

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **018812**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2013.10.30

(51) Int. Cl. **G21B 1/00 (2006.01)**
H01J 7/24 (2006.01)

(21) Номер заявки
201000477

(22) Дата подачи заявки
2006.03.07

(54) **СИСТЕМА ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ИЗ ПЛАЗМЫ**

(31) **60/659,525; 60/659,549; 60/659,738;**
60/659,767

(56) **US-A-6477216**
US-A-6335535

(32) **2005.03.07**

(33) **US**

(43) **2010.12.30**

(62) **200701919; 2006.03.07**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ДЗЕ РИДЖЕНТС ОФ ДЗЕ
ЮНИВЕРСИТИ ОФ КАЛИФОРНИЯ
(US)

(72) Изобретатель:
Ростоукер Норман, Биндербауэр
Михль, Вессел Фрэнк, Чэун Алекс,
Быстрицкий Виталий, Сун Юаньсюй,
Андерсон Майкл, Гарате Эусебну,
Вандри Элан (US)

(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(57) Предложены система и устройство для управляемого термоядерного синтеза в магнитной топологии с обращенной конфигурацией поля (FRC) и преобразования энергии продуктов термоядерного синтеза непосредственно в электрическую энергию. Ионы плазмы предпочтительно удерживаются магнитным полем в конфигурации FRC, в то время как электроны плазмы удерживаются электростатическим полем в глубокой потенциальной яме, созданной посредством регулировки приложенного извне магнитного поля. В этой конфигурации ионы и электроны могут иметь адекватную плотность и температуру, так что при столкновениях они вступают в термоядерную реакцию под действием ядерных сил, образуя, тем самым, продукты термоядерного синтеза, которые возникают в виде кольцевого пучка. Энергия отбирается из ионов продуктов термоядерного синтеза, когда они движутся по спирали мимо электродов обратного циклотронного преобразователя. Преимуществом является то, что плазмы из термоядерного топлива, которые можно использовать с настоящей системой удержания и преобразования энергии, включают усовершенствованные (безнейтронные) виды топлива.

B1

018812

018812

B1

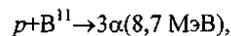
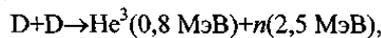
Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится, в целом, к физике плазмы и, в частности, касается способов и устройств для удержания плазмы, позволяющих обеспечить термоядерный синтез, и для преобразования энергии продуктов ядерного синтеза в электричество.

Уровень техники

Термоядерный синтез - это процесс, в результате которого два легких ядра объединяются, образуя более тяжелое ядро. При термоядерном процессе освобождается огромное количество энергии в виде быстро движущихся частиц. Поскольку атомные ядра заряжены положительно из-за содержащихся в них протонов, между ними возникает электростатическая, или кулоновская сила отталкивания. Для того чтобы два ядра вступили в термоядерную реакцию, необходимо преодолеть этот барьер отталкивания, что происходит, если два ядра достаточно близко подвести друг к другу, где короткодействующие ядерные силы становятся достаточными, чтобы преодолеть кулоновскую силу и запустить процесс термоядерного синтеза указанных ядер. Энергия, необходимая для того, чтобы ядра преодолели кулоновский барьер, обеспечивается их тепловой энергией, которая должна быть очень высокой. Например, скорость термоядерной реакции может стать существенной, если температура составляет по меньшей мере порядка 10^4 электронвольт (эВ), что примерно соответствует 100 миллионам градусов Кельвина. Скорость термоядерной реакции является функцией температуры и характеризуется величиной, называемой реактивностью. Реактивность реакции D-T, например, имеет широкий пик между 30 килоэлектронвольт и 100 килоэлектронвольт (КэВ).

Типичные термоядерные реакции включают в себя:



где D обозначает дейтерий, T обозначает тритий, α обозначает ядро гелия, n обозначает нейтрон, p обозначает протон, He обозначает гелий, а B^{11} обозначает бор-11. Числа в скобках в каждом уравнении указывают кинетическую энергию продуктов термоядерного синтеза.

Первые две реакции, перечисленные выше (реакции D-D и D-T), являются нейтронными, что означает, что большая часть энергии продуктов термоядерного синтеза переносится быстрыми нейтронами. Недостатки нейтронных реакций заключаются в том, что (1) поток быстрых нейтронов создает множество проблем, в том числе структурное повреждение стенок реактора и высокие уровни радиоактивности для большинства конструкционных материалов; и (2) энергию быстрых нейтронов собирают путем преобразования их тепловой энергии в электрическую энергию, что является крайне неэффективным (кпд составляет менее 30%). Преимущества нейтронных реакций состоят в том, что (1) их пики реактивности имеют место при относительно низкой температуре и (2) их потери на излучение относительно невелики, поскольку атомные числа дейтерия и трития равны 1.

Реагенты в других двух уравнениях (D-He³ и p-B¹¹) называются усовершенствованным топливом. Вместо создания быстрых нейтронов, как это имеет место в нейтронных реакциях, здесь продуктами термоядерного синтеза являются заряженные частицы. Одним преимуществом усовершенствованного топлива является то, что оно создает гораздо меньше нейтронов и, следовательно, меньше страдает от недостатков, сопровождающих их использование. В случае реакции D-He³ некоторые быстрые нейтроны создаются вторичными реакциями, но на эти нейтроны приходится только около 10 процентов энергии продуктов термоядерного синтеза. В реакции p-B¹¹ нет быстрых нейтронов, хотя и создается некоторое количество медленных нейтронов в результате вторичных реакций, но при этом возникает гораздо меньше проблем. Другим преимуществом усовершенствованных видов топлива является то, что их продукты термоядерной реакции содержат заряженные частицы, чью кинетическую энергию можно непосредственно преобразовать в электричество. При использовании подходящего процесса прямого преобразования энергии продукты термоядерного синтеза усовершенствованного топлива можно собирать с высоким КПД, возможно превышающим 90%.

Усовершенствованные виды топлива также имеют недостатки. Например, атомные числа усовершенствованных видов топлива являются более высокими (2 для He³ и 5 для B¹¹). Следовательно, их радиационные потери больше, чем в нейтронных реакциях. Также усовершенствованные виды топлива гораздо труднее заставить вступить в термоядерную реакцию. Их пиковые значения реактивности появляются при гораздо более высоких температурах и не достигают таких высоких значений, как реактивность в паре D-T. Таким образом, чтобы запустить термоядерную реакцию с усовершенствованными топливами, необходимо привести их в более высокое энергетическое состояние, в котором их реактивность станет значительной. Соответственно, усовершенствованные виды топлива должны удерживаться в течение более длительного периода времени, за которое для них могут быть созданы подходящие условия для термоядерного синтеза.

Время удержания для плазмы составляет

$$\Delta t = r^2 / D,$$

где r - минимальный размер плазмы, а D - коэффициент диффузии. Классическое значение коэффициента диффузии составляет $D_c = \alpha_i^2 / \tau_{ie}$, где α_i - гирорадиус иона, а τ_{ie} - время столкновения ион-электрон. Диффузию, соответствующую классическому коэффициенту диффузии, называют классическим переносом. Коэффициент диффузии Бома, характеризующий коротковолновые неустойчивости, составляет

$$D_B = (1/16) \alpha_i^2 \Omega_i,$$

где Ω_i - гирочастота иона. Диффузию, соответствующую этому соотношению, называют аномальным переносом. В условиях термоядерного синтеза,

$$D_B / D_c = (1/16) \Omega_i \tau_{ie} \approx 10^8,$$

аномальный перенос приводит к гораздо меньшему времени удержания, чем при классическом переносе. Это соотношение определяет, сколько плазмы должно быть в ядерном реакторе, с учетом требования, состоящего в том, что время удержания для данного количества плазмы должно быть больше времени, которое необходимо для обеспечения термоядерной реакции в плазме. Следовательно, состояние классического переноса в ядерном реакторе является более предпочтительным, позволяя иметь меньше первичной плазмы.

В проведенных ранее экспериментах с тороидальным удержанием плазмы было обнаружено, что время удержания $\Delta t \approx r^2 / D_B$. За последние 40 лет время удержания удалось увеличить до $\Delta t \approx 1000 r^2 / D_B$. Одной из существующих концепций термоядерного реактора является проект Токамак. В течение последних 30 лет исследовательские усилия были сосредоточены на реакторе Токамак, использующем топливо D-T. Кульминацией этих усилий стал международный термоядерный экспериментальный реактор (ITER). Последние эксперименты с реакторами Токамак показали, что возможен классический перенос $\Delta t \approx r^2 / D_c$, причем в этом случае минимальный размер плазмы можно уменьшить от нескольких метров до нескольких сантиметров. Эти эксперименты включали введение пучков высокой энергии (от 50 до 100 кэВ) для разогрева плазмы до температур от 10 до 30 КэВ. См. W. Heidbrink & G. J. Sadler, 34 Nuclear Fusion 535 (1994). В этих экспериментах наблюдалось замедление ионов в пучках высокой энергии и их классическая диффузия при сохранении аномально быстрой диффузии термической плазмы. Причина этого состоит в том, что ионы пучка высокой энергии имеют большой гирорадиус, а значит, не чувствительны к флуктуациям при длинах волн, более коротких, чем гирорадиус иона ($\lambda < \alpha_i$). Такие флуктуации имеют тенденцию к усреднению за цикл, и таким образом, их влияние сводится на нет. Однако, электроны имеют гораздо меньший гирорадиус, так что они реагируют на флуктуации и переносятся аномально.

Из-за аномального переноса минимальный размер плазмы должен составлять по меньшей мере 2,8 метра. Исходя из этого размера, реактор ITER был спроектирован с высотой 30 метров и диаметром в 30 метров. Это самый маленький реактор типа Токамак с топливом D-T, который можно осуществить. Для усовершенствованных видов топлива, таких как D-He³ и p-B¹¹, реактор типа Токамак должен быть гораздо больше, поскольку время, необходимое топливному иону для ядерной реакции, гораздо продолжительнее. С реактором Токамак, использующим топливо D-T, связана дополнительная проблема, заключающаяся в том, что большая часть энергии продуктов термоядерного синтеза переносится нейтронами с энергией 14 МэВ, что приводит к радиационному разрушению и вызывает радиоактивность почти во всех конструкционных материалах из-за нейтронного потока. Вдобавок, преобразование энергии нейтронов в электричество должно осуществляться посредством термического процесса, КПД которого не превышает 30%.

Другой предложенной конфигурацией реактора является реактор со встречными пучками. В реакторе со встречными пучками фоновая плазма бомбардируется пучками ионов. Эти пучки содержат ионы с энергией, значительно превышающей энергию термической плазмы. Осуществление полезных термоядерных реакций в реакторе подобного типа невозможно, поскольку фоновая плазма замедляет ионные пучки. Для разрешения этой проблемы и максимизации количества ядерных реакций были выдвинуты различные предложения.

Например, в патенте США №4065351, выданном Jassby и др., раскрыт способ создания встречных пучков дейтронов и тритонов в тороидальной системе удержания. В патенте США № 4057462, выданном Jassby и др., для противодействия влиянию сопротивления объемной равновесной плазмы на один из типов ионов инжектируется электромагнитная энергия. Тороидальная система удержания тождественна типу Токамак. В патенте США №4894199, выданном Rostoker, инжектируются пучки дейтерия и трития, которые захватываются с одинаковой средней скоростью в конфигурации Токамак, зеркальной конфигурации или конфигурации с обращенным полем. Холодная фоновая плазма с низкой плотностью предусмотрена с единственной целью захвата пучков. Пучки вступают в реакцию, поскольку они имеют высокую температуру, а замедление в основном вызывается электронами, которые сопровождают инжектированные ионы. Электроны нагреваются ионами, и в этом случае замедление будет минимальным.

Однако ни в одном из этих устройств равновесное электрическое поле не играет никакой роли. Кроме того, не предпринимается попыток уменьшить или просто учесть аномальный перенос.

В других патентах рассматривается электростатическое удержание ионов, а в некоторых случаях, магнитное удержание электронов. К ним относятся патент США №3258402, выданный Farnsworth, и патент США №3386883, выданный Farnsworth, в которых раскрыто электростатическое удержание ионов и инерционное удержание электронов; патент США №3530036, выданный Hirsch и др., и патент США №3530497, выданный Hirsch и др., аналогичны патенту, выданному Farnsworth; патент США №4233537, выданный Limraecher, в котором раскрыто электростатическое удержание ионов и магнитное удержание электронов отражающими стенками с мультипольным каспом; и патент США №4826646, выданный Bussard, который аналогичен патенту, выданному Limraecher, и включает точечные каспы. Ни в одном из этих патентов не рассматривается электростатическое удержание электронов и магнитное удержание ионов. Хотя было много исследовательских проектов по электростатическому удержанию ионов, ни в одном из них не удалось установить требуемые электростатические поля, при которых ионы будут иметь плотность, необходимую для термоядерного реактора. Наконец, ни в одном из упомянутых патентов не обсуждается магнитная топология с обращенной конфигурацией поля.

Конфигурация с обращенным полем (FRC) была открыта случайно примерно в 1960 году в Военно-морской исследовательской лаборатории США (Naval Research Laboratory) во время экспериментов с разрядом "тета-пинч". Типовая топология FRC, где внутреннее магнитное поле изменяет направление на противоположное, показано на фиг. 3 и на фиг. 5, а орбиты частиц в конфигурации FRC показаны на фиг. 6 и фиг. 9. Многие исследовательские программы, касающиеся конфигурации FRC, были поддержаны США и Японией. Имеется всеобъемлющая обзорная статья по теории и экспериментам с конфигурацией FRC за период с 1960 по 1988 годы. Смотри M. Tuszewski, 28 Nuclear Fusion 2033 (1988). В официальной документации по разработке FRC описаны исследования, проведенные в 1996 году, и рекомендации для будущих исследований. См. L. C. Steinhauer et al., 30 Fusion Technology) 116 (1996). До настоящего дня в экспериментах с FRC конфигурация FRC формировалась с использованием метода "тета-пинч". Последствием такого метода формирования является то, что ионы и электроны несут ток пополам, что приводит к созданию незначительного электростатического поля в плазме и не позволяет реализовать электростатическое удержание. Ионы и электроны в этих конфигурациях FRC поддерживались магнитным полем. Почти во всех экспериментах с FRC подразумевался аномальный перенос. Смотри, например, работу Tuszewski, начиная с раздела 1.5.2 на стр. 2072.

Таким образом, желательно обеспечить систему термоядерного синтеза, имеющую систему удержания, которая стремится по существу уменьшить или исключить аномальный перенос ионов и электронов, и систему преобразования энергии, которая преобразует энергию продуктов термоядерного синтеза в электричество с высоким КПД.

Сущность изобретения

Изобретение направлено на создание системы, облегчающей управляемый термоядерный синтез в магнитном поле, имеющем топологию обращенного поля, и обеспечивающей прямое преобразование энергии продуктов термоядерного синтеза в электрическую энергию. Система, называемая здесь системой выработки электрической энергии из плазмы (PEG), предпочтительно включает в себя термоядерный реактор, имеющий систему удержания, которая стремится существенно уменьшить или исключить аномальный перенос ионов и электронов. Вдобавок, система PEG включает в себя систему преобразования энергии, соединенную с реактором, которая осуществляет непосредственное преобразование энергии продуктов термоядерного синтеза в электричество с высоким КПД.

В одном варианте стремятся существенно уменьшить или исключить аномальный перенос как ионов, так и электронов. Аномальный перенос ионов стремятся избежать посредством магнитного удержания ионов в магнитном поле, имеющем обращенную конфигурацию (FRC). Для электронов аномальный перенос энергии исключают посредством регулировки приложенного извне магнитного поля для создания сильного электрического поля, которое обеспечивает электростатическое удержание электронов в глубокой потенциальной яме. В результате плазмы из термоядерного топлива, которые можно использовать с данным устройством и процессом для удержания, не ограничиваются нейтронными видами топлива, но также преимущественно включают в себя усовершенствованные, или "безнейтронные" виды топлива. Для безнейтронных видов топлива энергия термоядерной реакции почти полностью существует в виде заряженных частиц, то есть ионов высокой энергии, которыми можно манипулировать в магнитном поле, и в зависимости от конкретного топлива снизить радиоактивность либо вообще ее исключить.

В предпочтительном варианте система удержания плазмы термоядерного реактора содержит камеру, генератор магнитного поля для приложения магнитного поля в направлении в основном вдоль главной оси и кольцевой слой плазмы, который содержит циркулирующий пучок ионов. Ионы кольцевого слоя плазменного пучка в основном удерживаются на орбитах магнитным полем в камере, а электроны по существу находятся в электростатической энергетической яме. В одном предпочтительном варианте генератор магнитного поля включает в себя токовую катушку. Предпочтительно, чтобы генератор магнитного поля, кроме того, содержал зеркальные катушки на концах камеры, которые увеличивают величину приложенного магнитного поля на концах камеры. Система также содержит один или несколько инжекторов пучков для инъекции нейтрализованных ионных пучков в магнитное поле, где пучок выходит на орбиту благодаря силе, вызванной магнитным полем. В предпочтительном варианте система фор-

мирует магнитное поле, имеющее топологию с обращенной конфигурацией.

В другом предпочтительном варианте предусмотрена альтернативная камера, которая предотвращает формирование наведенных азимутальных токов в центральной области стенки камеры и позволяет магнитному потоку проникать в камеру в ускоренном временном масштабе. Камера, которая, в основном, выполнена из нержавеющей стали для обеспечения структурной прочности и хороших вакуумных свойств, включает в себя аксиальные изолирующие разрывы в стенке камеры, которые идут вдоль почти всей длины камеры. Предпочтительно иметь три разрыва, отстоящих друг от друга примерно на 120° . Эти разрывы включают в себя прорезь или зазор, сформированный в стенке. В эти прорези или зазоры вставлена вставка, содержащая изолирующий материал, предпочтительно керамику или т.п. Во внутренней части камеры вставка покрыта металлическим колпаком. Вне камеры вставка прикреплена к уплотнительной панели, предпочтительно выполненной из стекловолокна или т.п., которая образует вакуумный барьер посредством кольцевого уплотнителя с поверхностью стенки камеры, выполненной из нержавеющей стали.

В еще одном предпочтительном варианте в камере может быть смонтирован индуктивный источник плазмы, который включает в себя узел ударно действующей катушки, предпочтительно одновитковую ударную катушку, которая предпочтительно получает питание от высоковольтного источника питания (не показан) с напряжением порядка 5-15 кВ. В этот источник плазмы прямыми газовыми питателями через сопло Лавала вводится нейтральный газ, например водород (или другое подходящее газовое термоядерное топливо). Как только газ выходит из сопла и распределяется по поверхности витков ударно действующей катушки, на эти витки подается электрическое питание. Сверхбыстрый ток и нарастание потока в ударно действующей катушке с низкой индуктивностью приводит к созданию очень сильного электрического поля в газе, что вызывает разряд, ионизацию и последующий выброс сформированной плазмы с поверхности ударно действующей катушки в направлении центра или срединной плоскости камеры.

В следующем предпочтительном варианте радиочастотный (RF) возбудитель содержит квадрупольный циклотрон, расположенный в камере и имеющий четыре азимутально симметричных электрода с зазорами между ними. Квадрупольный циклотрон создает волну электрического потенциала, которая вращается в том же направлении, что и азимутальный вектор скорости ионов, но с большей скоростью. Ионы с соответствующей скоростью могут захватываться этой волной и периодически отражаться. Этот процесс увеличивает количество движения и энергию топливных ионов, и это увеличение передается топливным ионам, которые не захвачены столкновениями.

В другом варианте для преобразования кинетической энергии продуктов термоядерного синтеза непосредственно в электрическую энергию путем замедления заряженных частиц через электромагнитное поле используют систему прямого преобразования энергии. Преимуществом является то, что система прямого преобразования энергии согласно настоящему изобретению отличается эффективностью, имеет допуски на энергию частиц и способна на электронном уровне так преобразовать частоту и фазу выходной мощности термоядерного синтеза (частота порядка 5 МГц), чтобы обеспечить согласование по частоте с внешней электроэнергетической сетью (60 Гц).

В предпочтительном варианте система преобразования энергии содержит обратные циклотронные преобразователи (ИСС), соединенные с противоположными концами термоядерного реактора. Преобразователь ИСС имеет полую цилиндрическую конфигурацию, образованную из множества, предпочтительно четырех или более, одинаковых полуцилиндрических электродов с небольшими прямыми зазорами между ними. В процессе функционирования на электроды подается переменное напряжение. Электрическое поле E в преобразователе ИСС имеет многополюсную структуру и исчезает на симметричных осях и линейно возрастает по радиусу; причем пиковое значение будет иметь место в указанном зазоре.

Вдобавок, преобразователь ИСС включает в себя генератор магнитного поля для приложения однородного однонаправленного магнитного поля в направлении, по существу противоположном приложенному магнитному полю системы удержания термоядерного реактора. На самом дальнем от активной зоны конце термоядерного реактора преобразователь ИСС включает в себя приемник ионов.

Между активной зоной и преобразователем ИСС имеется симметричный магнитный касп, где магнитное поле системы удержания соединяется с магнитным полем преобразователя ИСС. В районе магнитного каспа расположен приемник электронов кольцевой формы, который электрически соединен с приемником ионов.

В еще одном предпочтительном варианте ядра продуктов термоядерного синтеза и электроны, компенсирующие заряд, появляются в виде кольцевых пучков из обоих концов активной зоны с такой плотностью, при которой магнитный касп разделяет электроны и ионы благодаря различиям в их энергиях. Электроны движутся по магнитным силовым линиям в приемник электронов, а ионы проходят через касп, где траектории ионов изменяются, следуя по фактически спиральной траектории вдоль длины преобразователя ИСС. Энергия отбирается от ионов, когда они спирально движутся мимо электродов, которые подсоединены к резонансной схеме. Потери энергии в перпендикулярном направлении стремятся к максимуму для ионов с самой высокой энергией, которые изначально циркулируют вблизи электродов, где электрическое поле является самым сильным.

В настоящем документе также подробно описаны следующие частные варианты осуществления упомянутых выше объектов:

1. Камера реактора, содержащая цилиндрическую стенку камеры, имеющую первый и второй концы, и множество изолирующих разрывов, проходящих аксиально вдоль стенки камеры с оставленными промежутками до первого и второго концов.

2. Камера по п.1, в которой множество изолирующих разрывов включают в себя прорезь, сформированную в стенке камеры.

3. Камера по п.1, в которой стенка камеры сформирована из металла.

4. Камера по п.2, в которой множество изолирующих разрывов включают в себя изолирующий материал, вставленный в прорезь.

5. Камера по п.4, в которой изолирующим материалом является керамический материал.

6. Камера по п.4, дополнительно содержащая множество колпаков, размещенных в камере над изолирующим материалом.

7. Камера по п.4, дополнительно содержащая уплотнительную пластину, проходящую над прорезью.

8. Камера по п.7, в которой изолирующий материал соединен с уплотнительной пластиной.

9. Камера по п.7, дополнительно содержащая средство для формирования уплотнения между уплотнительной пластиной и стенкой камеры.

10. Камера по п.9, в которой уплотнительная пластина сформирована из стекловолокна.

11. Камера по п.1, дополнительно содержащая генератор магнитного поля, соединенный с камерой, для создания однонаправленного магнитного поля в камере.

12. Камера по п.11, в которой генератор магнитного поля включает в себя множество катушек возбуждения, простирающихся азимутально в окрестности периметра стенки камеры.

13. Камера по п.12, в которой множество катушек возбуждения ориентированы параллельно друг другу.

14. Камера по п.12, в которой множество катушек возбуждения включают в себя первый и второй наборы зеркальных катушек.

15. Камера по п.11, дополнительно содержащая катушку бетатронного потока, простирающуюся концентрически относительно стенки камеры.

16. Камера по п.15, в которой катушка бетатронного потока расположена вне стенки камеры.

17. Камера по п.15, в которой катушка бетатронного потока включает в себя множество параллельно намотанных катушек.

18. Камера по п.1, дополнительно содержащая один или несколько инжекторов ионного пучка, расположенных перпендикулярно продольной оси стенки камеры и радиально от нее разнесенных.

19. Камера по п.18, в которой инжекторы ионного пучка включают в себя средство для нейтрализации электрического заряда ионных пучков, эмитируемых инжекторами ионного пучка.

20. Камера по п.1, дополнительно содержащая источник плазмы для формирования кольцевого облака фоновой плазмы в направлении срединной плоскости камеры.

21. Камера по п.1, дополнительно содержащая преобразователи энергии, соединенные с первым и вторым концами стенки камеры.

22. Камера по п.21, в которой преобразователи энергии включают в себя множество аксиально идущих электродов с продольными промежутками между ними.

23. Камера по п.22, дополнительно содержащая множество катушек возбуждения, идущих в окрестности периметра множества электродов.

