



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2005132306/06, 17.03.2004

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
17.03.2004(30) Конвенционный приоритет:
20.03.2003 EP 03290712.3

(43) Дата публикации заявки: 10.02.2006

(45) Опубликовано: 27.07.2008 Бюл. № 21

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: US 4893470 A, 16.01.1990. RU 2134220
C1, 10.08.1999. WO 00/01206 A1, 06.01.2000.
US 6523338 A, 25.02.2003.(85) Дата перевода заявки РСТ на национальную фазу:
20.10.2005(86) Заявка РСТ:
US 2004/008054 (17.03.2004)(87) Публикация РСТ:
WO 2005/028310 (31.03.2005)

Адрес для переписки:
129010, Москва, ул. Б. Спасская, 25, стр.3,
ООО "Юридическая фирма Городисский и
Партнеры", пат.пов. Ю.Д.Кузнецову, рег.№ 595

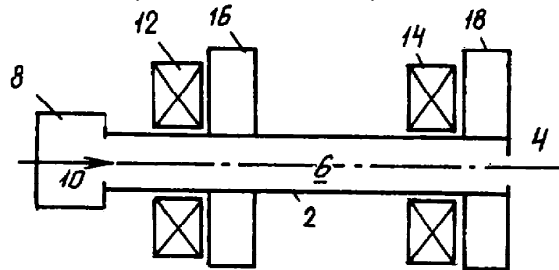
(72) Автор(ы):
ЭМСЕЛЛЕМ Грегори (FR)(73) Патентообладатель(и):
ЭЛВИНГ ЛЛС (US)

(54) ДВИГАТЕЛЬ МАЛОЙ ТЯГИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

(57) Реферат:

Двигатель предназначен для использования в космонавтике и ускорительной технике. Двигатель малой тяги имеет камеру внутри трубы с продольной осью, определяющей ось двигателя. Двигатель содержит инжектор, инжектирующий ионизируемый газ в трубу с одного края камеры, и генераторы. Генератор магнитного поля с двумя катушками генерирует магнитное поле, вектор которого параллелен оси, а магнитное поле имеет два максимума вдоль оси. Генератор электромагнитного поля имеет первую резонансную полость между двумя катушками и генерирует микроволновое ионизирующее поле на частоте электронного циклотронного резонанса в камере между двумя максимумами магнитного поля и вторую резонансную полость, генерирующую пондеромоторное поле, ускоряющее ионизованный

газ. Обеспечена ионизация газа посредством электронного циклотронного резонанса, а затем ускорение и электронов, и ионов посредством магнитной пондеромоторной силы. Изобретение обеспечивает простоту изготовления, прочность, устойчивость к отказам, ускорение частиц до высоких скоростей. 3 н. и 26 з.п. ф-лы, 17 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.

F03H 1/00 (2006.01)**H05H 1/00** (2006.01)**B64G 1/40** (2006.01)**(12) ABSTRACT OF INVENTION**(21), (22) Application: **2005132306/06, 17.03.2004**(24) Effective date for property rights: **17.03.2004**(30) Priority:
20.03.2003 EP 03290712.3(43) Application published: **10.02.2006**(45) Date of publication: **27.07.2008 Bull. 21**(85) Commencement of national phase: **20.10.2005**(86) PCT application:
US 2004/008054 (17.03.2004)(87) PCT publication:
WO 2005/028310 (31.03.2005)

Mail address:
**129010, Moskva, ul. B. Spasskaja, 25, str.3,
OOO "Juridicheskaja firma Gorodisskij i
Partnery", pat.pov. Ju.D.Kuznetsovu, reg.№ 595**

(72) Inventor(s):
EhMSELLEM Gregori (FR)(73) Proprietor(s):
EhLVING LLS (US)**(54) SPACECRAFT LOW-THRUST ENGINE**

(57) Abstract:

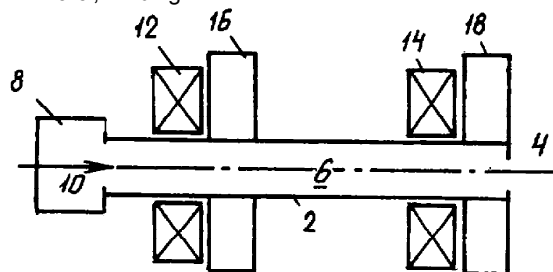
FIELD: engines and pumps.

SUBSTANCE: engine is intended for use in space programs and accelerators. A small-thrust engine incorporates a chamber arranged inside the tube with a lengthwise axis making that of the engine proper. The said engine is furnished with an injector to inject ionising gas into the said tube from the chamber one side and generators. Two-coil magnetic field generator induces a magnetic field with its vector parallel to the axis, while the magnetic field features two maxima along the said axis. The aforesaid generator has the first resonance chamber between two coils to generate microwave ionising field at the electronic cyclotron resonance frequency in the chamber between two magnetic field maxima and the second resonance chamber generating a ponderomotive field accelerating the ionised gas.

Gas ionisation is ensured by the electronic cyclotron resonance along with acceleration of electrons and ions being initiated by the magnetic ponderomotive force.

EFFECT: ease of manufacture, durability, faultless operation and acceleration of particles to higher velocities.

29 cl, 17 dwg



Фиг. 1

Область техники

Настоящее изобретение относится к двигателям малой тяги, которые используются для перемещения космических летательных аппаратов с типичной скоростью истечения в пределах от 2 км/сек до более 50 км/сек и удельным тяговым усилием около 1 Н/м² или ниже. При отсутствии какого-либо материала, на который двигатель малой тяги мог бы надавить или отклонить, двигатели малой тяги основываются на эжекции (выбросе) части массы космического летательного аппарата. Скорость выброса представляет собой ключевой фактор при оценке эффективности двигателя малой тяги и обычно должна быть максимальной.

Предшествующий уровень техники

Предлагаются различные решения для двигателей малой тяги. В патенте США US 5241244 раскрыт так называемый ионный сеточный двигатель малой тяги. В этом устройстве реактивный (движущий) газ сначала ионизируется, а затем полученные ионы ускоряются под действием статического электромагнитного поля между сетками.

Ускоренные ионы нейтрализуются потоком электронов. Для ионизации реактивного (движущего) газа в указанном патенте предлагается одновременно использовать магнитное кондиционирующее и ограничивающее поле и электромагнитное поле на частоте ЭЦР (электронного циклотронного резонанса) магнитного поля. Сходный двигатель малой тяги описан в патенте Франции FR 2799576, где для ионизации газа используется индукция. Этот тип двигателя малой тяги имеет скорость выброса около 30 км/сек и удельное тяговое усилие менее 1 Н/м² для электрической мощности 2,5 кВт.

Одной из проблем устройств этого типа является необходимость очень высокого напряжения между ускоряющими сетками. Другая проблема касается эрозии сеток из-за ударного воздействия ионов. Наконец, нейтрализаторы и сетки, как правило, представляют собой очень чувствительные устройства.

В патенте US 5581155 раскрыт двигатель малой тяги на эффекте Холла, в котором также используется электромагнитное поле для ускорения положительно заряженных частиц. Скорость выброса составляет около 15 км/сек, при этом удельное тяговое усилие меньше 5 Н/м² при мощности 1,3 кВт. Подобно ионному сеточному двигателю малой тяги существует проблема эрозии, а присутствие нейтрализатора приводит к отказам двигателя малой тяги.

В патенте США US 6205769 или в публикации D.J.Sullivan et al. «Development of a microwave resonant cavity electrothermal thruster prototype», IEPC 1993, №36, pp.337-354 раскрыты микроволновые электротермические двигатели малой тяги, которые основаны на нагреве движущегося газа под действием микроволнового поля. Нагретый газ выбрасывается через сопло, создавая тяговое усилие. Этот тип двигателя малой тяги имеет скорость выброса около 9-12 км/сек и тяговое усилие от 200 до 2000 Н.

В публикациях D.A.Kaufman et al. «Plume characteristic of an ECR plasma thruster», IEPC 1993, №37, pp.355-360 и H.Tabara et al. «Performance characteristic of a space plasma simulator using an electron cyclotron resonance plasma accelerator and its application to material and plasma interaction research, BEPC 1997», №163, pp.994-1000 раскрыты плазменные двигатели малой тяги ЭЦР, где плазма создается с использованием электронного циклотронного резонанса в магнитном сопле. Электроны ускоряются аксиально под действием магнитной дипольной силы, создавая электрическое поле, которое ускоряет ионы и формирует тяговое усилие. Другими словами, плазма протекает естественным путем вдоль линий уменьшающегося магнитного поля. Этот тип двигателя малой тяги имеет скорость выброса до 35 км/сек. В патенте США US 6293090 раскрыт РЧ плазменный двигатель малой тяги, который работает в соответствии с тем же принципом, с тем отличием, что плазма создается волной низшей гибридной моды вместо использования поля ЭЦР.

В патентах США US 6334302 и US 4893470 или в публикации Dr.Franklin R. Chang-Diaz «Design characteristic of the variable I_{sp} plasma rocket», IEPC 1991, №128 описан магнитоплазменный двигатель малой тяги с переменной плотностью импульса

(сокращенно VaSBVIR). Этот двигатель малой тяги использует трехстадийный способ инжектирования плазмы, нагрева и контролируемого выброса в конфигурации магнитного тандемного зеркала. Источник плазмы представляет собой геликоновый генератор или магнитоплазодинамический (MPD) двигатель малой тяги и нагреватель для плазмы

представляет собой циклотронный генератор, работающий на частоте ионного циклотронного резонанса. "Гибридная струя", состоящая из сердцевины горячей плазмы, окруженной холодным газом, находится в сопле, которое защищено от горячей плазмы защитным слоем холодного газа. Тепловое расширение в сопле преобразует часть внутренней энергии в направленное тяговое усилие. Как и в двигателе малой тяги ЭЦР или РЧ плазменном двигателе малой тяги, ионизированные частицы не ускоряются, а сначала протекают вдоль линий уменьшающегося магнитного поля, а затем вдоль градиента давления. Этот тип двигателя малой тяги имеет скорость выброса от около 10 до 300 км/сек и тяговое усилие от 50 до 1000 Н.

В другой области в патентах США US 4641060 и US 5442185 раскрыты плазменные генераторы ЭЦР, которые используются для вакуумной откачки или для имплантации ионов. Аналогичный плазменный генератор раскрыт в патенте США US 3160566.

