоенному количеству газоразрядных камер), которые располагаются на каждом из двух концов газоразрядных камер (2), состоящие из электромагнитов (10) и (11), электрически соединенных с источниками

питания электромагнитов (18), при этом электромагниты (10) создают осевое, совпадающее с осью соответствующей газоразрядной камеры (2), магнитное поле, а электромагниты (11) создают перпендикулярное осевой линии соответствующей газоразрядной камеры (2) магнитное поле. Электромагниты (10) расположены ближе к срезам газоразрядных камер (2), электромагниты (11) расположены рядом с электромагнитами (10) со стороны, которая дальше от срезов газоразрядных камер (2). Электромагниты (10), расположенные возле среза каждой газоразрядной камеры (2), создающие осевое магнитное поле, параллельное оси соответствующей газоразрядной камеры (2), ускоряют плазму, генерируемую в газоразрядных камерах (2) при помощи четырех механизмов ускорения плазмы - электростатического, электромагнитного, газодинамического, Джоулева нагрева. Электромагниты (11), создающие поперечное осевой линии соответствующей газоразрядной камеры (2) магнитное поле, служат в качестве плазменных фильтров, т.е. регулируют массовый расход плазмы, который при прохождении поперечного оси соответствующей газоразрядной камеры (2) магнитного поля может быть ускорен при помощи осевого, параллельного оси соответствующей газоразрядной камеры (2), магнитного поля, создаваемого электромагнитами (10) на каждом из срезов газоразрядных камер (2). Таким образом, электромагниты (11) выполняют роль плазменных фильтров для того, чтобы уменьшить количество плазмы, истекающее по одному из двух возможных направлений каждой из газоразрядных камер (2) или запрещают истекать плазме по этим направлениям, т.е. при помощи электромагнитов (11) можно управлять как локальными (по каждому из возможных двух направлений каждой газоразрядной камеры (2)) векторами тяги, так и главным вектором тяги, являющегося суммой локальных;

- модуля преобразования бортового питания (6), электрически соединенного с источниками бортового питания на борту малого космического аппарата, модулем ВЧ-генераторов (4), системой хранения и подачи рабочего тела (3), источниками питания магнитной системы (18), управляющим модулем (7). Модуль преобразования бортового питания (6) преобразует электрический ток, поступающий от источников бортового питания на борту малого космического аппарата до необходимых для работы модулей и систем модуля с многоканальной плазменной двигательной установкой;

- управляющего модуля (7), который задает управляющие воздействия на систему преобразования бортового питания (6), модуль ВЧ-генераторов (4), источники питания магнитной системы (18), собирающий информацию о характеристиках модулей и систем модуля с многоканальной плазменной двигательной установкой, передающий эту информацию на борт малого космического аппарата для ее дальнейшей передачи на

командный пункт, получающий информацию об управляющих воздействиях, которые были направлены на борт малого космического аппарата с командного пункта;

- системы электромагнитного экранирования (8), состоящую из тонких элементов, поглощающих электромагнитное излучение. Тонкие элементы системы электромагнитного экранирования (8) покрывают внешнюю поверхность модуля с многоканальной плазменной двигательной установкой для малого космического аппарата. Система электромагнитного экранирования служит для устранения воздействия электромагнитного излучения и магнитных полей модуля с многоканальной плазменной двигательной установкой на элементы конструкции, системы и модули малого космического аппарата.

Основная задача, которую выполняет модуль с многоканальной плазменной двигательной установкой для малого космического аппарата - это создание 6 векторов тяги, расположенных в разных проекциях, для создания суммарного вектора тяги, выполняющего управляющие воздействия, т.е. до выведения МКА с опорной на целевую орбиту, коррекции и поддержания орбиты, прецизионной ориентации, разгрузки систем ориентации, маневрам между орбитами, увода МКА с целевой орбиты в конце его срока активного существования (САС).