24. Камера по п.23, дополнительно содержащая первый и второй приемники ионов и первый и второй приемники электронов.

25. Система генерации плазмы, содержащая ударную катушку и сопло Лавалья, соединенное с ударной катушкой.

26. Система генерации плазмы по п.25, в которой ударная катушка содержит кольцевой корпус в виде диска и катушку из параллельно намотанных проводов, прикрепленных к лицевой стороне корпуса.

27. Система генерации плазмы по п.26, в которой катушка является одновитковой катушкой.

28. Система генерации плазмы по п.26, в которой катушка является многожильной катушкой.

29. Система генерации плазмы по п.26, в которой провода катушки начинаются рядом с внешним радиусом корпуса в разнесенных по углу точках и охватывают по окружности лицевую сторону корпуса одним витком, заканчиваясь у внутреннего радиуса корпуса.

30. Система генерации плазмы по п.29, в которой провода катушки начинаются с периметра корпуса.

31. Система генерации плазмы по п.26, в которой корпус содержит втулку, формирующую внутренний радиус корпуса.

32. Система генерации плазмы по п.31, в которой сопло Лавалья содержит кольцевой дискообразный рукав сопла, соединенный с втулкой.

33. Система генерации плазмы по п.32, в которой лицевая сторона рукава, обращенная к втулке, об-

разует газосборник кольцевой формы и сужающееся-расширяющееся сопло с лицевой стороной втулки.

34. Система генерации плазмы по п.33, дополнительно содержащая множество газовых каналов, сформированных во втулке и связанных с газосборником.

35. Система генерации плазмы по п.34, дополнительно содержащая кольцо седел клапана, имеющее множество седел клапана, выровненных относительно множества газовых каналов.

36. Система генерации плазмы по п.29, дополнительно содержащая колпак, соединенный с корпусом.

37. Способ генерации плазмы, содержащий распределение нейтрального газа по катушке из параллельно намотанных проводов ударной катушки с низкой индуктивностью, подачу питания на витки катушки и ионизацию газа в плазму.

38. Способ по п.37, дополнительно содержащий эжекцию сформированной плазмы из ударной катушки.

39. Способ по п.37, в котором подача питания на катушку включает в себя подачу питания на все провода катушки.

40. Способ по п.37, в котором подача питания на катушку включает в себя подачу питания на первый набор проводов и подачу питания на второй набор проводов после заранее определенного промежутка времени.

41. Способ по п.38, в котором эжекция плазмы включает в себя эжекцию плазмы кольцевой формы.

42. Система выработки электрической энергии из плазмы, содержащая камеру, имеющую главную ось; первый генератор магнитного поля для создания азимутально симметричного магнитного поля в центральной области камеры с потоком, в основном параллельным главной оси камеры; генератор плазмы, содержащий ударную катушку и сопло Лавала, расположенные в камере; и катушку, несущую ток, концентрически расположенную относительно главной оси камеры, для создания азимутального электрического поля в камере.

43. Система по п.42, в которой камера содержит цилиндрическую стенку камеры, имеющую первый и второй концы, и множество изолирующих разрывов, идущих аксиально вдоль стенки камеры с оставленными промежутками до первого и второго концов.

44. Система по п.42, в которой ударная катушка содержит кольцевой корпус в виде диска и катушку из параллельно намотанных проводов, прикрепленных к лицевой стороне корпуса.

45. Система по п.44, в которой катушка является одновитковой катушкой.

46. Система по п.45, в которой провода катушки начинаются у внешнего радиуса корпуса в разнесенных по углу точках и охватывают по окружности лицевую сторону корпуса одним витком, заканчиваясь у внутреннего радиуса корпуса.

47. Система по п.46, в которой провода катушки начинаются с периметра корпуса.

48. Система по п.44, в которой корпус содержит втулку, формирующую внутренний радиус корпуса.

49. Система по п.48, в которой сопло Лавала содержит кольцевой дискообразный рукав сопла, соединенный с втулкой.

50. Система по п.49, в которой лицевая сторона рукава, обращенная к втулке, образует газосборник кольцевой формы и сужающееся-расширяющееся сопло с лицевой стороной втулки.

51. Система по п.50, дополнительно содержащая множество газовых каналов, сформированных во втулке и связанных с газосборником.

52. Система по п.51, дополнительно содержащая кольцо седел клапана, имеющее множество седел клапана, выровненных относительно множества газовых каналов.

53. Система по п.44, дополнительно содержащая колпак, соединенный с корпусом.

54. Система по п.42, дополнительно содержащая систему преобразования энергии в камере.

55. Система по п.54, в которой система преобразования энергии содержит множество полуцилиндрических электродов, образующих цилиндрическую поверхность в первой концевой области камеры.

56. Система по п.55, в которой множество электродов содержит более двух разнесенных электродов с формированием зазора между соседними электродами.

57. Система по п.56, дополнительно содержащая второй генератор магнитного поля для создания азимутально симметричного магнитного поля в первой концевой области камеры с потоком, в основном параллельным главной оси камеры, приемник электронов, установленный между первым и вторым генераторами магнитного поля и рядом с первым концом множества электродов, и приемник ионов, расположенный рядом со вторым концом множества электродов.

58. Система по п.57, дополнительно содержащая второе множество полуцилиндрических электродов, образующих цилиндрическую поверхность во второй концевой области камеры, где второе множество электродов содержит более двух разнесенных электродов с формированием зазора между соседними электродами, третий генератор магнитного поля для создания азимутально симметричного магнитного поля во второй концевой области камеры с потоком, в основном параллельным главной оси камеры,

второй приемник электронов, установленный между первым и третьим генераторами магнитного поля и рядом с первым концом второго множества электродов, и второй приемник ионов, расположенный рядом со вторым концом второго множества электродов.

59. Система по п.58, дополнительно содержащая инжекторы ионного пучка, соединенные с резервуаром.

60. Система по п.59, в которой инжекторы ионного пучка включают в себя средство для нейтрализации электрического заряда ионных пучков, эмитируемых инжекторами.

61. Способ формирования магнитного поля, имеющего обращенную конфигурацию, в камере создающей направляющее магнитное поле в камере, распределение нейтрального газа по катушке из параллельно намотанных проводов ударной катушки с низкой индуктивностью, подачу питания на витки ударной катушки, ионизацию газа в плазму, эжекцию сформированной плазмы из ударной катушки в камеру вдоль силовых линий направляющего поля, создание азимутального электрического поля в камере, заставляющего плазму вращаться с формированием полоидального собственного магнитного поля, окружающего плазму, увеличение вращательной энергии плазмы для увеличения величины собственного поля до уровня, который превышает величину направляющего поля, и объединение магнитных силовых линий направляющего поля и собственного поля в магнитное поле, имеющее топологию с обращенной конфигурацией поля (FRC).

62. Способ по п.61, в котором подача питания на катушку включает в себя подачу питания на все провода катушки.

63. Способ по п.61, в котором подача питания на катушку включает в себя подачу питания на первый набор проводов и подачу питания на второй набор проводов после заранее определенного промежутка времени.

64. Способ по п.62, в котором эжекция плазмы включает в себя эжекцию плазмы кольцевой формы.

65. Способ по п.61, в котором создание направляющего поля включает в себя подачу питания на множество катушек возбуждения и зеркальных катушек, идущих около камеры.

66. Способ по п.61, дополнительно содержащий увеличение величины направляющего поля для поддержания вращающейся плазмы заранее определенного радиального размера.

67. Способ по п.61, в котором создание азимутального электрического поля включает в себя подачу питания на катушку бетатронного потока в камере и увеличение тока, протекающего через катушку.

68. Способ по п.67, в котором увеличение вращательной энергии вращающейся плазмы включает в себя увеличение скорости изменения тока, протекающего через катушку.

69. Способ по п.68, дополнительно содержащий увеличение скорости изменения тока, протекающего через катушку потока, для ускорения вращающейся плазмы до вращательной энергии уровня термоядерного синтеза.

70. Способ по п.61, дополнительно содержащий создание электростатической ямы в камере.

71. Способ по п.70, дополнительно содержащий регулировку электростатической ямы.

72. Способ по п.71, в котором регулировка электростатической ямы включает в себя манипулирование величиной направляющего поля.

73. Способ по п.69, дополнительно содержащий инжекцию ионных пучков с энергией уровня термоядерного синтеза в FRC и захват пучков на бетатронные орбиты в FRC.

74. Способ по п.73, в котором инжекция и захват ионных пучков дополнительно содержит нейтрализацию ионных пучков, снятие электрической поляризации из нейтрализованных ионных пучков и приложение силы Лоренца благодаря приложенному магнитному полю к нейтрализованным нейтронным пучкам для изгибания ионных пучков в бетатронные орбиты.

75. Способ по п.73, дополнительно содержащий магнитное удержание ионов в FRC и электростатическое удержание электронов в электростатической яме.

76. Способ по п.75, дополнительно содержащий формирование ионов - продуктов термоядерного синтеза.

77. Способ по п.76, дополнительно содержащий вывод ионов - продуктов термоядерного синтеза, из FRC в кольцевом пучке.

78. Система выработки электрической энергии из плазмы, содержащая камеру, имеющую главную ось; первый генератор магнитного поля для создания азимутально симметричного магнитного поля в центральной области камеры с потоком, в основном параллельным главной оси камеры, систему RF возбуждения, соединенную с центральной областью камеры, и катушку, несущую ток, концентрически расположенную относительно главной оси камеры, для создания азимутального электрического поля в камере.

79. Система по п.78, в которой система RF возбуждения содержит квадрупольный циклотрон.

80. Система по п.79, в которой квадрупольный циклотрон содержит четыре полуцилиндрических электрода, формирующих цилиндрическую поверхность.

81. Система по п.78, в которой система RF возбуждения содержит дипольный циклотрон.

82. Система по п.81, в которой дипольный циклотрон содержит четыре полуцилиндрических электрода, формирующих цилиндрическую поверхность.

83. Система по п.78, в которой система RF возбуждения содержит катушки модулирующего поля, идущие аксиально вблизи периметра камеры и токовой катушки.

84. Система по п.78, дополнительно содержащая систему преобразования энергии в камере.

85. Система по п.84, в которой система преобразования энергии содержит множество полуцилиндрических электродов, формирующих цилиндрическую поверхность в первой концевой области камеры.

86. Система по п.85, в которой множество электродов содержит более двух разнесенных электродов с формированием зазора между соседними электродами.

87. Система по п.86, дополнительно содержащая второй генератор магнитного поля для создания азимутально симметричного магнитного поля в первой концевой области камеры с потоком, в основном параллельным главной оси камеры, приемник электронов, находящийся между первым и вторым генераторами магнитного поля и рядом с первым концом множества электродов, и приемник ионов, расположенный рядом со вторым концом множества электродов.

88. Система по п.87, дополнительно содержащая второе множество полуцилиндрических электродов, формирующих цилиндрическую поверхность во второй концевой области камеры, где второе множество электродов содержит более двух разнесенных электродов с формированием зазора между соседними электродами, третий генератор магнитного поля для создания азимутально симметричного магнитного поля в первой концевой области камеры с потоком, в основном параллельным главной оси камеры, второй приемник электронов, находящийся между первым и третьим генераторами магнитного поля и рядом с первым концом второго множества электродов, и второй приемник ионов, расположенный рядом со вторым концом второго множества электродов.

89. Система по п.88, дополнительно содержащая инжекторы ионного пучка, соединенные с резервуаром.

90. Система по п.89, в которой инжекторы ионного пучка включают в себя средство для нейтрализации электрического заряда ионных пучков, эмитированных инжекторами.

91. Способ возбуждения ионов и электронов в FRC, содержащий создание FRC в районе вращающейся плазмы, и создание волны электрического потенциала, которая вращается в том же направлении, что и вектор азимутальной скорости ионов во вращающейся плазме.

92. Способ по п.91, в котором создание волны электрического потенциала включает в себя подачу питания на множество удлиненных электродов, формирующих цилиндрическую поверхность.

93. Способ по п.92, в котором множество удлиненных электродов формируют удлиненный циклотрон.

94. Способ по п.92, в котором циклотрон является квадрупольным циклотроном.

95. Способ по п.92, в котором циклотрон является дипольным циклотроном.

96. Способ по п.91, дополнительно содержащий инжекцию нейтральных ионов в волну.

97. Способ по п.92, дополнительно содержащий захват инжектированных нейтральных ионов в волне.

98. Способ по п.97, дополнительно содержащий увеличение количества движения и энергии захваченных ионов.

99. Система выработки электрической энергии из плазмы и тяги, содержащая камеру, имеющую главную ось и первый и второй концы, первый генератор магнитного поля для создания азимутально симметричного магнитного поля в центральной области камеры с потоком, в основном параллельным главной оси камеры, токовую катушку, концентрически расположенную относительно главной оси камеры, для создания азимутального электрического поля в камере, систему преобразования энергии, соединенную с первым концом камеры, и магнитное сопло, соединенное со вторым концом камеры.

100. Система по п.99, в которой система преобразования энергии содержит множество полуцилиндрических электродов, формирующих цилиндрическую поверхность.

101. Система по п.100, в которой множество электродов содержит более двух разнесенных электродов с формированием зазора между соседними электродами.

102. Система по п.101, дополнительно содержащая второй генератор магнитного поля для создания азимутально симметричного магнитного поля в системе преобразования энергии с потоком, в основном параллельным главной оси камеры, приемник электронов, установленный между первым и вторым генераторами магнитного поля и рядом с первым концом множества электродов, и приемник ионов, расположенный рядом со вторым концом множества электродов.

103. Система по п.102, дополнительно содержащая инжекторы ионного пучка, соединенные с камерой.

104. Система по п.103, в которой инжекторы ионного пучка включают в себя средство для нейтрализации электрического заряда ионных пучков, эмитируемых инжекторами.

105. Система по п.104, дополнительно содержащая термоэлектрический преобразователь, соединенный с камерой.

106. Система по п.105, дополнительно содержащая тепловой двигатель Брайтона, соединенный с камерой.

107. Система по п.106, в которой тепловой двигатель Брайтона содержит теплообменник, турбоге-

нератор, соединенный с теплообменником, компрессор, соединенный с теплообменником и турбогенератором, и радиатор, соединенный с компрессором и турбогенератором.

108. Система по п.107, дополнительно содержащая накопитель энергии, соединенный с турбогенератором.

109. Система по п.108, в которой накопитель энергии содержит батареи.

110. Система по п.108, в которой накопитель энергии содержит топливные элементы.

111. Способ, содержащий создание FRC в районе вращающейся плазмы в камере, имеющей первый и второй концы, и эжекцию кольцевого пучка ионов - продуктов термоядерного синтеза из первого и второго концов камеры, преобразование энергии ионов термоядерного синтеза, эжектированных из первого конца, в электрическую энергию, преобразование энергии ионов термоядерного синтеза в тягу.

112. Способ по п.111, в котором преобразование энергии ионов - продуктов термоядерного синтеза, эжектированных из первого конца, в электрическую энергию включает в себя инъекцию ионов вдоль спиральной траектории в, в основном, цилиндрической полости, сформированной из множества разнесенных друг относительно друга полуцилиндрических электродов с формированием удлиненных зазоров между ними, преобразование, по существу, всей аксиальной энергии инжектированных ионов во вращательную энергию, формирование многополосного электрического поля в полости, причем это электрическое поле содержит три или более полюсов, и преобразование по меньшей мере части энергии ионов в электрическую энергию.

113. Способ по п.112, дополнительно содержащий приложение осциллирующего напряжения к множеству электродов.

114. Способ по п.112, в котором формирование электрического поля включает в себя создание азимутального электрического поля поперек зазоров.

115. Способ по п.112, дополнительно содержащий замедление ионов.

116. Способ по п.112, дополнительно содержащий направление кольцевого пучка через магнитный касп.

117. Способ по п.112, дополнительно содержащий сбор нейтрализующих заряд электронов из кольцевого пучка, когда эти электроны следуют по силовым линиям магнитного поля магнитного каспа.

118. Способ по п.117, дополнительно содержащий сбор ионов, как только существенная часть их энергии преобразуется в электрическую энергию.

119. Способ по п.112, в котором множество электродов содержит по меньшей мере четыре электрода.

120. Способ по п.116, дополнительно содержащий создание магнитного каспа.

121. Способ по п.120, в котором создание магнитного каспа содержит создание первого и второго магнитных полей, где силовые линии первого и второго магнитных полей идут в противоположных направлениях, и объединение первого и второго магнитных полей.

122. Способ по п.111, в котором преобразование энергии ионов термоядерного синтеза, инжектированных из второго конца, в тягу включает в себя фокусировку кольцевого пучка ионов термоядерного синтеза в виде направленного потока частиц.

123. Способ по п.122, дополнительно содержащий преобразование электромагнитных эмиссий из камеры в электрическую энергию.

124. Способ по п.122, дополнительно содержащий преобразование теплового излучения из камеры в электрическую энергию.

Другие аспекты и признаки настоящего изобретения станут очевидными из рассмотрения последующего описания вместе с сопроводительными чертежами.

Краткое описание чертежей

Предпочтительные варианты изобретения показаны в качестве примеров, а не в качестве какого-либо ограничения, на прилагаемых чертежах, где одинаковые ссылочные позиции относятся к одинаковым компонентам.

Фиг. 1 - частичное изображение примерной камеры для удержания;

фиг. 2А - частичное изображение другой примерной камеры для удержания;

фиг. 2В - частичное поперечное сечение по линии 2В-2В на фиг. 2А;

фиг. 2С - подробный вид по линии 2С на фиг. 2В;

фиг. 2Б - частичное поперечное сечение по линии 2D-2D на фиг. 2А;

фиг. 3 - магнитное поле конфигурации FRC;

фиг. 4А и 4В - диамагнитное и противоположное ему направление в FRC, соответственно;

фиг. 5 - система со встречными пучками;

фиг. 6 - бетатронная орбита;

фиг. 7А и 7В - соответственно магнитное поле и направление градиентного дрейфа в FRC;

фиг. 8А и 8В - соответственно электрическое поле и направление дрейфа $\vec{E} \times \vec{B}$ в конфигурации FRC;

фиг. 9А, 9В и 9С - дрейфовые ионные орбиты;

- фиг. 10А и 10В - сила Лоренца на концах FRC;
- фиг. 11 и 11В - регулировка электрического поля и электрического напряжения в системе со встречными пучками;
- фиг. 12 - распределение Максвелла;
- фиг. 13А и 13В - переходы с бетатронных орбит на дрейфовые орбиты из-за столкновений ион-ион с большим углом;
- фиг. 14 - бетатронные орбиты А, В, С и D при учете столкновений электрон-ион под малым углом;
- фиг. 15 - пучок нейтрализованных ионов, когда он электрически поляризован;
- фиг. 16 - вид спереди на пучок нейтрализованных ионов, когда он контактирует с плазмой в камере для удержания;
- фиг. 17 - схематический вид с торца камеры для удержания согласно предпочтительному варианту процедуры запуска;
- фиг. 18 - схематический вид с торца камеры для удержания согласно другому предпочтительному варианту процедуры запуска;
- фиг. 19 - кривые точечного исследования напряженности В, показывающие, как формируется конфигурация FRC;
- фиг. 20А - вид индуктивного источника плазмы, монтируемого в камере;
- фиг. 20В и 20С - частичные изображения индуктивного источника плазмы;
- фиг. 21А и 21В - частичные изображения системы RF возбуждения;
- фиг. 21С - схема дипольной и квадрупольной конфигураций;
- фиг. 22А - частичное изображение системы выработки электрической энергии из плазмы, которая содержит термоядерный реактор со встречными пучками, соединенный с прямым преобразователем энергии, который содержит обратный циклотронный преобразователь;
- фиг. 22В - вид с торца обратного циклотронного преобразователя на фиг. 19А;
- фиг. 22С - орбита иона в обратном циклотронном преобразователе;
- фиг. 23А - частичное изображение системы выработки электрической энергии из плазмы, содержащей термоядерный реактор со встречными пучками, соединенный с альтернативным вариантом обратного циклотронного преобразователя;
- фиг. 23В - вид с торца обратного циклотронного преобразователя на фиг. 20А;
- фиг. 24А - орбита частицы внутри стандартного циклотрона;
- фиг. 24В - осциллирующее электрическое поле;
- фиг. 24С - изменение энергии ускоряющейся частицы;
- фиг. 25 - азимутальное электрическое поле в зазорах между электродами преобразователя ИСС, который испытывает воздействие ионов, имеющих угловую скорость;
- фиг. 26 - фокусирующий квадрупольный двухлинзовый объектив;
- фиг. 27А и 27В - дополнительная система катушек для создания магнитного поля;
- фиг. 28 - реактор на 100 МВт;
- фиг. 29 - оборудование поддержки реактора;
- фиг. 30 - двигательная система на плазменной тяге;
- фиг. 31 - основные компоненты двигательной системы на плазменной тяге;
- фиг. 32 - блок-схема двигательной системы на плазменной тяге.

Подробное описание предпочтительных вариантов изобретения

Как показано на упомянутых фигурах, система выработки электрической энергии из плазмы (РЕG) по настоящему изобретению предпочтительно включает в себя термоядерный реактор со встречными пучками (СВFR), связанный с системой прямого преобразования энергии. Как упоминалось выше, идеальный термоядерный реактор решает проблему аномального переноса как для ионов, так и для электронов. Найденное здесь решение проблемы аномального переноса предусматривает использование системы удержания с магнитным полем, имеющим обращенную конфигурацию (FRC). Аномального переноса ионов удастся избежать путем магнитного удержания в FRC таким образом, что большинство ионов имеют большие, не адиабатические орбиты, что делает их не чувствительными к коротковолновым флуктуациям, которые вызывают аномальный перенос адиабатических ионов. В частности, наличие в конфигурации FRC области, где магнитное поле исчезает, открывает возможность получения плазмы, содержащей преимущественно не адиабатические ионы. Аномального переноса энергии для электронов удастся избежать путем регулировки приложенного извне магнитного поля для создания сильного электрического поля, которое обеспечивает их электростатическое удержание в глубокой потенциальной яме. Плазмы из термоядерного топлива, которые можно использовать с данным устройством и процессом для удержания, не ограничиваются нейтронными топливами, такими как D-D (дейтерий-дейтерий) или D-T (дейтерий-тритий), но также преимущественно включают в себя усовершенствованные, или безнейтронные виды топлива, такие как D-He³ (дейтерий - гелий-3) или p-B¹¹ (водород - бор-11). (Обсуждение усовершенствованных видов топлива смотри R. Feldbacher & M. Heindler, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A271(1988)JJ-64 (North Holland Amsterdam)). Для указанных безнейтронных видов топлива энергия термоядерной реакции почти целиком существует в виде заряженных частиц, то есть ионов

высокой энергии, которыми можно манипулировать в магнитном поле и, в зависимости от конкретного топлива, снизить радиоактивность или вообще ее исключить. В реакции D-He³ создается ион H и ион He⁴ с энергией 18,2 МэВ, в то время как в реакции p-B¹¹ создаются три иона He⁴ и энергия 8,7 МэВ. По результатам теоретического моделирования устройства термоядерного синтеза, использующего безнейтронные виды топлива, КПД преобразования энергии на выходе может достигать порядка 90%, как описано, например, в работе К. Yoshikawa, Т. Noma и Y. Yamamoto в Fusion Technology, 19, 870 (1991). Указанные значения КПД значительно улучшают перспективы использования безнейтронного термоядерного синтеза в варьируемой по мощности (1-1000 МВт), компактной и недорогой конфигурации реактора.

В процессе прямого преобразования энергии согласно настоящему изобретению заряженные частицы продуктов термоядерного синтеза могут замедляться, и их кинетическая энергия может быть преобразована непосредственно в электрическую. Преимуществом является то, что система прямого преобразования энергии по настоящему изобретению имеет КПД, допуски на энергию частиц и электронные возможности для преобразования частоты и фазы выходной мощности термоядерного синтеза с частотой порядка 5 МГц, чтобы обеспечить согласование с частотой и фазой внешней электроэнергетической сети (частотой 60 герц).

Система удержания для термоядерного синтеза

На фиг. 1 показан предпочтительный вариант системы 300 удержания согласно настоящему изобретению. Система 300 удержания содержит стенку 305 камеры, которая ограничивает камеру 310 для удержания. Предпочтительно, чтобы камера 310 имела цилиндрическую форму с главной осью 315, проходящей вдоль центральной части камеры 310. Для применения этой системы 300 удержания в термоядерном реакторе необходимо создать внутри камеры 310 вакуум или близкое к нему состояние. Вокруг главной оси 315 располагается катушка 320 бетатронного потока, находящаяся в камере 310. Катушка 320 бетатронного потока содержит носитель электрического тока, адаптированный для направления тока по окружности длинной катушки, как показано на фиг. 1, которая предпочтительно содержит параллельные витки множества отдельных катушек и, в наиболее предпочтительном варианте, параллельные витки примерно четырех отдельных катушек для формирования длинной катушки. Специалистам в данной области техники очевидно, что ток, проходящий через бетатронную катушку 320, приведет к созданию магнитного поля внутри бетатронной катушки 320 фактически в направлении главной оси 315.