В патенте США US 3571734 раскрыты способ и устройство для ускорения частиц, которые предназначены для создания пучка частиц для реакций ядерного синтеза. Газ инжектируется в цилиндрическую полость резонатора, находящуюся в наложенных друг на друга аксиальном и радиальном магнитных полях. Электромагнитное поле на частоте ЭЦР используется для ионизации газа. Напряженность магнитного поля уменьшается вдоль оси полости, так что ионизованные частицы протекают вдоль этой оси. Это ускоряющее устройство описано также в журнале *Compte Rendu de l'Academie des Sciences*, November 4, 1963, vol.257, p.2804-2807. Эти устройства предназначены для создания пучка частиц для реакций ядерного синтеза, где скорость выброса равна около 60 км/сек, но удельное тяговое усилие является очень низким, как правило, ниже $1,5 \text{ Н/м}^2$.

В патенте США US 3425902 раскрыто устройство для создания и удерживания ионизированных газов. Магнитное поле является максимальным на обоих краях камеры, где газы ионизируются.

Краткое изложение существа изобретения

Технической задачей настоящего изобретения является создание двигателя малой тяги, имеющего хорошую скорость выброса, простого в изготовлении, прочного и устойчивого к отказам, которое представляет собой безэлектродное устройство, ускоряющее оба типа частиц до высокой скорости посредством приложения направленной массовой силы.

Поставленная задача решена согласно изобретению путем создания двигателя малой тяги, содержащего

камеру, определяющую ось тягового усилия,
инжектор, предназначенный для инжектирования ионизируемого газа в камеру,
генератор магнитного поля, которое имеет по меньшей мере максимум вдоль оси,
генератор электромагнитного поля, предназначенный для генерирования микроволнового ионизирующего поля в камере (6) по одну сторону от указанного максимума и магнитного поперечного ускоряющего поля по другую сторону от указанного максимума.

Управляющий двигатель характеризуется также тем, что

угол вектора магнитного поля с осью тягового усилия меньше 45° , предпочтительно меньше 20° ,

частота электромагнитного поля отличается на 10% от частоты электронного циклотронного резонанса в положении, где генерируется электромагнитное поле, отношение максимального значения и минимального значения магнитного поля

находится в пределах от 1,1 до 20,

угол между электрическим компонентом электромагнитного поля и ортогональю к радиальному направлению меньше 45° , предпочтительно меньше 20° ,

локальный угол между электрическим компонентом электромагнитного поля и вектором

магнитного поля в двигателе малой тяги находится в пределах от 60 до 90°,

период ионного циклотронного резонанса в двигателе малой тяги по меньшей мере в два раза больше, чем характерное время между столкновениями ионов в управляющем ракетном микродвигателе,

5 микроволновое ионизирующее поле и магнитное поле предназначены для ионизации, по меньшей мере, 50% газа, инжектируемого в камеру,

генератор магнитного поля содержит по меньшей мере одну катушку, расположенную вдоль оси, по существу в максимуме магнитного поля,

10 генератор магнитного поля содержит вторую катушку, расположенную между указанной по меньшей мере одной катушкой и инжектором,

генератор магнитного поля предназначен для изменения значения указанного максимума,

генератор магнитного поля предназначен для изменения направления магнитного поля по меньшей мере по одну сторону от максимума,

15 генератор электромагнитного поля содержит по меньшей мере одну резонансную полость,

генератор электромагнитного поля содержит по меньшей мере одну резонансную полость по одну сторону от максимума,

20 генератор электромагнитного поля содержит по меньшей мере одну резонансную полость по другую сторону от максимума,

камера сформирована внутри трубы,

труба имеет увеличенное поперечное сечение с края, противоположного инжектору,

двигатель малой тяги содержит пороговую (успокоительную) камеру между инжектором и камерой.

25 Согласно другому аспекту настоящего изобретения предусмотрен также способ генерирования тягового усилия, заключающийся в том, что

инжектируют газ в камеру,

прикладывают первое магнитное поле и первое электромагнитное поле для ионизации по меньшей мере части газа,

30 затем прикладывают к газу второе магнитное поле и второе электромагнитное поле для ускорения частично ионизованного газа под действием магнитной пондеромоторной силы.

Способ характеризуется дополнительно одним из следующих признаков:

газ ионизируют посредством электронного циклотронного резонанса и ускоряют посредством магнитной пондеромоторной силы;

35 формируемые ионы по большей части нечувствительны к первому магнитному полю, локальный угол между первым электрическим компонентом электромагнитного поля и вектором первого магнитного поля находится в пределах от 60° до 90°,

локальный угол между электрическим компонентом второго электромагнитного поля и вектором второго магнитного поля находится в пределах от 60° до 90°,

40 ионизируют по меньшей мере 50% газа, изменяют направление второго магнитного поля.

Краткое описание чертежей

В дальнейшем настоящее изобретение поясняется описанием предпочтительного варианта воплощения со ссылками на прилагаемые чертежи, на которых:

45 фиг.1 изображает схему поперечного сечения двигателя малой тяги, первый вариант осуществления согласно изобретению;

фиг.2 - диаграмму напряженности магнитного и электромагнитного полей вдоль оси двигателя малой тяги согласно изобретению;

фиг.3 - схему поперечного сечения двигателя малой тяги, второй вариант осуществления согласно изобретению;

50 фиг.4 - схему поперечного сечения двигателя малой тяги, третий вариант осуществления согласно изобретению;

фиг.5 - диаграмму напряженности магнитного поля вдоль оси двигателя малой тяги

третьего варианта осуществления согласно изобретению;

фиг.6 - схему поперечного сечения двигателя малой тяги, четвертый вариант осуществления согласно изобретению;

фиг.7 - диаграмму напряженности магнитного поля вдоль оси двигателя малой тяги

5 четвертого варианта осуществления согласно изобретению;

фиг.8 - схему поперечного сечения двигателя малой тяги, пятый вариант осуществления согласно изобретению;

фиг.9 - диаграмму напряженности магнитного поля вдоль оси двигателя малой тяги пятого варианта осуществления согласно изобретению;

10 фиг.10-13 - схемы различных вариантов осуществления двигателя малой тяги, которые позволяют изменять направление тягового усилия согласно изобретению;

фиг.14 - схему поперечного сечения, показывающую различные возможные изменения в трубе согласно изобретению;

15 фиг.15 - схему поперечного сечения двигателя малой тяги, шестой вариант выполнения согласно изобретению;

фиг.16 - диаграмму напряженности магнитного и электромагнитного полей вдоль оси двигателя малой тяги шестого варианта выполнения согласно изобретению;

фиг.17 - схему поперечного сечения двигателя малой тяги, седьмой вариант осуществления согласно изобретению.

20 Описание предпочтительных вариантов воплощения изобретения

На фиг.1 представлена схема поперечного сечения двигателя малой тяги в соответствии с первым вариантом осуществления настоящего изобретения. Указанный двигатель малой тяги основан на электронном циклотронном резонансе для получения плазмы и на магнитной пондеромоторной силе для ускорения этой плазмы для формирования тягового

25 усилия. Пондеромоторная сила представляет собой силу, прилагаемую к плазме под действием градиента напряженности высокочастотного электромагнитного поля, и раскрыта в публикации Н.Мотз и С.Д.Ватсона (1967) «Advances in electronics and electron physics» 23, pp.153-302. В отсутствие магнитного поля эта сила может быть выражена как

30
$$F = - \frac{q^2}{4m\omega^2} \nabla E^2$$
 для одной частицы

$$F = - \frac{\omega_p^2}{2\omega^2} \nabla \frac{\epsilon_0 E^2}{2} \quad \text{для плазмы с} \quad \omega_p^2 = \frac{ne^2}{m_e \epsilon_0}$$

35 В присутствии неоднородного магнитного поля эта сила может быть выражена как

$$F = - \frac{q^2}{4m\omega} \left(\frac{\nabla E^2}{(\omega - \Omega_c)} - \frac{E^2}{(\omega - \Omega_c)^2} \nabla \Omega_c \right) - \mu \nabla B$$

40 Устройство содержит трубу 2 (фиг.1). Труба 2 имеет продольную ось 4, которая определяет ось тягового усилия. На самом деле тяговое усилие, формируемое двигателем малой тяги, направлено вдоль этой оси, хотя оно может быть направлено так, как описано ниже, со ссылками на фигуры 10-13. Внутреннее пространство трубы 2 определяет камеру 6, в которой движущийся газ ионизируется и ускоряется.

45 В описываемом варианте труба 2 представляет собой цилиндрическую трубу. Она изготовлена из непроводящего материала для получения магнитных и электромагнитных полей в камере. Можно также использовать керамику с низкой проницаемостью, кварц, стекло или подобные материалы. Труба может также состоять из материала, имеющего высокий коэффициент эмиссии вторичных электронов, такого как BN, Al₂O₃, B₄C. Это увеличивает плотность электронов в камере и улучшает ионизацию.

50 Труба 2 проходит непрерывно вдоль двигателя малой тяги, газ инжектируется с одного края трубы. Однако можно предположить различные формы трубы. Например, поперечное сечение трубы, которое в описываемом примере является круговым, может иметь другую форму, в соответствии с потоком плазмы, требующимся на выходе двигателя малой тяги.

Пример другого возможного поперечного сечения приводится ниже со ссылкой на фиг.14. Кроме того, не является необходимым, чтобы труба проходила непрерывно между инжектором и выходом двигателя малой тяги. В этом случае труба может изготавливаться из металлов или сплавов, таких как сталь, W, Mo, Al, Cu, Th-W или Cu-W, которые могут импрегнироваться, или покрываться оксидом бария или оксидом магния, или содержать радиоактивный изотоп для усиления ионизации. Как обсуждается ниже, плазма удерживается не трубой, а магнитными и электромагнитными полями, прикладываемыми к двигателю малой тяги. Таким образом, труба может содержать две отдельные секции, в то время как камера будет проходить вдоль двигателя малой тяги, между двумя секциями этой трубы.

На одном из краев трубы расположен инжектор 8, который инжектирует ионизируемый газ в трубу, как показано на фиг.1 стрелкой 10. Газ может включать в себя инертные газы Xe, Ar, Ne, Kr, He, химические соединения, такие как H_2 , N_2 , NH_3 , N_2H_2 , H_2O или CH_4 , или даже металлы, подобные Cs, Na, K или Li (щелочные металлы) или Hg. Чаще всего используются Xe и H_2 , которые требуют меньше энергии для ионизации.

