

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202391422 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2023.07.25

(22) Дата подачи заявки  
2021.11.09

(51) Int. Cl. *H05H 1/02* (2006.01)  
*H05H 1/16* (2006.01)  
*G21B 1/05* (2006.01)  
*G21B 1/15* (2006.01)

(54) СИСТЕМА, УСТРОЙСТВА И СПОСОБЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА

(31) 63/111,446

(32) 2020.11.09

(33) US

(86) PCT/US2021/058601

(87) WO 2022/099189 2022.05.12

(71) Заявитель:

ТАЭ ТЕКНОЛОДЖИЗ, ИНК. (US)

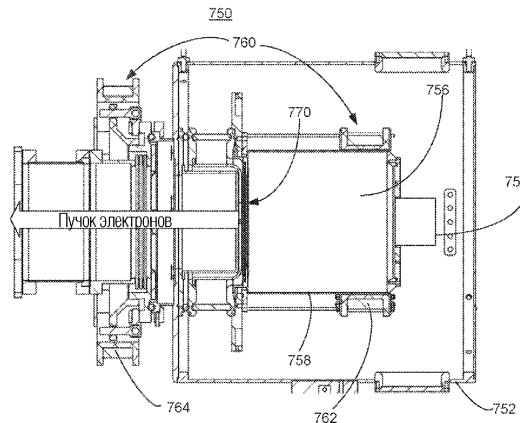
(72) Изобретатель:

Ткачев Антон, Корепанов Сергей (US)

(74) Представитель:

Медведев В.Н. (RU)

(57) Длинно-импульсный пучок электронов с высоким уровнем мощности с плазменными эмиттерами для плазменного нагрева. Пучок электронов включает в себя дуговой плазменный источник, электронно-оптическую систему, содержащую систему ускоряющих сеток, линию движения пучка, которая включает в себя магнитную систему, чтобы обеспечивать эффективное формирование, транспортировку и, в конечном счете, инжекцию пучка электронов в представляющее интерес устройство удержания плазмы, катушку плазменного генератора, катушку плазменного эмиттера, катушку линзы и катушку для транспортировки пучка.



202391422

A1

A1

202391422

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-578121EA/030

### СИСТЕМА, УСТРОЙСТВА И СПОСОБЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА

#### ПЕРЕКРЕСТНЫЕ ССЫЛКИ НА РОДСТВЕННЫЕ ЗАЯВКИ

[0001] Настоящая заявка притязает на приоритет предварительной заявки на патент (США) номер 63/111446, поданной 9 ноября 2020 года, которая полностью включена в данный документ по ссылке для всех целей.

#### ОБЛАСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0002] Варианты осуществления, описанные в данном документе, в целом, относятся к пучкам электронов, а более конкретно, к системам, устройствам и способам для получения длинно-импульсного пучка электронов с высоким уровнем мощности с помощью плазменного эмиттера, которые упрощают плазменный нагрев.

#### ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0003] Конфигурация с обращенным полем (FRC) принадлежит классу топологий магнитного удержания плазмы, известных как компактные тороиды (КТ). Она демонстрирует преимущественно полоидальные магнитные поля и обладает нулевыми или малыми самогенерируемыми тороидальными полями (см. M. Tuszewski, Nucl. Fusion, 28, 2033 (1988)). Преимуществами такой конфигурации являются ее простая геометрия для удобства построения и обслуживания, естественный неограниченный дивертор для облегчения вывода энергии и золоудаления и очень высокий  $\beta$  ( $\beta$  - это отношением среднего давления плазмы к среднему давлению магнитного поля внутри FRC), т.е. высокая плотность энергии. Природа высокого  $\beta$  является преимущественной для экономичной работы и для использования передовых анейтронных видов топлива, таких как D-He<sup>3</sup> и p-B<sup>11</sup>.

[0004] Традиционный способ формирования FRC использует технологию  $\theta$ -пинча с обращенным полем, производящую горячие высокоплотные плазмы (см. A. L. Hoffman и J. T. Slough, Nucl. Fusion, 33, 27 (1993)). Разновидностью этого является *способ переноса и захвата*, при осуществлении которого плазму, созданную в «источнике» тета-пинча, в большей или меньшей степени немедленно инжектируют из одного торца в камеру удержания. Потом осуществляют захват переносимого плазмоида между двумя прочными зеркалами на торцах камеры (см., например, H. Nimura, S. Okada, S. Sugimoto и S. Goto, Phys. Plasmas, 2, 191 (1995)). При его нахождении в камере удержания, могут применяться различные способы нагрева и возбуждения тока, такие как инжекция пучка (нейтральных или нейтрализованных частиц), вращающиеся магнитные поля, нагрев токами высокой частоты или омический нагрев и т.д. Это разделение функций источника и удержания дает ключевые инженерные преимущества для потенциальных будущих реакторов термоядерного синтеза. FRC доказали свою исключительную надежность, устойчивость к динамическому формированию, переносу и интенсивным событиям захвата. Более того, они демонстрируют тенденцию допускать предпочтительное состояние плазмы (см.,

например, H. Y. Guo, A. L. Hoffman, K. E. Miller и L. C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett., 92, 245001 (2004)). За последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в развитии других способов формирования FRC: посредством слияния сфероматов с противоположно направленными спиральностями (см., например, Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama и T. Okazaki, Nucl. Fusion, 39, 2001 (1999)) и посредством возбуждения тока вращающимися магнитными полями (ВМП) (см., например, I. R. Jones, Phys. Plasmas, 6, 1950 (1999)), который также обеспечивает дополнительную устойчивость.

[0005] Недостаток предшествующих конструктивных решений для FRC-систем заключается в отсутствии эффективных режимов нагрева электронов, за исключением инъекции пучка нейтральных частиц, которая имеет тенденцию иметь плохую эффективность электронного нагрева вследствие механизма демпфирования энергии на электронах через ионно-электронное столкновение. Один подход к электронному нагреву плазм заключается в использовании пучков электронов. Эффективный электронный нагрев с помощью пучков электронов в FRC-системах требует длинно-импульсного пучка электронов с высоким уровнем мощности.

[0006] Сложности в создании длинно-импульсного пучка электронов с высоким уровнем мощности главным образом связаны с деградацией катода и существенными эффектами пространственного заряда пучка, получающимися в результате высокого первенса пучка. Во многих предшествующих вариантах применения катод изготавливается либо из твердого материала, либо из системы сетчатых электродов, формирующих так называемый плазменный эмиттер. В обоих случаях, возникает проблема интенсивных тепловых потоков вследствие бомбардировки активной поверхности катода высокоэнергетическими частицами. Эффекты пространственного заряда пучка могут приводить к тому, что огибающая пучка быстро расширяется или сжимается с расстоянием. Когда не предпринимаются дополнительные меры, поведение огибающей пучка также становится чрезвычайно чувствительным к окружающим газовым условиям вдоль линии движения пучка, что приводит к фактической невозможности управлять распространением и транспортировкой пучка к конечному назначению.

[0007] Для целей плазменного нагрева в конфигурациях с открытым удержанием плазмы инъекция пучка электронов может быть осуществлена вдоль оси симметрии установки для удержания плазмы, что вызывает сопутствующую проблему транспортировки пучка через магнитную пробку в область удержания. Это налагает определенное число специальных требований на магнитную систему пучка электронов, а также на магнитную систему устройства-плазменного генератора (пучка).

[0008] Как отмечено выше, основные недостатки подходов уровня техники заключаются в деградации катода, которая приводит к низкой длительности импульса и низкому току пучка. Катод, изготовленный из твердых материалов, не может противостоять высокоэнергетическим потокам, связанным с нагревом и бомбардировкой частицами. Следовательно, в подходах уровня техники длительность импульса обычно ограничивается ~100 микросекундами. По той же причине число рабочих циклов также ограничивается

~100-1000 импульсами до того, как требуется смена катода.