В перспективных разработках в области электро-ракетных двигателей (ЭРД) пришли к применению магнитного сопла с целью контроля плазменного потока. ЭРД, использующие магнитные сопла, классифицируются как электромагнитные, и включают магнитоплазодинамические, геликонные двигатели и двигатель VASIMR. Эти передовые двигатели необходимы для того, чтобы отвечать требованиям будущих космических миссий и разрабатываются для производства большого удельного импульса и тяги большей, чем у существующих ЭРД при том же уровне мощности.

Магнитные сопла, представленные в изобретении электромагнитами (10), подобно соплам Лаваля, преобразуют термическую энергию частиц рабочего тела или их хаотически направленную кинетическую энергию в направленную кинетическую энергию. Преимущество магнитных сопел заключается в том, что минимизирован контакт высокотемпературной плазмы с поверхностью сопла, при этом магнитные сопла предоставляют возможность использования дополнительных механизмов образования тяги за счет взаимодействия плазмы и их магнитных полей.

Вклад мощности в плазму, отрыв плазмы от магнитных линий и передача импульса ускоренной плазмы в электромагнитном поле, созданном антенной (9), по линиям магнитного поля, созданного электромагнитами (10) магнитных систем (5), являются важными этапами для генерирования тяги в магнитном сопле. Механизмы, при помощи которых извлекается кинетическая энергия из плазмы при помощи электромагнитов (10)

магнитных систем (5) для создания сил тяги, включают закон сохранения адиабатического инварианта магнитного момента, силы электрического поля, направление термической энергии и нагрев Джоуля. Механизмы отрыва плазмы включают резистивную диффузию магнитного поля, процессы рекомбинации в плазме, магнитное пересоединение линий магнитного поля, потеря адиабатичности процесса расширения плазмы, эффекты инерционных сил и эффекты расслоения линий собственных электромагнитных полей. Процесс передачи импульса от плазмы к космическому аппарату является следствием взаимодействия между линиями приложенного магнитного поля, созданного электромагнитами (10) и индуцированных потоков, которые формируются вследствие магнитного давления.

Три ключевых этапа требуются для образования тяги в магнитном сопле:

- Преобразование магнитоплазменной энергии в направленную кинетическую энергию;
- Эффективный отрыв плазмы от линий магнитного поля;
- Передачу момента импульса от плазмы к космическому аппарату.

Основные механизмы преобразования энергии в магнитном сопле и соответствующие им типы ускорения между которыми энергия передается представлены ниже:

- Сохранение адиабатического инварианта магнитного момента (ускорение в электромагнитном поле);
- Ускорение в электрическом поле;
- Направление движения термически нагретых частиц (газодинамическое ускорение);
- Нагрев Джоуля (термическое ускорение).

Сохранение адиабатического инварианта магнитного момента.

Магнитный момент частицы является адиабатически постоянным при движении, если изменение магнитного поля при одном периоде циклотронного движения во много раз меньше, чем величина индукции магнитного поля. Условия адиабатичности могут быть представлены различными зависимостями. Наиболее часто используемое условие определяется отношением Ларморовского радиуса частицы $r_L = mv_{\perp}/(qB)$ к характеристическому размеру изменения магнитного поля определяемого как $1/|gradB|$: $r_L|gradB| \ll 1$.

Для дальнейшего описания адиабатного обмена энергии положим упрощенное энергетическое выражение для изоэнтропической, бесстолкновительной и эквипотенциальной плазмы в следующем виде:

$$K_{\Sigma} = K_{\perp} + K_{\parallel} = \frac{mv_{\perp}^2}{2} + \frac{v_{\parallel}^2}{2} = \text{const.}$$