Двигатель малой тяги содержит также генератор магнитного поля для генерирования магнитного поля в камере 6. Генератор магнитного поля содержит две катушки 12 и 14, которые создают в камере 6 магнитное поле B, продольный компонент которого представлен на фиг.2. Продольный компонент магнитного поля имеет два максимума, положение которых соответствует катушкам. Первый максимум B_{max1} , который соответствует первой катушке 12, расположен вблизи инжектора. Он служит только для удерживания плазмы и не является необходимым для работы двигателя малой тяги. Продольный компонент осуществляет продольное удержание электронов плазмы, так что ионизация облегчается эффектом магнитной бутылки, кроме того, край трубы и сопло инжектора являются защищенными от эрозии. Второй максимум B_{max2} , соответствующий второй катушке 14, обеспечивает удержание плазмы в камере. Он также разделяет объем камеры ионизации двигателя малой тяги: по одну сторону от максимума и по другую сторону от максимума. Величина продольного компонента магнитного поля на этом максимуме может адаптироваться, как указано ниже. Между двумя максимумами или на той стороне от второго максимума, где инжектируется газ, магнитное поле имеет более низкое значение. В примере на фиг.1 магнитное поле имеет минимальное значение B_{min} по существу в средней части камеры.

В ионизационном объеме двигателя малой тяги между двумя максимумами магнитного поля радиальный компонент магнитного поля и ортогональный к радиальному компонент магнитного поля, то есть компоненты магнитного поля в плоскости, перпендикулярной продольной оси двигателя малой тяги, не являются важными для работы двигателя малой тяги, они, предпочтительно, имеют меньшую напряженность, чем продольный компонент магнитного поля. На самом деле, они могут только уменьшить эффективность двигателя малой тяги, индуцируя ненужное движение вдоль стенок ионов и электронов в камере.

В ускоряющем объеме двигателя малой тяги, то есть по правую сторону от второго максимума B_{max2} магнитного поля в примере на фиг.1, направление магнитного поля по существу задает направление тягового усилия. Таким образом, вектор магнитного поля предпочтительно направлен вдоль оси тягового усилия. Радиальные и ортогональные к радиальным компоненты магнитного поля предпочтительно являются настолько малыми, насколько это возможно.

Таким образом, в ионизационном объеме и в ускоряющем объеме вектор магнитного поля предпочтительно по существу параллелен оси двигателя малой тяги. Угол между вектором магнитного поля и осью 4 двигателя малой тяги предпочтительно меньше 45° , более предпочтительно меньше 20° . В примере на фиг.1 и 2 этот угол по существу равен 0° , так что диаграмма (фиг.2) соответствует не только графику напряженности магнитного поля вдоль оси двигателя малой тяги, но также и аксиальному компоненту магнитного поля.

Напряженность магнитного поля, генерируемого генератором магнитного поля, то есть

значения $B_{\max 1}$, $B_{\max 2}$ и $B_{\min}$, предпочтительно выбираются следующим образом. Максимальные значения выбираются, чтобы обеспечить удерживание электронов плазмы в камере, при этом чем выше значение коэффициента отражения $B_{\max}/B_{\min}$, тем лучше электроны удерживаются в камере. Значение можно выбрать в соответствии с желаемым (скоростью истечения) удельным тяговым усилием и энергией электромагнитного ионизирующего поля (или энергией для данной скорости истечения), так что 90% газа или более ионизируется после прохождения второго пика магнитного поля. Нижнее значение $B_{\min}$ зависит от положения катушек. Оно не имеет большого значения, за исключением варианта, представленного на фиг.4 и 5. Доля потерь электронов из бутылки в процентах может быть выражена как:

$$\alpha_{lost} = 1 - \sqrt{1 - \frac{B_{\min}}{B_{\max}}} \quad \text{или} \quad \frac{B_{\max}}{B_{\min}} = \frac{1}{1 - (1 - \alpha_{lost})^2}$$

Для массового потока и для тягового усилия, меньшее значение α_{lost} позволяет уменьшить ионизирующую мощность для той же скорости истечения и доли ионизации.

В дополнение к этому, магнитное поле предпочтительно выбирается таким образом, что ионы по большей части нечувствительны к магнитному полю. Другими словами, величина магнитного поля является достаточно низкой, так что ионы движущего газ не отклоняются или, по существу, не отклоняются посредством магнитного поля. Это условие позволяет ионам движущего газа пролетать через трубу, по существу, по прямой линии и улучшает тяговое усилие. Если определять циклотронную частоту ионов как

$$f_{ICR} = q \cdot B_{\max} / 2\pi M,$$

ионы определяются как ненамагниченные, если циклотронная частота ионов гораздо меньше, чем частота соударений ионов (или параметр Холла ионов, который представляет собой отношение меньше чем 1)

$$f_{ICR} \ll f_{ion-collision},$$

где: q - электрический заряд, M - масса ионов, $B_{\max}$ - максимальная величина магнитного поля. При таком ограничении f_{ICR} представляет собой частоту циклотронного резонанса ионов, т.е. частоту, с которой ионы вращаются вокруг линий магнитного поля.

Ограничение представляет собой тот факт, что время одного вращения в камере является настолько продолжительным по сравнению с периодом времени между соударениями, что движение ионов практически не изменяется под действием магнитного поля. Параметр $f_{ion-collision}$ определяется, как известно, как

$$f_{ion-collision} = N \cdot \sigma \cdot V_{TH}$$

где: N - объемная плотность электронов, σ - сечение рассеяния электронов на ионах, V_{TH} - тепловая скорость электронов. Тепловая скорость может быть выражена как

$$V_{TH} = \sqrt{\frac{kT}{m_e}}$$

где: k - микроскопическая константа Больцмана, T - температура, m_e - масса электрона. Параметр $f_{ion-collision}$ представляет собой количество соударений, которое испытывает один ион за секунду в облаке электронов, имеющих плотность N и температуру T .

Предпочтительно, максимальная величина магнитного поля должна выбираться таким образом, чтобы

$$f_{ICR} < f_{ion-collision} / 2$$

или даже

$$f_{ICR} < f_{ion-collision} / 10.$$

Таким образом, период циклотронного резонанса ионов в двигателе малой тяги по меньшей мере в два раза продолжительнее, чем период между соударениями ионов в камере или в двигателе малой тяги.

В то же время по-прежнему возможно иметь достаточное удерживание газа в ионизационном объеме двигателя малой тяги, что подтверждается численным примером,

приведенным ниже. Тот факт, что ионы по большей части нечувствительны к магнитному полю, во-первых, помогает фокусировать пучок ионов и электронов на выходе из двигателя малой тяги, увеличивая этим расход. Кроме этого, это позволяет избежать удерживания ионов на линии магнитного поля после того, как они выходят из двигателя малой тяги, это обеспечивает создание тягового усилия в целом.

Двигатель малой тяги содержит также генератор электромагнитного поля, который генерирует электромагнитное поле в камере 6. В примере на фиг.1 генератор электромагнитного поля содержит первую резонансную полость 16 и вторую резонансную полость 18, расположенные соответственно вблизи катушек 12 и 14. Первая полость 16 предназначена для генерирования колебаний электромагнитного поля в полости между двумя максимумами магнитного поля или по меньшей мере по ту сторону от максимума $B_{\max 2}$, где находится инжектор. Осциллирующее поле представляет собой ионизирующее поле с частотой f_{EI} в микроволновом диапазоне, то есть в пределах от 900 МГц до 80 ГГц. Частота электромагнитного поля предпочтительно адаптирована к локальному значению магнитного поля, так что важная или существенная часть ионизации происходит под действием электронного циклотронного резонанса. В частности, для данной величины B_{res} магнитного поля частота электронного циклотронного резонанса f_{ECR} задается формулой:

$$f_{ECR} = eB_{res} / 2\pi m$$

где: e - электрический заряд, m - масса электрона. Это значение частоты электромагнитного поля предназначено для обеспечения максимальной ионизации движущего газа под действием электронного циклотронного резонанса. Предпочтительно, чтобы значение частоты электромагнитного поля f_{EI} было равно частоте ЭЦР, вычисленной для положения, где приложенное электромагнитное поле является максимальным. Разумеется, это не что иное, как аппроксимация, поскольку напряженность магнитного поля изменяется вдоль оси и поскольку электромагнитное поле прикладывается локально, а не к одной единственной точке.

Можно также выбрать значение частоты, которое не совпадает точно с этим предпочтительным значением. Предпочтительным является диапазон $\pm 10\%$ по отношению к частоте ЭЦР. Диапазон $\pm 5\%$ дает лучшие результаты. Предпочтительно также, чтобы по меньшей мере 50% движущего газа были ионизированы во время прохождения объема или камеры ионизации. Такое количество ионизированного газа обеспечивается только благодаря использованию ЭЦР для ионизации. Если частота электромагнитного поля выпадает из диапазона $\pm 10\%$, приведенного выше, вероятным является заметное падение степени ионизации движущего газа ниже предпочтительного значения 50%.

Направление электрического компонента электромагнитного поля в ионизационном объеме предпочтительно перпендикулярно к направлению магнитного поля. В любом положении угол между вектором локального магнитного поля и локальным осциллирующим электрическим компонентом электромагнитного поля находится в пределах от 60° до 90° , предпочтительно от 75° до 90° , что необходимо для оптимизации ионизации посредством ЭЦР. В примере на фиг.1 электрический компонент электромагнитного поля ортогонален к радиальному или радиальным; он находится в плоскости, перпендикулярной продольной оси, и ортогонален к прямой линии в этой плоскости, проходящей через ось, что может быть получено путем выбора резонансной моды в полости резонатора. В примере на фиг.1 электромагнитное поле резонирует в моде TE_{111} . Ортогональное к радиальному поле также позволяет улучшить удерживание плазмы в ионизационном объеме и удерживание контакта со стенками камеры. Направление электрического компонента электромагнитного поля может изменяться по отношению к предпочтительному ортогональному к радиальному направлению. Предпочтительно угол между вектором электромагнитного поля и ортогональным к радиальному направлением меньше 45° , более предпочтительно, меньше 20° .

В ускоряющем объеме частота электромагнитного поля также предпочтительно выбирается таким образом, чтобы она была равна частоте ЭЦР или находилась вблизи

нее. Это позволяет использовать магнитную пондеромоторную силу в качестве ускоряющей по обе стороны максимума электромагнитного поля, как показано во втором уравнении, приведенном выше. Частота электромагнитной силы не должна быть абсолютно идентичной частоте ЭЦР. Такие же диапазоны, как указаны выше, применимы для частоты и для углов между векторами магнитных и электромагнитных полей. На этой стадии частота электромагнитного поля, используемого для ионизации и ускорения, может быть одинаковой: это упрощает генератор электромагнитного поля, поскольку один и тот же микроволновый генератор может использоваться для возбуждения обеих полостей резонатора.