[0009] Дополнительно, в подходах уровня техники плотность тока пучка и в силу этого пространственный заряд пучка поддерживаются на относительно небольших значениях, чтобы иметь возможность пренебрегать эффектами пространственного заряда при конструировании линии движения пучка и во время транспортировки пучка.

[0010] Требуется усовершенствованные системы, устройства и способы, которые содействуют реализации длинно-импульсных пучков электронов с высоким уровнем мощности с помощью плазменных эмиттеров для плазменного нагрева.

#### СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0011] Примерные варианты осуществления систем, устройств и способов предусмотрены в данном документе для того, чтобы генерировать длинно-импульсные пучки электронов с высоким уровнем мощности с помощью плазменных эмиттеров для плазменного нагрева плазмы FRC. В примерных вариантах осуществления пучок электронов включает в себя дуговой плазменный источник, электронно-оптическую систему, содержащую систему ускоряющих сеток, линию движения пучка, которая включает в себя магнитную систему для обеспечения эффективного формирования пучка электронов, транспортировку и, в конечном счете, инжекцию пучка электронов в представляющее интерес устройство удержания плазмы, катушку плазменного генератора, катушку плазменного эмиттера, катушку линзы и катушку для транспортировки пучка.

[0012] Другие системы, способы, признаки и преимущества предмета изобретения, описанного в настоящем документе будут или станут очевидными специалисту в области техники после изучения следующих чертежей и подробного описания. Предполагается, что все такие дополнительные системы, способы, признаки и преимущества, включенные в рамки этого описания, находятся в пределах объема предмета изобретения, описанного в данном документе, и защищаются посредством прилагаемой формулы изобретения. Ни в каком образом признаки примерных вариантов осуществления не должны истолковываться в качестве ограничения прилагаемой формулы изобретения при отсутствии специального перечисления этих признаков в формуле изобретения.

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

[0013] Сопроводительные чертежи, которые включены в настоящее описание как его часть, иллюстрируют текущие примерные варианты осуществления и вместе с общим описанием, приведенным выше, и подробным описанием примерных вариантов осуществления, приведенным ниже, служат для того, чтобы пояснять и изучать принципы настоящего изобретения.

[0014] Фиг. 1 иллюстрирует удержание частиц в настоящей FRC-системе в высокоэффективном FRC-режиме (HPF) по сравнению с традиционным FRC-режимом (CR) и по сравнению с другими традиционными FRC-экспериментами.

[0015] Фиг. 2 иллюстрирует компоненты настоящей FRC-системы и магнитную топологию FRC, получаемую в настоящей FRC-системе.

[0016] Фиг. 3А иллюстрирует базовую схему расположения настоящей FRC-

системы на виде сверху, включая предпочтительное расположение центрального сосуда удержания, формирующей секции, диверторов, пучков нейтральных частиц, электродов, плазменных пушек, зеркальных пробок и инжектора таблеток.

[0017] Фиг. 3В иллюстрирует центральный сосуд удержания на виде сверху и показывает пучки нейтральных частиц, расположенные под прямым углом (по нормали) к главной оси симметрии в центральном сосуде удержания.

[0018] Фиг. 3С иллюстрирует центральный сосуд удержания на виде сверху и показывает пучки нейтральных частиц, расположенные под углом, отклоненным от нормали к главной оси симметрии в центральном сосуде удержания, и направленные с возможностью инжектировать частицы к средней плоскости центрального сосуда удержания.

[0019] Фиг. 3D и 3E иллюстрируют виды сверху и в перспективе, соответственно, базовой схемы расположения альтернативного варианта осуществления настоящей FRC-системы, включая предпочтительное расположение центрального сосуда удержания, формирующей секции, внутренних и внешних диверторов, пучков нейтральных частиц, размещаемых под углом, отклоненным от нормали к главной оси симметрии в центральном сосуде удержания, электродов, плазменных пушек и зеркальных пробок.

[0020] Фиг. 4 иллюстрирует схему компонентов системы импульсного питания для формирующих секций.

[0021] Фиг. 5 иллюстрирует изометрический вид отдельного формирующего модуля импульсного питания.

[0022] Фиг. 6 иллюстрирует изометрический вид узла формирующих труб.

[0023] Фиг. 7 иллюстрирует изометрический вид с частичным разрезом системы с пучком нейтральных частиц и ключевых компонентов.

[0024] Фиг. 8 иллюстрирует изометрический вид схемы расположения пучка нейтральных частиц в камере удержания.

[0025] Фиг. 9 иллюстрирует изометрический вид с частичным разрезом предпочтительной схемы расположения систем геттерирования Ti и Li.

[0026] Фиг. 10 иллюстрирует изометрический вид с частичным разрезом плазменной пушки, установленной в диверторной камере. Также показаны связанные магнитная зеркальная пробка и сборка диверторного электрода.

[0027] Фиг. 11 иллюстрирует предпочтительную схему расположения кольцевого смещающего электрода на осевом торце камеры удержания.

[0028] Фиг. 12 иллюстрирует эволюцию радиуса исключаемого потока в FRC-системе, полученную из серии внешних диамагнитных контуров на двух формирующих секциях тета-пинчей с обращенным полем и магнитных зондов, заделанных внутри центральной металлической камеры удержания. Время измеряется с момента синхронизируемого обращения поля в формирующих источниках, а расстояние  $z$  задается относительно осевой средней плоскости машины.

[0029] Фиг. 13А, 13В, 13С и 13D иллюстрируют данные от неподдерживаемого

разряда в типичном невысокоэффективном режиме в настоящей FRC-системе. Показаны как функции времени: (фиг. 13А) радиус исключаемого потока в средней плоскости, (фиг. 13В) 6 хорд линейно-интегрированной плотности из находящегося в средней плоскости CO<sub>2</sub>-интерферометра, (фиг. 13С) радиальные профили плотности, инвертированные по Абелю, по данным CO<sub>2</sub>-интерферометра, и (фиг. 13D) полная температура плазмы из баланса давлений.

[0030] Фиг. 14 иллюстрирует осевые профили исключаемого потока в выбранные времена для одного и того же разряда настоящей FRC-системы, показанной на фиг. 13А, 13В, 13С и 13D.

[0031] Фиг. 15 иллюстрирует изометрический вид направляющих катушек, смонтированных снаружи камеры удержания.

[0032] Фиг. 16А, 16В, 16С и 16D иллюстрируют корреляции времени жизни FRC и длительности импульса инжектируемых пучков нейтральных частиц. Как показано, более длинные импульсы пучков создают более долгоживущие FRC.

[0033] Фиг. 17А, 17В, 17С и 17D показывают отдельные и совокупные эффекты различных компонентов FRC-системы на рабочие характеристики FRC и достижение высокоэффективного режима.

[0034] Фиг. 18А, 18В, 18С и 18D иллюстрируют данные из типичного высокоэффективного режима неподдерживаемого разряда в настоящей FRC-системе. Показаны как функций времени: (фиг. 18А) радиус исключаемого потока в средней плоскости, (фиг. 18В) 6 хорд линейно-интегрированной плотности из находящегося в средней плоскости CO<sub>2</sub>-интерферометра, (фиг. 18С) радиальные профили плотности, инвертированные по Абелю, по данным CO<sub>2</sub>-интерферометра, и (фиг. 18D) общая температура плазмы из баланса давлений.