Вокруг стенки 305 камеры предусмотрена внешняя катушка 325. Внешняя катушка 325 создает относительно постоянное магнитное поле, поток которого по существу параллелен главной оси 315. Это магнитное поле является азимутально симметричным. Приближение, состоящее в том, что магнитное поле, создаваемое внешней катушкой 325, является постоянным и параллельным оси 315, ближе всего к действительности вдали от концов камеры 310. На каждом конце камеры 310 имеется зеркальная катушка 330. Зеркальные катушки 330 приспособлены для создания усиленного магнитного поля внутри камеры 310 на каждом конце, что приводит к искривлению силовых линий магнитного поля внутрь у каждого конца. (Смотри фиг. 3 и 5). Как объяснялось выше, это искривление силовых линий поля внутрь помогает удерживать плазму 335 в области удержания в камере 310 в основном между зеркальными катушками 330 путем выталкивания ее с концов, где плазма может вырваться из системы 300 удержания. Зеркальные катушки 330 могут быть приспособлены для создания усиленного магнитного поля на концах множеством различных способов, известных в данной области техники, в том числе, путем увеличения количества витков в зеркальных катушках 330, увеличения тока через зеркальные катушки 330 или перекрытия зеркальных катушек 330 с внешней катушкой 325.

На фиг. 1 показано, что внешняя катушка 325 и зеркальные катушки 330 выполнены вне стенки 305 камеры; однако они могут находиться внутри камеры 310. В тех случаях, когда стенка 305 камеры сконструирована из проводящего материала, например, металла, размещение катушек 325, 330 внутри стенки 305 камеры может дать преимущество, поскольку время, которое тратится на диффузию магнитного поля через стенку 305, может быть относительно большим, что приводит к замедленной реакции системы 300. Аналогичным образом, камера 310 может иметь форму полого цилиндра, причем стенка камеры образует длинное кольцо. В указанном случае катушка 320 бетатронного потока может быть выполнена снаружи стенки 305 камеры в центре этого кольца. Предпочтительно, чтобы внутренняя стенка, образующая центральную часть кольца, могла содержать непроводящий материал, например, стекло. Как станет очевидным впоследствии, камера 310 должна иметь достаточные размеры и форму, чтобы дать возможность циркулирующему пучку или слою 335 плазмы вращаться вокруг главной оси 315 с заданным радиусом.

Стенка 305 камеры может быть выполнена из материала, имеющего высокую магнитную проницаемость, например из стали. В указанном случае стенка 305 камеры благодаря наведенным встречным токам в материале помогает избежать выхода магнитного потока из камеры 310, "сжимая" его. Если стенка камеры была бы выполнена из материала с низкой магнитной проницаемостью, такого как плексиглас, понадобилось бы другое устройство для удержания магнитного потока. В указанном случае можно предусмотреть ряд замкнутых плоских металлических колец. Эти кольца, известные в данной области техники как ограничители потока, могут быть предусмотрены во внешних катушках 325, но вне циркулирующего пучка 335 плазмы. Кроме того, эти ограничители потока могут быть пассивными или активными, причем активные ограничители потока возбуждаются заданным током, что дополнительно спо-

способствует удержанию магнитного потока в камере 310. В альтернативном варианте сами внешние катушки 325 могут служить ограничителями потока.

Как более подробно объясняется ниже, циркулирующий поток 335 плазмы, содержащий заряженные частицы, может удерживаться в камере 310 силой Лоренца, вызванной магнитным полем от внешней катушки 325. Как таковые, ионы в пучке 335 плазмы удерживаются магнитным полем на больших бета-тронных орбитах около силовых линий потока от внешней катушки 325, которые параллельны главной оси 315. Также предусмотрено одно или несколько отверстий 340 для инъекции пучка с целью добавления ионов плазмы в циркулирующий пучок 335 плазмы в камере 310. В предпочтительном варианте инъекционные отверстия 340 приспособлены для инъекции ионного пучка примерно в том же самом радиальном положении относительно главной оси 315, где удерживается циркулирующий пучок 335 плазмы (то есть вокруг нулевой поверхности, описанной ниже). Кроме того, инъекционные отверстия 340 приспособлены для инъекции ионных пучков 350 (смотри фиг. 17) тангенциально и в направлении бета-тронной орбиты удерживаемого пучка 335 плазмы.

Также предусмотрен один или несколько источников 345 фоновой плазмы для инъекции облака плазмы невысокой энергии в камеру 310. В предпочтительном варианте источники 345 фоновой плазмы приспособлены для направления плазмы 335 к осевому центру камеры 310. Было установлено, что направление плазмы таким путем способствует лучшему удержанию плазмы 335 и приводит к более высокой плотности плазмы 335 в области удержания в камере 310.

Вакуумная камера

Как было описано выше, использование системы удержания реактора CBFR необходимо для создания вакуума или состояния, близкого к вакууму, внутри камеры. Поскольку взаимодействия (рассеяние, зарядовый обмен) между нейтральными атомами и плазменным топливом всегда представляют канал потери энергии, крайне важно ограничить остаточную плотность в камере реактора. Кроме того, примеси, возникающие в результате некачественного вакуумирования камер, могут привести к загрязнению побочных реакций во время работы и привести к утечке чрезмерно большого количества энергии во время запуска, так как система должна "выжечь" эти остаточные продукты.

Для достижения вакуума высокого уровня обычно используют камеры и отверстия из нержавеющей стали, а также материалы с низким газовыделением. В случае использования металлов хорошие вакуумные свойства дополнительно сочетаются с хорошими конструктивными характеристиками. Однако проводящие материалы, такие как нержавеющая сталь и т.п., порождают различные проблемы, связанные с их электрическими свойствами. Хотя все эти отрицательные эффекты взаимосвязаны, они проявляются различными путями. Среди наиболее отрицательных свойств следует отметить замедленную диффузию магнитных полей через стенки камеры, аккумуляцию электрических зарядов на поверхностях, резкое изменение времени реакции системы на переходные сигналы, а также возникновение наведенных токов на поверхностях, которые сильно влияют на требуемую магнитную топологию. К материалам, которые не имеют эти нежелательные свойства и обладают хорошими вакуумными свойствами, относятся изоляторы, такие как керамика, стекло, кварц и в меньшей степени углеродное волокно. Главная проблема, связанная с этими материалами, заключается в структурной целостности, а также в возможности случайного повреждения. Дополнительными ограничениями также являются проблемы изготовления, такие как плохая обрабатываемость керамики.

В одном варианте, изображенном на фиг. 2B, 2C и 2D, предусмотрена альтернативная камера 1310, где указанные проблемы сведены к минимуму. Камера 1310 реактора CBFR предпочтительно выполнена в основном из металла, предпочтительно из нержавеющей стали или т.п., для обеспечения конструктивной прочности и хороших вакуумных свойств. Однако, цилиндрическая стенка 1311 камеры 1310 включает в себя аксиальные изолирующие разрывы 1360 в стенке 1311, которые проходят вдоль почти всей длины камеры 1310 в ее центральной части, или области, где находится активная зона реактора CBFR. Предпочтительно иметь три разрыва 1360, как показано на фиг. 2B, которые расположены примерно в 120 градусах друг от друга. Как показано на фиг. 2C, разрывы 1360 включают в себя прорезь или зазор 1362 в стенке 1311 камеры 1310 с канавкой или посадочным местом 1369 для уплотнения, сформированным у периферии прорези 1362. В канавку 1369 вставлен кольцевой уплотнитель 1367. Прорези 1362, как показано на фиг. 2B, проходят почти по всей длине камеры 1310, оставляя достаточное количество нержавеющей стали, который образует непрерывную по азимуту часть стенки 1311 около двух концов для обеспечения структурной целостности и высококачественных вакуумных уплотнителей на концах. Для повышения структурной целостности и предотвращения направленного внутрь взрыва камера 1310, как показано на фиг. 2A, предпочтительно включает в себя множество наборов отдельных азимутальных ребер 1370, которые образуют единое целое со стенкой 1311 камеры или соединены с поверхностью стенки 1311 камеры путем сварки или т.п.

Как показано на фиг. 2C, зазор 1362 заполнен вставкой 1364, сформированной из керамического материала. Вставка 1364 слегка входит внутрь камеры 1310 и покрыта внутри металлическим колпаком 1366 для предотвращения вторичной эмиссии плазмы из-за столкновений ионов первичной плазмы из циркулирующего пучка плазмы с керамическим материалом. Вне камеры 1310 вставка 1364 прикреплена к уплотнительной панели 1365, которая образует вакуумный барьер с помощью кольцевого уплотнителя

1367 с поверхностью стенки 1311 камеры, выполненной из нержавеющей стали. Для сохранения желательных вакуумных свойств уплотнительная панель 1365 предпочтительно сформирована из подложки (предпочтительно из стекловолокна или т.п.), которая является более гибкой и создает более плотное уплотнение с помощью кольца 1367, чем при использовании керамического материала, особенно в том случае, когда внутреннее давление слегка деформирует камеру 1310.

Вставки или керамические изоляторы 1364 внутри прорезей 1362 предпочтительно предотвращают образование электрической дуги через зазоры 1362 и, следовательно, предотвращают формирование наведенных азимутальных токов в стенке 1311 камеры. Наведенные токи являются проявлением закона Лоренца, который заключается в тенденции противостоять любому изменению потока: например, изменению потока, который появляется в катушке 1320 потока во время образования конфигурации FRC, как будет описано ниже. При отсутствии прорезей 1362 в цилиндрической стенке 1311 камеры 1310 изменяющийся поток в катушке 1320 создает равный и противоположно направленный индуцированный ток в стенке 1311 из нержавеющей стали, с тем чтобы нейтрализовать изменение магнитного потока внутри камеры 1310. Хотя наведенные индуцированные токи (из-за индуктивных потерь) будут слабее, чем ток, поданный в потоковую катушку 1320, наведенный ток будет стремиться значительно уменьшить приложенное или удерживаемое магнитное поле в камере 1310, что, учитывая его непредсказуемое направление, может оказать негативное воздействие на топологию магнитного поля и изменить характеристики удержания внутри камеры 1310. Существование прорезей 1362 предотвращает формирование наведенных токов в стенке 1311 в сторону средней плоскости камеры 1310 вдали от концов камеры 1310 в азимутально непрерывной части стенки 1311. Наведенные токи, которые могут протекать по стенке 1311 камеры в направлении срединной плоскости вдали от концов камеры 1310, являются очень слабыми, причем они протекают параллельно продольной оси прорезей 1362. Указанные токи не оказывают влияния на аксиальные магнитные поля удержания в конфигурации FRC, так как наведенные магнитные поля, созданные наведенными токами, продольно пересекающими стенку 1311 камеры, проявляются только в виде радиальной и азимутальной компонент. Азимутальные наведенные токи, сформированные в азимутально непрерывной проводящей части стенки 1311 вблизи концов камеры 1310, не оказывают негативного воздействия и/или не изменяют характеристики удержания внутри камеры 1310, в то время как магнитная топология в этом месте не имеет большого значения для удержания плазмы.

Вдобавок к предотвращению образования азимутальных наведенных токов в стенке 1311 камеры прорези 1362 обеспечивают путь для магнитного потока от полевых и зеркальных катушек 1325 и 1330 для проникновения в камеру 1310 в ускоренном масштабе времени. Прорези 1362 позволяют обеспечить точную регулировку на субмиллисекундном уровне и в результате обеспечить управление с обратной связью прилагаемым магнитным полем.

Заряженные частицы в конфигурации FRC

На фиг. 3 показано магнитное поле конфигурации FRC 70. Система имеет цилиндрическую симметрию относительно своей оси 78. В конфигурации FRC имеются две области магнитных силовых линий: открытая 80 и замкнутая 82. Поверхность, разделяющая эти две области, называют сепаратрисой 84. Конфигурация FRC образует цилиндрическую нулевую поверхность 86, в которой магнитное поле исчезает. В центральной части 88 конфигурации FRC магнитное поле в аксиальном направлении заметно не изменяется. На концах 90 магнитное поле заметно изменяется в аксиальном направлении. Магнитное поле вдоль центральной оси 78 изменяет направление на противоположное в конфигурации FRC, что и привело к появлению термина "обращенное" в конфигурации с обращенным полем (FRC).

На фиг. 4А магнитное поле вне нулевой поверхности 94 проходит в первом направлении 96. Магнитное поле внутри нулевой поверхности 94 проходит во втором направлении 98, обратном первому. Если ион движется в направлении 100, то сила Лоренца, действующая на него, направлена на нулевую поверхность 94. Это легко оценить, применив правило правой руки. Для частиц, движущихся в диамагнитном направлении 102, сила Лоренца всегда направлена на нулевую поверхность 94. Это явление порождает орбиту частицы, называемую бетатронной орбитой, которая описывается ниже.

На фиг. 4В показан ион, движущийся в направлении 104, противоположном диамагнитному. В этом случае сила Лоренца направлена от нулевой поверхности 94. Это явление порождает тип орбиты, называемый дрейфовой орбитой, которая описывается ниже. Диамагнитное направление для ионов является направлением, противоположным диамагнитному, для электронов, и наоборот.

На фиг. 5 показан круговой или кольцевой слой плазмы 106, вращающийся в диамагнитном направлении 102 для ионов. Кольцо 106 расположено вокруг нулевой поверхности 86. Магнитное поле 108, созданное кольцевым слоем 106 плазмы, в сочетании с приложенным извне магнитным полем 110, образует магнитное поле, имеющее топологию FRC (эта топология показана на фиг. 3).

Пучок ионов, который формирует уровень 106 плазмы, имеет температуру; следовательно, скорости ионов формируют распределение Максвелла в системе отсчета, вращающейся со средней угловой скоростью пучка ионов. Столкновения между ионами с различными скоростями приводят к термоядерным реакциям. По этой причине слой плазменного пучка или активную зону 106 называют системой со встречными пучками.

На фиг. 6 показаны основной тип ионных орбит в системе со встречными пучками, называемый бе-

татронной орбитой 112. Бетатронная орбита 112 может быть представлена в виде синусоидальной волны, центрированной по нулевой окружности 114. Как объяснялось выше, магнитное поле на нулевой окружности 114 исчезает. Плоскость орбиты 112 перпендикулярна оси 78 конфигурации FRC. Ионы на этой орбите 112 движутся по своему диамагнитному направлению 102 из начальной точки 116. Ион, находящийся на бетатронной орбите, участвует в двух движениях: колебание в радиальном направлении (перпендикулярно нулевой окружности 114) и поступательное перемещение вдоль нулевой окружности 114.

На фиг. 7А показан график магнитного поля 118 в конфигурации FRC. Горизонтальная ось графика представляет расстояние в сантиметрах от оси 78 FRC. Магнитное поле представлено в килогауссах. Как показано на графике, магнитное поле 118 исчезает при радиусе 120 нулевой окружности.

Как показано на фиг. 7В, частица, движущаяся в районе нулевой окружности, обнаруживает градиент 126 магнитного поля, направленный от нулевой поверхности 86. Магнитное поле вне нулевой окружности проходит в первом направлении 122, в то время как магнитное поле внутри нулевой окружности проходит во втором направлении 124, противоположном первому. Направление градиентного дрейфа

задается векторным произведением $\vec{B} \times \nabla B$, где ∇B градиент магнитного поля; таким образом, это можно представить себе, применив правило правой руки, согласно которому направление градиентного дрейфа противоположно диамагнитному направлению независимо от того, находится ли ион вне или внутри нулевой окружности 128.

На фиг. 8А показан график электрического поля 130 в конфигурации FRC. Горизонтальная ось графика представляет расстояние в сантиметрах от оси 78 FRC. Электрическое поле представлено в вольт/см. Как показано на графике, электрическое поле 130 исчезает вблизи радиуса 120 нулевой окружности.

Как показано на фиг. 8В, электрическое поле для ионов не является удерживающим; оно идет в направлениях 132, 134 от нулевой поверхности 86. Магнитное поле, как и ранее, проходит в противоположных направлениях 122, 124 внутри и вне нулевой поверхности 86. Это можно объяснить, применив правило правой руки, по которому направление $\vec{E} \times \vec{B}$ дрейфа является диамагнитным направлением 102 независимо от того, находится ли ион вне или внутри нулевой поверхности 136.

На фиг. 9А и 9В показан другой тип общей орбиты в конфигурации FRC, называемой дрейфовой орбитой 138. Дрейфовые орбиты 138 могут находиться вне нулевой поверхности 114, как показано на фиг. 9А, или внутри ее, как показано на фиг. 9В. Дрейфовые орбиты 138 поворачиваются в диамагнитном направлении, если доминирует дрейф $\vec{E} \times \vec{B}$, или в направлении, противоположном диамагнитному, если доминирует градиентный дрейф. Дрейфовые орбиты 138, показанные на фиг. 9А и 9В, вращаются в диамагнитном направлении 102 из исходной точки 116.

Как показано на фиг. 9С, дрейфовую орбиту можно представить как небольшую окружность, катящуюся по относительно большой окружности. Маленькая окружность 142 вращается вокруг своей оси в направлении 144. Она также катится по большой окружности 146 в направлении 102. Точка 140 будет вычерчивать в пространстве траекторию, аналогичную траектории 138.

На фиг. 10А и 10В показано направление силы Лоренца на концах конфигурации FRC 151. На фиг. 10А показано, что ион движется в диамагнитном направлении 102 со скоростью 148 в магнитном поле 150. Это можно объяснить, применив правило правой руки, по которому сила 152 Лоренца стремится толкнуть ион обратно в область замкнутых силовых линий. Таким образом, в этом случае сила 152 Лоренца является удерживающей для ионов. На фиг. 10В показано, что ион движется в направлении, обратном диамагнитному, со скоростью 148 в магнитном поле 150. Применив правило правой руки, можно понять, что сила 152 Лоренца стремится толкнуть ион в область открытых силовых линий. Следовательно, в этом случае сила 152 Лоренца не является удерживающей для ионов.

Магнитное и электростатическое удержание в конфигурации FRC

Слой 106 плазмы (смотри фиг. 5) может быть сформирован в FRC путем инжектирования ионных пучков высокой энергии вокруг нулевой поверхности 86 в диамагнитном направлении 102 для ионов. (Подробное обсуждение различных способов формирования FRC и кольца плазмы следует ниже). В слое 106 циркулирующей плазмы большинство ионов имеют бетатронные орбиты 112 (см. фиг. 6), имеют высокую энергию и являются не адиабатическими, а значит, они не чувствительны к коротковолновым флуктуациям, которые вызывают аномальный перенос.

В слое 106 плазмы, сформированном в FRC, и в равновесных условиях сохранение количества движения задает соотношение между угловой скоростью ионов ω_i и угловой скоростью электронов ω_e . Это соотношение выглядит следующим образом

$$\omega_e = \omega_i \left[1 - \frac{\omega_i}{\Omega_0} \right], \quad \text{где } \Omega_0 = \frac{ZeB_0}{m_i c}. \quad (1)$$

В уравнении 1 Z - это атомное число иона, m_i - масса иона, e - заряд электрона, B_0 - величина приложенного магнитного поля, а c - скорость света. В этом соотношении имеется три свободных параметра: приложенное магнитное поле B_0 , угловая скорость ω_e электрона и угловая скорость ω_i иона. Если два из них известны, то третий можно определить из уравнения 1.

Поскольку слой 106 плазмы формируется путем инжекции ионных пучков в FRC, угловая скорость ω_i ионов определяется инжекционной кинетической энергией W_i пучка, которая задается как

$$W_i = \frac{1}{2} m_i V_i^2 = \frac{1}{2} m_i (\omega_i r_0)^2 \quad (2)$$

Здесь $V_i = \omega_i r_0$, где V_i - скорость инжекции ионов, ω_i - циклотронная частота ионов, а r_0 - радиус нулевой поверхности 86. Кинетическая энергия электронов в пучке не учитывалась, поскольку масса m_e электрона гораздо меньше массы m_i иона.

Для фиксированной скорости инжекции пучка (при фиксированной ω_i) приложенное магнитное поле B_0 можно отрегулировать так, чтобы были доступны разные значения ω_e . Как будет показано ниже, регулировка внешнего магнитного поля B_0 также позволяет получить разные значения электростатического поля внутри слоя плазмы. Этот признак изобретения показан на фиг. 11А и 11В. На фиг. 11А показаны три графика электрического поля (в вольт/см), полученных для одной и той же скорости инжекции $\omega_i = 1,35 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$, но для трех разных значений приложенного магнитного поля B_0 :

График	Приложенное магнитное поле	Угловая скорость электрона (ω_e)
154	$B_0 = 2,77 \text{ кГс}$	$\omega_e = 0$
156	$B_0 = 5,15 \text{ кГс}$	$\omega_e = 0,625 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$
158	$B_0 = 15,5 \text{ кГс}$	$\omega_e = 1,11 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$

Значения ω_e в таблице были определены согласно уравнению 1. Очевидно, что, если $\omega_e > 0$, то $\Omega_0 > \omega_i$ в уравнении 1, так что электроны вращаются в направлении, противоположном диамагнитному. На фиг. 11В показан электрическое напряжение (в вольтах) для одного и того же набора значений B_0 и ω_e . Горизонтальная ось на фиг. 11А и 11В представляет расстояние от оси 78 FRC, показанное на графике в сантиметрах. Электрическое поле и электрическое напряжение сильно зависят от ω_e .

Вышеуказанные результаты можно объяснить, исходя из простых физических оснований. Когда ионы вращаются в диамагнитном направлении, они удерживаются магнитным полем благодаря силе Лоренца. Это было показано на фиг. 4А. Для электронов, вращающихся в том же направлении, что и ионы, сила Лоренца имеет противоположное направление, так что электроны не будут удерживаться. Электроны покидают плазму, и в результате создается избыток положительного заряда. Это приводит к установке электрического поля, которое предотвращает покидание плазмы другими электронами. Направление и величина этого электрического поля в равновесном состоянии определяется, исходя из сохранения количества движения.

Электростатическое поле играет существенную роль в переносе как электронов, так и ионов. Соответственно, важным аспектом этого изобретения является то, что внутри плазменного слоя 106 создается сильное электростатическое поле, величина которого задается значением приложенного магнитного поля B_0 , которое можно легко регулировать.

Как было объяснено выше, электростатическое поле является удерживающим для электронов, если $\omega_e > 0$. Как показано на фиг. 11В, глубину потенциальной ямы можно увеличить путем регулировки приложенного магнитного поля B_0 . За исключением очень узкой области вблизи нулевой окружности, электроны всегда имеют маленький гирорадиус. Следовательно, электроны реагируют на коротковолновые флуктуации аномально высокой скорости диффузии. Эта диффузия действительно помогает поддерживать потенциальную яму, как только возникла термоядерная реакция. Ионы, являющиеся продуктами термоядерного синтеза и имеющие гораздо более высокую энергию, покидают плазму. Чтобы поддерживать квазинейтральность заряда, продукты термоядерного синтеза должны вместе с собой вытолкнуть электроны из плазмы, забирая электроны в основном с поверхности плазменного слоя. Плотность электронов на поверхности плазмы очень низкая, и электроны, которые покидают плазму с продуктами термоядерного синтеза, должны быть возмещены; в противном случае, потенциальная яма исчезнет.

На фиг. 12 показано распределение 162 Максвелла для электронов. Достичь поверхности плазмы и покинуть ее вместе с ионами термоядерного синтеза могут только электроны очень высокой энергии из завершающей части 160 распределения Максвелла. Таким образом, завершающая часть 160 распределения 162 непрерывно создается столкновениями электрон-электрон в области высокой плотности вблизи нулевой поверхности. Электроны высокой энергии к тому же имеют маленький гирорадиус, так что аномальная диффузия позволяет им достаточно быстро достичь поверхности для аккомодации уходящих ионов - продуктов термоядерного синтеза. Электроны высокой энергии теряют свою энергию, повышая потенциальную яму, и остаются с очень малой энергией. Хотя электроны могут быстро пересечь магнитное поле из-за аномального переноса, аномальных потерь энергии стремятся избежать, поскольку переносится малое количество энергии.