Из этих уравнений сохранения видно, что уменьшение силы магнитного поля приводит к увеличению скорости частиц, параллельной магнитному полю. Это поведение подобно знакомой физике магнитного зеркала. Объединение этих уравнений приводит к следующему соотношению для скорости, параллельной магнитному полю:

$$v_{\parallel} = \sqrt{v_{\Sigma}^2 - 2\mu_m B/m}.$$

Дополнительное понимание может быть получено, если предположить, что поток, в котором изначально преобладает перпендикулярная составляющая скорости постепенно течет в область с очень маленьким магнитным полем. Выражение выходной скорости для этого потока показано ниже и является выражением для полного преобразования энергии, связанной с магнитным моментом, параллельным кинетической энергии:

$$v_{\parallel, \text{max}} = \sqrt{2\mu_m B_0/m}.$$

Ускорение электростатическим полем.

Ускорение электростатическим полем может быть вызвано формированием амбиполярных полей или двойных слоев. Эти механизмы являются результатом высокой подвижности электронов по сравнению с ионами. Эта повышенная подвижность характеризуется тепловой скоростью. В расширяющихся магнитных соплах подвижные электроны формируют градиент электронного давления перед медленными ионами. Для поддержания квазинейтральности формируется электрическое поле, которое ускоряет ионы и замедляет электроны. Это приводит к обмену энергией между тепловой скоростью электронов и скоростью ионного потока.

Хотя амбиполярное ускорение и ускорение в двойном слое обусловлены схожей физикой, они совершенно разные. Двойные слои характеризуются изменением потенциала в области нескольких длин Дебая, в то время как измерение потенциала при амбиполярном механизме может быть порядка характерных размеров системы.

Направление движения термически нагретых частиц.

Кинетическая энергия может быть получена путем направления тепловой энергии. Сопла Лавы направляют тепловое движение в осевом направлении через сходящуюся-расходящуюся физическую стенку. Магнитные сопла делают это путем ограничения плазмы в необходимую геометрическую форму при помощи сильного направляющего поля. Физика преобразования энергии основана на гидродинамике, а геометрия магнитного сопла определяется взаимодействием плазмы с магнитным полем. Это подразумевает, что соотношения, основанные на гидродинамике, аналогичны тем, которые используются при

анализе сопел Лавала, могут быть использованы для анализа этого преобразования энергии, если пренебречь потерями, появляющимися при образовании магнитной стенки.

Основное условие ограничения плазмы применительно к тепловым силам характеризуется отношением давления сплошной среды к магнитному давлению, представленного в следующем выражении:

$$\beta_p = \frac{nk_B T}{B^2/2\mu_0}.$$

Если это соотношение удовлетворяется, т.е. магнитное давление сильнее, чем тепловое давление, то ограничение плазмы возможно, но не гарантировано. Ограничение плазмы может также потребовать формирование токового слоя на границе плазмы и вакуума. Процессы диффузии и конвекции могут ухудшить токовый слой, поэтому они должны быть поняты для того, чтобы потери, вызванные не идеальностью ограничения плазмы.

Нагрев Джоуля.

Обмен энергией также может возникнуть при взаимодействии электромагнитных и гидродинамических полей. Такой обмен лучше всего описывается уравнением энергии магнитогидродинамики, приведенного ниже:

$$\frac{\delta e_H}{\delta t} + \nabla \cdot [U(e_H + p) - k\nabla T + U \cdot \tau] = J \cdot E.$$

Правая часть выражения, представленного выше, является выражением для нагрева по закону Джоуля-Ленца и описывает энергию, полученную сплошной средой вследствие потерей энергии электромагнитным полем. Такая же часть выражения, только с обратным знаком, представлена в уравнении энергии электромагнитного поля:

$$\frac{1}{2} \frac{\delta}{\delta t} \left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) + \nabla \cdot \left[\frac{1}{\mu_0} E \times B \right] = -J \cdot E.$$

Отрыв плазмы.