[0035] Фиг. 19 иллюстрирует удержание потока в качестве функции от температуры электронов ( $T_e$ ). Он содержит графическое представление о вновь устанавливаемом улучшенном режиме масштабирования для разрядов в высокоэффективном режиме.

[0036] Фиг. 20 иллюстрирует время жизни FRC, соответствующее длительности импульса ненаклонных и наклонных инжектируемых пучков нейтральных частиц.

[0037] Фиг. 21А, 21В, 21С, 21D и 21Е иллюстрируют длительность импульса наклонного пучка нейтральных частиц и время жизни параметров плазмы FRC от радиуса плазмы, плотности плазмы, температуры плазмы и магнитного потока, соответствующего длительности импульса наклонных инжектируемых пучков нейтральных частиц.

[0038] Фиг. 22А и 22В иллюстрируют базовую схему расположения инжектора компактных тороидов (КТ).

[0039] Фиг. 23А и 23В иллюстрируют центральный сосуд удержания, показывающий КТ-инжектор, смонтированный в нем.

[0040] Фиг. 24А и 24В иллюстрируют базовую схему расположения альтернативного варианта осуществления КТ-инжектора, имеющего дрейфовую трубку, соединенную с ним.

[0041] Фиг. 25 иллюстрирует изометрический вид в сечении системы с пучками

нейтральных частиц и ключевых компонентов для подстраиваемой выходной энергии пучка.

[0042] Фиг. 26 является схематическим видом, иллюстрирующим систему с пучками нейтральных частиц с подстраиваемой выходной энергией пучка.

[0043] Фиг. 27 является схематическим видом для иллюстрации механизма управления осевым положением плазмы FRC в сосуде (CV) удержания.

[0044] Фиг. 28 является блок-схемой последовательности операций способа для общей схемы управления в скользящем режиме.

[0045] Фиг. 29 является составным графиком примеров моделирования управления осевым положением в скользящем режиме.

[0046] Фиг. 30 является составным графиком примеров моделирования управления осевым положением в скользящем режиме.

[0047] Фиг. 31 является схематическим видом источника пучка электронов, преобразованного из источника ионов.

[0048] Фиг. 32 является графиком результатов моделирования, показывающим вытягивание пучка электронов из плазмы и ускорение.

[0049] Фиг. 33 является частичным схематическим видом электронно-оптической системы.

[0050] Фиг. 34А и 34В являются схематическими видами вариантов осуществления плазменной сетки с маской, чтобы получать полый пучок.

[0051] Фиг. 35 является схематическим видом сверху, показывающим осевую инжекцию пучка электронов в систему удержания плазмы.

[0052] Фиг. 36 является схематическим видом в перспективе, показывающим пучок электронов, установленный в диверторе системы удержания плазмы.

[0053] Следует отметить, что чертежи необязательно нарисованы в масштабе, и что элементы аналогичных структур или функций обычно представляются посредством аналогичных ссылочных позиций с номерами на всех чертежах в целях иллюстрации. Также следует отметить, что чертежи предназначаются только для того, чтобы упростить описание различных вариантов осуществления, поясняемых в данном документе. Чертежи не обязательно описывают каждый аспект идей, раскрытых в данном документе, и не ограничивают объем формулы изобретения.

#### ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0054] До того, как будет подробно описан настоящий предмет изобретения, следует понимать, что это раскрытие сущности не ограничено конкретными описанными вариантами осуществления, поскольку они, конечно, могут варьироваться. Также следует понимать, что терминология, используемая в данном документе, служит только для цели описания конкретных вариантов осуществления и не имеет намерения ограничивать объем настоящего раскрытия, который ограничен только посредством прилагаемой формулы изобретения.

[0055] Настоящие варианты осуществления, предусмотренные в данном документе,

направлены на системы и способы, которые упрощают формирование и поддержание FRC с превосходной стабильностью, а также удержанием частиц, энергии и потока. Некоторые из настоящих вариантов осуществления направлены на системы и способы, которые упрощают формирование и поддержание FRC с повышенными системными энергиями, и на инжекторы пучка нейтральных частиц использования повышенной устойчивости с подстраиваемыми характеристиками энергии пучка. Некоторые из настоящих вариантов осуществления также направлены на системы и способы, которые способствуют стабильности плазмы FRC в радиальном и осевом направлениях и управлению осевым положением плазмы FRC вдоль оси симметрии камеры удержания плазмы FRC независимо от свойств осевой стабильности равновесия плазмы FRC. Некоторые из настоящих вариантов осуществления также направлены на пучок электронов с высоким уровнем мощности для плазменного нагрева в системе магнитного удержания плазмы.

[0056] Далее подробнее описаны типичные примеры вариантов осуществления, описанных в данном документе, причем эти примеры используют многие из этих дополнительных признаков и идей как отдельно, так и в комбинации, со ссылкой на прилагаемые чертежи. Это подробное описание предназначено только для того, чтобы пояснить специалистам в области техники дополнительные подробности для использования на практике предпочтительных аспектов идей настоящего изобретения, и не предназначено для того, чтобы ограничивать объем изобретения. Следовательно, комбинации признаков и этапов, раскрытых в последующем подробном описании, могут быть необязательными для того, чтобы использовать изобретение на практике в самом широком смысле, а вместо этого изучаются просто для того, чтобы конкретно описывать типичные примеры настоящих идей.

[0057] Более того, различные признаки характерных примеров и зависимые пункты формулы изобретения могут комбинироваться способами, которые не перечислены конкретно и явно, чтобы обеспечить дополнительные полезные варианты осуществления настоящих идей. Помимо этого, следует явно отметить, что все признаки, раскрытые в описании и/или в формуле изобретения, имеют намерение раскрытия отдельно и независимо друг от друга для целей исходного раскрытия, а также для целей ограничения заявленного предмета изобретения, независимо от компоновок признаков в вариантах осуществления и/или в формуле изобретения. Также следует явно отметить, что все диапазоны значений или индикаторы относительно групп объектов раскрывают каждое возможное промежуточное значение или промежуточный объект для целей исходного раскрытия, а также для целей ограничения заявленного предмета изобретения.

[0058] Перед обращением к системам и способам, которые способствуют стабильности плазмы FRC в радиальном и осевом направлениях и управлению осевым положением плазмы FRC вдоль оси симметрии камеры удержания плазмы FRC, предоставляется пояснение систем и способов для формирования и поддержания высокоэффективных FRC с превосходной стабильностью, а также с превосходным удержанием частиц, энергии и потока по сравнению с традиционными FRC. Такие



высокоэффективные FRC предусматривают вариант развития для обширного множества применений, включающих в себя компактные нейтронные источники (для производства изотопов медицинского назначения, ликвидации ядерных отходов, исследований в области материаловедения, нейтронной радиографии и томографии), компактные источники фотонов (для получения и обработки химических продуктов), системы разделения и обогащения изотопов, а также активные зоны реакторов для синтеза легких ядер с целью выработки энергии в будущем.

[0059] Чтобы оценить, существует ли режим удержания в FRC, превосходящий известные, исследованы различные вспомогательные системы и рабочие режимы. Эти усилия привели к прорывным открытиям и развитию парадигмы высокоэффективной FRC, описанной в данном документе. В соответствии с этой новой парадигмой, настоящие системы и способы сочетают огромное количество новых идей и средств для существенного улучшения FRC-удержания, как проиллюстрировано на фиг. 1, а также обеспечить управление устойчивостью без отрицательных побочных эффектов. Как подробнее поясняется ниже, фиг. 1 иллюстрирует удержание частиц в FRC-системе 10, описанной ниже (см. фиг. 2 и 3), работающей в соответствии с высокоэффективным FRC-режимом (HPF) для формирования и поддержания FRC по сравнению с работой в соответствии с традиционным режимом (CR) для формирования и поддержания FRC и по сравнению с удержанием частиц в соответствии с традиционными режимами для формирования и поддержания FRC, используемыми в других экспериментах. В настоящем раскрытии приведены общее и подробное описание инновационных отдельных компонентов FRC-системы 10 и способов, а также их совместные эффекты.