Предпочтительно, чтобы электрический компонент электромагнитного поля был чисто радиальным или ортогональным к радиальному, чтобы получить максимальную магнитную пондеромоторную силу. В дополнение к этому ортогональный к радиальному электрический компонент электромагнитного поля будет фокусировать пучок плазмы на выходе двигателя малой тяги. Угол между электрическим компонентом электромагнитного поля и радиальным или ортогональным к радиальному направлением предпочтительно меньше 45° или, лучше, меньше 20° .

На фиг.2 представлена диаграмма напряженности магнитного и электромагнитного полей вдоль оси двигателя малой тяги, напряженность магнитного поля и электромагнитного поля представлена по вертикальной оси графика. Положение вдоль оси двигателя малой тяги представлено на горизонтальной оси. Как указано выше, напряженность магнитного поля, которое в основном параллельно оси двигателя малой тяги, имеет два максимума.

Напряженность электрического компонента электромагнитного поля имеет первый максимум $E_{\max 1}$, расположенный в средней плоскости первой полости резонатора, и второй максимум $E_{\max 2}$, расположенный в средней плоскости второй полости резонатора. Величина напряженности первого максимума выбирается вместе со скоростью потока в ионизационной камере. Величина второго максимума может адаптироваться к значению I_{sp} , требуемому на выходе двигателя малой тяги. На фиг.2 частота первого и второго максимумов электромагнитного поля одинакова. В самом деле, полости резонаторов идентичны и возбуждаются одним и тем же микроволновым генератором. Начало продольной оси двигателя малой тяги находится в сопле инжектора.

Ниже приведен пример, иллюстрирующий настоящее изобретение. Поток газа равен 6 мг/сек, общая микроволновая мощность составляет около 1550 Вт, что соответствует ~350 Вт для ионизации и ~1200 Вт для ускорения для тягового усилия ~120 мН. Микроволновая частота равна около 3 ГГц. Тогда, магнитное поле может иметь напряженность с максимумом около 180 мТ и с минимумом ~57 мТ. На фиг.2 также показано значение B_{res} магнитного поля, в положении, где находятся полости резонаторов. Частота электромагнитного поля предпочтительно равна соответствующей частоте ЭЦР $eB_{res}/2\pi m$.

Следующие численные значения иллюстрируют двигатель малой тяги, обеспечивающий скорость выброса более 20 км/сек и удельное тяговое усилие выше 100 Н/м². Труба представляет собой трубу из BN, имеющую внутренний диаметр 40 мм, наружный диаметр 48 мм и длину 260 мм. Инжектор подает Хе со скоростью 130 м/сек на входе в трубу и с массовой скоростью потока ~6 мг/сек.

Первый максимум магнитного поля $B_{\max 1}$ расположен при $X_{B1}=20$ мм от сопла инжектора, напряженность $B_{\max 1}$ магнитного поля равна ~180 мТ. Первая полость резонатора для электромагнитного поля расположена при $X_{E1}=125$ мм от сопла инжектора, напряженность E_1 электрического поля равна ~41000 В/м. Второй максимум магнитного поля $B_{\max 2}$ расположен при $X_{B2}=170$ мм от сопла инжектора, напряженность $B_{\max 2}$ этого магнитного поля равна ~180 мТ. Вторая полость резонатора для электромагнитного поля расположена при $X_{E2}=205$ мм от сопла инжектора, напряженность E_2 электрического поля равна ~77000 В/м.

Примерно 90% газа, проходящего в ускоряющий объем ($X > X_{B2}$), ионизируется.

Параметр f_{ICR} равен 15,9 МГц, поскольку $q=e$, и $M=130$ а.е.м. Таким образом, параметр

Холла для иона равен 0,2, так что ионы в основном нечувствительны к магнитному полю.

Представленные значения являются иллюстративными. Они демонстрируют, что двигатель малой тяги согласно изобретению обеспечивает получение одновременно скорости выброса выше 15 км/сек и удельного тягового усилия выше 100 Н/м². Двигатель малой тяги на фиг.1 работает следующим образом. Газ инжектируют в камеру. Затем он подается в первое магнитное поле и первое электромагнитное поле, где по меньшей мере частично ионизируется. Затем частично ионизированный газ проходит через пиковое значение магнитного поля. Затем он подается во второе магнитное поле и второе электромагнитное поле и ускоряется под действием магнитной пондеромоторной силы.

Ионизация и ускорение разделяются и осуществляются последовательно и могут контролироваться независимо.

Двигатель малой тяги согласно изобретению является значительно более эффективным, чем известные устройства. Кроме того, он имеет следующие преимущества.

Во-первых, отсутствуют электроды. Таким образом, все проблемы, создаваемые электродами, эрозия, высокое напряжение, исключаются.

Во-вторых, благодаря магнитной пондеромоторной силе как электроны, так и ионы ускоряются в одном и том же направлении. Нет необходимости в создании нейтрализатора на выходе двигателя малой тяги.

В-третьих, одна и та же частота электромагнитной силы используется для ионизации и ускорения. Это позволяет использовать один и тот же микроволновый генератор для возбуждения генератора электромагнитного поля.

В-четвертых, ионизация и ускорение разделяются, поскольку они осуществляются по разные стороны от пика магнитного поля. Это позволяет, как объясняется ниже, воздействовать по-отдельности на ионизацию и на ускорение, чтобы адаптировать рабочие характеристики двигателя малой тяги в соответствии с потребностями. Это также увеличивает эффективность ионизации и уменьшает мощность, необходимую для ионизации движущего газа.

В-пятых, электроны получают энергию и намагничиваются в ионизационном объеме, но ионы по существу нечувствительны к магнитному полю. Это улучшает эффективность двигателя малой тяги по сравнению с известным двигателем малой тяги VaSIMR или с известными плазменными насосами. Также электроны получают энергию при частоте ЭЦР или вблизи этой частоты, что улучшает эффективность ионизации.

На фиг.3 представлено схематично поперечное сечение двигателя малой тяги во втором варианте осуществления. Отличие от фиг.1 заключается в положении первой полости 16 резонатора, которая расположена вблизи катушки 14 и формирует второй максимум магнитного поля. Полость резонатора расположена вдоль оси с координатой $x = X_{E3} = 205$ мм. Это положение выбирается таким образом, чтобы величина магнитного поля была равна величине магнитного поля в положении X_{E1} . Это позволяет использовать одну и ту же полость резонатора без необходимости в адаптации значения частоты электромагнитного поля. Можно также использовать две полости резонатора с координатами X_{E1} и X_{E2} для генерирования электромагнитного поля в ионизационном объеме. Это позволит увеличить количество газа, ионизирующегося в ионизационном объеме. Расположение полости по правую сторону уменьшает эрозию.

На фиг.4 представлена схема поперечного сечения двигателя малой тяги в третьем варианте осуществления изобретения, а на фиг.5 - диаграмма напряженности магнитного и электромагнитного полей вдоль оси двигателя малой тяги. Двигатель малой тяги, представленный на фиг.4, аналогичен двигателю на фиг.1. Однако первая полость 16 резонатора расположена по существу посередине между катушками 12 и 14. Фиг.5 аналогична фиг.2, но показывает напряженности магнитного поля для двигателя малой тяги на фиг.4, где первая полость резонатора расположена по существу на координате X_{E4} , которая соответствует минимальному значению B_{min} магнитного поля. Частота электромагнитного поля выбирается таким образом, чтобы она была равна $e \cdot B_{min} / 2\pi m$. Вторая полость резонатора расположена в положении, где магнитное

поле имеет такую же величину. Это позволяет использовать один и тот же микроволновый генератор для возбуждения обеих полостей. Преимущество этого варианта осуществления заключается в том, что величина магнитного поля по существу одинакова во всем объеме, где прикладывается поле ЭЦР. Это увеличивает количество ионизованного газа при прочих равных условиях.

На фиг.6 представлена схема поперечного сечения двигателя малой тяги в четвертом варианте осуществления настоящего изобретения, а на фиг.7 - диаграмма напряженности магнитного поля вдоль оси этого двигателя малой тяги. В этом варианте осуществления значения коэффициента отражения магнитного поля могут адаптироваться, чтобы изменять степень ионизации в ионизационном объеме двигателя малой тяги. Увеличение степени ионизации будет давать ионы с более высоким зарядом из-за большего удерживания электронов в ионизационном объеме. Эти ионы будут приобретать более высокую скорость, что позволит увеличить тяговое усилие.

Двигатель малой тяги на фиг.6 аналогичен двигателю на фиг.3. Однако генератор магнитного поля снабжен тремя дополнительными катушками 22, 24 и 26. Первая и третья дополнительные катушки 22 и 26 расположены внутри катушек 12 и 14, в то время как вторая дополнительная катушка 24 расположена по существу вблизи от среднего положения между катушками 12 и 14. Первая и третья дополнительные катушки создают магнитное поле, которое усиливает поле, создаваемое катушками 12 и 14. Это позволяет увеличить напряженность максимумов $B_{\max 1}$ и $B_{\max 2}$ магнитного поля. Вторая дополнительная катушка создает магнитное поле, противоположное магнитному полю, создаваемому катушками 12 и 14. Это уменьшает величину $B_{\min}$ магнитного поля, таким образом, увеличивая коэффициент отражения.

На фиг.7 представлена диаграмма напряженности магнитного поля для различных величин тока, приложенного к дополнительным катушкам. Диаграмма 28 соответствует варианту, когда дополнительные катушки не создают никакого магнитного поля. Диаграмма 30 соответствует первому значению тока через дополнительные катушки, в то время как диаграмма 32 соответствует значительно более высокому значению тока. Благодаря наличию второй дополнительной катушки величина магнитного поля в координатах X_{E3} и X_{E2} , где расположены полости резонаторов, остается по существу одной и той же. Это исключает необходимость в изменении частоты электромагнитного поля или положении полостей, при этом требуемая ионизация посредством ЭЦР не зависит от величины магнитного поля. Другими словами, максимальная величина магнитного поля изменяется, но величина магнитного поля в положении полостей резонаторов остается по существу постоянной. Величина магнитного поля благодаря этим катушкам изменяется в пределах 100%, что вызывает изменение степени ионизации до 90%. Это вызывает изменение тягового усилия до 90%. В этом примере можно использовать дополнительные катушки на выходе двигателей малой тяги для модификации профиля и направления выбрасываемого материала.