Для того, чтобы магнитное сопло создало тягу направленная кинетическая энергия должна отсоединиться от линий приложенного поля. Механизмы отсоединения плазмы стали главным аспектом при проектировании магнитного сопла в попытке минимизировать потери, связанные с силами электромагнитного сопротивления и расхождения плазменного потока. Механизмы плазменного отсоединения должны быть разделены на три категории: столкновительные, бесстолкновительные и отсоединения за счет пересоединения магнитных линий.

Столкновительный отрыв. Столкновительный отрыв может быть достигнут путем Бомовской диффузии поперек линиям магнитного поля и рекомбинации ионов и электронов.

Бомовская диффузия. Предполагается, что Бомовская диффузия является фактором достижения отсоединения и определяется диффузией плазмы поперек линий магнитного поля. Бомовская диффузия представляет противоречивые требования для первоначального связывания, необходимого для правильной геометрии сопла и конечного поперечного диффузионного поля, необходимого для отсоединения. Удельное сопротивление также должно быть уменьшено. Предполагается, что постепенно расходящееся магнитное поле более подходит для обеспечения Бомовского отрыва плазмы.

Магнитное число Рейнольдса используется для количественной оценки связывания плазмы в магнитном сопле. Для больших значений, пренебрегают Бомовским отсоединением по сравнению с эффектами конвекции и связывание достигается. Для промежуточных значений, диффузия является важной и плазма может двигаться поперек линий магнитного поля. Поэтому большие значения магнитного числа Рейнольдса требуются для связывания, в то время как промежуточные и малые значения требуются для отрыва. Важно отметить, что хотя магнитное число Рейнольдса дает понимание диффузионного режима, количественное сравнение следует проводить с осторожностью вследствие неоднозначности выбора линейного масштаба. Магнитные числа Рейнольдса лучше всего использовать для качественного сравнения и могут быть использованы для количественного сравнения для систем, которые физически и геометрически подобны.

Метод прогнозирования величины, при которой плазма будет диффундировать через магнитный барьер, был изучен и предполагает, что плазма может проявлять аномальное удельное сопротивление, которое на несколько порядков больше, чем предсказанное классической теорией плазмы и Бомовской диффузией. Существование аномального удельного сопротивления, следовательно, должно быть рассмотрено численными методами. В качестве средства обеспечения резистивного отрыва Бомовская диффузия рассматривалась в большей степени как неэффективной в силу побочных воздействий, которые будут влиять на процесс выработки тяги, так же как и расходящаяся диффузия, которая возможно будет иметь место. Тем не менее нельзя пренебрегать резистивными эффектами, так как они могут иметь важное значения при проведении экспериментов. Отрыв плазмы в дальней области от среза магнитного сопла вследствие резистивных эффектов может быть интересен в частности в области, близкой к оси сопла, где время пролета связанных частиц может быть больше по сравнению со времен между столкновениями.

Процессы рекомбинации. Процессы рекомбинации частиц реализуют отрыв плазмы вследствие образования нейтральных частиц, которые больше не подвержены влиянию магнитных полей. Процесс образования нейтралов в первую очередь является следствием

рекомбинации трех частиц, в котором две из них одного знака взаимодействуют с другой противоположного знака, образуя нейтрал и высокоэнергетичную частицу. Процесс рекомбинации требует наличия ион-электронной частоты столкновений на достаточно высоком уровне, который обеспечит эффективный отрыв. Хотя первоначальное рассмотрение процесса рекомбинации как средства достижения отрыва не является обнадеживающим, частота рекомбинации может быть повышена за счет конфигурации резко убывающего магнитного поля или быстрого охлаждения электронов в расширяющемся сопле.

Бесстолкновительный отрыв. Основными средствами для достижения бесстолкновительного отрыва являются потеря адиабатичности, эффекты электронно инерции и эффекты наведенного магнитного поля.