#### FRC-система

##### *Вакуумная система*

[0060] Фиг. 2 и 3 иллюстрируют схематический вид настоящей FRC-системы 10. FRC-система 10 включает в себя центральный сосуд 100 удержания, окруженный посредством двух диаметрально противоположных формирующих секций 200 тета-пинчей с обращенным полем, и две камеры 300 диверторов за пределами формирующих секций 200 для управления плотностью нейтральных частиц и загрязнением примесями. Настоящая FRC-система 10 была построена для обеспечения сверхвысокого вакуума и работает при типичных начальных давлениях  $10^{-8}$  мм.рт.ст ( $10^{-8}$  торр). Такие вакуумметрические давления требуют использования стыковочных фланцев с двойной откачкой между стыкуемыми компонентами, металлических уплотнительных колец, внутренних стенок с высокой степенью чистоты, а также тщательного начального приведения в требуемое состояние поверхности всех деталей перед сборкой, к примеру, физической и химической очистки, после чего выполняется вакуумное спекание при  $250^{\circ}\text{C}$  в течение 24 часов и очистка в тлеющем разряде в водороде.

[0061] Формирующие секции 200 тета-пинчей с обращенным полем представляют собой стандартные тета-пинчи с обращенным полем (FRTP), хотя и с усовершенствованной формирующей системой с подачей импульсного питания, подробно обсуждаемой ниже (см.

фиг. 4-6). Каждая формирующая секция 200 изготовлена из стандартных непрозрачных промышленных кварцевых трубок, которые содержат 2-миллиметровую внутреннюю футеровку из ультрачистого кварца. Камера удержания 100 изготовлена из нержавеющей стали, чтобы обеспечивать множество радиальных и тангенциальных отверстий; она также служит в качестве консерватора потока во временном масштабе экспериментов, описанных ниже, и ограничивает быстрые магнитные переходные процессы. Вакуумы создаются и поддерживаются в FRC-системе 10 с помощью набора безмасляных спиральных насосов предварительного разрежения, турбомолекулярных насосов и крионасосов.

#### *Магнитная система*

[0062] Магнитная система 400 проиллюстрирована на фиг. 2 и 3. Фиг. 2, в числе прочих признаков иллюстрируются магнитный FRC-поток и контуры плотности (в качестве функций от радиальных и осевых координат), связанные с FRC 450, сформированной посредством FRC-системы 10. Эти контуры получаются посредством двумерного резистивного численного холловского МГД-моделирования с помощью кода, разработанного для моделирования систем и способов, соответствующих FRC-системе 10, и хорошо согласуются с измеренными экспериментальными данными. Как видно на фиг. 2, FRC 450 состоит из тора замкнутых силовых линий поля во внутреннем пространстве 453 FRC 450 внутри сепаратриссы 451 и кольцевого граничного слоя 456 на незамкнутых силовых линиях 452 поля сразу же за пределами сепаратриссы 451. Граничный слой 456 сливается в струи 454 за рамками длины FRC, что обеспечивает естественный дивертор.

[0063] Главная магнитная система 410 включает в себя ряд катушек 412, 414 и 416 квазипостоянного тока, которые располагаются в конкретных осевых положениях вдоль компонентов, т.е. вдоль камеры 100 удержания, формирующих секций 200 и диверторов 300 FRC-системы 10. Катушки 412, 414 и 416 квазипостоянного тока питаются посредством переключаемых источников питания квазипостоянного тока и создают базовые магнитные поля напряжения смещения примерно 0,1 Т в камере 100 удержания, формирующих секциях 200 и диверторах 300. В дополнение к катушкам 412, 414 и 416 квазипостоянного тока главная магнитная система 410 включает в себя зеркальные катушки 420 квазипостоянного тока (питаемые посредством переключаемых источников) между любым торцом камеры 100 удержания и соседними формирующими секциями 200. Зеркальные катушки 420 квазипостоянного тока обеспечивают коэффициенты отражения магнитного зеркала вплоть до 5 и могут независимо снабжаться питанием для контроля формы равновесия. Помимо этого зеркальные пробки 440 расположены между каждой из формирующих секций 200 и диверторами 300. Зеркальные пробки 440 содержат компактные зеркальные катушки 430 квазипостоянного тока и катушки 444 зеркальных пробок. Зеркальные катушки 430 квазипостоянного тока включают в себя три катушки 432, 434 и 436 (питаемые посредством переключаемых источников), которые создают дополнительные направляющие поля, чтобы фокусировать поверхности 455 магнитного потока к проходу 442 малого диаметра, проходящему через катушки 444 зеркальных пробок. Катушки 444 зеркальных пробок, которые намотаны вокруг прохода 442

небольшого диаметра и питаются посредством LC-схемы подачи импульсного питания, создают сильные поля магнитного зеркала вплоть до 4 Т. Цель этой всей схемы расположения катушек состоит в том, чтобы плотно связывать и направлять поверхности 455 магнитного потока и текущие к торцу плазменные струи 454 в отдаленные камеры 310 диверторов 300. В завершение, набор «антенн» 460 направляющих катушек (см. фиг. 15) расположен снаружи камеры 100 удержания, по две с каждой стороны средней плоскости, и запитан посредством источников питания постоянного тока. Антенны 460 направляющих катушек могут быть выполнены с обеспечением квазистатического дипольного или квадрупольного магнитного поля примерно в 0,01 Т для управления вращательными неустойчивостями и/или управления электронным током. Антенны 460 направляющих катушек могут гибко обеспечивать магнитные поля, которые являются симметричными или антисимметричными относительно средней плоскости машины в зависимости от направления приложенных токов.

#### *Формирующие системы с подачей импульсной мощности*

[0064] Формирующие системы 210 с подачей импульсного питания работают по принципу модифицированного тета-пинча. Предусмотрено две системы, каждая из которых питает одну из формирующих секций 200. Фиг. 4-6 иллюстрируют основные составляющие блоки и расположение формирующих систем 210. Формирующая система 210 состоит из модульной конструкции подачи импульсного питания, которая состоит из отдельных блоков 220 (модулей), каждый из которых подает питание в поднабор катушек 232 (подвесок) узла 230 подвески, которые обвиты вокруг формирующих кварцевых труб 240. Каждый модуль 220 состоит из конденсаторов 221, индукторов 223, быстродействующих сильноточных переключателей 225 и связанных с ними панелей 222 запуска и 224 сброса заряда. В общем, каждая формирующая система 210 накапливает между 350-400 кДж емкостной энергии, которая обеспечивает вплоть до 35 ГВт мощности, с тем чтобы формировать и ускорять FRC. Координированная работа этих компонентов достигается через систему 222 и 224 зауска и управления уровня техники, которая обеспечивает синхронизацию по времени между формирующими системами 210 в каждой формирующей секции 200 и минимизирует дрожание фазы при переключении до десятков наносекунд. Преимущество этой модульной конструкции заключается в ее гибкой работе: FRC могут формироваться на месте и затем ускоряться и инжектироваться (= статическое формирование) либо формироваться и ускоряться одновременно (= динамическое формирование).