Другим последствием потенциальной ямы является механизм сильного охлаждения электронов, который подобен охлаждению испарением. Например, чтобы испарить воду, необходимо приложить скры-

тое тепло испарения. Это тепло подается остальной водой в жидкой фазе и окружающей средой, которая затем быстро термализуется до более низкой температуры, причем это происходит быстрее, чем возмещение энергии через процессы переноса тепла. Аналогичным образом, глубина потенциальной ямы для электронов эквивалентна скрытой теплоте испарения воды. Электроны поставляют энергию, необходимую для снижения глубины потенциальной ямы, благодаря процессу термализации, который пополняет энергию в завершающей части распределения Максвелла, с тем, чтобы вылет электронов мог состояться. Таким образом, процесс термализации приводит к снижению температуры электронов, причем это происходит гораздо быстрее, чем любой процесс нагрева. Из-за различия масс электронов и протонов время переноса энергии от протонов примерно в 1800 раз меньше времени термализации электронов. Указанный механизм охлаждения также уменьшает радиационные потери электронов. Это особенно важно для усовершенствованных видов топлива, где радиационные потери увеличиваются из-за топливных ионов с атомным числом Z , большим 1; $Z > 1$.

Электростатическое поле также влияет на перенос ионов. Большая часть орбит частиц в плазменном слое 106 представляет собой бетатронные орбиты. Столкновения при больших углах, то есть столкновения с углами рассеяния между 90 и 180° могут изменить бетатронную орбиту на дрейфовую орбиту. Как было описано выше, направление вращения дрейфовой орбиты определяется соотношением между дрейфом $\vec{E} \times \vec{B}$ и градиентом дрейфа. Если доминирует дрейф $\vec{E} \times \vec{B}$, то дрейфовая орбита поворачивается в диамагнитном направлении. Если доминирует градиентный дрейф, то дрейфовая орбита поворачивается в направлении, противоположном диамагнитному. Это показано на фиг. 13А и 13В. На фиг. 13А показан переход с бетатронной орбиты на дрейфовую орбиту из-за столкновения с углом 180° , которое произошло в точке 172. Дрейфовая орбита продолжает поворачиваться в диамагнитном направлении, поскольку доминирует дрейф $\vec{E} \times \vec{B}$.

На фиг. 13В показано другое столкновение с углом 180° , но в этом случае электростатическое поле слабое, и доминирует градиентный дрейф. Таким образом, дрейфовая орбита поворачивается в направлении, противоположном диамагнитному.

Направление вращения дрейфовой орбиты определяет, будет или нет удержание. Частица, движущаяся по дрейфовой орбите, также будет иметь скорость, параллельную оси FRC. Время, необходимое частице для прохождения от одного конца конфигурации FRC к другому в результате этого параллельного движения, называется временем перехода; следовательно, дрейфовые орбиты достигают конца FRC за время, примерно равное времени перехода. Как показано в связи с фиг. 10А, сила Лоренца на концах FRC является удерживающей только для тех дрейфовых орбит, которые поворачиваются в диамагнитном направлении. Следовательно, по истечении времени перехода ионы на дрейфовых орбитах, вращающихся в направлении, противоположном диамагнитному, теряются.

Это явление учитывает механизм потерь для ионов, который, как ожидается, существует во всех экспериментах с конфигурацией FRC. В действительности, в этих экспериментах ионы переносят одну половину тока, а электроны переносят его другую половину. В этих условиях электрическое поле внутри плазмы будет пренебрежимо малым, и градиентный дрейф всегда доминирует над дрейфом $\vec{E} \times \vec{B}$.

Следовательно, все дрейфовые орбиты, созданные в результате столкновений с большими углами, по окончании времени перехода не сохраняются. В этих экспериментах сообщается о скоростях диффузии ионов, которые превышали скорости, прогнозируемые согласно оценкам для классической диффузии.

Если имеется сильное электростатическое поле, то дрейф преобладает над градиентным дрейфом, и дрейфовые орбиты поворачиваются в диамагнитном направлении. Это было показано выше в связи с фиг. 13А. Когда эти орбиты достигают концов конфигурации FRC, они отражаются обратно в область замкнутых силовых линий поля силой Лоренца; следовательно, они продолжают удерживаться в системе.

Электростатические поля в системе со встречными пучками могут быть достаточно сильными, с тем чтобы дрейф $\vec{E} \times \vec{B}$ преобладал над градиентным дрейфом. Таким образом, удастся избежать переноса ионов электростатическим полем путем исключения механизма потерь ионов, который аналогичен конусу потерь в зеркальном устройстве.

Другой аспект диффузии ионов можно оценить, рассмотрев воздействие столкновений электрон-ион с малыми углами на бетатронных орбитах. На фиг. 14А показана бетатронная орбита 112; на фиг. 14В показана та же орбита 112, но с учетом столкновения электрон-ион с малыми углами (орбита 174); на фиг. 14С показана орбита по фиг. 14В, отслеженная в течение в десять раз большего времени (орбита 176); а на фиг. 14D показана орбита по фиг. 14В, отслеженная в течение в двенадцать раз большего времени (орбита 178). Можно видеть, что топология бетатронных орбит не изменяется из-за столкновений электрон-ион с малыми углами; однако амплитуда их радиальных колебаний со временем растёт. В действительности орбиты, показанные на фиг. с 14А по 14D, со временем утолщаются, что указывает на классическую диффузию.

Формирование конфигурации FRC

В стандартных процедурах, используемых для формирования FRC, в первую очередь применяется

процедура реверсирования поля тета-пинча. В этом стандартном методе применяется магнитное поле смещения, обеспечиваемое внешними катушками, которые охватывают камеру, заполненную нейтральным газом. Поступающий газ тут же ионизируется, и магнитное поле фиксирует свое положение в плазме. Далее быстро изменяют направление тока во внешних катушках на противоположный, и противоположно направленные силовые линии магнитного поля соединяются с ранее зафиксированными силовыми линиями для формирования закрытой топологии FRC (смотри фиг. 3). Этот процесс формирования является в значительной степени эмпирическим, и почти не существует средств для управления формированием FRC. Этот способ имеет плохую воспроизводимость и, как результат, отсутствуют возможности регулировки.

В противоположность этому способы создания FRC по настоящему изобретению предоставляют достаточные возможности по управлению и обеспечивают гораздо более прозрачный и воспроизводимый процесс. В действительности, конфигурация FRC, сформированная способами по настоящему изобретению, может регулироваться, и на ее форму, а также другие свойства, можно непосредственно влиять, манипулируя магнитным полем, налагаемым внешними катушками 325 возбуждения. Формирование FRC способами по настоящему изобретению также приводит к образованию электрического поля и потенциальной ямы так, как это подробно было описано выше. Кроме того, настоящие способы можно легко расширить, чтобы довести конфигурацию FRC до параметров и токов, характерных для топлива высокой энергии на уровне реактора, причем к преимуществам этих способов относится возможность классического удержания ионов. Кроме того, эта технология может быть использована в компактном устройстве и отличается высокой надежностью, а также с ее помощью легко реализовать все наиболее желательные характеристики реакторных систем.

В настоящих способах формирование FRC связано с циркулирующим плазменным пучком 335. Очевидно, что циркулирующий плазменный пучок, являясь током, создает полоидальное магнитное поле, как если бы это был электрический ток в круговом проводе. Внутри циркулирующего плазменного пучка 335 собственное магнитное поле, которое индуцирует пучок, направлено навстречу магнитному полю, приложенному извне благодаря внешней катушке 325. Вне плазменного пучка 335 собственное магнитное поле имеет то же самое направление, что и приложенное магнитное поле. Когда ионный ток в плазме достаточно велик, собственное поле превосходит приложенное поле, и магнитное поле внутри циркулирующего плазменного пучка 335 меняет направление на противоположное, формируя, тем самым, топологию FRC, как показано на фиг. 3 и 5.

Требования, необходимые для реверсирования поля, можно оценить с помощью простой модели. Рассмотрим электрический ток I_p , который проходит в кольце с максимальным радиусом r_0 и минимальным радиусом $\alpha \ll r_0$. Магнитное поле в центре этого кольца перпендикулярно кольцу, $B_p = 2I_p / (cr_0)$. Положим, что кольцевой ток $I_p = N_p e (\Omega_0 / 2\pi)$ переносится N_p ионами, которые имеют угловую скорость Ω_0 . Для одного иона, циркулирующего с радиусом $r_0 = V_0 / \Omega_0$, $\Omega_0 = eV_0 / m_i c$ является циклотронной частотой для внешнего магнитного поля B_0 . Положим, что V_0 является средней скоростью ионов в пучке. Реверсирование поля определяется как

$$B_p = \frac{N_p e \Omega_0}{r_0 c} \geq 2B_0, \quad (3)$$

откуда следует, что $N_p > 2r_0 / \alpha_i$, и

$$I_p \geq \frac{eV_0}{\pi\alpha_i}, \quad (4)$$

где $\alpha_i = e^2 / m_i c^2 = 1,57 \times 10^{-16}$ см, а энергия ионного пучка равна $\frac{1}{2} m_i V_0^2$. В одномерной модели магнитное поле от тока плазмы составит $B_p = (2\pi/c) i_p$, где i_p - ток на единицу длины. Требование для реверсирования поля выглядит как $i_p > eV_0 / \pi r_0 \alpha_i = 0, 225$ кА/см, где $B_0 = 69,3$ Гс, а $\frac{1}{2} m_i V_0^2 = 100$ эВ. Для модели с периодическими кольцами и B_z , усредненной по аксиальной координате $\langle B_z \rangle = (2\pi/c)(I_p/s)$ (s - кольцевой интервал), если $s = r_0$, эта модель будет иметь то же самое среднее магнитное поле, что и в одномерной модели с $i_p = I_p/s$.

Комбинированная технология формирования пучков с бетатронным ускорением

Вышеописанный предпочтительный способ формирования FRC в системе 300 удержания называется в описании комбинированной технологией формирования пучков с бетатронным ускорением. Этот подход объединяет пучки плазменных ионов низкой энергии с бетатронным ускорением путем использования катушки 320 бетатронного потока.

Первый шаг в этом способе состоит в инъекции по существу кольцевого облачного слоя фоновой плазмы в камеру 310 с использованием источников 345 фоновой плазмы. Внешняя катушка 325 создает магнитное поле внутри камеры 310, которое намагничивает фоновую плазму. На коротких интервалах ионные пучки низкой энергии инжектируются в камеру 310 через инжекторные отверстия 340, по существу, перпендикулярные приложенному извне магнитному полю в камере 310. Как было объяснено выше, ионные пучки захватываются этим магнитным полем в камере 310 на большие бетатронные орбиты. Ионные пучки могут создаваться ускорителем ионов, таким как ускоритель, содержащий ионный диод и

генератор Маркса. (Смотри R. B. Miller, An Introduction to the Physics of Intense Charged Particle Beams, (1982)). Как очевидно специалистам в данной области техники, приложенное магнитное поле, как только оно появится в камере 310, вызывает силу Лоренца в инжектированном ионном пучке; однако желательно, чтобы пучок не отклонялся, а значит, не вышел на бетатронную орбиту, пока он не достиг циркулирующего плазменного пучка 335. Для решения этой проблемы ионные пучки нейтрализуют электронами, и, как показано на фиг. 15, когда ионный пучок 350 направляется посредством подходящего магнитного поля, такого как приложенное однонаправленное магнитное поле в камере 310, положительно заряженные ионы и отрицательно заряженные электроны разделяются. Таким образом, ионный пучок 350 приобретает электрическую самополяризацию благодаря магнитному полю. Это магнитное поле также можно создать, например, постоянным магнитом или электромагнитом на пути ионного пучка. При последующем введении в камеру 310 для удержания результирующее электрическое поле уравнивает магнитную силу, действующую на частицы пучка, позволяя ионному пучку дрейфовать без отклонения. На фиг. 16 показан вид спереди ионного пучка 350, когда он контактирует с плазмой 335. Как здесь показано, электроны из плазмы 335 проходят вдоль магнитных силовых линий в или из пучка 350, который, тем самым, снимает электрическую поляризацию пучка. Когда пучок больше не обладает электрической поляризацией, он соединяется с циркулирующим плазменным пучком на бетатронной орбите вокруг главной оси 315, как показано на фиг. 1 (см. также фиг. 5).

Когда плазменный пучок 335 движется по своей бетатронной орбите, движущиеся ионы образуют ток, который, в свою очередь, приводит к появлению собственного полоидального магнитного поля. Для создания в камере 310 топологии FRC необходимо увеличить скорость плазменного пучка 335, что увеличит величину собственного магнитного поля, которое порождается плазменным пучком 335. Когда собственное магнитное поле достаточно велико, направление магнитного поля на радиальном расстоянии от оси 315 в плазменном пучке 335 меняется на противоположное, что приводит к созданию конфигурации FRC (см. фиг. 3 и 5). Можно понять, что для поддержания радиального расстояния циркулирующего плазменного потока 33 на бетатронной орбите необходимо увеличить магнитное поле, приложенное от внешней катушки 325, когда увеличивается скорость циркулирующего плазменного потока 335. Таким образом, предусмотрена система управления для поддержания соответствующего приложенного магнитного поля, обусловленного током, протекающим через внешнюю катушку 325. В альтернативном варианте для обеспечения дополнительного приложенного магнитного поля, которое необходимо для поддержания радиуса орбиты плазменного пучка при его ускорении, можно использовать вторую внешнюю катушку.

Для увеличения скорости циркулирующего плазменного потока 335 на его орбите предусмотрена катушка 320 бетатронного потока. Обратимся к фиг. 17, из которой можно понять, что увеличение тока через катушку 320 бетатронного потока согласно закону Ампера наведет азимутальное электрическое поле E внутри камеры 310. Положительно заряженные ионы в плазменном потоке 335 ускоряются этим наведенным электрическим полем, что приводит к реверсированию поля, как было описано выше. При добавлении ионных пучков 350, нейтрализованных и поляризованных, как было описано выше, к циркулирующему плазменному пучку 335, плазменный пучок 335 деполяризует ионные пучки.

Для реверсирования поля циркулирующий плазменный пучок 335 ускоряют предпочтительно до значения вращательной энергии примерно 100 эВ, и предпочтительно в диапазоне порядка от 75 эВ до 125 эВ. Для достижения условий, подходящих для термоядерного синтеза, циркулирующий плазменный пучок 335 ускоряют предпочтительно до порядка 200 кэВ, и предпочтительно в диапазоне примерно от 100 кэВ до 3,3 МэВ.

Формирование FRC было успешно продемонстрировано путем использования комбинированной технологии формирования пучков с бетатронным ускорением. Комбинированная технология формирования пучков с бетатронным ускорением была реализована экспериментально в камере диаметром 1 м и длиной 1,5 м с использованием приложенного извне магнитного поля до 500 Гс, магнитного поля от вращающейся плазмы, наведенное катушкой 320 бетатронного потока, величиной до 5 кГс, и вакуума $1,2 \times 10^{-5}$ торр. В этом эксперименте фоновая плазма имела плотность 10^{13} см⁻³, а ионный пучок представлял собой пучок нейтрализованного водорода, имеющий плотность $1,2 \times 10^{13}$ см⁻³, скорость 2×10^7 см/с и длину импульса порядка 20 мкс (при половинной высоте). При этом наблюдалось реверсирование поля.

Технология бетатронного формирования FRC

Другой предпочтительный способ формирования FRC в системе 300 удержания называется здесь технологией бетатронного формирования. Эта технология основана на возбуждении тока, наведенного бетатроном, для непосредственного ускорения циркулирующего плазменного пучка 335 с использованием катушки 320 бетатронного потока. В предпочтительном варианте этой технологии используется система 300 удержания, показанная на фиг. 1, за исключением того, что в инжекции ионных пучков низкой энергии нет необходимости.

Как было показано, основным компонентом в технологии бетатронного формирования FRC является катушка 320 бетатронного потока, смонтированная в центральной части камеры 310 вдоль ее оси. Благодаря конструкции с разделанными параллельными витками катушка 320 отличается очень низкой ин-

дуктивностью и, будучи подсоединенной к подходящему источнику питания, имеет небольшую постоянную времени LC, которая позволяет обеспечить быстрое нарастание тока в катушке 320 бетатронного потока.

Предпочтительно, чтобы формирование FRC начиналось путем подачи питания на катушки 325, 330 внешнего поля. Это обеспечивает аксиальное направляющее поле, а также компоненты радиального магнитного поля вблизи концов для аксиального удержания плазмы, инжектированной в камеру 310. Как только установилось достаточное магнитное поле, источники 345 фоновой плазмы получают питание от своих собственных источников питания. Плазма, испускаемая плазменными пушками, устремляется вдоль аксиального направляющего поля и слегка расширяется из-за своей температуры. Когда плазма достигает срединной плоскости камеры 310, устанавливается непрерывный, аксиально распространяющийся кольцевой слой холодной, медленно движущейся плазмы.

В этот момент на катушку 320 бетатронного потока подается питание. Быстро нарастающий ток в катушке 320 вызывает быстрое изменение аксиального потока внутри катушки. Благодаря индуктивным эффектам это быстрое увеличение аксиального потока приводит к созданию азимутального электрического поля E (смотри фиг. 18), которое пронизывает пространство вокруг катушки бетатронного потока. Согласно уравнениям Максвелла это электрическое поле E прямо пропорционально изменению напряженности магнитного потока внутри катушки, то есть, чем быстрее нарастает ток в бетатронной катушке, тем сильнее электрическое поле.

Созданное в результате индукции электрическое поле E взаимодействует с заряженными частицами в плазме и вызывает пондеромоторную силу, которая ускоряет частицы в кольцевом плазменном слое. Электроны из-за их меньшей массы испытывают ускорение в первую очередь. Таким образом, начальный ток, сформированный этим процессом, в основном создается благодаря электронам. Однако при достаточно большом времени ускорения (порядка сотен микросекунд), в конце концов, также появится ионный ток. Обратимся к фиг. 18, где электрическое поле E ускоряет электроны и ионы в противоположных направлениях. Как только те и другие достигнут своих тепловых скоростей, ток будет переноситься ионами и электронами примерно в равной степени.

Как упоминалось выше, ток, переносимый вращающейся плазмой, приводит к возникновению собственного магнитного поля. Действительная топология FRC создается тогда, когда собственное магнитное поле, созданное током в плазменном слое, становится сравнимым с приложенным магнитным полем от внешних катушек 325, 330 возбуждения. В этот момент происходит перезамыкание магнитных силовых линий, и открытые силовые линии первоначального, созданного извне магнитного поля начинают замыкаться и образуют поверхности потока FRC (смотри фиг. 3 и 5).

В базовой конфигурации FRC, установленной согласно этому способу, получается умеренное магнитное поле и энергии частиц, которые, как правило, не соответствуют рабочим параметрам реактора. Однако, пока ток в катушке 320 бетатронного потока будет продолжать увеличиваться с высокой скоростью, индуктивное электрическое ускоряющее поле будет продолжать существовать. Результатом этого процесса станет непрерывный рост энергии и напряженности общего магнитного потока в конфигурации FRC. Таким образом, протяженность этого процесса в основном ограничивается источником питания катушки бетатронного потока, так как непрерывная подача тока требует наличия массивного аккумулятора энергии. Однако в принципе, этот подход открывает прямой путь доведения системы до параметров, подходящих для реактора.

Для реверсирования поля циркулирующий плазменный поток 335 предпочтительно ускоряют до значения вращательной энергии порядка 100 эВ и предпочтительно в диапазоне примерно от 7 эВ до 125 эВ. Для достижения условий, подходящих для термоядерного синтеза, циркулирующий плазменный поток 335 предпочтительно ускоряют до значения вращательной энергии порядка 200 кэВ и предпочтительно в диапазоне примерно от 100 кэВ до 3,3 МэВ. При вводе ионных пучков в циркулирующий плазменный пучок 335, как было описано выше, плазменный пучок 335 деполяризует ионные пучки.

Формирование бетатрона с использованием формирования FRC было успешно продемонстрировано при следующих уровнях параметров:

- размеры вакуумной камеры: около 1 м в диаметре и 1,5 м в длину;
- радиус бетатронной катушки - 10 см;
- радиус орбиты плазмы - 20 см.

Средняя величина внешнего магнитного поля, созданного в вакуумной камере, составляла до 100 Гс с периодом нарастания 150 мкс и зеркальным отношением 2 к 1 (источник: внешние катушки и бетатронные катушки).

Фоновая плазма (в основном газ водород) характеризовалась средней плотностью 10^{13} см⁻³ и кинетической температурой менее 10 эВ.

Время существования указанной конфигурации было ограничено общей энергией, запасенной в эксперименте, и обычно составляло порядка 30 мкс.

Эксперименты проводились путем первой инжекции слоя фоновой плазмы двумя наборами плазменных пушек с коаксиальным кабелем, смонтированными по окружности внутри камеры. Каждая группа из 8 пушек была смонтирована на одном из двух узлов зеркальной катушки. Пушки были разнесены

азимутально с равными промежутками и смещены относительно другого набора. Такая компоновка позволила активизировать пушки одновременно и создавать, тем самым, кольцевой плазменный слой.

После установления этого слоя на катушку бетатронного потока подавалось питание. Нарастание тока в витках бетатронной катушки вызывало увеличение потока внутри катушки, что порождало азимутальное электрическое поле, искривляющееся вблизи бетатронной катушки. Быстро растущий и большой ток в катушке бетатронного потока создавал сильное электрическое поле, которое ускоряло кольцевой плазменный слой и индуцировало, тем самым, значительный ток. Достаточно сильный плазменный ток создавал собственное магнитное поле, которое изменяло приложенное извне поле и приводило к созданию конфигурации с обращенным полем. Детальные измерения с точечными (В) контурами позволили определить протяженность, напряженность и длительность существования конфигурации FRC.

Пример типовых данных показан в виде кривых сигналов точечного измерения В на фиг. 19. Кривая А данных представляет абсолютную напряженность аксиальной компоненты магнитного поля в аксиальной срединной плоскости (75 см от любой концевой пластины) экспериментальной камеры и при радиальном положении 15 см. Кривая В данных представляет абсолютную напряженность аксиальной компоненты магнитного поля в аксиальной срединной плоскости камеры при радиальном положении 30 см. Таким образом, набор данных кривой А показывает напряженность магнитного поля внутри слоя топливной плазмы (между бетатронной катушкой и плазмой), в то время как набор данных кривой В показывает напряженность магнитного поля вне слоя топливной плазмы. Эти данные ясно указывают на то, что внутреннее магнитное поле изменило свою ориентацию (на отрицательную) в интервале между примерно 23 и 47 мкс, в то время как внешнее поле осталось положительным, то есть не изменило свою ориентацию на противоположную. Время реверсирования ограничено нарастанием тока в бетатронной катушке. Как только в бетатронной катушке достигнут пиковый ток, ток, наведенный в слое топливной плазмы, начинает уменьшаться, и конфигурация FRC быстро распадается. До сих пор время существования FRC ограничивается энергией, которая может быть запасена в эксперименте. При экспериментах с инжекцией и захватом система может быть модернизирована, чтобы обеспечить большее время существования FRC и доведение ее до параметров, подходящих для реактора.

В общем и целом, эта технология не только создает компактную конфигурацию FRC, но также отличается надежностью и может быть непосредственно реализована. Самое важное, это то, что базовую конфигурацию FRC, созданную таким способом, можно легко довести до любого желаемого уровня вращательной энергии и напряженности магнитного поля. Это крайне важно для термоядерных приложений и для классического удержания топливных пучков высокой энергии.

Индуктивный источник плазмы

Вышеописанные технология бетатронного формирования FRC и комбинированная технология формирования пучков с бетатронным ускорением основаны на передаче энергии в фоновую плазму посредством катушки 320 потока. По аналогии с трансформатором, катушка потока выполняет функцию первичных витков трансформатора, в то время как плазма действует как вторичные витки. Чтобы эта индуктивная система работала эффективно, главное, чтобы плазма представляла собой хороший проводник.

В отличие от типовых проводников, таких как металлы, при повышении температуры сопротивление плазмы уменьшается, то есть увеличивается ее проводимость. В частности, температура электронов плазмы играет важную роль и в значительной степени определяет диссипацию, которая зависит от столкновений электрон-ион. В сущности, диссипация возникает из-за сопротивления, которое вызывается столкновениями электрон-ион, причем чем выше частота столкновений, тем выше сопротивление. Это происходит из-за коллективных явлений в плазме при экранировании сечения кулоновских столкновений. Частота столкновений (частота появления последовательных столкновений) является по существу функцией плотности, экранированного сечения кулоновского рассеяния и тепловой (или средней) скорости сталкивающихся/рассеивающихся зарядов, то есть: $\nu_c = m \sigma v$. Если определить масштабы v с $T^{1/2}$, то ν_c пропорционально v^{-4} или T^{-2} . Следовательно, частота столкновений ν_c пропорциональна $nT^{-3/2}$. Сопротивление связано с частотой столкновений соотношением $\eta = \nu_c m / ne^2$. Таким образом, сопротивление пропорционально $T^{-3/2}$ и (что примечательно) не зависит от плотности; это является прямым следствием того, что если даже количество носителей заряда с увеличением плотности возрастает, количество центров рассеяния также увеличивается. Таким образом, более высокая температура приводит к более высокой проводимости плазмы и уменьшению диссипативных потерь.