Потеря адиабатичности. Отрыв вследствие потери адиабатичности происходит, когда условия адиабатного расширения плазмы в расходящемся магнитном поле нарушаются и плазма, как результат, становится размагниченной. Размагничивание плазмы подразумевает, что частицы больше не подвержены воздействию, которое заставляет их вращаться вокруг одной линии магнитного поля. Такой режим может быть лучше всего продемонстрирован при помощи представления частицы, которая начинает вращаться вокруг одной линии магнитного поля, а затем в течение своего вращения, пересекая совершенно другую линию магнитного поля, изменяя при этом орбиту движения.

Потеря адиабатичности присуща как ионам, так и электронам, но в большей степени ионам, чем электронам, так как размагничивание ионов более вероятно вследствие их значительно большего Ларморовского радиуса по сравнению с электронным. Теоретически предполагается, что потеря адиабатичности только ионов не гарантирует отрыв, вследствие формирования электрических полей между связанными электронами и истекающими оторвавшимися ионами. Отрыв в данном частном сложном случае относится к инерционному отрыву отдельных частиц плазмы и будет обсужден в следующем параграфе. Потеря адиабатичности описывает процесс отрыва отдельных частиц плазмы, однако, отрыв всей истекающей плазмы гарантирован только в случае, когда и ионы, и электроны размагничены. Отрыв вследствие потери адиабатичности также может быть изучен при помощи более сложного Лагранжевого инварианта, которые определяет отдельные области, в которых заряженные частицы могут находиться.

Инерционный отрыв. Как было сказано в предыдущем параграфе, при инерционном отрыве рассматривается случай, когда только частицы одного вида размагничиваются и формируется электрическое поле, поддерживающее квазинейтральность выходящего из сопла потока плазмы. Однако отрыв плазмы все еще может быть достигнут частицами,

которые имеют достаточную инерцию для того, чтобы преодолеть силы связывающего магнитного поля. Гибридный Ларморовский радиус, основывающийся на гибридной массе частиц, был введен для упрощения изучения этой модели. Отрыв в данном случае может рассматриваться как дрейф гибридных электрон-ионных частиц. Отношение магнитной инерции к инерции потока плазмы описывается безразмерной величиной, представленной в следующем выражении:

$$G \approx \frac{eB_z}{m_e} \frac{eB_z}{M_i} \frac{r_0^2}{u_0^2}.$$

Значительные теоретический и численный вклады были внесены в изучение эффективности процесса инерционного отрыва, при этом одна группа исследователей полагали, что размагничивание, базирующееся на гибридном Ларморовском радиусе, является эффективным средством для отрыва, а другие считали, что только при размагничивании электронов может эффективно быть достигнут отрыв плазмы.

Отрыв вследствие инерционного механизма часто относят к нижнему пределу отрыва, который может быть усилен при помощи других механизмов.

Отрыв за счет наведенных полей. Отрыв плазмы вследствие наведенных магнитных полей возможен либо за счет удлинения магнитного поля в бесконечность, либо за счет нейтрализации внешнего приложенного магнитного поля и таким образом размагничивания плазмы. Эффективность отрыва за счет наведенных полей может быть изучена при рассмотрении токов, которые эти поля создали.

Удлинение магнитного поля происходит, когда кинетическая энергия плазмы превосходит магнитную энергию, или другими словами, когда газодинамическая скорость плазмы превышает скорость Альфвена. Удлинение магнитного поля характеризуется безразмерным параметром, представленным в следующем выражении:

$$\beta_f = \frac{\rho u^2/2}{(B^2/2\mu_0)} > 1.$$

Когда это неравенство удовлетворено, плазма считается суперальфвеновской и движется быстрее, чем скорость, с которой изменения в магнитном поле воздействуют на поток. В результате, линии магнитного поля за счет сил трения удлиняются в бесконечность, оставаясь как бы замороженными в плазменный поток. Токи, требуемые для режима суперальфвеновского отрыва являются парамагнитными, что в результате приводит к сходящемуся отрыву, однако увеличивает потери тяги вследствие сил притяжения между приложенным полем и полем наведенных токов. Теоретические исследования показали, что переходный режим между доальфвеновским течением и суперальфвеновским течением может минимизировать потери при отрыве плазмы, т.к. магнитное поле будет расходиться медленно. При экспериментальных исследованиях было

предположено, что режим отрыва вследствие удлинения магнитного поля более вероятен, чем размагничивание ионов, при этом результаты экспериментов согласуются с результатами численного моделирования. Тем не менее удлинение магнитных линий не может быть измерено. Результаты других экспериментальных исследований и компьютерных моделирований также показали суперальфвеновский отрыв и определили механизм самоколлимации плазменного потока.