#### *Инжекторы пучков нейтральных частиц*

[0065] Пучки 600 нейтральных атомов разворачиваются в FRC-системе 10 для того, чтобы обеспечивать нагрев и возбуждение тока, а также развивать давление быстрых частиц. Как показано на фиг. 3А, 3В и 8, отдельные линии движения пучков, содержащие системы 610 и 640 инжекторов пучков нейтральных атомов, расположены вокруг центральной камеры 100 удержания и инжектируют быстрые частицы тангенциально в плазму FRC (и перпендикулярно либо под углом, отклоненным от нормали к главной оси

симметрии в центральном сосуде 100 удержания) с параметром столкновений таким образом, чтобы целевая зона захвата хорошо лежала внутри сепаратриссы 451 (см. фиг. 2). Каждая система 610 и 640 инжекторов допускает инъекцию вплоть до 1 МВт мощности пучка нейтральных частиц в плазму FRC с энергиями частиц между 20 и 40 кэВ. Системы 610 и 640 основаны на многоапертурных источниках вытягивания положительных ионов и используют геометрическую фокусировку, инерционное охлаждение сеток для вытягивания ионов и дифференциальную накачку. Помимо использования различных источников плазмы системы 610 и 640 главным образом различаются посредством их физической конструкции, чтобы удовлетворять соответствующим монтажным местоположениям, обеспечивая возможности боковой и верхней инъекции. Типичные компоненты этих инжекторов пучков нейтральных частиц, в частности, иллюстрируются на фиг. 7 для систем 610 боковых инжекторов. Как показано на фиг. 7, каждая отдельная система 610 с пучком нейтральных частиц включает в себя плазменный RF-источник 612 на входном торце (он заменяется на дуговой источник в системах 640) с магнитным экраном 614, закрывающим торец. Оптический источник ионов и ускоряющие сетки 616 соединяются с плазменным источником 612, и запорный клапан 620 расположен между оптическим источником ионов и ускоряющими сетками 616 и нейтрализатором 622. Отклоняющий магнит 624 и поглотитель 628 ионов расположены между нейтрализатором 622 и прицельным устройством 630 на выходном торце. Система охлаждения содержит два криогенные холодильные машины 634, две криопанели 636 и защитный LN<sub>2</sub>-кожух 638. Эта гибкая конструкция обеспечивает возможность работы в широком диапазоне FRC-параметров.

[0066] Альтернативная конфигурация для инжекторов 600 пучка нейтральных атомов состоит в инъекции быстрых частиц тангенциально в плазму FRC, но с углом  $A$ , меньшим  $90^\circ$  относительно главной оси симметрии в центральном сосуде 100 удержания. Эти типы ориентации инжекторов 615 пучков показаны на фиг. 3С. Помимо этого, инжекторы 615 пучков могут ориентироваться таким образом, что инжекторы 615 пучка на любой стороне от средней плоскости центрального сосуда 100 удержания инжектируют свои частицы к средней плоскости. В завершение, осевое положение этих пучковых систем 600 может выбираться ближе к средней плоскости. Эти альтернативные варианты осуществления на основе инъекции упрощают вариант более централизованной заправки топливом, который обеспечивает лучшее связывание пучков и более высокую эффективность улавливания инжектированных быстрых частиц. Кроме того, в зависимости от угла и осевого положения это расположение инжекторов 615 пучков обеспечивает более прямое и независимое управление осевым удлинением и другими характеристиками FRC 450. Например, инъекция пучков под малым углом  $A$  относительно главной оси симметрии сосуда должна создавать плазму FRC с большей осевой протяженностью и более низкой температурой, тогда как выбор более перпендикулярного угла  $A$  должен приводить к аксиально более короткой, но более горячей плазме. Таким образом, угол  $A$  инъекции и местоположение инжекторов 615 пучков могут оптимизироваться для различных целей.

Помимо этого, такое регулирование угла и расположение инжекторов 615 пучка позволит инъекцию пучков более высокой энергии (которые, в общем, являются более предпочтительными для выделения большей мощности с меньшей расходимостью пучка) в более слабые магнитные поля, чем в иных случаях требуется для того, чтобы захватывать такие пучки. Это обусловлено тем фактом, что именно азимутальная составляющая энергии определяет масштаб орбит быстрых ионов (который становится постепенно меньшим по мере того, как угол инъекции относительно главной оси симметрии сосуда уменьшается при постоянной энергии пучка). Кроме того, наклонная инъекция к средней плоскости и с осевыми положениями пучков, близкими к средней плоскости, улучшает связь пучка и плазмы, даже по мере того, как плазма FRC сжимается или иным образом аксиально сужается в течение периода инъекции.

[0067] Обращаясь к фиг. 3D и 3E, другая альтернативная конфигурация FRC-системы 10 включает в себя внутренние диверторы 302, в дополнение к инжекторам 615 наклонных пучков. Внутренние диверторы 302 расположены между формирующими секциями 200 и камерой 100 удержания и выполнены и работают практически аналогично внешним диверторам 300. Внутренние диверторы 302, которые включают в себя быстрые переключающиеся магнитные катушки, фактически являются неактивными во время процесса формирования, чтобы позволить формирующим FRC проходить через внутренние диверторы 302 по мере того, как формирующие FRC поступательно перемещаются к средней плоскости камеры 100 удержания. После того как формирующие FRC проходят через внутренние диверторы 302 в камеру 100 удержания, внутренние диверторы активируются для работы практически аналогично внешним диверторам и изолируют камеру 100 удержания от формирующих секций 200.

#### *Инжектор таблеток*

[0068] Чтобы обеспечить средство для инъекции новых частиц и лучшего контроля захвата FRC-частиц, в системе 10 FRC используется 12-ствольный инжектор 700 таблеток (см., например, I. Vinyar и др., Pellet injectors Developed at PELIN for JET, TAE and HL-2A, Proceedings of the 26th Fusion Science and Technology Symposium, 27.09-01-10 (2010)). Фиг. 3 иллюстрирует схему расположения инжектора 700 таблеток в FRC-системе 10. Цилиндрические таблетки ( $D \sim 1$  мм,  $L \sim 1-2$  мм) инжектируются в FRC со скоростью в диапазоне 150-250 км/с. Каждая отдельная таблетка содержит примерно  $5 \times 10^{19}$  атомов водорода, что является сравнимым с запасом FRC-частиц.

#### *Системы геттерирования*

[0069] Хорошо известно, что нейтральный галоидный газ представляет собой серьезную проблему во всех системах удержания. Процессы обмена зарядами и рециркуляции зарядов (высвобождения холодного примесного материала из стенки) могут оказывать пагубное воздействие на и удержание энергии и частиц. Помимо этого, любая значительная плотность нейтрального газа на границе или вблизи нее должна приводить к быстрым потерям или по меньшей мере к значительному сокращению времени жизни инжектируемых крупноорбитальных (высокоэнергетических) частиц

(«крупноорбитальный» означает частицы, имеющие орбиты в масштабе FRC-топологии или по меньшей мере радиусы орбиты, намного превышающие масштаб характерной длины градиента магнитного поля), т.е. к факту, который оказывает негативное влияние на все варианты применения высокоэнергетичной плазмы, включающие в себя синтез через вспомогательный нагрев пучка.