Следовательно, для обеспечения лучших рабочих характеристик, относящихся к удержанию в конфигурации FRC, крайне желательно, чтобы плазма была горячей. В случае системы PEG, повышенная температура электронов приводит к улучшенному запуску FRC (чем лучше проводящие свойства плазмы, тем сильнее индуктивная связь между плазмой и катушкой потока), к лучшему поддержанию тока (уменьшение сопротивления плазмы приводит к уменьшению диссипативных потерь и потерь на трение и, следовательно, уменьшает потери тока) и к более высокой напряженности магнитного поля (чем сильнее ток, тем больше собственное поле). Адекватная температура электронов во время формирования исходной плазмы и перед приведением в действие катушки потока приводит к усилению индуктивной свя-

зи катушки потока с плазмой (которая преимущественно стремится воспрепятствовать созданию азимутальных наведенных токов в стенке камеры). Это, в свою очередь, приведет к увеличению бетатронного ускорения (уменьшение сопротивления приводит к увеличению индуктивного переноса энергии из катушки потока в плазму) и нагреву плазмы (некоторая часть подведенной направленной энергии, представленной вращающимся током, будет термализована и превратится в случайную энергию, что, в конце концов, приведет к нагреву плазмы катушкой потока), что приведет к увеличению времени столкновения ион-электрон (из-за более высокой температуры), уменьшению диссипации (уменьшенное сопротивление) и, в конце концов, откроет возможность обеспечить более сильные поля FRC (большие токи приводят к созданию более сильных полей).

Для достижения лучшей температуры исходной плазмы предусмотрен индуктивный источник плазмы. Как показано на фиг. 20А, 20В и 20С, индуктивный источник 1010 плазмы смонтирован в камере 310 у конца катушки 320 потока и включает в себя узел 1030 одновитковой ударной катушки, на который предпочтительно подавать питание от высоковольтного (порядка от 5 до 15 кВ) источника питания (не показан). В источник 1010 посредством прямых газовых питателей через сопло 1020 Лаваля вводится нейтральный газ, например, водород (или другое подходящее газообразное термоядерное топливо). Поток газа предпочтительно регулировать с помощью набора сверхбыстродействующих впускных клапанов для создания чистого ударного фронта. Как только газ выходит из сопла 1020 и распространяется по поверхности витков 1040 ударной катушки 1030, на витки 1040 подается питание. Сверхбыстрое нарастание тока и потока в ударной катушке 1030 с низкой индуктивностью приводит к созданию очень сильного электрического поля в газе, что вызывает разряд, ионизацию и последующую эжекцию сформированной плазмы с поверхности ударной катушки 1030 по направлению к центру камеры 310.

В предпочтительном варианте ударная катушка 1030 содержит корпус 1032 в форме кольцевого диска, окруженной внешним кольцом 1034, сформированным по внешней периферии, и кольцевую втулку 1036, сформированную по ее внутренней периферии. Кольцо 1034 и втулка 1036 проходят аксиально за поверхность корпуса 1032, образуя края открытого сверху кольцевого канала 1035. Предпочтительно, чтобы корпус 1032, кольцо 1034 и втулка 1036 были сформированы в виде цельной пресспованной конструкции из подходящего непроводящего материала с хорошими вакуумными свойствами и низким газовыделением, например, из стекла, стекловолокна, пирекса, кварца, керамики или т.п.

Предпочтительно, чтобы к кольцу 1034 ударной катушки 1030 был подсоединен многосекционный колпак 1012 для ограничения радиального дрейфа созданной плазмы. Каждая секция 1014 колпака 1012 включает в себя множество аксиально идущих пальцев 1016. Концы каждой секции 1014 содержат монтажную скобу 1015.

Витки 1040 обмотки предпочтительно закреплены на лицевой стороне корпуса 1032 катушки в канале 1035 с использованием эпоксидного или какого-либо другого подходящего клея. Для получения электромагнитных характеристик катушки 1030 потока с малой постоянной времени важно поддерживать ее индуктивность как можно меньшей. Это достигается путем использования в катушке 1040 как можно меньшего числа витков, а также выполнения катушки 1040 из множества жил провода 1042, которые намотаны параллельно. В приведенном в качестве примера варианте катушка 1040 содержала 24 параллельных жилы провода 1042, каждая из которых образовывала один виток. Каждый из проводов 1042 начинался во входной точке 1044, которые предпочтительно должны располагаться примерно на 15 градусов от внешнего периметра корпуса 1032, и заканчивался после одного оборота в выходных точках 1046 на внутреннем радиусе корпуса 1032. Витки 1040 катушки таким образом покрывают всю область между внутренним и внешним краями канала 1035. Предпочтительно, чтобы группы жил 1042 были подсоединены к одной и той же конденсаторной батарее. В общем случае питание может подаваться на все жилы 1042 от одной и той же конденсаторной батареи или как в приведенном в качестве примера варианте, где 8 групп из 3 жил 1042 соединены вместе и получают общее питание от одной из 2 отдельных конденсаторных батарей.

Корпус 1022 сопла в форме кольцевого диска соединен по своему внутреннему периметру с втулкой 1036 для формирования сопла 1020 Лаваля. Поверхность 1024 корпуса 1022 сопла, обращенная к втулке 1036, имеет расширяющийся срединный профиль, определяющий кольцевой газосборник 1025 между поверхностью 1024 и лицевой поверхностью 1037 втулки 1036. Рядом с внешней периферией корпуса 1022 сопла поверхность 1024 имеет сужающийся-расширяющийся профиль, ограничивающий азимутально проходящее выпускное отверстие 1023 сопла типа сопла Лаваля между поверхностью 1024 и лицевой поверхностью 1037 втулки 1036.

К противоположной стороне втулки 1036 прикреплено кольцо 1050 седел клапана с несколькими седлами 1054 клапана, сформированными на внешней стороне кольца 1050. Седла 1054 клапана выровнены с каналами 1052 подачи газа, проходящими сквозь втулку 1036.

При работе нейтральный газ подается через сверхбыстродействующие впускные клапаны в седлах 1054 клапана в газовые каналы 1052, проходящие через втулку 1036. Благодаря наличию ограничивающей части выпускного отверстия 1023 клапана газ стремится попасть внутрь и заполнить кольцевой газосборник 1025 до истечения из сопла 1020. Как только газ выходит из сопла 1020 и распределяется по поверхности витков 1040 ударной катушки 1030, на витки 1040 подается питание. Сверхбыстрое нарастание

тание тока и потока в ударной катушке 1030 с малой индуктивностью приводит к образованию очень сильного электрического поля в газе, которое вызывает разряд, ионизацию и последующую эжекцию сформированной плазмы с поверхности ударной катушки 1030 в направлении центра камеры 310.

Нарастание тока предпочтительно должно быть синхронизировано во всех жилах 1042 или группах жил 1042, которые, как подразумевается, должны активизироваться вместе. Другим вариантом, который возможен и потенциально имеет преимущества, является активизация разных групп жил в разные моменты времени. Между разными включающимися группами жил 1042 может быть сознательно установлена задержка, для того чтобы активизировать разные группы жил в разные моменты времени. При активизации разных групп жил в разные моменты времени важно сгруппировать жилы таким образом, чтобы их расположение было азимутально симметричным и обеспечивало достаточное покрытие поверхности катушки 1040 проводами 1042, несущими ток, при любом заданном импульсе питания. Таким путем можно создать по меньшей мере два последовательных отдельных импульса плазмы. Задержка между импульсами ограничивается имеющимся количеством нейтрального газа. На практике указанные импульсы можно активизировать с промежутком примерно от 5 до 600 мкс.

На практике входные рабочие параметры предположительно выглядят следующим образом:

зарядное напряжение: разделенный источник питания примерно от 10 до 25 кВ;

ток: общий ток через все витки примерно до 50 кА;

время импульса/нарастания: примерно до 2 мкс;

давление газа: примерно от -20 до 50 фунт/квадратный дюйм;

размер газосборника: примерно от 0,5 до 1 см³ на клапан, то есть общий объем газа примерно от 4 до 8 см³ на импульс;

В приведенном в качестве примера варианте входные рабочие параметры имели следующие значения:

зарядное напряжение: разделенный источник примерно от 12 до 17 кВ, то есть, от -12 кВ до +12 кВ;

ток: от 2 до 4,5 кА на группу из трех жил, то есть общий ток через все витки вместе от 16 до 36 кА;

время импульса/нарастания: от 1 до 1,5 мкс;

давление газа: от -15 до 30 фунт/квадратный дюйм;

размер газосборника: от 0,5 до 1 см³ на клапан, то есть общий объем газа от 4 до 8 см³ на импульс.

Плазма, созданная с помощью этого рабочего способа с индуктивным источником 1010 плазмы при использовании указанных выше параметров, имеет следующие выгодные характеристики:

плотность $\sim 4 \times 10^{13}$ см⁻³;

температура ~ 10 -20 эВ;

кольцевой масштаб ~ 40 -50 см в диаметре;

Скорость аксиального дрейфа ~ 5 -10 эВ.

Благодаря форме и ориентации источника 1010 форма возникающей плазмы является кольцевой с диаметром, стремящимся к диаметру кольца вращающейся плазмы, чтобы сформировать конфигурацию FRC. В настоящей системе PEG два указанных индуктивных источника 1010 плазмы предпочтительно поместить на любом аксиальном конце камеры 310 и желателен активизировать их одновременно. Два сформированных распределения плазмы дрейфуют аксиально в направлении центра камеры 310, где они образуют кольцевой слой плазмы, который затем ускоряется катушкой 320 потока, как было описано выше.

RF возбуждение для ионов и электронов в конфигурации FRC

Для конфигураций FRC, в которых ток переносится в основном электронами, использовался RF возбудитель тока под названием "ротомак" (rotomak). Он включает в себя вращающееся радиальное магнитное поле, созданное двумя фазированными антеннами. Электроны намагничиваются и привязываются к силовым линиям вращающегося магнитного поля. Это поддерживает ток, пока кулоновские столкновения ионов с электронами не заставят ионы ускориться и уменьшить ток. Однако ротомак не подходит для поддержания тока неопределенно долго, а способен успешно это делать в течение нескольких миллисекунд.

В конфигурациях FRC настоящей системы ток, в основном, переносится ионами, находящимися на бетатронных орбитах, которые не привязываются к силовым линиям вращающегося магнитного поля. Ионы на больших орбитах важны для обеспечения устойчивости и классической диффузии. Вместо антенн, как в циклотронах, используются электроды, а ионы возбуждаются электростатической волной. Проблема не выходит за рамки электростатики, поскольку частота RF диапазона меньше 10 мегагерц, так что длина волны (30 м) значительно превышает любой размер плазмы. Электростатические поля могут проникать в плазму FRC гораздо легче, чем электромагнитные волны.

Электромагнитная волна, созданная электродами, рассчитана на продвижение со скоростью, близкой к средней азимутальной скорости ионов или электронов. Если волна распространяется быстрее, чем средняя скорость ионов, она будет ускорять их и, тем самым, компенсировать торможение из-за столкновений ион-электрон. Однако электроны ускоряются из-за кулоновских столкновений с ионами. В этом случае волна должна иметь скорость, меньшую средней скорости электронов, и электроны будут уско-

рять эту волну. Средняя скорость электронов меньше средней скорости ионов, так что электроны должны возбуждаться при двух разных частотах. Более высокая частота будет для ионов, причем энергию предпочтительно подавать от внешней схемы. Для электронов энергия может извлекаться при более низкой частоте.

Системы электродов

На фиг. 21А и 21В показана квадрупольная система RF возбуждения. Как здесь показано, RF возбудитель содержит квадрупольный циклотрон 1110, расположенный в камере 310 и имеющий четыре удлиненных, азимутально симметричных электрода 1112 с зазорами 1114 между ними. Квадрупольный циклотрон 1110 предпочтительно создает волну электрического потенциала, которая вращается в том же направлении, что и вектор азимутальной скорости ионов, но с большей скоростью. Ионы, имеющие подходящую скорость, могут захватываться этой волной и периодически отражаться. Этот процесс увеличивает количество движения и энергию топливных ионов, и это увеличение передается топливным ионам, которые не захвачены столкновениями. Топливные ионы из топливной плазмы 335 могут быть возмещены путем инжекции нейтральных частиц с любой подходящей скоростью.

Альтернативный и дополнительный способ возбуждения тока состоит в добавлении в систему электродов дополнительных катушек 1116 магнитного поля, расположенных около катушки 325 потока и квадрупольного циклотрона 1110, причем эти катушки возбуждаются с половинной частотой циклотронных электродов 1112. Однако представленное здесь последующее обсуждение ограничено иллюстрацией версии только с электродами (без катушек 1116 магнитного поля).

На фиг. 21С показаны электроды для двухэлектродной и четырехэлектродной конфигураций.

Напряжение, созданное электродами с указанными приложенными напряжениями, отмечено на фиг. 21С для вакуума в пространстве $r < r_b$. Указанные выражения даны для самых низких гармоник. Они получены путем решения уравнения Лапласа

$$\left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \Phi(r, \theta, t) = 0 \quad (5)$$

с соответствующими граничными условиями. Например, для дипольного циклотрона

$$\begin{aligned} \Phi(r_b, t) &= -V_o \cos \omega t \quad \text{для } 0 \leq \theta \leq \pi \\ &= V_o \cos \omega t \quad \text{для } \pi \leq \theta \leq 2\pi \end{aligned} \quad (6)$$

$\Phi(r, \theta, t)$ - конечная величина.

Поскольку величина $\Phi(r, \theta, t)$ является периодической по θ с периодом 2π , ее можно разложить в ряд Фурье, то есть:

$$\Phi(r, \theta, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u_n(r, t) e^{in\theta} \quad (7)$$

$$u_n(r, t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\theta e^{-in\theta} \Phi(r, \theta, t) \quad (8)$$

а u_n удовлетворяет уравнению

$$\left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{n^2}{r^2} \right) u_n(r, t) = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} u_n(r_o, t) &= \frac{V_o \cos \omega t}{in\pi} (e^{-in\pi} - 1) = 0, \quad \text{если } n = 2, 4, \dots \text{ т. д.} \\ u_n(0, t) &= 0 \end{aligned}$$

$$\Phi(r, \theta, t) = \frac{4V_o \cos \omega t}{\pi} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\sin(2l-1)\theta}{2l-1} \left(\frac{r}{r_b} \right)^{2l-1}. \quad (10)$$

Самая низшая гармоника выглядит следующим образом

$$\Phi_1(r, \theta, t) = \frac{2V_o}{\pi} \frac{r}{r_b} [\sin(\omega t + \theta) - \sin(\omega t - \theta)] \quad (11)$$

Высшие гармоники представляют собой

$$\Phi_l(r, \theta, t) = \frac{2V_o}{\pi} \left(\frac{r}{r_b} \right)^{2l-1} \{ \sin[\omega t + (2l-1)\theta] - \sin[\omega t - (2l-1)\theta] \} \quad (12)$$

Скорость волны в азимутальном направлении составляет

$$\dot{\theta} = \pm \omega (2l - 1),$$

так что высшие гармоники имеют меньшую фазовую скорость и амплитуду. Эти выкладки применимы к обоим случаям, показанным на фиг. 21С. Частота ω будет близка к ω_1 частоте вращения ионов при жестком роторном равновесии для FRC. Таким образом,

$$\dot{\theta} = \omega_1$$

для $l=1$. Для $l=2$

$$\dot{\theta} = \omega_i/3$$

а амплитуда волны будет существенно ниже; таким образом, учет только низшей гармоники является хорошей аппроксимацией.

Плазменный эффект

Реакция плазмы может быть описана диэлектрическим тензором. Электрическое поле создает плазменные токи, которые вызывают разделение зарядов в соответствии с уравнением сохранения зарядов

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

где \vec{J} - плотность тока, а ρ - плотность заряда. Соответствующее уравнение представляет собой

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi\rho = 4\pi\vec{\chi} \cdot \vec{E} \quad (14)$$

или

$$\nabla \cdot \vec{\epsilon} \cdot \vec{E} = -\nabla \cdot \vec{\epsilon} \cdot \nabla \Phi = 0$$

где $\vec{\epsilon} = \vec{1} + 4\pi\vec{\chi}$ - диэлектрический тензор, а χ - поляризуемость.

Если учитывать только вклад электронов, то тензор ϵ будет диагональным с одной компонентой

$$\epsilon_{\perp} = 1 + \frac{4\pi n m c^2}{B^2} \quad (15)$$

где n - плотность, а B - магнитное поле в конфигурации FRC. n и B быстро изменяются с изменением r , и $B=0$ на поверхности при $r=r_0$ в плазме. Выражение для ϵ_{\perp} получено в предположении, что электроны имеют маленький гирорадиус, а электрическое поле изменяется медленно по сравнению с гирочастотой, $\Omega_e = eB/mc$. Эта аппроксимация становится непригодной вблизи нулевой поверхности. Характеристические орбиты изменяются с дрейфовых орбит на бетатронные орбиты, которые гораздо меньше реагируют на электрическое поле, то есть $\epsilon_{\perp} \cong 1$ вблизи нулевой поверхности при $r=r_0$. Ионы, в основном, имеют бетатронные орбиты, а для дрейфовых орбит реакция на электрическое поле мала, поскольку электрическое поле изменяется с частотой $\omega \cong \omega_i$.

Конечный результат состоит в том, что уравнение Лапласа заменяется уравнением

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{\epsilon_{\perp}(r)} \frac{d\epsilon_{\perp}}{dr} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} = 0 \quad (16)$$

которое необходимо решать численно. Дополнительный член исчезает вблизи $r=r_0$. Напряжение для низшей гармоники в случае квадрупольной конфигурации имеет вид

$$\Phi = V_0 \frac{F(r)}{2} \sin(2\theta - \omega t) \quad (17)$$

и аналогичный вид для случая дипольной конфигурации. Волны, идущие в противоположном направлении к ионам (или электронам), будут пренебрежимо малы.

Ускорение благодаря ионам, захваченным электростатической волной

Положим, что $\omega = 2\omega_i + \Delta\omega$, так что волна

$$\dot{\theta} = \omega/2 = \omega_i + \Delta\omega/2$$

будет двигаться несколько быстрее, чем ионы. Предполагается, что стандартная функция распределения жесткого ротора для ионов представляет собой

$$f_i(\vec{x}, \vec{v}) = \left(\frac{m_i}{2\pi T_i} \right)^{3/2} n_i(r) \exp \left\{ -\frac{m_i}{2T_i} [v_r^2 + v_z^2 + (v_{\theta} - r\omega_i)^2] \right\}. \quad (18)$$

Представляющая интерес функция усеченного распределения выглядит следующим образом

$$F_i(r, v_{\theta}) = \left(\frac{m_i}{2\pi T_i} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{m_i}{2T_i} (v_{\theta} - r\omega_i)^2 \right].$$

Скорость электростатической волны, созданной квадрупольным циклотроном, составляет

$$v_w = r\omega/2 = r\omega_i + \Delta v_w.$$

Ионы, движущиеся быстрее, чем волна, отражаются, если

$$v_{\theta} - v_w < \sqrt{\frac{2e\Phi_0}{m_i}}. \quad (19)$$

Это увеличивает энергию волны, то есть

$$\frac{dW_+}{dt} = \sum_{l=1,2} \frac{n_i m_i}{\lambda} \int_{v_{\theta}=v_w}^{v_{\theta}=v_w + \sqrt{\frac{2e\Phi_0}{m_i}}} dv_{\theta} F_i(r, v_{\theta}) \left[\frac{v_{\theta}^2}{2} - \frac{(2v_w - v_{\theta})^2}{2} \right] (v_{\theta} - v_w). \quad (20)$$

Ионы, движущиеся медленнее, чем волна, отражаются, если

$$v_w - v_\theta < \sqrt{\frac{2e\Phi_0}{m_i}}.$$

и волна теряет энергию при скорости

$$\frac{dW_-}{dt} = \sum_{i=1,2} \frac{n_i m_i}{\lambda} \int_{v_\theta = v - \sqrt{\frac{2e\Phi_0}{m_i}}}^{v_\theta = v_w} dv_\theta F_i(r, v_\theta) \left[\frac{v_\theta^2}{2} - \frac{(2v_w - v_\theta)^2}{2} \right] (v_w - v_\theta). \quad (21)$$

Конечный результат упрощается при замене переменной $v'_\theta = v_\theta - v_w$, то есть

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW_+}{dt} - \frac{dW_-}{dt} = \sum_{i=1,2} \frac{2n_i m_i v_w}{\lambda} \int_0^{\sqrt{\frac{2e\Phi_0}{m_i}}} dv'_\theta (v'_\theta)^2 [F_i(v_w + v'_\theta) - F_i(v_w - v'_\theta)]. \quad (22)$$

Аппроксимация

$$F_i[v_w \pm v_\theta] = F_i(v_w) \pm \frac{\partial F_i}{\partial v_\theta} \Big|_{v_w} v_\theta, \quad (23)$$

приводит к

$$\frac{dW}{dt} = \sum_{i=1,2} \frac{2n_i m_i v_w}{\lambda} \left(\frac{2e\Phi_0}{m_i} \right)^2 \frac{\partial F_i}{\partial v_\theta} \Big|_{v_w = v_w}. \quad (24)$$

Это выражение имеет вид, аналогичный затуханию Ландау, но по физическому смыслу это не то же самое, поскольку затухание (нарастание) Ландау - линейное явление, а данный случай - чисто не линейный.

Поскольку

$$\frac{\partial F_i}{\partial v_\theta} \Big|_{v_w} = \left(\frac{m_i}{2\pi T_i} \right)^{1/2} \frac{m_i}{T_i} (v_w - r\omega_i) \exp \left[-\frac{m_i}{2T_i} (v_w - r\omega_i)^2 \right]. \quad (25)$$

Если $v_w = r\omega_i$, изменение волновой энергии отсутствует. Если $v_w > r\omega_i$ или $\Delta v_w > 0$, волновая энергия уменьшается; для $\Delta v_w < 0$ волновая энергия возрастает. Это аналогично интерпретации затухания Ландау. В первом случае $\Delta v_w > 0$ имеется больше ионов, движущихся медленнее, чем волна. Следовательно, волновая энергия уменьшается. В противоположном случае $\Delta v_w < 0$ волновая энергия возрастает. Первый случай используют для поддержания энергии и количества движения ионов с помощью квадрупольного циклотрона. Это и есть токовое возбуждение. Последний случай обеспечивает базу для преобразователя. Уравнения (22) и (24) можно использовать для оценки применимости к условиям термоядерного реактора.

Мощность, переданная ионам, когда $v_w = r\omega_i$, $\Delta v_w \cong v_i$ (тепловая скорость иона) составляет

$$P = 2\pi \int_0^{r\omega_i} \frac{dW}{dt} r dr,$$

где dW/dt определяется уравнениями (24) и (25).

Для упрощения интегрирования $\Phi_0(r)$ заменяют на $\Phi_0(r_0)$, значение при пиковой плотности, которое является нижней границей амплитуды волны.

$$P = \left(\frac{2}{\pi} \right)^{3/2} \sum_{i=1,2} (N_i T_i) \omega_i \left[\frac{2e_i \Phi_0(r_0)}{T_i} \right]^2 \quad (26)$$

N_i - линейная плотность ионов, $i=1,2$ определяет два типа ионов, которые обычно присутствуют в реакторе.

Подробные вычисления $F(r)$ показывают, что амплитуда $\Phi_0(r_0)$ волны примерно в 10 раз меньше максимального напряжения в зазоре, которое равно $2V_0$. Это определяет ограничения данного способа RF возбуждения. V_0 ограничивается максимальным напряжением в зазоре, которое может поддерживаться и вероятно составляет около 10 киловольт для зазора в 1 см.

Требования реактора

Для токового возбуждения мощность P_i предпочтительно передается ионам при частоте ω_i , а мощность P_e предпочтительно передается электронам при частоте ω_e . Это компенсирует кулоновское взаимодействие между электронами и ионами, что уменьшает скорость ионов и увеличивает скорость электронов. (При отсутствии передач мощности кулоновские столкновения приведут к одинаковой скорости для электронов и ионов и отсутствию тока). Среднее электрическое поле для поддержания равновесия электронов и ионов задается выражением

$$2\pi r_0 \langle E_\theta \rangle = IR \quad (27)$$

где $I = \frac{N_e e}{2\pi} (\omega_i - \omega_e)$ - ток на единицу длины, а

$$R = \frac{(2\pi r_0)^2 m}{N_e e^2} \left(\frac{N_1 Z_1 m_1}{N_e t_{1e}} + \frac{N_2 Z_2 m_2}{N_e t_{2e}} \right)$$

сопротивление на единицу длины. N_e , N_1 , N_2 - линейные плотности электронов и ионов $N_e = N_1 Z_1 + N_2 Z_2$, где Z_1 , Z_2 - атомные числа ионов; t_{1e} и t_{2e} - времена передачи количества движения от ионов к электронам. Среднее электрическое поле для ионов или электронов одинаково, поскольку для квазинейтрального состояния $N_e \cong N_i$, а заряд противоположен. Мощность, которую необходимо передать ионам, составляет

$$P_i = 2\pi r_0 I_{i\theta} \langle E_\theta \rangle \quad (28)$$

а мощность, которую можно получить от электронов, составляет

$$P_e = -|2\pi r_0 I_{e\theta} \langle E_\theta \rangle| \quad (29)$$

где

$$I_{i\theta} = N_e e \omega_i / 2\pi \quad \text{и} \quad I_{e\theta} = N_e e \omega_e / 2\pi .$$

Для пополнения топлива с RF возбуждением топливо может быть возмещено при любой энергии со скоростями, заданными временами термоядерного синтеза $t_{F1} = 1/n_1 \langle \sigma v \rangle_1$ и $t_{F2} = 1/n_2 \langle \sigma v \rangle_2$;

n_1 и n_2 - плотности ионов плазмы, а

$\langle \sigma v \rangle$ - реактивности.