Нейтрализация внешнего приложенного магнитного поля при помощи наведенного поля относится к процессу саморазмагничивания и происходит вследствие формирования диамагнитных токов в плазме. Эти токи создают осевую ускоряющую силу. Диамагнитные токи, которые способствуют отрыву, выгодны за счет передачи момента космическому аппарату, однако создают расходящуюся плазменную струю. Конфигурация линий магнитного поля для достижения данного вида отрыва похожа на ту, которая будет рассмотрена в случае отрыва при магнитном пересоединении. Отрыв при саморазмагничивании был показан методом компьютерного моделирования.

Пересоединение линий магнитного поля. Задача о пересоединении линий магнитного поля широко изучается в физике плазмы, однако до настоящего момента эта задача была недостаточно изучена применительно к вопросу отрыва плазмы для создания тяги. Явление проявления отрыва плазмы за счет магнитного пересоединения замечают при корональном выбросе массы на Солнце и магнитном связывании при термоядерных экспериментах.

В работе Shumeiko, A. I., & Telekh, V. D. (2019, November). Probe diagnostics of the plasma plume created by a magnetic nozzle of an inductively coupled plasma source. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1393, No. 1, p. 012027). IOP Publishing (doi:10.1088/1742-6596/1393/1/012027) приведены результаты измерения скорости потока плазмы на выходе из магнитного сопла (в изобретении электромагниты (10)), ускоренного при помощи электростатического ускорения плазмы, т.е. образования двойного электростатического слоя в потоке плазмы на выходе из магнитного сопла.

В работе исследовали лабораторную модель двигателя с геликонным источником плазмы и магнитным соплом АВНРТ. Двигатель состоял из разрядной камеры (в изобретении газоразрядная камера (2)) из кварцевого стекла с закрытым концом, толщиной стенки 3 мм, внутренним диаметром 50 мм и длиной 200 мм. На открытом конце разрядной камеры находилась мембрана с отверстием диаметром 20 мм, которое служило для формирования коллимированного потока плазмы.

Геликонная антенна (в изобретении антенна (9)) длиной 12 см, изготовленная из меди, окружала газоразрядную камеру и была прикреплена к одному из фланцев вакуумной камеры. Антенна находилась в нескольких миллиметрах от газоразрядной камеры, чтобы

минимизировать емкостную связь и уменьшить тепловые эффекты. Электромагнитны (в изобретении электромагниты (10)) создавали расходящееся магнитное поле с максимальной величиной магнитного поля в 200 Гс.

АВНРТ был установлен внутри вакуумной камеры диаметром 0,7 м и длиной 1 м. Камера была изготовлена из немагнитной нержавеющей стали, которая устойчива к деформации, вызванной тепловыми циклами, высоким вакуумом и дегазацией, для моделирования вакуумных условий низкой околоземной орбиты (НОО), в которых давление обычно составляет менее 10^{-2} Па. Вакуумная камера имела турбомолекулярную/роторную насосную систему, которая поддерживала базовое давление менее 10^{-3} Па, а эффективная скорость откачки, измеренная для воздуха, составляла приблизительно $300 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$. При таких давлениях может быть смоделирована тепловая среда космического пространства, поскольку теплопроводность газов мала по сравнению с лучистой теплопередачей. Давление в камере измерялось с помощью устройства MKS 220CA Baratron, которое было расположено на одном из фланцев вакуумной камеры.