[0070] Приведение поверхности в требуемое состояние представляет собой средство, посредством которого негативное воздействие нейтрального газа и примесей можно контролировать или уменьшить в системе удержания. С этой целью FRC-система 10, предусмотренная в данном документе, использует системы 810 и 820 осаждения титана и лития, которые покрывают обращенные к плазме поверхности камеры 100 удержания (или сосуда) и диверторов 300 и 302 пленками (толщиной в десятки микрометров) из Ti и/или Li. Покрываются методами осаждения из паровой фазы. Твердые Li и/или Ti испаряют и/или сублимируют и напыляют на близлежащие поверхности, чтобы формировать покрытия. Источники представляют собой атомные печи с направляющими соплами 822 (в случае Li) или нагретыми сферами твердого тела с направляющим бандажом 812 (в случае Ti). Испаряющие Li-системы типично работают в непрерывном режиме, тогда как Ti-сублиматоры работают главным образом периодически между работой с плазмой. Рабочие температуры этих систем выше 600°C, чтобы получать высокие скорости осаждения. Чтобы достигать хорошего покрытия стенок, требуются несколько стратегически расположенных испаряющих/сублимирующих систем. Фиг. 9 детализирует предпочтительную схему расположения систем 810 и 820 геттерирования и осаждения в FRC-системе 10. Покрываются действуют как геттерирующие поверхности и эффективно откачивают атомные и молекулярные водородные частицы (H и D). Покрываются также уменьшают другие типичные примеси, такие как углерод и кислород, до незначительных уровней.

#### *Зеркальные пробки*

[0071] Как указано выше, FRC-система 10 использует наборы зеркальных катушек 420, 430 и 444, как показано на фиг. 2 и 3. Первый набор зеркальных катушек 420 расположен на двух осевых торцах камеры 100 удержания и независимо возбуждается от удерживающей, формирующей и диверторной катушек 412, 414 и 416 постоянного тока главной магнитной системы 410. Первый набор зеркальных катушек 420 главным образом способствует управлению и осевому расположению FRC 450 во время слияния и обеспечивает управление формой равновесия во время поддержания устойчивости. Первый набор 420 зеркальных катушек создает номинально более сильные магнитные поля (примерно в 0,4-0,5 T), чем центральное поле удержания, создаваемое посредством центральных удерживающих катушек 412. Второй набор 430 зеркальных катушек, который включает в себя три компактных зеркальных катушки 432, 434 и 436 квазипостоянного тока, расположен между формирующими секциями 200 и диверторами 300 и возбуждается посредством общего переключаемого источника питания. Зеркальные катушки 432, 434 и 436, вместе с более компактными импульсными катушками 444 зеркальных пробок

(питаемыми посредством емкостного источника мощности) и физическим стягиванием 442, формируют зеркальные пробки 440, которые обеспечивают узкий канал с низкой газопроводностью с очень сильными магнитными полями (между 2-4 Т с временами нарастания примерно 10-20 мс). Наиболее компактные импульсные зеркальные катушки 444 имеют компактные радиальные размеры, высверленное отверстие в 20 см и аналогичную длину, по сравнению с высверленным отверстием масштаба порядка метров или более и с плоской конструкцией диверторных катушек 412, 414 и 416. Назначение зеркальных пробок 440 является множественным: (1) Катушки 432, 434, 436 и 444 плотно увязывают и направляют поверхности 452 магнитного потока и текущие к торцу плазменные струи 454 в удаленные камеры 300 диверторов. Это гарантирует то, что выходящие частицы достигают диверторов 300 надлежащим образом, и то, что существуют поверхности 455 непрерывного потока, которые прослеживаются от области открытых силовых линий 452 центральной FRC 450 на всем пути до диверторов 300. (2) Физические сужения 442 в FRC-системе 10, через которые катушки 432, 434, 436 обеспечивают прохождение поверхностей 452 магнитного потока и струй 454 плазмы 444, создают препятствие для потока нейтрального газа из плазменных пушек 350, которые находятся в диверторах 300. Аналогичным образом, сужения 442 предотвращают обратное течение газа из формирующих секций 200 в диверторы 300, за счет этого уменьшая число нейтральных частиц, которые должны вводиться во всю FRC-систему 10 при начале запуска FRC. (3) Строго осевые зеркала, создаваемые посредством катушек 432, 434, 436 и 444, уменьшают осевые потери частиц и за счет этого уменьшают коэффициент параллельной диффузии частиц на открытых силовых линиях поля.

[0072] В альтернативной конфигурации, показанной на фиг. 3D и 3E, набор низкопрофильных обжимных катушек 421 представляет положения между внутренними диверторами 302 и формирующими секциями 200.

#### *Осевые плазменные пушки*

[0073] Потоки плазмы из пушек 350, смонтированных в камерах 310 диверторов 300, предназначены для повышения стабильности и производительности пучка нейтральных частиц. Пушки 350 монтируются на оси в камере 310 диверторов 300, как проиллюстрировано на фиг. 3 и 10, и формируют плазму, протекающую вдоль открытых силовых линий 452 потока в диверторе 300 и к центру камеры 100 удержания. Пушки 350 работают при газовом разряде высокой плотности в промывочном пакетированном канале и выполнены с возможностью генерировать несколько килоампер полностью ионизированной плазмы в течение 5-10 мс. Пушки 350 включают в себя импульсную магнитную катушку, которая согласует выходной поток плазмы с требуемым размером плазмы в камере 100 удержания. Технические параметры пушек 350 характеризуются каналом, имеющим внешний диаметр 5-13 см и внутренний диаметр вплоть до примерно 10 см, и обеспечивают разрядный ток в 10-15 кА при 400-600 В с внутренним магнитным полем пушки в 0,5-2,3 Т.

[0074] Потоки плазмы пушек могут проникать в магнитные поля зеркальных пробок

440 и протекать в формирующую секцию 200 и камеру 100 удержания. Эффективность переноса плазмы через зеркальную пробку 440 увеличивается с уменьшением расстояния между пушкой 350 и пробкой 440 и посредством задания пробки 440 более широкой и короткой. При приемлемых условиях пушки 350 могут доставлять примерно  $10^{22}$  протонов/с через зеркальные пробки 440 в 2-4 Т с высокими температурами ионов и электронов примерно в 150-300 эВ и примерно в 40-50 эВ, соответственно. Пушки 350 обеспечивают значительное пополнение топливом граничного FRC-слоя 456 и улучшенное общее удержание FRC-частиц.

[0075] Чтобы дополнительно увеличивать плотность плазмы, можно было бы использовать газосепаратор, чтобы напускать дополнительный газ в поток плазмы из пушек 350. Эта технология обеспечивает возможность кратного увеличения плотности инжектируемой плазмы. В FRC-системе 10 газосепаратор, установленный на обращенной к диверторам 300 стороне зеркальных пробок 440, улучшает пополнение граничного FRC-слоя 456, формирование FRC 450 и линейное связывание плазмы.

[0076] Учитывая все параметры регулирования, поясненные выше, а также с учетом того, что является возможной работа только с одной или с обеими пушками, совершенно очевидно, что доступен широкий спектр рабочих режимов.

#### *Смещающие электроды*

[0077] Электрическое смещение открытых поверхностей потока может обеспечить радиальные потенциалы, которые обуславливают азимутальное движение  $E \times B$ , которое обеспечивает управляющий механизм, аналогичный повороту ручки регулировки, чтобы управлять вращением плазмы с открытыми силовыми линиями поля, а также фактического ядра 450 FRC через сдвиг скоростей. Чтобы выполнять это управление, FRC-система 10 использует различные электроды, стратегически размещенные в различных частях машины. Фиг. 3 иллюстрирует смещающие электроды, расположенные в предпочтительных местоположениях в FRC-системе 10.

[0078] В принципе, предусмотрено 4 класса электродов: (1) точечные электроды 905 в камере 100 удержания, которые вступают в контакт с отдельными открытыми силовыми линиями 452 поля на границе FRC 450 для того, чтобы обеспечивать локальный заряд, (2) кольцевые электроды 900 между камерой 100 удержания и формирующими секциями 200 для того, чтобы заряжать дальние граничные слои 456 потока по азимутально-симметричной схеме, (3) пакеты концентрических электродов 910 в диверторах 300 для того, чтобы заряжать многочисленные концентрические слои 455 потока (за счет чего выбор слоев является управляемым посредством регулирования катушек 416, чтобы регулировать магнитное поле дивертора, с тем чтобы завершать требуемые слои 456 потока на соответствующих электродах 910) и наконец (4) аноды 920 (см. фиг. 10) самих плазменных пушек 350 (которые перехватывают внутренние открытые поверхности 455 потока вблизи сепаратриссы FRC 450). Фиг. 10 и 11 показывают некоторые типичные конструкции для некоторых из них.