Эта величина будет составлять секунды. Инжектированные нейтральные вещества (для возмещения топливных ионов, которые выгорели или исчезли) будут быстро ионизироваться и ускоряться из-за кулоновских столкновений до средней скорости ионов за время порядка нескольких миллисекунд (для плотностей в реакторе порядка 10^{15} см^{-3}). Однако это потребует добавления к $\langle E_\theta \rangle$ и дополнительную передачу мощности для поддержания стабильного состояния. Эта добавка составляет

$$\delta \langle E_\theta \rangle = \frac{V_{i\theta} - V_{e\theta}}{N_e e^2} \left(\frac{N_1 Z_1 m_1}{t_{F1}} + \frac{N_2 Z_2 m_2}{t_{F2}} \right) \quad (30)$$

что увеличит передачу необходимой мощности примерно вдвое.

Может быть обеспечена мощность для возбуждения тока и пополнения топлива без превышения максимальной амплитуды напряжения в зазоре 10 кВ/см. С учетом того, что частота будет от 1 до 10 МГц и магнитное поле составит порядка 100 кГс, разряд не ожидается. Мощность, которую следует передать для возбуждения тока и пополнения топлива, такая же, как в любом способе возбуждения тока. Однако за многие годы была отработана высокоэффективная RF технология с частотами от 1 до 10 МГц. Описанный способ, где вместо антенн используют электроды, имеет значительное преимущество, поскольку условия для проникновения поля гораздо легче, чем для электромагнитных волн. Следовательно, этот способ имеет преимущества в отношении циркулирующей мощности и КПД.

Термоядерный синтез

Важно, что эти две технологии формирования FRC внутри вышеописанной системы 300 удержания или т.п. могут привести к получению плазмы со свойствами, подходящими для осуществления в ней термоядерного синтеза. В частности, конфигурация FRC, сформированная этими способами, может быть доведена до любого желаемого уровня вращательной энергии и напряженности магнитного поля. Это очень важно для термоядерных приложений и классического удержания топливных пучков высокой энергии. Таким образом, в системе 300 удержания открывается возможность захвата и удержания плазменных пучков высокой энергии в течение периодов времени, достаточных, для того чтобы вызвать термоядерную реакцию.

Для приспособления к термоядерному синтезу конфигурацию FRC, сформированную указанными способами, предпочтительно ускоряют до подходящих уровней вращательной энергии и напряженности магнитного поля посредством бетатронного ускорения. Однако для того чтобы имел место термоядерный синтез, требуется конкретный набор физических условий. Вдобавок, для достижения эффективного сгорания топлива и получения положительного энергетического баланса, топливо должно поддерживаться в практически неизменном состоянии в течение продолжительных периодов времени. Это важно, так как состояние, подходящее для термоядерного синтеза, характеризуется высокой кинетической температурой и/или энергией. Следовательно, создание этого состояния требует подвода значительного количества энергии, которая может быть восстановлена только в том случае, если большая часть топлива подвергнется термоядерному синтезу. Как следствие, время удержания топлива должно быть больше, чем время сгорания. Это приводит к положительному энергетическому балансу и, следовательно, выходу полезной энергии.

Значительным преимуществом настоящего изобретения является то, что описанные здесь система удержания и плазма позволяют обеспечить длительное удержание, то есть обеспечить времена удержания, которые превышают времена сгорания топлива. Таким образом, типовое состояние для топлива характеризуется следующими физическими условиями (которые имеют тенденцию к изменению в зависимости от топлива и рабочего режима).

Средняя температура ионов: в диапазоне примерно от 30 до 230 кэВ и предпочтительно в диапазоне примерно от 80 кэВ до 230 кэВ.

Средняя температура электронов: в диапазоне примерно от 30 до 100 кэВ и предпочтительно в диапазоне примерно от 80 кэВ до 100 кэВ.

Когерентная энергия топливных пучков (инжектированные ионные пучки и циркулирующий плазменный пучок): в диапазоне примерно от 100 кэВ до 3,3 МэВ и предпочтительно в диапазоне примерно от 300 кэВ до 3,3 МэВ.

Общее магнитное поле: в диапазоне примерно от 47,5 до 120 кГс и предпочтительно в диапазоне примерно от 95 до 120 кГс (с приложенным извне полем в диапазоне примерно от 2,5 до 15 кГс и предпочтительно в диапазоне примерно от 5 до 15 кГс).

Время классического удержания: больше времени сгорания топлива и предпочтительно в диапазоне примерно от 10 до 100 с.

Плотность топливных ионов: в диапазоне примерно от 10^{14} до менее 10^{16} см⁻³ и предпочтительно в диапазоне от 10^{14} до 10^{15} см⁻³.

Общая мощность термоядерного синтеза: предпочтительно в диапазоне примерно от 50 до 450 кВт/см (мощность на см длины камеры).

Для согласования с состоянием топлива, как было указано выше, FRC предпочтительно ускоряют до уровня когерентной вращательной энергии предпочтительно в диапазоне примерно от 100 кэВ до 3,3 МэВ и более предпочтительно в диапазоне примерно от 300 кэВ до 3,3 МэВ и уровня напряженности магнитного поля предпочтительно в диапазоне примерно от 45 до 120 кГс и более предпочтительно в диапазоне примерно от 90 до 115 кГс. При указанных уровнях ионные пучки высокой энергии, нейтрализованные и поляризованные, как было описано выше, можно инжектировать в FRC, где они захватываются, образуя слой плазменного пучка, в котором ионы плазменного пучка удерживаются магнитным полем, а электроны плазменного пучка удерживаются электростатическим полем.

Предпочтительно поддерживать температуру электронов низкой, насколько это практически возможно, чтобы уменьшить объем тормозного излучения, которое, в противном случае, может привести к потерям энергии на излучение. Электростатическая энергетическая яма по настоящему изобретению обеспечивает эффективное средство выполнения вышеуказанного.

Температуру ионов предпочтительно поддерживать на уровне, который обеспечивает эффективное сгорание, поскольку сечение термоядерного синтеза зависит от температуры ионов. Высокая прямая энергия топливных ионных пучков имеет существенное значение для обеспечения классического переноса, как обсуждалось в данной заявке. Это также минимизирует эффекты нестабильности в топливной плазме. Магнитное поле соответствует энергии вращения пучка. Оно частично создается плазменным пучком (собственное поле) и, в свою очередь, обеспечивает поддержку и силу для поддержания плазменного пучка на требуемой орбите.

Продукты термоядерного синтеза

Продукты термоядерного синтеза зарождаются в активной зоне преимущественно вблизи нулевой поверхности 86, откуда они появляются благодаря диффузии в направлении сепаратрисы 84 (см. фиг. 3 и 5). Это происходит из-за столкновений с электронами (все столкновения с ионами не изменяют центр масс и, следовательно, не вызывают изменения магнитных силовых линий). Благодаря своей высокой кинетической энергии (ионы продуктов термоядерного синтеза имеют гораздо более высокую энергию, чем топливные ионы) продукты термоядерного синтеза могут легко пересекать сепаратрису 84. Как только они попадают за сепаратрису 84, они могут уходить вдоль открытых силовых линий 80 поля при условии, что они подвергаются рассеянию из-за столкновений ион-ион. Хотя этот процесс столкновений не приводит к диффузии, он может изменить направление вектора скорости ионов, так что тот окажется параллельным магнитному полю. Эти открытые силовые линии 80 поля соединяют топологию FRC активной зоны с однородным полем, приложенным извне топологии FRC. Ионы продуктов термоядерного синтеза появляются на разных силовых линиях поля, по которым они следуют с распределением энергий. Ионы продуктов реакции и нейтрализующие заряд электроны преимущественно появляются в виде вращающихся кольцевых пучков из обоих концов топливной плазмы. Например, для установки 50 МВт с реакцией p-B¹¹ эти пучки будут иметь радиус порядка 50 см и толщину порядка 10 сантиметров. В сильных магнитных полях вне сепаратрисы 84 (как правило, около 100 кГс) ионы продуктов реакции имеют соответствующее распределение гирорадиусов, которое изменяется от минимального значения порядка 1 см до максимального порядка 3 см для ионов - продуктов термоядерного синтеза, имеющих максимальную энергию.

Изначально ионы продуктов термоядерного синтеза имеют продольную, а также вращательную энергию, определяемую $\frac{1}{2}M(v_{\text{par}})^2$ и $\frac{1}{2}M(V_{\text{перп}})^2$. Величина $v_{\text{перп}}$ является азимутальной скоростью, связанной с вращением вокруг силовой линии поля как центра орбиты. Поскольку силовые линии поля расходятся, покидая окрестность топологии FRC, вращательная энергия имеет тенденцию к уменьшению, в то время как общая энергия остается постоянной. Это является следствием адиабатической инвариантности магнитного момента ионов - продуктов термоядерного синтеза. Специалистам в данной области техники хорошо известно, что заряженные частицы, движущиеся по орбитам в магнитном поле, имеют маг-

нитный момент, связанный с их движением. В случае, когда частицы движутся вдоль медленно изменяющегося магнитного поля, также имеет место адиабатический инвариант движения, описываемый выражением $\frac{1}{2}(M(v_{\text{перп}})^2)/B$. Ионы продуктов, движущиеся по орбитам вокруг соответствующих силовых линий поля, имеют магнитный момент и указанный адиабатический инвариант, связанный с их движением. Поскольку B уменьшается примерно в 10 раз (указано расширение слабых линий поля), $v_{\text{перп}}$ также будет уменьшаться примерно в 3,2 раза. Таким образом, к моменту поступления ионов - продуктов в область однородного поля, их вращательная энергия будет составлять менее 5% от их общей энергии. Другими словами, почти вся энергия будет содержаться в продольной составляющей.

Преобразование энергии

Система прямого преобразования энергии по настоящему изобретению содержит обратный циклотронный преобразователь (ICC) 420, показанный на фиг. 22А и 23А, который соединен (как частично показано) с активной зоной 436 термоядерного реактора 420 со встречными пучками (CBFR) для формирования системы 400 выработки электрической энергии из плазмы. Симметрично слева от реактора CBFR 410 может располагаться второй преобразователь ICC (не показан). Между CBFR 410 и ICC 420 может находиться магнитный касп 486, который формируется при слиянии магнитных полей реактора CBFR 410 и преобразователя ICC 420.

Прежде чем подробно описать преобразователь ICC 420 и его работу, рассмотрим работу типового циклотронного ускорителя. В известных циклотронных ускорителях ионы высокой энергии со скоростями, перпендикулярными магнитному полю, вращаются по окружности. Радиус орбиты ионов высоких энергий определяется напряженностью магнитного поля и их отношением заряд-масса, причем этот радиус увеличивается с увеличением энергии. Однако частота вращения ионов не зависит от их энергии. Этот факт использован в конструкции циклотронных ускорителей.

Обратимся к фиг. 24А, где стандартный циклотронный ускоритель 700 включает в себя два зеркально отображенных С-образных электрода 710, образующих зеркально отображенные D-образные полости, находящиеся в однородном магнитном поле 720, силовые линии которого перпендикулярны плоскости симметрии электродов, то есть плоскости страницы. Между С-образными электродами приложено осциллирующее электрическое напряжение (смотри фиг. 21В). С поверхности, расположенной в центре циклотрона 700, имитируются ионы I. Магнитное поле 720 регулируют таким образом, чтобы частота вращения ионов соответствовала частоте изменения электрического напряжения и связанного с ним электрического поля. Если ион I пересекает зазор 730 между С-образными электродами 710 в том же направлении, что электрическое поле, ион ускоряется. Благодаря ускорению иона I его энергия и радиус орбиты увеличиваются. Когда ион пройдет полуокружность (не увеличивая энергию), он снова пересекает зазор 730. Теперь электрическое поле между С-образными электродами 710 изменило свое направление. Ион I вновь ускоряется, и его энергия дополнительно увеличивается. Этот процесс повторяется каждый раз, когда ион пересекает зазор 730, при условии, если его частота вращения продолжает соответствовать частоте осциллирующего электрического поля (смотри фиг. 24С). С другой стороны, если частица пересекает зазор 730, когда электрическое поле имеет противоположное направление, она будет замедляться и вернуться к источнику в центре циклотрона. Ускоряются будут только частицы, у которых первоначальные скорости перпендикулярны магнитному полю 720 и которые пересекают зазор 739 при правильной фазе осциллирующего электрического поля. Таким образом, для ускорения существенным является правильное соответствие фазы.

В принципе, циклотрон можно использовать для извлечения кинетической энергии из острого фокусированного пучка идентичных ионов высокой энергии. Замедление ионов с помощью циклотрона, но без извлечения энергии, наблюдалось для протонов, как описано в работе Bloch and Jeffries в Phys. Rev. 80, 305 (1950). Ионы могут инжектироваться в указанную полость, так чтобы они поступали в фазе замедления относительно осциллирующего поля. Тогда все ионы будут двигаться в обратном направлении по траектории T для ускоряющегося иона, показанной на фиг. 24А. Когда ионы замедляются благодаря взаимодействию с электрическим полем, их кинетическая энергия преобразуется в осциллирующую электрическую энергию в электрической схеме, являющейся частью циклотрона. Таким образом достигается прямое преобразование в электрическую энергию с тенденцией получения очень высокого КПД.

На практике ионы из ионного пучка поступают в циклотрон с всевозможными фазами. Если не компенсировать различающиеся фазы в схеме циклотрона, то половина ионов будет ускоряться, а другая половина - замедляться. В результате максимальный КПД преобразования будет в действительности равен 50%. Кроме того, кольцевые ионные пучки из продуктов термоядерного синтеза, обсужденные выше, имеют неподходящие геометрические характеристики для стандартного циклотрона.

Как более подробно обсуждается ниже, преобразователь ICC по настоящему изобретению приспособляется к кольцевому характеру пучков продуктов термоядерного синтеза, выходящих из активной зоны термоядерного синтеза, а также к случайной относительной фазе ионов в пучке и разбросу их энергий.

Обратимся к фиг. 22А, где слева показана часть активной зоны 436 реактора CBFR 410, где плазменное топливное ядро 435 удерживается в конфигурации FRC 470, частично сформированной благодаря магнитному полю, приложенному внешними катушками 425 возбуждения. Конфигурация FRC 470

содержит замкнутые силовые линии 482 поля, сепаратрису 484 и открытые силовые линии 480 поля, которые, как отмечалось выше, определяют свойства кольцевого пучка 437 продуктов термоядерного синтеза. Открытые силовые линии 480 поля расходятся из активной зоны 436 в направлении магнитного каспа 486. Как отмечалось выше, продукты термоядерного синтеза появляются из активной зоны 436 вдоль открытых силовых линий 480 поля в виде кольцевого пучка 437, содержащего ионы высокой энергии и электроны, нейтрализующие заряд.

Геометрия преобразователя ICC 420 подобна полуму цилиндру длиной порядка пяти метров. Предпочтительно, чтобы цилиндрическая поверхность была сформирована из четырех или более одинаковых полуцилиндрических электродов 494 с малыми прямыми зазорами 497. При работе к электродам 494 попеременно прикладывается осциллирующее напряжение. Электрическое поле E в преобразователе имеет квадрупольную структуру, как показано на виде с торца, представленном на фиг. 22В. Электрическое поле E исчезает на оси симметрии и линейно возрастает с радиусом; причем пиковое значение имеет место в зазоре 497.

Вдобавок, преобразователь ICC 420 включает в себя внешние катушки 488 возбуждения для формирования однородного магнитного поля в геометрии полого цилиндра реактора ICC. Поскольку через катушки 480 возбуждения ICC ток протекает в направлении, противоположном направлению тока, протекающего через катушки 425 возбуждения СВФР, силовые линии 496 поля в преобразователе ICC 420 идут в направлении, противоположном направлению открытых силовых линий 480 поля реактора СВФР 410. На самом дальнем от активной зоны 436 реактора СВФР 410 конце циклотрон ICC 420 включает в себя приемник 492 ионов.

Между СВФР 410 и ICC 420 имеется симметричный магнитный касп 486, где открытые силовые линии 480 реактора СВФР 410 соединяются с силовыми линиями 496 поля ICC 420. Около магнитного каспа 486 расположен приемник 490 электронов кольцевой формы, который электрически соединен с приемником 498 ионов. Как обсуждается ниже, магнитное поле магнитных каспов 486 преобразует аксиальную скорость пучка 437 во вращательную скорость с высокой эффективностью. На фиг. 22С показана типовая орбита 422 иона в преобразователе 420.

Реактор СВФР 410 имеет цилиндрическую симметрию. В его центре находится активная зона 436 термоядерного синтеза с плазменным ядром 435, находящейся в топологии магнитного поля FRC 470, где происходят термоядерные реакции. Как отмечалось выше, ядра продуктов и электроны, нейтрализующие заряд, появляются в виде кольцевых пучков 437 из обоих концов топливной плазмы 435. Например, для проекта реактора мощностью 40 МВт с реакцией $p-B^{11}$ эти пучки будут иметь радиус порядка 50 см и толщину порядка 10 см. Кольцевой пучок имеет плотность $n \approx 10^7-10^8 \text{ см}^{-3}$. Для указанной плотности магнитный касп 486 разделяет электроны и ионы. Электроны следуют по магнитным силовым линиям в приемник 490 электронов, а ионы проходят через касп 486, где их траектории изменяются, следуя фактически по спирали вдоль длины преобразователя ICC 420. Энергия отбирается от ионов, когда они движутся по спирали мимо электродов 494, соединенных с резонансной схемой (не показана). Потери перпендикулярной энергии будут максимальными для ионов с максимальной энергией, которые первоначально циркулируют вблизи электродов 494, где электрическое поле самое сильное.

Ионы поступают в магнитный касп 486 с вращательной энергией, примерно равной начальной общей энергии, то есть

$$\frac{1}{2}Mv_p^2 \approx \frac{1}{2}Mv_0^2.$$

Имеется распределение энергий ионов и начальный радиус r_0 иона, когда ионы достигают магнитного каспа 486. Однако начальный радиус r_0 стремится быть пропорциональным начальной скорости v_0 . Радиальное магнитное поле и радиальная скорость пучка создают силу Лоренца в азимутальном направлении. Магнитное поле в каспе 486 не изменяет энергию частиц, но преобразует начальную аксиальную скорость $v_p \approx v_0$ в остаточную аксиальную скорость v_z и азимутальную скорость v_\perp , где

$$v_0^2 = v_z^2 + v_\perp^2$$

Значение азимутальной скорости v_\perp можно определить из канонического преобразования количества движения.

$$P_\theta = Mr_0 v_\perp - \frac{qB_0 r_0^2}{2c} = \frac{qB_0 r_0^2}{2c} \quad (31)$$

Ион пучка входит в касп 486 с левой стороны с $B_z = B_0$, $v_z = v_0$, $v_\perp = 0$ и $\Gamma = \Gamma_0$. Он появляется с правой стороны каспа 486 с $\Gamma = \Gamma_0$,

$$B_z = -B_0, \quad v_\perp = qB_0 r_0 / Mc \quad \text{и} \quad v_z = \sqrt{v_0^2 - v_\perp^2}$$

$$\frac{v_z}{v_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{r_0 \Omega_0}{v_0} \right)^2} \quad (32)$$

где

$$\Omega_0 = \frac{qB_0}{Mc}$$

частота циклотрона. Частота вращения ионов находится в диапазоне примерно от 1 до 10 МГц и предпочтительно в диапазоне примерно от 5 до 10 МГц, причем при этой частоте имеет место выработка энергии.

Для того чтобы ионы прошли через касп 486, эффективный гирорадиус иона должен быть больше ширины каспа 486 при радиусе r_0 . Экспериментально вполне возможно уменьшить аксиальную скорость в 10 раз, так чтобы остаточная аксиальная энергия уменьшилась в 100 раз. Тогда 99% энергии ионов будет преобразовываться во вращательную энергию. Ионный пучок имеет распределение значений для v_0 и R_0 . Однако, поскольку r_0 пропорционально v_0 , как указывалось ранее, благодаря свойствам реактора на основе FRC, КПД преобразования во вращательную энергию стремится к 99% для всех ионов.

Как показано на фиг. 22В, симметричная электродная структура преобразователя ИСС 420 по настоящему изобретению предпочтительно включает в себя четыре электрода 494. К электродной структуре 494 подсоединен резонансный контур (не показана), так что мгновенные напряжения и электрические поля выглядят так, как показано на этой фигуре. Напряжение и резонансный контур колеблется с частотой $\omega = \Omega_0$. Азимутальное электрическое поле в зазорах 497 показано на фиг. 22В и 25. На фиг. 25 показано электрическое поле в зазорах 497 между электродами 494, и поле, воздействие которого испытывают ионы, когда оно вращается с угловой скоростью Ω_0 . Очевидно, что при полном обороте частица будет испытывать попеременно ускорение и замедление в порядке, определенном начальной фазой. Вдобавок к азимутальному электрическому полю E_θ имеется также радиальное электрическое поле E_r . Азимутальное поле E_θ максимально в зазорах 497 и уменьшается с уменьшением радиуса. На фиг. 22 предполагается, что частицы вращаются, сохраняя постоянный радиус. Из-за градиента электрического поля замедление будет всегда доминировать над ускорением. Фаза ускорения увеличивает радиус иона, так что, когда ион в следующий раз сталкивается с замедляющим электрическим полем, его радиус будет больше. Фаза замедления будет доминирующей независимо от начальной фазы иона, поскольку радиальный градиент азимутального электрического поля E_θ всегда положительный. В результате КПД преобразования энергии не ограничивается 50% из-за проблемы начальной фазы, характерной для стандартных циклотронов. Электрическое поле E_r также играет важную роль. Оно также осциллирует и создает чистое воздействие в радиальном направлении, которое возвращает траекторию пучка к исходному радиусу с нулевой скоростью в плоскости, перпендикулярной оси, как на фиг. 22С.

Процесс, в результате которого ионы всегда замедляются, аналогичен принципу строгой фокусировки, который является существенным признаком современных ускорителей, как описано в патенте США № 2736799. Комбинация положительной (фокусирующей) и отрицательной (дефокусирующей) линзы будет положительной, если магнитное поле имеет положительный градиент. Квадрупольная двойная линза со строгой фокусировкой показана на фиг. 26. Первая линза является фокусирующей в направлении "х" и дефокусирующей в направлении "у". Вторая линза аналогична первой, но имеет противоположные свойства по "х" и "у". Магнитное поле исчезает на оси симметрии и имеет положительный радиальный градиент. Конечным результатом для ионного пучка, проходящего через обе линзы, является фокусировка по всем направлениям независимо от порядка прохождения.

Аналогичные результаты были опубликованы для пучка, проходящего через резонансную полость, содержащую сильное аксиальное магнитное поле и работающую в режиме TE_{111} (смотри Yoshikawa et al.). Это устройство называют "пениотроном" (peniotron). В режиме TE_{111} резонансная полость имеет стоячие волны, в которых электрическое поле обладает квадрупольной симметрией. Результаты имеют качественную аналогию с некоторыми результатами, описанными выше. Имеется количественная разница, состоящая в том, что резонансная полость имеет гораздо больший размер (10 м в длину) и работает с гораздо более высокой частотой (150 МГц) и сильным магнитным полем (10 Т). Для извлечения энергии из высокочастотных волн потребуется антенна со встроенным выпрямителем. Энергетический спектр пучка уменьшает КПД преобразования. Существование ионов двух видов является более серьезной проблемой, но КПД преобразования является подходящим для реактора D-He³, который создает протоны с энергией 15 МэВ.