На фиг.8 представлена схема поперечного сечения двигателя малой тяги в пятом варианте осуществления настоящего изобретения, а на фиг.9 представлена диаграмма напряженности магнитного поля вдоль оси двигателя малой тяги на фиг.8. В этом варианте осуществления градиент магнитного поля изменяет напряженность магнитной пондеромоторной силы в ускоряющем объеме. Как указано выше, компонент магнитной пондеромоторной силы пропорционален градиенту магнитного поля.

Двигатель малой тяги, представленный на фиг.8, аналогичен двигателю на фиг.4, однако он дополнительно содержит дополнительные катушки 34, 36 для контроля градиента, расположенные по обеим сторонам второй полости 18 резонатора. Первая градиентная катушка 34, которая расположена между второй катушкой 14 и второй полостью 18 резонатора, генерирует магнитное поле, параллельное полю, генерируемому второй катушкой. Вторая градиентная катушка 36, которая расположена на стороне второй полости 18 резонатора, противоположной второй катушке 14, генерирует магнитное поле, противоположное полю, генерируемому второй катушкой. Таким образом, эти катушки для

контроля градиента предназначены для изменения градиента магнитного поля в ускоряющем объеме двигателя малой тяги. Кроме того, они могут использоваться для увеличения максимальной величины магнитного поля, создаваемого второй катушкой, в то же время сохраняя положение резонансного поля вблизи средней плоскости полости.

5 Присутствие катушек для контроля градиента слегка изменит положение полости резонатора в ускоряющем объеме двигателя малой тяги.

На фиг.9 представлена диаграмма напряженности магнитного поля для двигателя малой тяги на фиг.8. Диаграмма 38 соответствует случаю, когда на катушки для контроля градиента не подается питание. Диаграмма 40 показывает величину магнитного поля, когда на катушки для контроля градиента подается питание. Величина градиента во второй полости 18 резонатора изменяется от 2,3 Т/м до 4,5 Т/м, то есть относительное изменение достигает 100%. Как и в примере на фиг.6, величина магнитного поля в полостях резонаторов остается постоянной и нет необходимости в изменении частоты электрической энергии, возбуждающей полости резонаторов.

15 На фиг.9, кроме того, показано, что положение, где достигается максимальное значение $B_{\max 2}$ магнитного поля, слегка смещается, когда на катушки для контроля градиента подается питание, показано расстояние δx . Это изменит длину ионизационной камеры и вместе с увеличением максимальной величины внесет вклад в дополнительную ионизацию движущего газа, что увеличит тяговое усилие.

20 Катушки для контроля градиента, которые представлены на фиг.8, также могут использоваться в примерах на фиг.1 и 4, единственным ограничением является объем, занимаемый катушками. На фиг.8 представлен пример генератора магнитного поля, проходящего за край трубы. В этом варианте показано, что труба не должна проходить непрерывно от инжектора до края двигателя малой тяги. Катушки для контроля градиента могут использоваться также в сочетании с примером, показанным на фиг.7, с теми же ограничениями, связанными с объемом.

На фиг.10-13 представлены различные варианты осуществления двигателя малой тяги, который позволяет изменять направления тягового усилия. Как указано выше, пондеромоторная сила направлена вдоль линий магнитного поля. При изменении линий этого поля в ускоряющем объеме двигателя малой тяги создается возможность для изменения направления тягового усилия. На фиг.10 представлено поперечное сечение другого варианта осуществления двигателя малой тяги, который аналогичен двигателю на фиг.4. Однако в примере на фиг.10 двигатель малой тяги дополнительно снабжен тремя дополнительными катушками 42, 44 и 46 для контроля направления, расположенными после второй полости 18 резонатора. Эти катушки смещены по отношению к оси двигателя малой тяги, чтобы изменять направление магнитного поля после второй катушки 14. На фиг.11 показан вид сбоку трех катушек и трубы 2, а также различные магнитные поля, которые могут формироваться путем подачи питания к одной или нескольким из этих катушек, которые представлены символически в виде стрелок в трубе 2. Предпочтительно катушки генерируют магнитное поле, направление которого противоположно полю, создаваемому катушками 12 и 14. Это дополнительно увеличивает градиент магнитного поля, а следовательно, и тяговое усилие. С другой стороны, подавая питание на катушки с противоположным направлением тока, возможно изменять направление тягового усилия в более широких пределах и использовать меньше катушек (2 или 3 вместо 4), но использовать более сложный источник питания для возбуждения катушки.

На фиг.12 представлен вид сбоку, аналогичный виду на фиг.11, но для двигателя малой тяги, имеющего только две дополнительные катушки, показан также наружный диаметр элементов 14 и 18. На фиг.13 представлен вид сбоку, аналогичный виду на фиг.11, но для двигателя малой тяги, имеющего только четыре дополнительных катушки.

50 В примерах на фиг.10-13 катушки для контроля направления расположены настолько близко, насколько это возможно, ко второй полости, чтобы воздействовать на магнитное поле в ускоряющем объеме. Желательно, чтобы напряженность магнитного поля в катушках для контроля направления выбиралась таким образом, чтобы магнитное поле по-

прежнему непрерывно уменьшалось после двигателя малой тяги, что устраняет любой эффект зеркала, который мог бы локально захватывать электроны плазмы. Можно также использовать катушки, ось которых наклонена по отношению к оси двигателя малой тяги. Это может увеличить возможный диапазон направлений для вектора тягового усилия.

5 Величина магнитного поля, создаваемого катушками для контроля направления, предпочтительно составляет от 20% до 80% от главного поля, так что оно нигде не меняет направление магнитного поля на обратное.

На фиг.14 представлена схема поперечного сечения, показывающая различные возможные изменения в трубе, которые могли бы использоваться по отдельности в любом из вариантов осуществления, показанных на фиг.1-13, или в вариантах осуществления на 10 фиг.15 и 17. Во-первых, по сравнению с вариантами осуществления, обсуждаемыми выше, камера 6 на фиг.14 имеет меньшее поперечное сечение. Это увеличивает плотность газа в камере при той же массовой скорости потока, а следовательно, и частоту ионизирующих соударений в ионизационном объеме, что улучшает ионизацию.

15 Во-вторых, труба может быть снабжена экранирующей камерой 48, расположенной после камеры 6. Эта камера имеет преимущество защиты сопла инжектора от электронов высокой энергии, которые могут проходить через барьер, создаваемый первым максимумом $B_{\max 1}$ магнитного поля. Дополнительно такая экранирующая камера улучшит однородность потока в камере и ограничит градиент плотности в камере.

20 В-третьих, труба дополнительно снабжена дополнительным инжектором 50 для газа внутри ускоряющей камеры. Это защищает стенки трубы от эрозии под действием электронов высоких энергий, ускоряемых посредством двигателя малой тяги.

На фиг.15 представлена схема поперечного сечения двигателя малой тяги в еще одном варианте осуществления настоящего изобретения, где камера 52 имеет форму кольца. Кроме того, в двигателе малой тяги на фиг.15 использованы постоянные магниты вместо катушек, при этом в камеру 52 осуществляется инжекция газа с одного края (показано 25 стрелками 54 и 56). Таким образом, труба содержит внутренний цилиндр 58 и наружный цилиндр 59, расположенные у одной оси. Инжекция газа может, на самом деле, осуществляться по окружности кольца, образующего край камеры, с помощью одного или 30 нескольких инжекторов (не показаны). Первая и вторая полости 60 и 62 резонаторов расположены вдоль трубы, каждая из полостей формируется из внутренней части, расположенной внутри трубы 58, и наружной части, расположенной снаружи трубы. В двигателе малой тяги использованы постоянные магниты. Два внутренних магнита 64 и 66 в форме колец предусмотрены внутри цилиндра 58, соответствующие наружные магниты 35 68 и 70 в форме колец находятся снаружи наружного цилиндра 59, напротив внутренних магнитов в форме колец. Третий магнит 72 предусмотрен слева от камеры 52. Он является круговым по форме и имеет по существу такой же наружный диаметр, как и наружный диаметр наружных магнитов в форме колец. Для придания нужного направления линиям магнитного поля первая круговая труба, выполненная из такого материала, как мягкое 40 железо, размещена снаружи наружных магнитов в форме колец и соединена с внешней периферией кругового магнита 72. Вторая круговая труба 76 из сходного материала расположена внутри первого внутреннего магнита 64 в форме кольца и соединена вблизи центра кругового магнита 72. Стержень 78 направляет линии магнитного поля от внутренней периферии второго внутреннего магнита 66 в форме кольца к центру кругового 45 магнита 78. Разумеется, возможны и другие конструкции для направления линий поля.

На фиг.16 представлена диаграмма напряженности магнитного и электромагнитного полей вдоль оси указанного двигателя малой тяги. Она по существу аналогична диаграмме на фиг.2 за исключением того, что магнитное поле является в основном радиальным.

На фиг.17 представлена схема двигателя малой тяги с камерой 52, аналогичной камере 50 на фиг.15. Однако в двигателе малой тяги на фиг.17 использованы катушки для генерирования магнитного поля. Структура подобна структуре на фиг.15, но магниты 64, 66, 68, 70 и 72 заменены средствами для придания направления линиям поля по существу такой же формы;

первая катушка 80 в форме кольца размещена на стержне 78 вблизи элемента 66;
 вторая катушка 82 в форме кольца размещена на трубе 76 вблизи элемента 64.

Магнитное и электромагнитное поля аналогичны полям на фиг.16. С помощью элементов в форме кольца, таких как элементы на фиг.15 и 17, положение генераторов магнитного поля и электромагнитного поля может легко изменяться.

В Таблицах приведены примеры вариантов 1-33 осуществления настоящего изобретения, где

Power - относительная мощность двигателя малой тяги по сравнению с другими примерами таблицы;

Band - диапазон микроволновых частот;

Ptotal - общая мощность двигателя малой тяги, в Вт;

Pthrust - мощность двигателя малой тяги, в Вт;

Pion - мощность, используемая для ионизации, в Вт;

Thrust - полученное тяговое усилие, в мН;

Mdot - массовая скорость потока, в мг/сек;

Isp - удельный импульс, то есть отношение между скоростью истечения и ускорением силы тяжести g на уровне моря, в сек;

Efficiency - коэффициент полезного действия двигателя малой тяги, то есть отношение между мощностью, используемой в двигателе малой тяги, и механической мощностью тягового усилия;

B - собой резонансное магнитное поле, в мТ;

Fce - электронная циклотронная частота, в ГГц;

Vmax/Vmin - отношение между максимальной и минимальными величинами магнитного поля;

T/s - удельное тяговое усилие, в Н/м²;

Routput - радиус двигателя малой тяги на выходе, в см;

Rin - внутренний радиус магнитных катушек, в см;

L - общая длина полости, в см;

Dbob - расстояние между магнитными катушками, в см;

Ibob - напряженность в магнитных катушках, в А;

Nbob - количество витков в катушках.