[0079] Во всех случаях, эти электроды возбуждаются посредством источника



импульсного питания или источника питания постоянного тока при напряжениях вплоть до примерно 800 В. В зависимости от размера электрода и того, какие поверхности потока пересекаются, токи могут потребляться в килоамперном диапазоне.

*Неподдерживаемая работа FRC-системы: традиционный режим*

[0080] Стандартное формирование плазмы в FRC-системе 10 следует хорошо разработанному методу тета-пинча с обращенным полем. Типичный процесс запуска FRC начинается посредством возбуждения катушек 412, 414, 416, 420, 432, 434 и 436 квазипостоянного тока для работы в установившемся состоянии. Затем RFTP-цепи подачи импульсного питания формирующих систем 210 с подачей импульсного питания возбуждают катушки 232 импульсного питания быстро обращаемого магнитного поля, чтобы создавать временное обращенное напряжение смещения величиной примерно  $-0,05$  Т в формирующих секциях 200. В этот момент предварительно определенное количество нейтрального газа при 9-20 psi (фунт/кв. дюйм) инжектируется в два формирующих объема, определяемых камерами кварцевых труб 240 (северной и южной) формирующих секций 200, через набор азимутально ориентированных напускающих клапанов во фланцах, расположенных на наружных торцах формирующих секций 200. Затем генерируется небольшое (~в сотни килогерц) RF-поле от набора антенн на поверхности кварцевых труб 240 для того, чтобы создавать предварительную ионизацию в форме локальных областей ионизации затравок в пределах столбов нейтрального газа. После этого применяют тета-кольцевую модуляцию на токе, возбуждающем катушки 232 импульсного питания быстро обращаемого магнитного поля, что приводит к более глобальной предварительной ионизации столбов газа. В завершение, основные банки импульсного питания формирующих систем 210 с подачей импульсного питания запускаются, чтобы возбуждать катушки 232 импульсного быстро обращаемого магнитного поля, чтобы создавать прямосмещенное поле величиной вплоть до 0,4 Т. Этот этап может быть упорядочен во времени таким образом, чтобы прямосмещенное поле генерировалось равномерно по всей длине формирующих труб 240 (статическое формирование), либо таким образом, чтобы последовательная перистальтическая модуляция поля достигалась вдоль оси формирующих труб 240 (динамическое формирование).

[0081] В этом всем процессе формирования фактическое обращение поля в плазме возникает быстро, в пределах примерно 5 мкс. Мультигигаваттная импульсная мощность, подаваемая в формирующую плазму, легко создает горячие FRC, которые затем удаляются из формирующих секций 200 посредством применения либо последовательной во времени модуляции магнитного поля в переднем полупространстве (магнитная перистальтика), либо временно увеличенных токов в последних катушках наборов 232 катушек вблизи осевых внешних торцов формирующих труб 210 (формирование осевого градиента магнитного поля, который направлен аксиально к камере 100 удержания). Две (северная и южная) формирующие FRC, сформированные и ускоренные таким способом, затем расширяются в камеру 100 удержания большего диаметра, в которой катушки 412 квазипостоянного тока создают прямосмещенное поле для того, чтобы управлять радиальным расширением и

обеспечивать равновесный внешний магнитный поток.

[0082] После того как северная и южная формирующие FRC прибывают в окрестность средней плоскости камеры 100 удержания, FRC сталкиваются. Во время столкновения осевые кинетические энергии северной и южной формирующих FRC большей частью термализуются по мере того, как FRC сливаются в конечном счете в одну FRC 450. Большой набор средств диагностики плазмы доступен в камере 100 удержания для изучения равновесий FRC 450. Типичные рабочие условия в FRC-системе 10 создают составные FRC с радиусами сепаратриссы примерно 0,4 м и осевой протяженностью примерно в 3 м. Дополнительные характеристики представляют собой внешние магнитные поля величиной примерно 0,1 Т, плотности плазмы примерно в  $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и общую температуру плазмы вплоть до 1 кэВ. Без какого-либо поддержания, т.е. без нагрева и/или возбуждения тока через инъекцию пучка нейтральных частиц либо других вспомогательных средств, время жизни этих FRC ограничено примерно 1 мс, собственным характерным временем спада конфигурации.

Экспериментальные данные неустойчивого режима работы: традиционный режим

[0083] Фиг. 12 показывает типичную временную эволюцию радиуса исключаемого потока,  $r_{\Delta\phi}$ , который аппроксимирует радиус сепаратриссы,  $r_s$ , чтобы иллюстрировать динамику процесса слияния тета-пинчей FRC 450. Два (северный и южный) отдельных плазмоида создаются одновременно и затем ускоряются из соответствующих формирующих секций 200 со сверхзвуковой скоростью,  $v_z \sim 250 \text{ км/с}$ , и сталкиваются около средней плоскости при  $z=0$ . Во время столкновения плазмоиды сжимаются аксиально, после чего выполняется быстрое радиальное и осевое расширение перед окончательным слиянием для того, чтобы сформировать FRC 450. Как радиальная, так и осевая динамика слияния FRC 450 подтверждается посредством подробных измерений профиля плотности и болометрической томографии.

[0084] Данные из типичного неподдерживаемого разряда FRC-системы 10 показаны как функции времени на фиг. 13А, 13В, 13С и 13D. FRC инициируется в момент  $t=0$ . Радиус исключаемого потока в средней вдоль оси плоскости машины показан на фиг 13А. Эти данные получены из массива магнитных зондов, расположенных непосредственно внутри стенки камеры удержания из нержавеющей стали, которые измеряют осевое магнитное поле. Стальная стенка представляет собой хороший консерватор потока на временных масштабах этого разряда.

[0085] На фиг. 13В показаны линейно-интегрированные плотности, полученные из 6-хордового  $\text{CO}_2/\text{He-Ne}$  интерферометра, расположенного при  $z=0$ . С учетом вертикального ( $y$ ) смещения FRC, измеренного посредством болометрической томографии, инверсия по Абелю дает контуры плотности согласно фиг. 13С. После некоторого осевого и радиального колебания в течение первых 0,1 мс, FRC устанавливается с полым профилем плотности. Этот профиль является довольно плоским, с существенной плотностью на оси, как того требуют равновесия типичных двумерных FRC.

[0086] На фиг.13(D) показана общая температура плазмы, которая выведена исходя из баланса давлений и полностью согласуется с томсоновским рассеянием и спектроскопическими измерениями.

[0087] Анализ всего массива исключаемого потока указывает то, что форма FRC-сепаратриссы (аппроксимированная осевыми профилями исключаемого потока) постепенно эволюционирует от круговой в эллиптическую. Эта эволюция, показанная на фиг. 14, является согласованной с постепенным магнитным перезамыканием с переходом от двух в одну FRC. Фактически, приблизительные оценки предлагают то, что в этот конкретный момент примерно 10% магнитных потоков двух первоначальных FRC перезамыкаются во время столкновения.