На фиг. 22С показана единственная орбита 422 для частицы в преобразователе ИСС 420. Этот результат был получен посредством компьютерного моделирования, и аналогичный результат был получен для пениотрона. Ион, поступающий с некоторым радиусом r_0 , движется по спирали вдоль длины преобразователя ИСС и, потеряв начальную вращательную энергию, устремляется в точку на окружности того же радиуса r_0 . Начальные условия являются асимметричными; конечное состояние отражает эту асимметрию, но не зависит от начальной фазы, так что все частицы замедляются. Пучок на конце приемника ионов преобразователя ИСС также является кольцевым и имеет аналогичные размеры. Аксиальная скорость уменьшится в 10 раз, а плотность соответственно возрастает. Для одной частицы можно добиться КПД извлечения энергии, равного 99%. Однако различные факторы, такие как перпендикулярная вращательная энергия кольцевого пучка до его входа в преобразователь, могут снизить этот КПД примерно на 5%. Выделение электрической мощности будет происходить при частоте примерно от 1 до 10 МГц и

предпочтительно примерно от 5 до 10 МГц с дополнительным снижением КПД преобразования из-за необходимости нормализации параметров потока электрической мощности для подсоединения к внешней энергетической сети.

Как показано на фиг. 23А и 23В, альтернативные варианты электродных структур 494 в преобразователе ИСС 420 могут включать в себя два симметричных полукруглых электрода и/или конусообразных электрода 494, которые сужаются в направлении приемника 492 ионов.

Настройки динамических характеристик ионов в главном магнитном поле преобразователя ИСС 420 можно выполнить, используя два набора 500 и 510 кольцевых катушек, как показано на фиг. 27А и 27В. Оба набора 500 и 510 катушек включают в себя соседние проводники с встречными токами, так что магнитные поля имеют малый радиус действия. Градиент магнитного поля, как схематически показано на фиг. 27А, изменяет частоту и фазу вращения иона. Многополюсное магнитное поле, как схематически показано на фиг. 27В, создает группирование частиц, как в линейном ускорителе.

Реактор

На фиг. 28 показан реактор на 100 МВт. На вырезе генератора показана область активной зоны термоядерного синтеза, имеющая сверхпроводящие катушки для приложения однородного магнитного поля и катушку потока для формирования магнитного поля с обращенной топологией. Рядом с противоположными концами активной зоны термоядерного синтеза расположены преобразователи энергии типа ИСС для прямого преобразования кинетической энергии продуктов термоядерного синтеза в электрическую энергию. Оборудование для поддержки указанного реактора показано на фиг. 29.

В частности, на фиг. 29 указаны следующие компоненты:

1 - конденсаторная батарея для индуктивного запуска;

2 - криогенное оборудование для сверхпроводящих магнитов;

3 - ускоритель для инъекции протонов;

4 - ускоритель для инъекции бора;

5 - вакуумные насосы;

6А - электромагнитный насос и теплообменник для бака с литиевым и натрий-калиевым теплоносителем;

6В - паровая турбина и генератор;

7 - выпрямитель;

8 - инвертер;

9 - очертание реактора.

Двигательная система

Исследование солнечной системы (и космического пространства за ее пределами) требует тяговые возможности, которые далеко превосходят лучшие из имеющихся систем на химической или электрической тяге. Для передовых двигательных систем настоящее изобретение дает прекрасную перспективу в отношении простоты конструкции, большого тягового усилия, высокого удельного импульса, высокой удельной плотности энерговыделения, небольшой массы системы, а также возможности использования видов топлива, которые обладают малой радиоактивностью или вообще не радиоактивны.

В двигательной системе на плазменной тяге согласно настоящему изобретению используется высокая кинетическая энергия, присущая продуктам термоядерного синтеза при их аксиальном вытеснении из активной зоны термоядерной плазмы. Система 800 схематически показана на фиг. 30 и 31. Система включает в себя термоядерный реактор с встречными пучками, имеющий активную зону 836 с конфигурацией FRC, в которой находится термоядерное топливное ядро 835, как было описано выше. Реактор дополнительно содержит генератор 825 магнитного поля, токовую катушку (не показана) и инжекторы 840 ионного пучка. Прямой преобразователь 820 энергии типа ИСС, как было описано выше, подсоединен к одному концу активной зоны 836, причем он перехватывает примерно половину частиц продуктов термоядерного синтеза, которые появляются из обоих концов активной зоны 836 в виде кольцевых пучков 837. Как было описано выше, преобразователь ИСС 820 замедляет их благодаря обратному-циклотронному процессу и преобразует их кинетическую энергию в электрическую энергию. Рядом с другим концом активной зоны 836 расположено магнитное сопло 850, которое направляет остальные частицы продуктов термоядерного синтеза в пространство, создавая тягу Т. Кольцевой пучок 837 продуктов термоядерного синтеза выходит из одного конца активной зоны 836 вдоль силовых линий 837 поля в преобразователь ИСС 820 для преобразования энергии и из другого конца активной зоны 836 вдоль силовых линий 837 поля из сопла 850, создавая тягу Т.

Тормозное излучение преобразуется в электрическую энергию термоэлектрическим преобразователем 870 энергии (ТЕС). Энергия тормозного излучения, которая не преобразуется преобразователем ТЕС 870, поступает в тепловой двигатель 880, работающий по циклу Брайтона. Отработанное тепло выводится в космос. Подсистема управления мощностью (810, см. фиг. 32) непрерывно контролирует все источники и приемники электрической и тепловой энергии, поддерживая стабильное функционирование системы и обеспечивая независимый источник энергии (то есть топливные элементы, батареи и т.д.) для активизации работы космического корабля и вывода двигательной системы из нерабочего состояния. Поскольку продукты термоядерного синтеза представляют собой заряженные α -частицы, системе нет

необходимости использовать массивные радиационные и нейтронные экраны, и поэтому она отличается существенно уменьшенной массой по сравнению с другими термоядерными космическими двигательными системами.

Рабочие характеристики двигательной системы 800 на плазменной тяге описываются следующими кинетическими параметрами для приведенной в качестве примера активной термоядерной зоны (100 МВт, реакция $p\text{-D}^{11}$) при использовании конструкции, показанной на фиг. 31:

Удельный импульс, I_{sp}	$1,4 \times 10^6$ с
Тяговая мощность, P_T	50,8 МВт
Тяговая мощность/общая выходная мощность, P_T/P_0	0,51
Тяговое усилие, T	28,1 Н
Тяговое усилие/общая выходная мощность, T/P_0	281 мН/МВт

Система 800 развивает очень высокий удельный импульс, который позволяет обеспечить высокие конечные скорости космического корабля при использовании двигательной системы на плазменной тяге.

Ключевой полетной характеристикой/предельным показателем для всех космических кораблей является масса системы. Главные составляющие массы в двигательной системе 800 на плазменной тяге показаны на фиг. 31 и 32. Для обеспечения стабильной работы зоны 835 термоядерного синтеза требуется примерно 50 МВт инжектированной мощности. Система генерирует примерно 77 МВт ядерной мощности (мощности частиц), половина которой восстанавливается в прямом преобразователе 820 энергии с КПД до 90%. Таким образом, для поддержания работы реактора необходимо иметь дополнительно 11,5 МВт, которые обеспечиваются преобразователем ТЕС 870 и тепловым двигателем 880 Брайтона.

Главным источником тепла в двигательной системе 880 на плазменной тяге является тормозное излучение. Преобразователь ТЕС 870 восстанавливает примерно 20% излучения, или 4,6 МВт, передавая примерно 18,2 МВт в тепловой двигатель 880 Брайтона с замкнутым циклом. Тепловой двигатель 880 Брайтона содержит теплообменник 860, турбогенератор 884, компрессор 882 и радиаторы 886, как показано на фиг. 31. Двигатель 880 Брайтона поставляет остающуюся мощность (7 МВт), необходимую для поддержания работы реактора, а другие 11 МВт сбрасываются радиаторами непосредственно в космическое пространство.

Тепловой двигатель Брайтона с замкнутым циклом является продуманным и эффективным вариантом для преобразования избыточного тепла, сбрасываемого преобразователем ТЕС 870. В двигателях Брайтона максимальная температура цикла ограничена характеристиками материалов, которые ограничивают максимальный КПД термодинамического цикла. На основе стандартной многомерной характеристики двигателя Брайтона можно выделить несколько расчетных точек. Как правило, можно добиться кпд до 60%. Для настоящего случая необходимо восстановить 7 МВт, поэтому при преобразовании отработанного тепла приемлем КПД, составляющий только 40%, и предпочтительно в рамках предельных для стандартных двигателей Брайтона параметров.

Масса по отдельным компонентам для двигателя Брайтона в целом (без тепловых радиаторов) вычисляется на основе удельных массовых параметров, типичных для самых современных промышленных технологий, то есть в диапазоне 3 кг/кВт. Турбогенераторы, включая компрессоры, силовые турбины и теплообменники, объединяются в подсистему с общей массой 18 метрических тонн.

Масса радиатора оценивается примерно в 6 метрических тонн, с предпочтительным использованием панелей с теплоотводящими трубками с теплопроводностью, отвечающей современному техническому уровню.

Причиной значительной массы системы также являются магниты 825, удерживающие плазменное ядро 835. Сверхпроводящие магнитные катушки 825 предпочтительно выполняются из Nb3Sn, которые стабильно работают при температуре 4,5 К и напряженности поля 12,5-13,5 Т. Криогенные требования к Nb3Sn менее жесткие, чем для других рассматриваемых материалов. С учетом требования к напряженности магнитного поля (7 Тесла) и длине устройства (примерно 7,5 метров) требуется катушка с 1500 витками провода, несущая ток 56 кА. При использовании проводов радиусом 0,5 см общая масса катушки составит примерно 3097 кг. Система охлаждения жидким гелием содержит два насоса, по одному на каждом конце основной катушки. Общая масса этих насосов составляет примерно 60 кг. В качестве опоры для магнитов и всех внутренних компонентов снаружи используется внешняя конструктивная оболочка. Она выполняется из композита кевлар/углерод-углерод толщиной 0,01 м с общей массой порядка 772 кг. Самый внешний слой представляет собой изоляционную оболочку для экранирования внутренних частей от больших изменений температуры в космическом пространстве, масса которой оценивается величиной 643 кг. Таким образом, общая масса подсистемы 825 магнитов составляет примерно 4,8 метрической тонны.

В настоящее время наиболее подходящей системой 840 инъекции для космических систем является индукционный линейный ускоритель, или RFQ. Примерно 15 лет назад ускоритель RFQ летал на научно-исследовательской ракете и успешно продемонстрировал возможность использования энергии высокого напряжения и инъекции ионных пучков в космическое пространство. В предпочтительном варианте

шесть инжекторов 840 распределены вдоль длины реактора СВFR по три для каждого вида ионов. Каждый инжектор 840 предпочтительно представляет собой ускоритель RFQ с 30 составляющими пучками общим размером 0,3 м в длину и радиусом 0,020 м. Для каждого инжектора требуется источник ионов, предпочтительно длиной 0,02 м и радиусом 0,020 м, который подает ионизированный водород в прибор. Для каждого ускорителя требуется один источник.

Предпочтительно, чтобы инжектор и источник удовлетворяли достигнутым на сегодняшний день предельным параметрам; с учетом необходимой доводки для использования в космосе их общая масса, включая источники и ускорители, должна составлять примерно 60 кг.

Прямой преобразователь 820 энергии ИСС конусообразной формы находится на одном конце реактора 836 и предпочтительно выполняется из нержавеющей стали. При базовом радиусе 0,5 м и длиной 2 метра масса ИСС составит примерно 1690 кг. RF источник 820 питания (инвертор/конвертор) восстанавливает направленный поток ионов, преобразуя его в электрическую мощность. Масса источника питания составляет примерно 30 кг. Для запуска/перезапуска реактора СВFR используют аккумуляторную батарею 812. Ее емкость составляет примерно 30 МДж, а масса - примерно 500 кг. В альтернативном варианте можно также использовать топливный элемент. Дополнительные блоки управления координируют работу всех указанных компонент. Масса подсистемы управления оценивается величиной 30 кг. Таким образом, общая масса подсистемы преобразователя энергии/стартера оценивается величиной порядка 2,25 метрической тонны.

Магнитное сопло 850 находится на другом конце термоядерного топливного ядра 835. Сопло 850 фокусирует поток продуктов термоядерного синтеза в виде направленного потока частиц. По оценкам массы магнитного сопла и преобразователя ИСС примерно равны, поскольку и тот и другой содержат сверхпроводящие магниты и относительно легкие конструктивные компоненты.

Преобразователь ТЕС 870 восстанавливает энергию из электромагнитного излучения термоядерного топливного ядра. Он предпочтительно представляет собой тонкопленочную структуру, выполненную из бор-карбида/кремний-германия толщиной 0,02 см, с плотностью порядка 5 г/см³. Преобразователь ТЕС 870 расположен у первой стенки и предпочтительно полностью простирается вдоль внутренней поверхности активной зоны реактора; масса преобразователя ТЕС 870 оценивается величиной порядка 400 кг. Поток излучения на преобразователь ТЕС 870 составляет 1,2 МВт/м², и предполагается, что пиковая рабочая температура составит менее 1800 К.

Таким образом, общая масса двигательной системы на плазменной тяге оценивается величиной порядка 33 метрических тонн. Это определяет остальные полетные критические параметры для обсуждаемого блока мощностью 100 МВт:

Общая масса/общая мощность, M_T/P_0	$0,33 \times 10^{-3}$ кг/Вт
Тяговое усилие/масса, T/M_T	$0,85 \times 10^{-3}$ Н/кг

Хотя изобретение чувствительно к различным модификациям и альтернативным вариантам, здесь со ссылками на чертежи был подробно показан и описан конкретный пример его осуществления. Однако следует понимать, что изобретение не ограничивается раскрытым здесь конкретным вариантом, а наоборот, оно покрывает все модификации, эквиваленты и альтернативные варианты, не выходящие за рамки сущности и объема прилагаемой формулы изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система генерации плазмы, содержащая ударную катушку, имеющую кольцевой корпус в виде диска, окруженный внешним кольцом, сформированным по внешней периферии упомянутого корпуса, и кольцевую втулку, сформированную по внутренней периферии упомянутого корпуса, и катушку из параллельно намотанных проводов, прикрепленных к лицевой стороне упомянутого корпуса, и

сопло Лавала для введения газа в ударную катушку, при этом сопло имеет кольцевой корпус сопла в виде диска, соединенный по внутренней периферии упомянутого корпуса сопла со втулкой и формирующий со втулкой по внешней периферии упомянутого корпуса сопла радиально ориентированное кольцевое выпускное отверстие сопла, расположенное рядом с внутренней периферией упомянутого корпуса ударной катушки, причем упомянутое сопло ориентировано для радиального распределения газа по поверхности упомянутой катушки от внутренней к внешней периферии упомянутого корпуса ударной катушки таким образом, что, когда газ распределяется по поверхности упомянутой катушки и на катушку подается питание, кольцевая плазма эжектируется с поверхности ударной катушки.

2. Система генерации плазмы по п.1, в которой катушка из параллельно намотанных проводов является одновитковой катушкой.

3. Система генерации плазмы по п.2, в которой катушка из параллельно намотанных проводов является многожильной катушкой.

4. Система генерации плазмы по п.2, в которой провода катушки начинаются рядом с внешним радиусом упомянутого корпуса в разнесенных по углу точках и охватывают по окружности лицевую сто-

рону корпуса одним витком, заканчиваясь у внутреннего радиуса корпуса.

5. Система генерации плазмы по п.4, в которой провода катушки начинаются с периметра корпуса.

6. Система генерации плазмы по п.1, в которой лицевая сторона корпуса сопла, обращенная к втулке, образует газосборник кольцевой формы и сужающееся-расширяющееся сопло с лицевой стороной втулки.

7. Система генерации плазмы по п.6, дополнительно содержащая множество газовых каналов, сформированных во втулке и связанных с газосборником.

8. Система генерации плазмы по п.7, дополнительно содержащая кольцо седел клапана, имеющее множество седел клапана, выровненных относительно множества газовых каналов.

9. Система генерации плазмы по п.1, дополнительно содержащая колпак, соединенный с упомянутым внешним кольцом.

10. Система генерации плазмы по п.1, в которой ударная катушка выполнена с возможностью активизации проводов синхронно.

11. Система генерации плазмы по п.1, в которой провода сгруппированы во множество групп проводов, которые являются азимутально симметричными относительно поверхности ударной катушки.

12. Способ генерации плазмы, содержащий распределение нейтрального газа по катушке из параллельно намотанных проводов ударной катушки с низкой индуктивностью, при этом ударная катушка имеет кольцевой корпус в виде диска, окруженный внешним кольцом, сформированным по внешней периферии упомянутого корпуса, и кольцевую втулку, сформированную по внутренней периферии упомянутого корпуса, причем параллельно намотанные провода упомянутой катушки прикреплены к лицевой стороне упомянутого корпуса, при этом нейтральный газ распределяется из сопла Лавалья, при этом сопло содержит кольцевой корпус сопла в виде диска, соединенный по внутренней периферии упомянутого корпуса сопла со втулкой и формирующий со втулкой по внешней периферии упомянутого корпуса сопла радиально ориентированное кольцевое выпускное отверстие сопла, расположенное рядом с внутренней периферией упомянутого корпуса ударной катушки, причем упомянутое сопло ориентировано для радиального распределения газа по поверхности упомянутой катушки от внутренней к внешней периферии упомянутого корпуса ударной катушки; подачу питания на ударную катушку для питания упомянутой катушки из параллельно намотанных проводов и

ионизацию газа для формирования плазмы.

13. Способ по п.12, в котором этап подачи питания на ударную катушку включает в себя эжекцию сформированной плазмы из ударной катушки.

14. Способ по п.12, в котором подача питания на катушку включает в себя подачу питания на все провода катушки.

15. Способ по п.12, в котором подача питания на катушку включает в себя подачу питания на первый набор проводов и подачу питания на второй набор проводов после заранее определенного промежутка времени.

16. Способ по п.13, в котором эжекция плазмы включает в себя эжекцию плазмы кольцевой формы.

17. Система выработки электрической энергии из плазмы, содержащая камеру, имеющую главную ось; первый генератор магнитного поля для создания азимутально симметричного магнитного поля в центральной области камеры с потоком, в основном параллельным главной оси камеры;

генератор плазмы, содержащий ударную катушку и сопло Лавалья, расположенные в камере, при этом ударная катушка имеет кольцевой корпус в виде диска, окруженный внешним кольцом, сформированным по внешней периферии упомянутого корпуса, и кольцевую втулку, сформированную по внутренней периферии упомянутого корпуса, причем параллельно намотанные провода упомянутой катушки прикреплены к лицевой стороне упомянутого корпуса, при этом нейтральный газ распределяется из сопла Лавалья, при этом сопло содержит кольцевой корпус сопла в виде диска, соединенный по внутренней периферии упомянутого корпуса сопла со втулкой и формирующий со втулкой по внешней периферии упомянутого корпуса сопла радиально ориентированное кольцевое выпускное отверстие сопла, расположенное рядом с внутренней периферией упомянутого корпуса ударной катушки, причем упомянутое сопло ориентировано для радиального распределения газа по поверхности упомянутой катушки от внутренней к внешней периферии упомянутого корпуса ударной катушки, причем когда газ распределяется по поверхности упомянутой катушки и на катушку подают питание и катушка запитывается, кольцевая плазма эжектируется из поверхности упомянутой катушки; и

катушку, несущую ток, концентрически расположенную относительно главной оси камеры, для создания азимутального электрического поля в камере.

18. Система по п.17, в которой камера содержит цилиндрическую стенку камеры, имеющую первый и второй концы, и множество изолирующих разрывов, идущих аксиально вдоль стенки камеры с оставленными промежутками до первого и второго концов.

19. Система по п.17, в которой катушка из параллельно намотанных проводов является одновитковой катушкой.

20. Система по п.19, в которой провода катушки начинаются у внешнего радиуса упомянутого корпуса в разнесенных по углу точках и охватывают по окружности лицевую сторону корпуса одним витком, заканчиваясь у внутреннего радиуса корпуса.

21. Система по п.20, в которой провода катушки начинаются с периметра корпуса.

22. Система по п.17, в которой лицевая сторона корпуса сопла, обращенная к втулке, образует газосборник кольцевой формы и сужающееся-расширяющееся сопло с лицевой стороной втулки.

23. Система по п.22, дополнительно содержащая множество газовых каналов, сформированных во втулке и связанных с газосборником.

24. Система по п.23, дополнительно содержащая кольцо седел клапана, имеющее множество седел клапана, выровненных относительно множества газовых каналов.

25. Система по п.17, дополнительно содержащая колпак, соединенный с внешним кольцом.

26. Система по п.17, дополнительно содержащая систему преобразования энергии в камере.

27. Система по п.26, в которой система преобразования энергии содержит множество полуцилиндрических электродов, образующих цилиндрическую поверхность в первой концевой области камеры.

28. Система по п.27, в которой множество электродов содержит более двух разнесенных электродов с формированием зазора между соседними электродами.

29. Система по п.28, дополнительно содержащая второй генератор магнитного поля для создания азимутально симметричного магнитного поля в первой концевой области камеры с потоком, в основном параллельным главной оси камеры, приемник электронов, установленный между первым и вторым генераторами магнитного поля и рядом с первым концом множества электродов, и приемник ионов, расположенный рядом со вторым концом множества электродов.

30. Система по п.29, дополнительно содержащая второе множество полуцилиндрических электродов, образующих цилиндрическую поверхность во второй концевой области камеры, причем второе множество электродов содержит более двух разнесенных электродов с формированием зазора между соседними электродами,

третий генератор магнитного поля для создания азимутально симметричного магнитного поля во второй концевой области камеры с потоком, в основном параллельным главной оси камеры,

второй приемник электронов, установленный между первым и третьим генераторами магнитного поля и рядом с первым концом второго множества электродов, и второй приемник ионов, расположенный рядом со вторым концом второго множества электродов.

31. Система по п.30, дополнительно содержащая инжекторы ионного пучка, соединенные с резервуаром.

32. Система по п.31, в которой инжекторы ионного пучка включают в себя средство для нейтрализации электрического заряда ионных пучков, эмитируемых инжекторами.

33. Способ формирования в камере магнитного поля, имеющего обращенную конфигурацию, содержащий

создание направляющего магнитного поля в камере,

распределение нейтрального газа по катушке из параллельно намотанных проводов ударной катушки с низкой индуктивностью, при этом ударная катушка имеет кольцевой корпус в виде диска, окруженный внешним кольцом, сформированным по внешней периферии упомянутого корпуса, и кольцевую втулку, сформированную по внутренней периферии упомянутого корпуса, причем параллельно намотанные провода упомянутой катушки прикреплены к лицевой стороне упомянутого корпуса, при этом нейтральный газ распределяется из сопла Лавала, при этом сопло содержит кольцевой корпус сопла в виде диска, соединенный по внутренней периферии упомянутого корпуса сопла со втулкой и формирующий со втулкой по внешней периферии упомянутого корпуса сопла радиально ориентированное кольцевое выпускное отверстие сопла, расположенное рядом с внутренней периферией упомянутого корпуса ударной катушки, причем упомянутое сопло ориентировано для радиального распределения газа по поверхности упомянутой катушки от внутренней к внешней периферии упомянутого корпуса ударной катушки таким образом, что, когда газ распределяется по поверхности упомянутой катушки и на катушку подают питание и катушка запитывается, кольцевая плазма эжектируется из поверхности упомянутой катушки;

подачу питания на ударную катушку для запитывания упомянутой катушки с параллельно намотанными проводами для ионизации газа для формирования плазмы;

эжекцию сформированной плазмы из ударной катушки в камеру вдоль силовых линий упомянутого направляющего поля;

создание азимутального электрического поля в камере, заставляющего плазму вращаться с формированием полоидального собственного магнитного поля, окружающего плазму;

увеличение вращательной энергии плазмы для увеличения величины собственного поля до уровня, который превышает величину направляющего поля, и

объединение силовых линий управляющего направляющего поля и собственного поля в магнитное поле, имеющее топологию с обращенной конфигурацией поля (FRC).

34. Способ по п.33, в котором подача питания на катушку включает в себя подачу питания на все

провода катушки.

35. Способ по п.33, в котором подача питания на катушку включает в себя подачу питания на первый набор проводов и подачу питания на второй набор проводов после заранее определенного промежутка времени.

36. Способ по п.34, в котором эжекция плазмы включает в себя эжекцию плазмы кольцевой формы.

37. Способ по п.33, в котором создание направляющего поля включает в себя подачу питания на множество катушек возбуждения и зеркальных катушек, идущих около камеры.

38. Способ по п.33, дополнительно содержащий увеличение величины направляющего поля для поддержания вращающейся плазмы заранее определенного радиального размера.

39. Способ по п.33, в котором создание азимутального электрического поля включает в себя подачу питания на катушку бетатронного потока в камере и увеличение тока, протекающего через катушку.

40. Способ по п.39, в котором увеличение вращательной энергии вращающейся плазмы включает в себя увеличение скорости изменения тока, протекающего через катушку.