В примерах указаны диапазоны для каждой из иллюстрируемых величин. Например, значения отношения Vmax/Vmin находятся в пределах между 1,69 (примеры 18 и 24) и 17,61 (пример 5). Эта величина предпочтительно должна находиться в пределах от 1,2 до 20. Хотя различные диапазоны, которые можно получить из Таблицы, относятся к конкретным примерам, осуществление настоящего изобретения возможно во всем диапазоне, приведенном в Таблице. Таким образом, различные диапазоны, получаемые из Таблицы, на самом деле, не зависят друг от друга.

Таблица 1						
Пр.	Power	Band	Ptotal	Pthrust	Pion	Thrust
1	Низкая	C	199	190	9	8,3
2	Низкая	X	200	139	48	16,4
3	Низкая	K	200	152	48	17,2
4	Низкая	X	200	124	7	5,9
5	Низкая	K	200	151	7	6,6
6	Низкая	C	224	163	61	20,0
7	Умеренно низкая	K	1500	968	382	122,1
8	Умеренно низкая	C	1500	1117	382	131,1
9	Умеренно низкая	X	1500	1117	382	131,1
10	Умеренно низкая	C	1500	993	61	49,3
11	Умеренно низкая	X	1500	1392	61	58,4
12	Умеренно низкая	K	1500	1392	61	58,4
13	Средняя	K	3500	2591	897	306,2
14	Средняя	C	3500	2599	897	306,7
15	Средняя	X	3500	2929	574	260,5
16	Средняя	K	3500	2947	143	130,2

5

10

15

17	Средняя	X	3500	3368	143	139,2
18	Средняя	C	3500	3369	143	139
19	Умеренно высокая	K	8000	7061	913	510,0
20	Умеренно высокая	X	8000	7355	670	445,8
21	Умеренно высокая	X	8000	7604	329	317,4
22	Умеренно высокая	K	8000	7691	329	319,2
23	Умеренно высокая	C	8000	7699	329	319,4
24	Умеренно высокая	C	8027	7708	319	315,1
25	Высокая	C	10000	7417	2573	877,3
26	Высокая	K	10000	9089	839	554,6
27	Высокая	X	10000	9612	410	398,9
28	Высокая	C	10000	9623	410	399,1
29	Высокая	K	10000	9686	339	364,0
30	Очень высокая	C	50000	45952	4204	2791,4
31	Очень высокая	C	50000	48106	2059	1998,9
32	Очень высокая	X	50000	49319	804	1264,9
33	Очень высокая	K	50000	49349	712	1190,8

20

25

30

35

40

45

Таблица 2							
Пр.	Mdot	Isp	Efficiency	B	Fce	Bmin/Bmax	T/S
1	0,18	4638	75,97%	85,41	2,391	2,16	26,6
2	0,97	1729	69,63%	344,97	9,656	2,16	52,3
3	0,97	1806	75,96%	634,46	17,759	9,79	54,6
4	0,14	4244	61,83%	352,09	9,855	2,16	75,6
5	0,14	4684	75,34%	649,72	18,186	17,61	83,5
6	1,22	1666	65,35%	85,41	2,391	2,16	63,6
7	7,70	1617	64,56%	634,46	17,759	9,79	388,6
8	7,70	1737	74,47%	88,55	2,479	2,26	104,3
9	7,70	1737	74,47%	338,73	9,481	3,75	104,3
10	1,22	4108	66,23%	88,55	2,479	2,26	39,2
11	1,22	4864	92,82%	634,46	17,759	9,79	185,8
12	1,22	4864	92,82%	634,46	17,759	9,79	743,1
13	18,09	1725	74,02%	634,46	17,759	9,79	974,6
14	18,09	1728	74,27%	88,55	2,479	2,26	79,7
15	11,58	2293	83,69%	338,73	9,481	3,75	207,3
16	2,87	4616	84,19%	634,46	17,759	9,79	414,3
17	2,87	4935	96,23%	338,73	9,481	3,75	442,9
18	2,87	4935	96,26%	105,78	2,961	1,69	110,8
19	18,42	2823	88,26%	634,46	17,759	9,79	1623,3
20	13,51	3363	91,93%	338,73	9,481	3,75	354,8
21	6,63	4884	95,06%	338,73	9,481	3,75	449,1
22	6,63	4911	96,13%	634,46	17,759	9,79	1016,2
23	6,63	4914	96,23%	88,55	2,479	2,26	162,7
24	6,44	4986	96,34%	90,30	2,528	1,69	111,5
25	51,89	1724	74,17%	88,55	2,479	2,26	137,9
26	16,92	3341	90,89%	634,46	17,759	9,79	1765,4
27	8,28	4943	96,12%	338,73	9,481	3,75	564,3
28	8,28	4915	96,23%	88,55	2,479	2,26	203,3
29	6,84	5425	96,86%	634,46	17,759	9,79	1158,6
30	84,78	3356	91,90%	86,62	2,425	4,45	246,8
31	41,53	4906	96,21%	86,62	2,425	4,45	360,7
32	16,22	7949	98,64%	338,73	9,481	3,75	1006,6
33	14,37	8449	98,70%	634,46	17,759	9,79	3790,4

50

Таблица 3						
Пр.	Routput	Rin	L	Dbob	Ibob	Nbob
1	1	8	32	20	1	15000
2	1	4	17	10	1,35	20000
3	1	2	16	10	1,4	20000
4	0,5	4	18	10	1,5	20000
5	0,5	1,6	16	10	1,35	20000
6	1	8	32	20	1	15000
7	1	2	16	10	1,4	20000

5

10

15

20

8	2	7	30	18	1	15000
9	2	3	17	10	1,2	20000
10	2	7	30	18	1	15000
11	1	2	16	10	1,4	20000
12	0,5	2	16	10	1,4	20000
13	1	2	16	10	1,4	20000
14	3,5	7	30	18	1	15000
15	2	3	17	10	1,2	20000
16	1	2	16	10	1,4	20000
17	1	3	17	10	1,2	20000
18	2	7	26	15	1	15000
19	1	2	16	10	1,4	20000
20	2	3	17	10	1,2	20000
21	1,5	3	17	10	1,2	20000
22	1	2	16	10	1,4	20000
23	2,5	7	30	18	1	15000
24	3	7	27	15	1	15000
25	4,5	7	30	18	1	15000
26	1	2	16	10	1,4	20000
27	1,5	3	17	10	1,2	20000
28	2,5	7	30	18	1	15000
29	1	2	16	10	1,4	20000
30	6	5	30	18	1	15000
31	4,2	5	30	18	1	15000
32	2	3	17	10	1,2	20000
33	1	2	16	10	1,4	20000

Примеры, приведенные выше, могут изменяться. Например, для генерирования магнитного поля могут использоваться средства иные, чем катушки, такие как постоянные магниты, как показано на фиг.15. Это применимо также и к другим двигателям малой тяги. Количество полостей резонаторов или катушек может изменяться в соответствии с требованиями. Например, может использоваться одна и та же полость резонатора для генерирования электромагнитного поля по обе стороны от максимума магнитного поля с учетом ограничений по объему. В примере на фиг.6 и 7 используются три дополнительные катушки; количество дополнительных катушек, а также их положения, могут отличаться, например, можно добавить дополнительную катушку в ускоряющий объем двигателя малой тяги. Можно также использовать дополнительные катушки в вариантах осуществления на фиг.1, 3, 4, 8, 10, 14, 15 или 16. Аналогично количество катушек для контроля градиента, а также их положения, могут отличаться от примера на фиг.8, градиентные катушки можно использовать и в других примерах. Можно также постоянно создавать более высокий градиент магнитного поля, как на диаграмме 40 (фиг.9). Катушки для контроля направления (фиг.10-13) могут также использоваться в вариантах осуществления на фиг.1-9 или 15 и 17. Во всех примерах одна и та же частота может использоваться для ионизирующих и ускоряющих электромагнитных полей. Это упрощает генерирование электромагнитного поля, однако можно также использовать различные частоты от различных генераторов.

Формула изобретения

1. Двигатель малой тяги, содержащий камеру, определяющую ось тягового усилия, инжектор, предназначенный для инжестирования ионизируемого газа в камеру, генератор магнитного поля, которое имеет, по меньшей мере, максимум вдоль оси, генератор электромагнитного поля, предназначенный для генерирования микроволнового ионизирующего поля в камере по одну сторону от указанного максимума и магнитного пондеромоторного ускоряющего поля по другую сторону от указанного максимума.

2. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что угол вектора магнитного поля

с осью тягового усилия составляет менее 45° , предпочтительно менее 20° .

3. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что период ионного циклотронного резонанса в двигателе малой тяги больше по величине, по меньшей мере, на один порядок, чем время пролета ионов в двигателе малой тяги.

5 4. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что отношение максимального значения к минимальному значению магнитного поля находится в пределах от 2 до 20.

5. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что угол вектора электромагнитного поля с ортогональным направлением меньше 45° , предпочтительно меньше 20° .

10 6. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что локальный угол между вектором электромагнитного поля и вектором магнитного поля в двигателе малой тяги находится в пределах от 60° до 90° .

7. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что частота электромагнитного поля отличается менее чем на 10% от частоты электронного циклотронного резонанса в положении, когда генерируется электромагнитное поле.

8. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что микроволновое ионизирующее поле и магнитное поле предназначены для ионизации, по меньшей мере, 50% газа, инжектируемого в камеру.

9. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что генератор магнитного поля содержит, по меньшей мере, одну катушку, расположенную вдоль оси, по существу, в максимуме магнитного поля.

10. Двигатель малой тяги по п.9, отличающийся тем, что генератор магнитного поля содержит вторую катушку, расположенную между указанной, по меньшей мере, одной катушкой и инжектором.

25 11. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что генератор магнитного поля предназначен для изменения величины указанного максимума.

12. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что генератор магнитного поля предназначен для изменения направления магнитного поля, по меньшей мере, с другой стороны от указанного максимума.

30 13. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что генератор электромагнитного поля содержит, по меньшей мере, одну резонансную полость.

14. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что генератор электромагнитного поля содержит по меньшей мере одну резонансную полость по одну сторону от указанного максимума.