Четыре фланца вакуумной камеры обеспечивали подвод линий подачи рабочего тела, электрического питания для электромагнитов, высокочастотного тока для антенны и питания схемы систем диагностики плазмы. Рабочее тело (воздух) подавалось в газоразрядную камеру с использованием полиамидной трубки, прикрепленной к ее закрытому концу, а его расход регулировался регулятором массового расхода, установленным снаружи вакуумной камеры. В качестве регулятора расхода использовался регулятор массового расхода MKS Type 2160B.

Устройства ВЧ согласования нагрузка/генератор снаружи вакуумной камеры было соединено с антенной АВНРТ коаксиальным кабелем RG-213 и двумя медными стержнями, заключенными в медный экран. Высокочастотная мощность (13,56 МГц) поддерживалась на уровне 120 Вт, чтобы уменьшить тепловую нагрузку на АВНРТ. По тем же причинам ток, приложенный к каждому соленоиду, был ограничен 2 А, чтобы избежать перегрева и плавления медного провода соленоида.

Для подтверждения характеристик АВНРТ, необходимых для поддержки вышеупомянутого МКА на орбите 200 км, функция распределения энергии ионов и локальный потенциал плазмы измерялись как анализатором энергии ионов (АЭИ) и зондом Ленгмюра соответственно.

АЭИ устанавливался на осевой линии АВНРТ и вакуумной камеры. АЭИ состоял из трех сеток и коллекторной пластины. Частицы плазмы поступали в анализатор через 5-миллиметровое отверстие в пластине с отверстиями из нержавеющей стали толщиной 0,1 мм. Пластина с отверстиями находилась в электрическом контакте с корпусом анализатора,

который был соединен с заземленной вакуумной камерой. Напряжения на сетках анализатора устанавливали на -90, -20 и -10 В. Измеренный ток представлял собой сумму тока коллектора и тока вторичной сетки, которая соответствует любым вторичным электронам, испускаемым из пластины коллектора при воздействии ионов. Для этого смещение вторичной сетки устанавливалось на -20 В. Анализатор использовался только в режиме сбора ионов. Напряжение на сетке дискриминатора изменялось от 0 до -150 В с шагом 0,5 В, причем 100 измерений тока усреднялись на каждый шаг измерений.

Зонд Ленгмюра монтировался на осевой линии АВНРТ. Напряжение на смещающем источнике изменялось от -150 до 150 В с шагом 0,5 В, при этом 100 измерений тока усреднялись на каждый шаг, чтобы получить усредненную по времени кривую I-V. Локальный плазменный потенциал определялся производной кривой I-V.

Характеристики плазмы и плазменного потока, созданных АВНРТ, были исследованы при расходе рабочего тела $1,5 \text{ мг} \cdot \text{с}^{-1}$, давлении 50 мПа, магнитном поле 200 Гс и ВЧ-мощности 120 Вт. Локальный потенциал плазмы V_{local} , измеренный зондом Ленгмюра, соответствовал месту расположения наибольшего градиента магнитного поля и в этом положении составлял 60 В относительно камеры. Измеренная энергия ионов в этой точке была равна 80 В. В этом случае скорость потока плазмы, выходящего из магнитного сопла (в изобретении электромагниты (10)), равнялась $11 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$.

Это исследование продемонстрировало экспериментальные результаты тестирования АВНРТ в условиях НОО. Эти результаты показывают, что двигатель с магнитным соплом (в изобретении электромагниты (10)) может успешно поддерживать МКА на НОО. Показано, что ионы, генерируемые в источнике волновой (геликонной) плазмы, могут ускоряться в АВНРТ магнитным соплом при помощи механизма электростатического ускорения, обеспечивающегося формирующимся двойным электростатическим слоем на выходе из магнитного сопла, до скоростей $11 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ при мощности 120 Вт. Двигатель создавал тягу в 18 мН.