41. Способ по п.40, дополнительно содержащий увеличение скорости изменения тока, протекающего через катушку потока, для ускорения вращающейся плазмы до вращательной энергии уровня термоядерного синтеза.

42. Способ по п.33, дополнительно содержащий создание электростатической ямы в камере.

43. Способ по п.42, дополнительно содержащий регулировку электростатической ямы.

44. Способ по п.43, в котором регулировка электростатической ямы включает в себя манипулирование величиной направляющего поля.

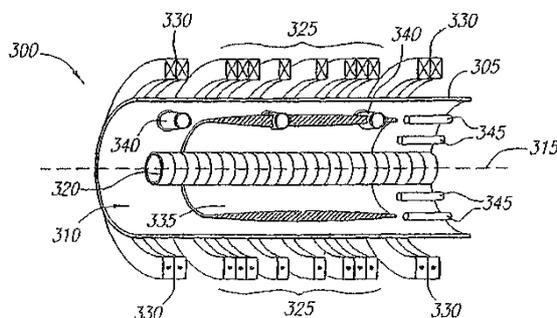
45. Способ по п.41, дополнительно содержащий инъекцию ионных пучков с энергией уровня термоядерного синтеза в FRC и захват пучков на бетатронные орбиты в FRC.

46. Способ по п.45, в котором инъекция и захват ионных пучков дополнительно содержит нейтрализацию ионных пучков, снятие электрической поляризации из нейтрализованных ионных пучков и приложение силы Лоренца, благодаря приложенному магнитному полю, к нейтрализованным нейтронным пучкам для изгибания ионных пучков в бетатронные орбиты.

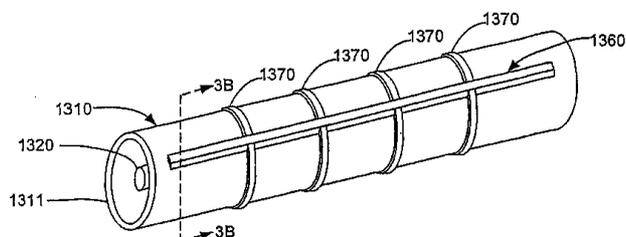
47. Способ по п.45, дополнительно содержащий магнитное удержание ионов в FRC и электростатическое удержание электронов в электростатической яме.

48. Способ по п.47, дополнительно содержащий формирование ионов - продуктов термоядерного синтеза.

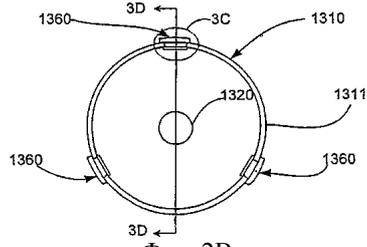
49. Способ по п.48, дополнительно содержащий вывод ионов - продуктов термоядерного синтеза из FRC в кольцевом пучке.



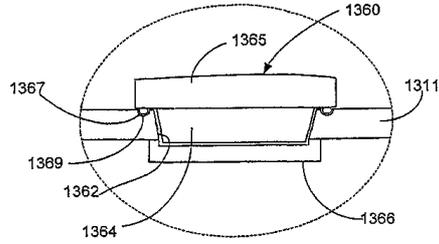
Фиг. 1



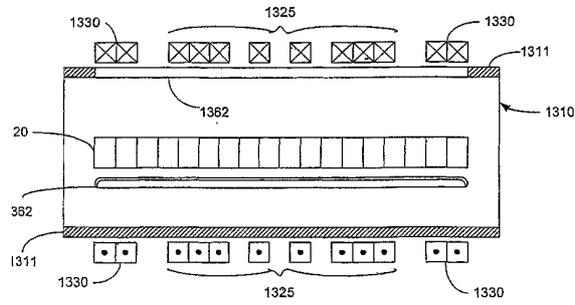
Фиг. 2А



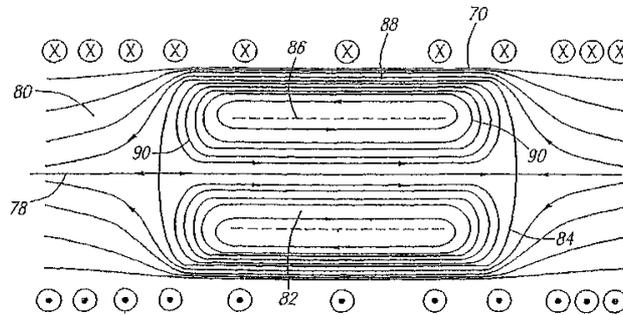
Фиг. 2В



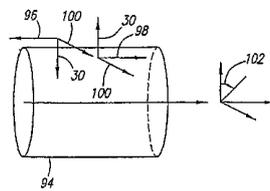
Фиг. 2С



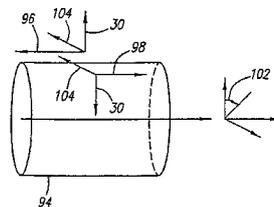
Фиг. 2D



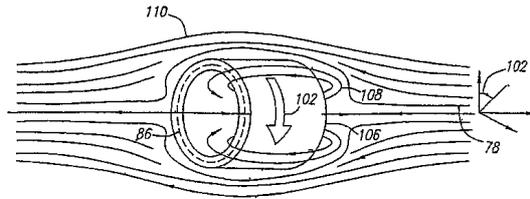
Фиг. 3



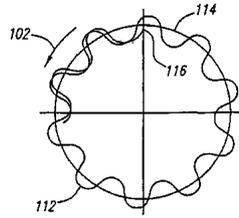
Фиг. 4А



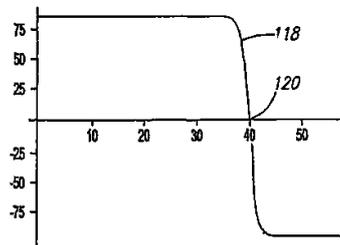
Фиг. 4В



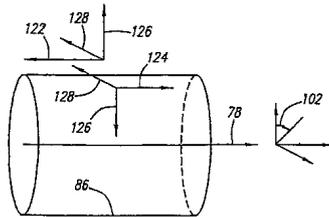
Фиг. 5



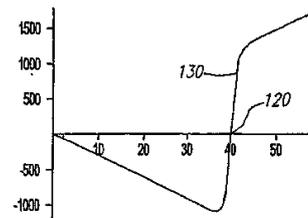
Фиг. 6



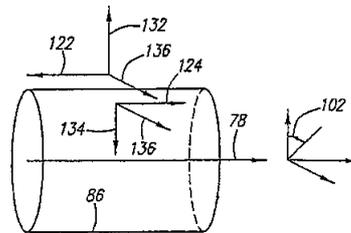
Фиг. 7А



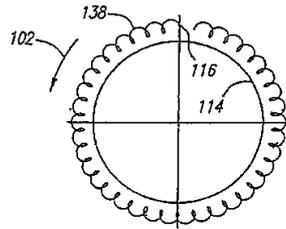
Фиг. 7В



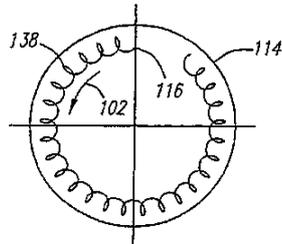
Фиг. 8А



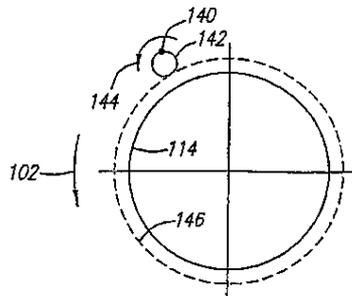
Фиг. 8В



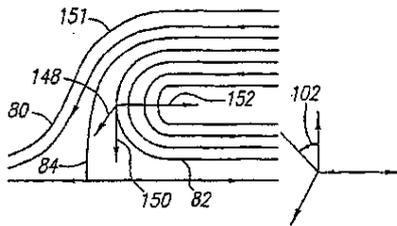
Фиг. 9А



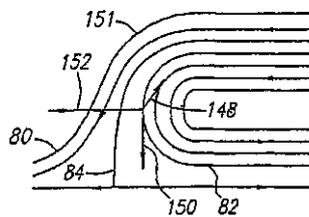
Фиг. 9В



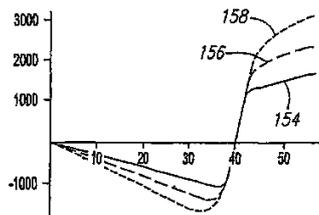
Фиг. 9С



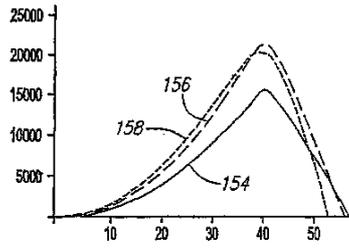
Фиг. 10А



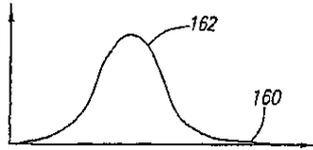
Фиг. 10В



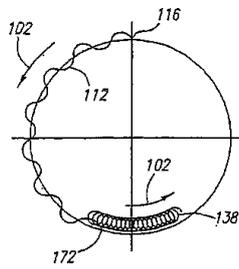
Фиг. 11А



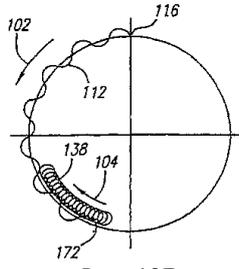
Фиг. 11В



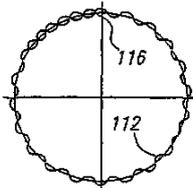
Фиг. 12



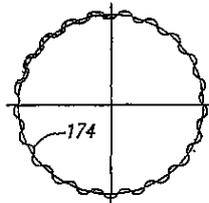
Фиг. 13А



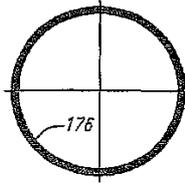
Фиг. 13В



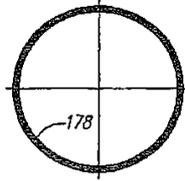
Фиг. 14А



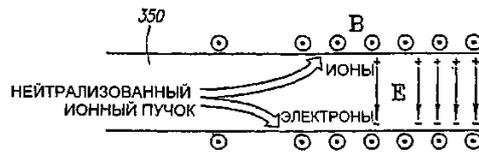
Фиг. 14В



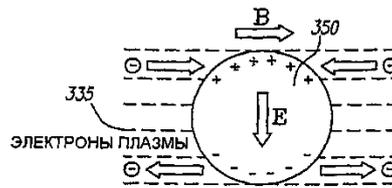
Фиг. 14С



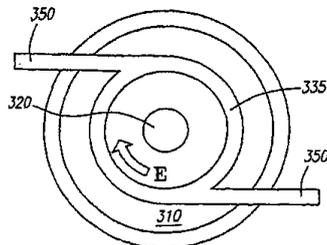
Фиг. 14D



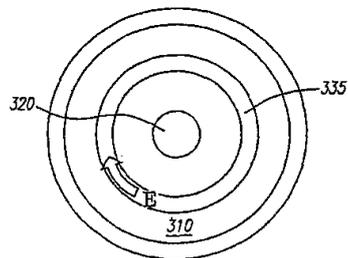
Фиг. 15



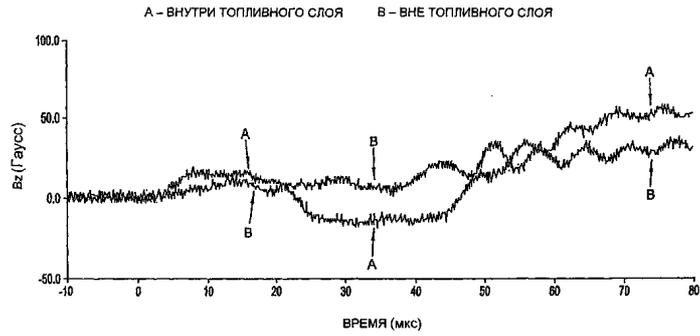
Фиг. 16



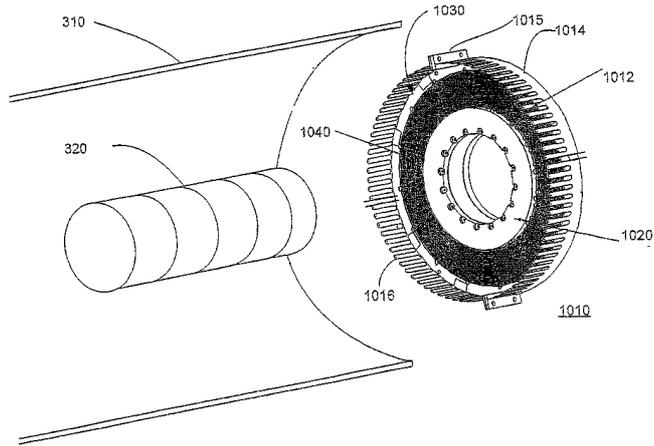
Фиг. 17



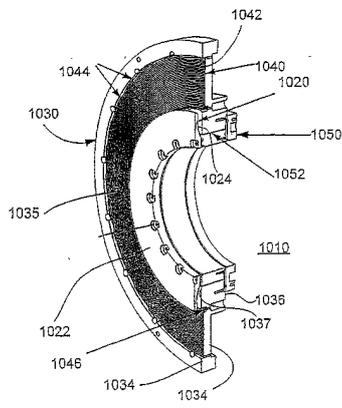
Фиг. 18



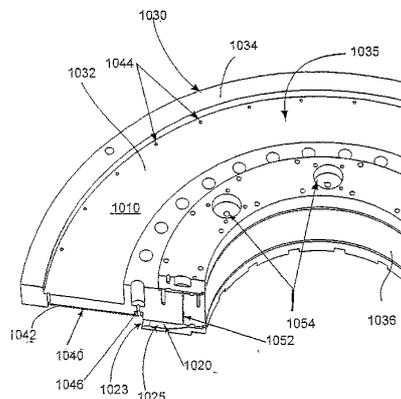
Фиг. 19



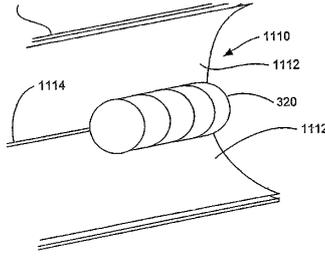
Фиг. 20А



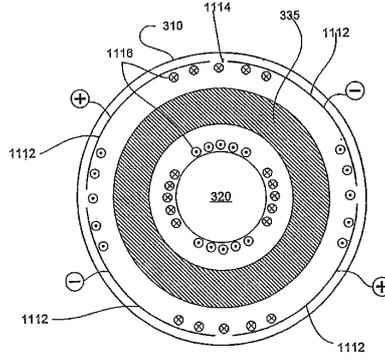
Фиг. 20В



Фиг. 20С



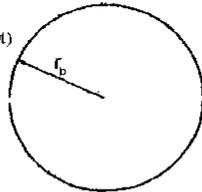
Фиг. 21А



Фиг. 21В

ДИПОЛЬНЫЙ ЦИКЛОТРОН

$$\delta\Phi(r_0, \theta; t) = -V_0 \cos(\omega t) \quad 0 \leq \theta \leq \pi$$

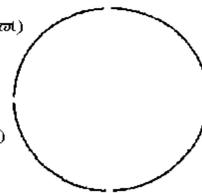


$$\delta\Phi(r_0, \theta; t) = V_0 \cos(\omega t) \quad \pi \leq \theta \leq 2\pi$$

$$\Phi_1(r, \theta; t) = (2V_0/\pi)(r/r_0) [\sin(\omega t + \theta) - \sin(\omega t - \theta)]$$

КВАДРУПОЛЬНЫЙ ЦИКЛОТРОН

$$\delta\Phi(r_0, \theta; t) = -V_0 \cos(\omega t) \quad \pi/2 \leq \theta \leq \pi$$



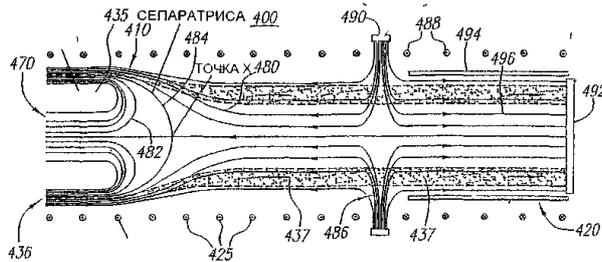
$$\delta\Phi(r_0, \theta; t) = V_0 \cos(\omega t) \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$\delta\Phi(r_0, \theta; t) = V_0 \cos(\omega t) \quad \pi \leq \theta \leq 3\pi/2$$

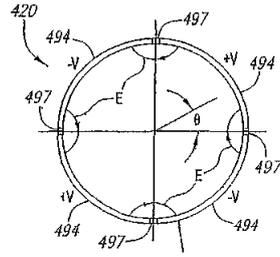
$$\delta\Phi(r_0, \theta; t) = -V_0 \cos(\omega t) \quad 3\pi/2 \leq \theta \leq 2\pi$$

$$\Phi_1(r, \theta; t) = (2V_0/\pi)(r/r_0)^2 [\sin(\omega t + 2\theta) - \sin(\omega t - 2\theta)]$$

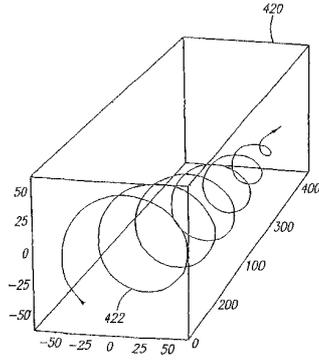
Фиг. 21С



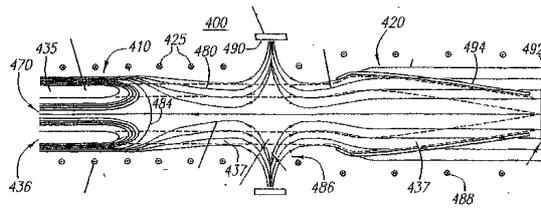
Фиг. 22А



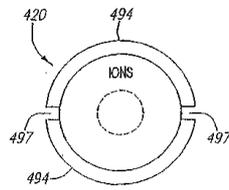
Фиг. 22В



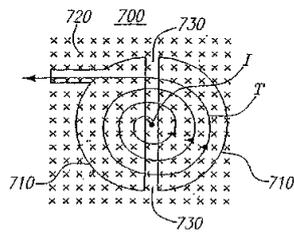
Фиг. 22С



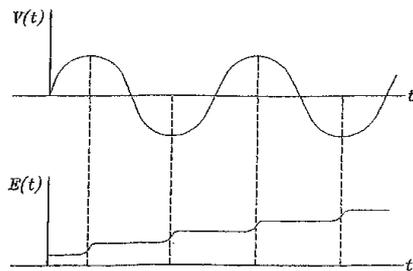
Фиг. 23А



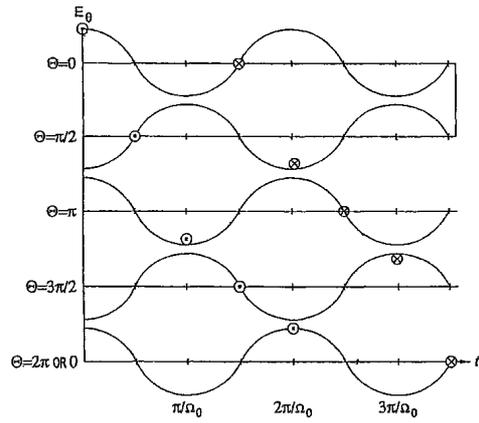
Фиг. 23В



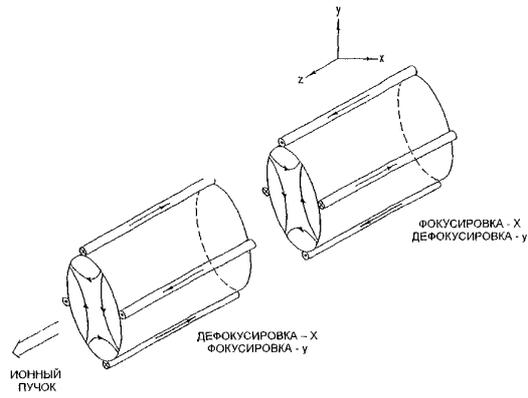
Фиг. 24А



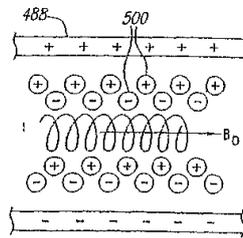
Фиг. 24В и 24С



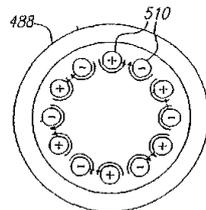
Фиг. 25



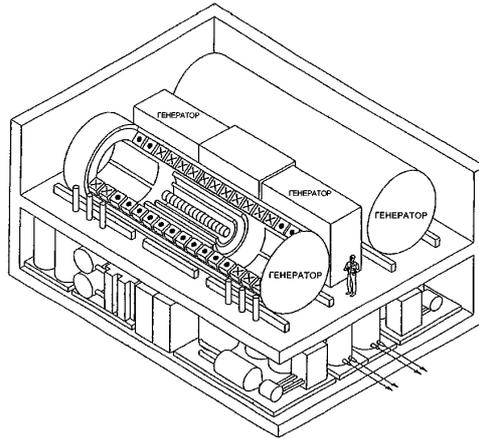
Фиг. 26



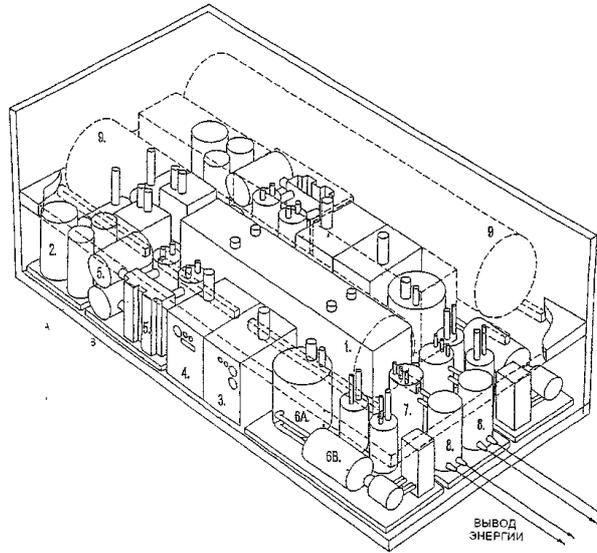
Фиг. 27А



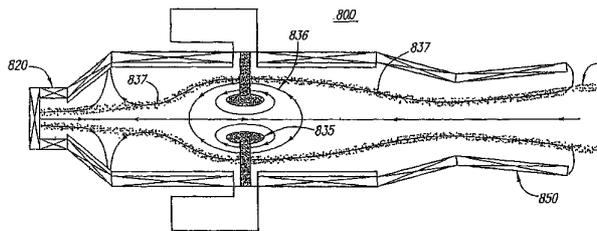
Фиг. 27В



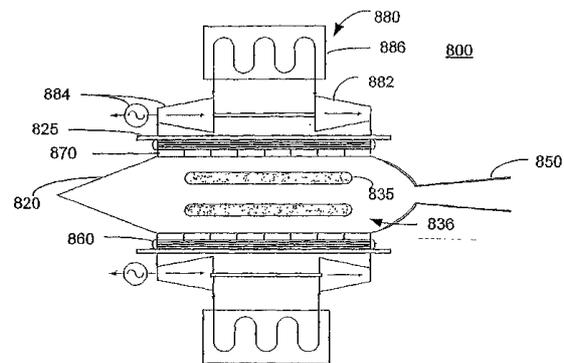
Фиг. 28



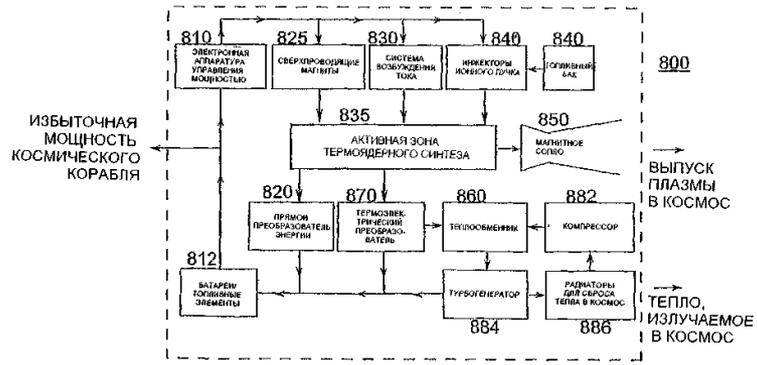
Фиг. 29



Фиг. 30



Фиг. 31



Фиг. 32