35 15. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что генератор электромагнитного поля содержит, по меньшей мере, одну резонансную полость по другую сторону от указанного максимума.

16. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что камера сформирована внутри трубы.

40 17. Двигатель малой тяги по п.16, отличающийся тем, что труба имеет увеличенное поперечное сечение с края, противоположного инжектору.

18. Двигатель малой тяги по п.16, отличающийся тем, что в трубе размещен радиоактивный изотоп.

45 19. Двигатель малой тяги по п.1, отличающийся тем, что дополнительно содержит экранирующую камеру между инжектором и камерой.

20. Двигатель малой тяги, содержащий камеру, определяющую ось тягового усилия, инжектор, предназначенный для инжектирования ионизируемого газа в камеру, генератор магнитного поля, которое имеет, по меньшей мере, максимум вдоль оси, генератор электромагнитного поля, предназначенный для генерирования микроволнового ионизирующего поля в камере по одну сторону от указанного максимума и магнитного пондеромоторного ускоряющего поля по другую сторону от указанного максимума,

период ионного циклотронного резонанса в двигателе малой тяги больше, по меньшей мере, на один порядок величины, чем время пролета ионов в двигателе малой тяги.

21. Двигатель малой тяги по п.20, отличающийся тем, что частота электромагнитного поля менее чем на 10% отличается от частоты электронного циклотронного резонанса в положении, когда генерируется электромагнитное поле.

22. Способ генерирования тягового усилия, заключающийся в том, что инжектируют газ в камеру, прикладывают первое магнитное поле и первое электромагнитное поле для ионизации, по меньшей мере, части газа,

затем прикладывают к газу второе магнитное поле и второе электромагнитное поле для ускорения частично ионизированного газа под действием магнитной пондеромоторной силы.

23. Способ по п.22, отличающийся тем, что частота электромагнитного поля менее чем на 10% отличается от частоты электронного циклотронного резонанса в положении, когда генерируется электромагнитное поле.

24. Способ по п.22, отличающийся тем, что газ ионизируют посредством электронного циклотронного резонанса.

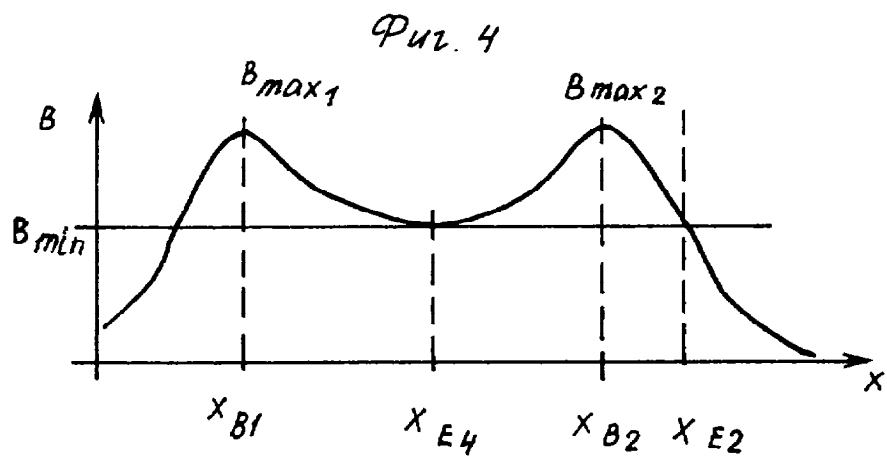
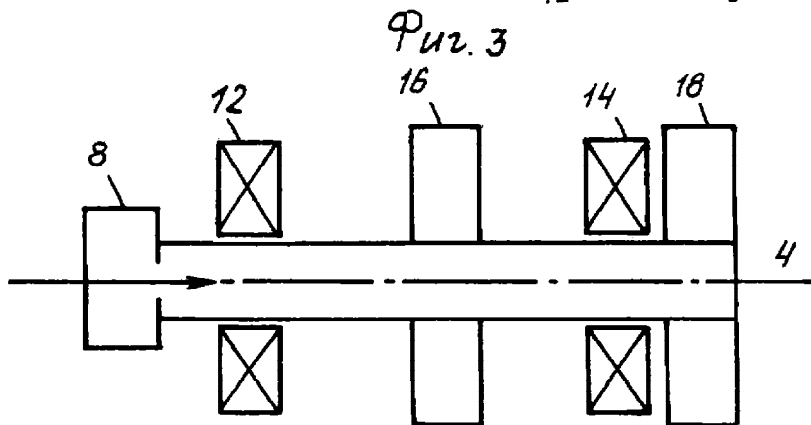
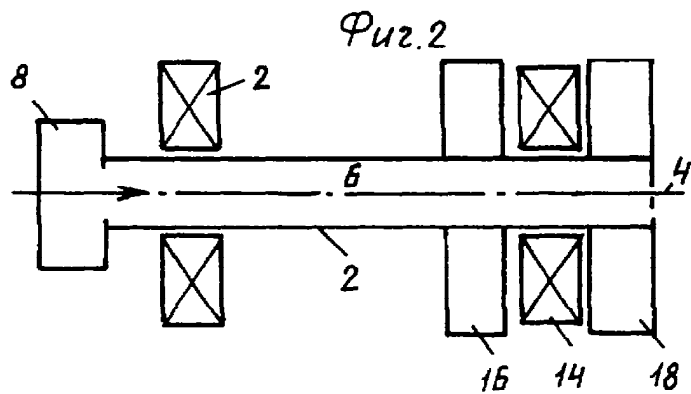
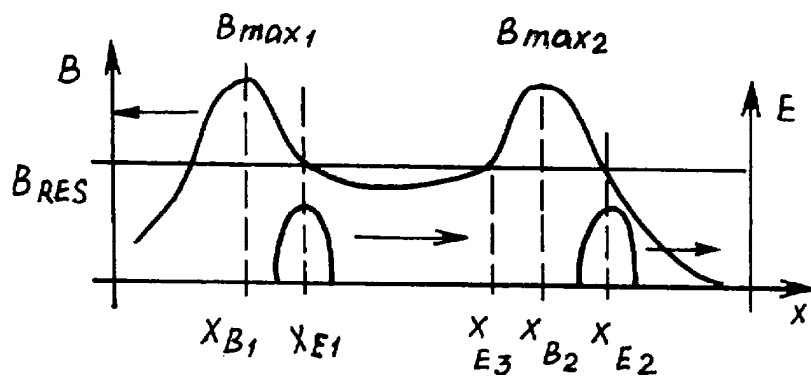
25. Способ по п.22, отличающийся тем, что ионы в основном нечувствительны к первому магнитному полю.

26. Способ по п.22, отличающийся тем, что локальный угол между вектором первого электромагнитного поля и вектором первого магнитного поля находится в пределах от 60 до 90°.

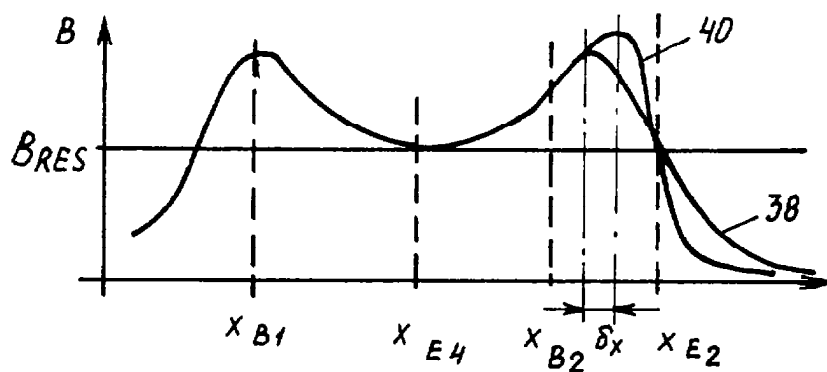
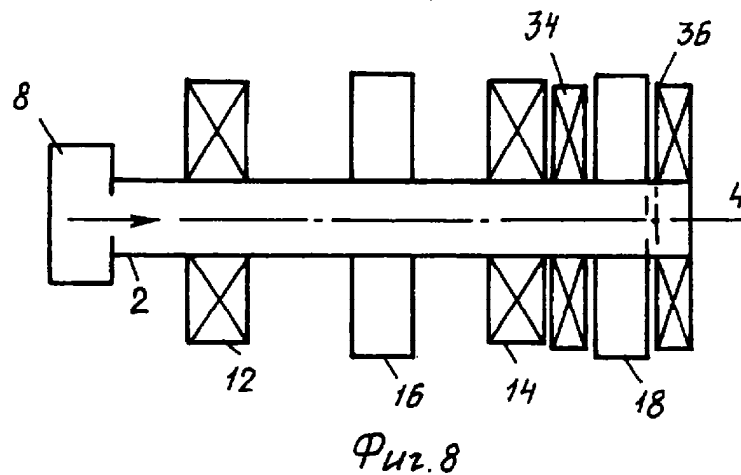
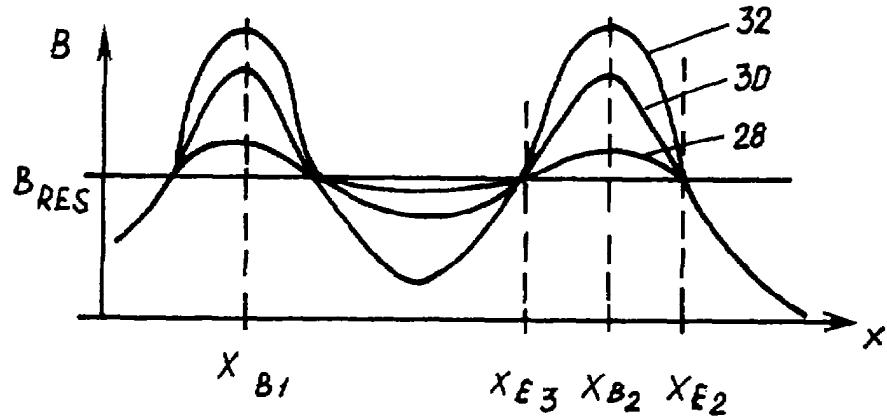
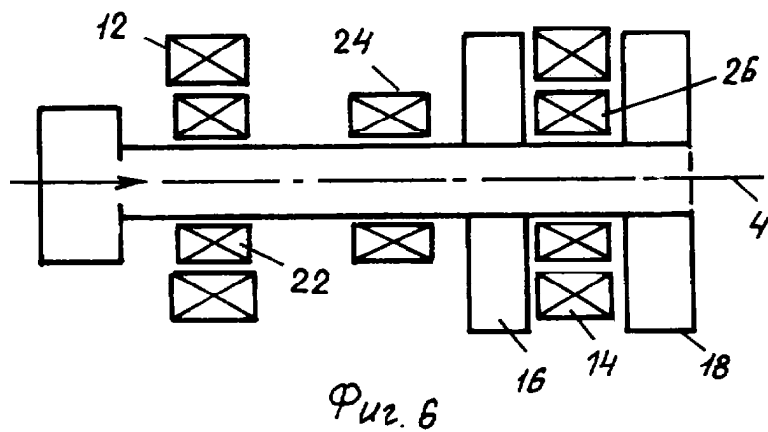
27. Способ по п.22, отличающийся тем, что локальный угол между вектором второго электромагнитного поля и вектором второго магнитного поля находится в пределах от 60 до 90°.

28. Способ по п.22, отличающийся тем, что ионизируют, по меньшей мере, 50% газа.

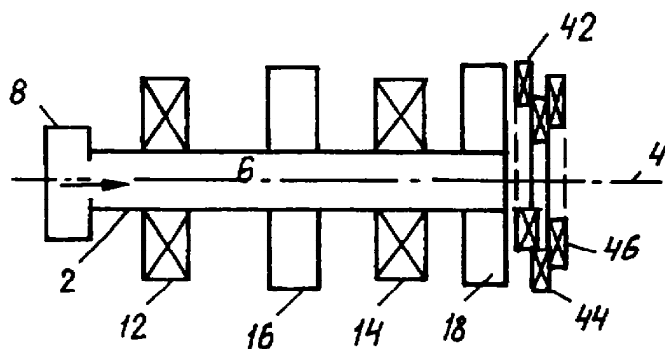
29. Способ по п.22, отличающийся тем, что дополнительно изменяют направление второго магнитного поля.



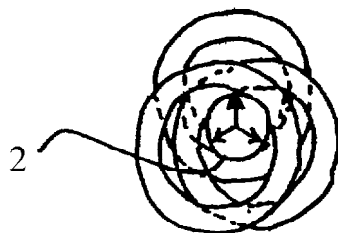
Физ. 5



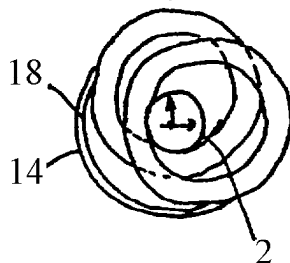
Фиг. 9



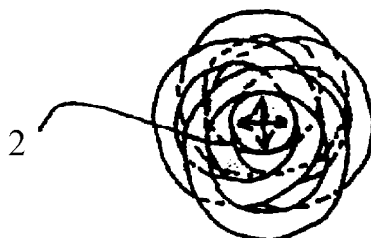
Фиг. 10



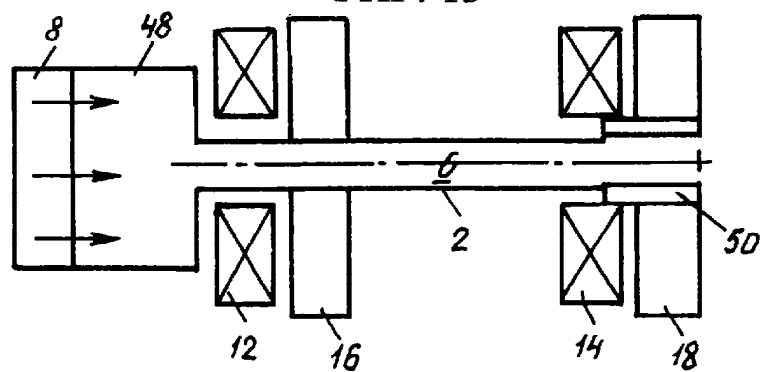
ФИГ. 11



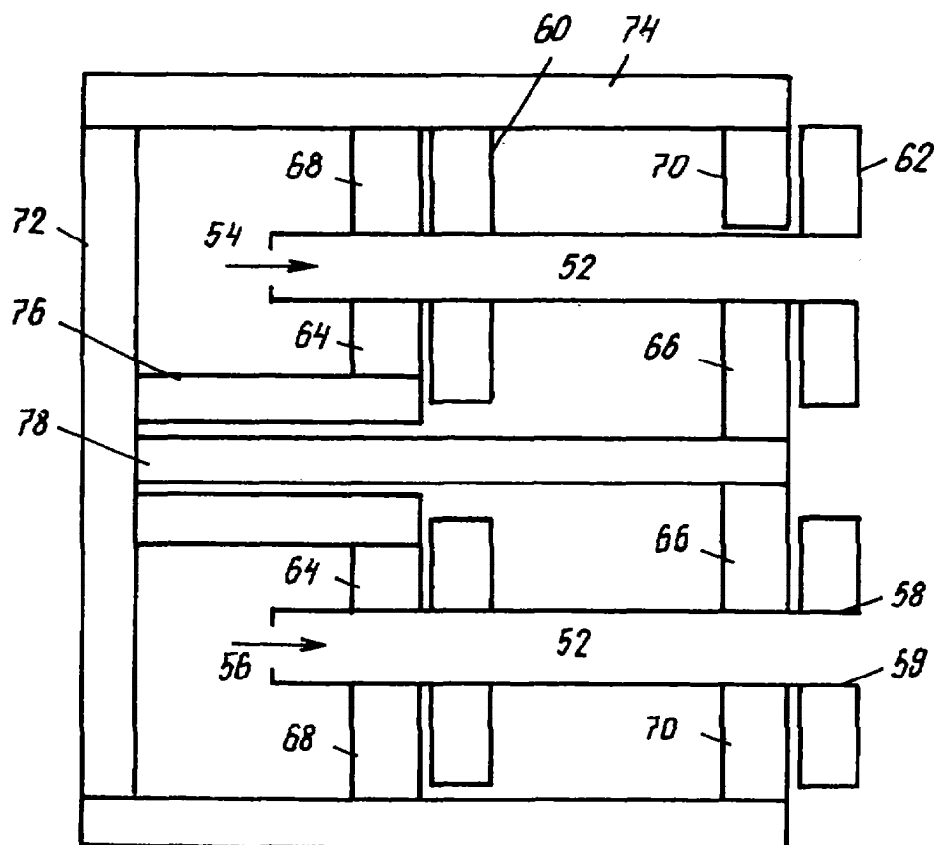
ФИГ. 12



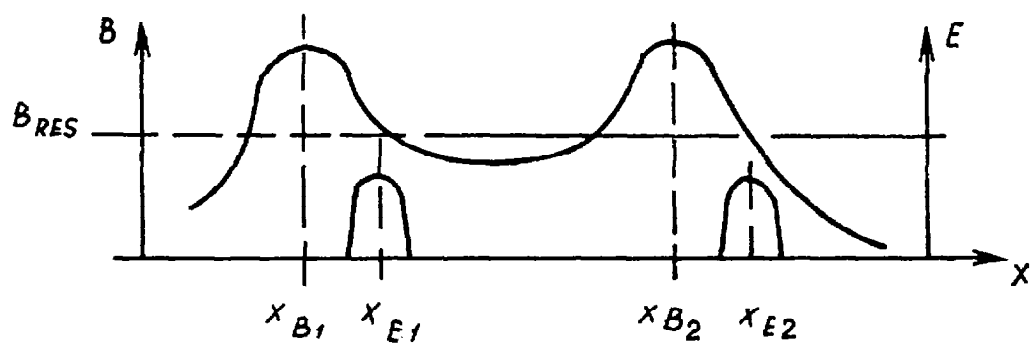
ФИГ. 13



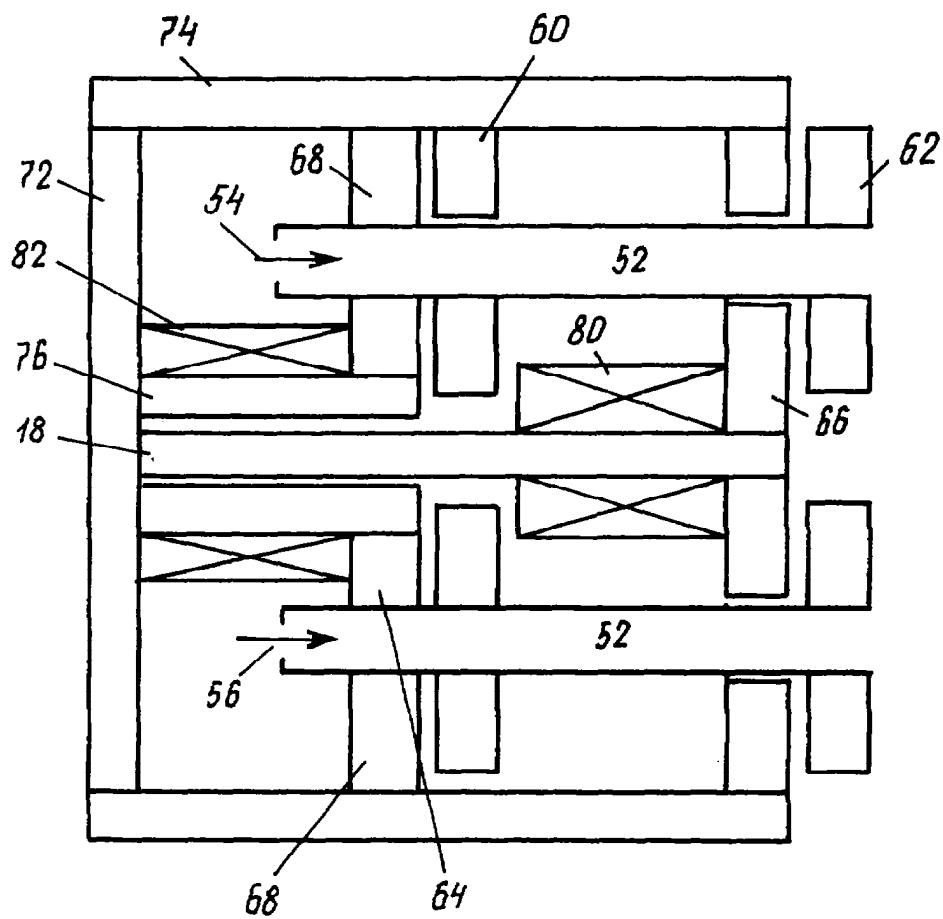
Фиг. 14



Фиг. 15



Фиг. 16



Фиг. 17