[0088] Длина FRC непрерывно сокращается с 3 до примерно 1 м в течение времени жизни FRC. Это сокращение, видимое на фиг. 14, позволяет предполагать, что при удержании FRC, главным образом, доминируют конвективные потери энергии. Поскольку давление плазмы внутри сепаратриссы снижается быстрее, чем внешнее магнитное давление, натяжение силовых линий магнитного поля в торцевых областях сжимает FRC аксиально, восстанавливая осевое и радиальное равновесие. Для разряда, рассмотренного на фиг. 13 и 14, магнитный FRC-поток, запас частиц и тепловая энергия (примерно в 10 мВб,  $7 \cdot 10^{19}$  частиц и 7 кДж, соответственно) снижаются примерно на порядок величины в первую миллисекунду, когда выявляется исчезновение равновесия FRC .

#### *Поддерживаемая работа - высокоэффективный режим*

[0089] Примеры на фиг. 12-14 представляют собой характеристику спадающих FRC какого-либо поддержания. Тем не менее, развертываются в FRC-системе 10 применяются несколько технологий для дальнейшего улучшения FRC-удержания (внутреннего ядра и граничного слоя) для достижения высокоэффективного режима и поддержания конфигурации.

#### *Пучки нейтральных частиц*

[0090] Во-первых, быстрые нейтральные (Н) частицы инжектируются перпендикулярно  $B_z$  в пучках из восьми инжекторов 600 пучков нейтральных частиц. Пучки быстрых нейтральных частиц инжектируются с момента, когда северная и южная формирующие FRC сливаются в камере 100 удержания в одну FRC 450. Быстрые ионы, созданные главным образом посредством обмена зарядами, имеют бетатронные орбиты (с первичными радиусами в масштабе FRC-топологии или по меньшей мере гораздо большими, чем масштаб характерной длины градиента магнитного поля), которые способствуют увеличению азимутального тока FRC 450. После некоторой доли разряда (после 0,5-0,8 мс для выстрела) достаточно большая популяция быстрых ионов значительно улучшает свойства стабильности и удержания внутренних FRC (см., например, M.W. Binderbauer и N. Rostoker, Plasma Phys., 56, часть 3, 451 (1996)). Кроме того, с точки зрения поддержания пучки из инжекторов 600 пучков нейтральных частиц также представляют собой первичные средства для возбуждения тока и нагрева плазмы FRC.

[0091] В режиме плазмы FRC-системы 10 быстрые ионы замедляются главным

образом на электронах плазмы. В течение ранней части разряда типичные усредненные по орбитам времена замедления быстрых ионов составляют 0,3-0,5 мс, что приводит к значительному нагреву FRC, главным образом электронами. Быстрые ионы выполняют большие радиальные отходы наружу от сепаратриссы, поскольку внутреннее магнитное FRC-поле является по своей природе слабым (примерно в 0,03 Т в среднем для внешнего осевого поля в 0,1 Т). Быстрые ионы были бы уязвимыми для потерь на обмен зарядами, если плотность нейтрального газа является слишком высокой снаружи от сепаратриссы. Следовательно, геттерирование стенок и другие технологии (такие как плазменная пушка 350 и зеркальные пробки 440, которые способствуют, в числе прочего, управлению газом), развернутые в FRC-системе 10, имеют тенденцию минимизировать граничные нейтральные частицы и обеспечивать требуемое нарастание тока быстрых ионов.

#### *Инжекция таблеток*

[0092] Когда значительная популяция быстрых ионов нарастает внутри FRC 450 с более высокими температурами электронов и большими временами жизни FRC, замороженные H- или D- таблетки инжестируются в FRC 450 из инжектора 700 таблеток для поддержания запаса FRC-частиц FRC 450. Ожидаемые временные рамки абляции являются достаточно короткими для того, чтобы обеспечивать значительный источник частиц FRC. Этот темп также может увеличиваться за счет увеличения площади поверхности инжектируемой части посредством разбиения отдельной таблетки на меньшие фрагменты при нахождении в цилиндрах или инжекционных трубках инжектора 700 таблеток и перед входом в камеру 100 удержания за счет этапа, который может достигаться в силу увеличения трения между таблеткой и стенками инжекционной трубы посредством стягивания радиуса изгиба последнего сегмента инжекционной трубки прямо перед входом в камеру 100 удержания. За счет варьирования последовательности и темпа запуска 12 цилиндров (инжекционных трубок), а также фрагментации, можно подстраивать систему 700 инъекции таблеток для того, чтобы обеспечивать только требуемый уровень поддержания запаса частиц. В свою очередь, это помогает поддерживать внутреннее кинетическое давление в FRC 450 и самоподдерживающийся режим работы и время жизни FRC 450.

[0093] После того как подвергнутые абляции атомы сталкиваются со значительной плазмой в FRC 450, они становятся полностью ионизированными. Получающийся в результате компонент холодной плазмы затем столкновительно нагревается посредством местной плазмы FRC. Энергия, необходимая для того, чтобы поддерживать требуемую температуру FRC, в конечном счете, подается посредством инжекторов 600 пучков. В этом смысле, инжекторы 700 таблеток вместе с инжекторами 600 пучков нейтральных частиц образуют систему, которая поддерживает установившееся состояние и поддерживает FRC 450.

#### *КТ-инжектор*

[0094] В качестве альтернативы инжектору таблеток предусмотрен инжектор компактных тороидов (КТ), главным образом для пополнения топливом плазм с

конфигурацией с обращенным полем (FRC). КТ-инжектор 720 содержит намагниченную коаксиальную плазменную пушку (НКПП), которая, как показано на фиг. 22А и 22В, включает в себя коаксиальные цилиндрические внутренний и внешний электроды 722 и 724, смещающую катушку 726, расположенную внутри внутреннего электрода, и электрический прерыватель 728 на конце, противоположном выпуску КТ-инжектора 720. Газ инжектируется через отверстие 730 для инъекции газа в пространство между внутренним и внешним электродами 722 и 724, и плазма типа сферомака генерируется из него посредством разряда и выталкивается из пушки силой Лоренца. Как показано на фиг. 23А и 23В, пара КТ-инжекторов 720 соединяется с сосудом 100 удержания вблизи и по противоположных сторонам средней плоскости сосуда 100 для того, чтобы инжектировать КТ в центральную плазму FRC в пределах сосуда 100 удержания. Выпускной конец КТ-инжекторов 720 направлен к средней плоскости сосуда 100 удержания под углом к продольной оси сосуда 100 удержания, аналогично инжекторам 615 пучков нейтральных частиц.

[0095] В альтернативном варианте осуществления КТ-инжектор 720, как показано на фиг. 24А и 24В, включает в себя дрейфовую трубку 740, содержащую удлиненную цилиндрическую трубку, соединенную с выпускным концом КТ-инжектора 720. Как проиллюстрировано, дрейфовая трубка 740 включает в себя катушки 742 дрейфовой трубки, расположенные вокруг и аксиально разнесенные вдоль трубки. Вдоль длины трубки изображено множество диагностических отверстий 744.

[0096] Преимущества КТ-инжектора 720 являются следующими: (1) контроль и регулируемость запаса частиц на инжектированный КТ; (2) осаждается теплая плазма (вместо криогенных таблеток); (3) система может работать в режиме частоты повторения, с тем чтобы обеспечивать возможность непрерывного пополнения; (4) система также может восстанавливать некоторый магнитный поток, поскольку инжектируемые КТ несут встроенное магнитное поле. В варианте осуществления для экспериментального использования внутренний диаметр внешнего электрода составляет 83,1 мм, а внешний диаметр внутреннего электрода составляет 54,0 мм. Поверхность внутреннего электрода 722 предпочтительно покрывается вольфрамом, чтобы уменьшать примеси, выходящие из электрода 722. Как проиллюстрировано, смещающая катушка 726 монтируется внутри внутреннего электрода 722.

[0097] В недавних экспериментах была достигнута сверхзвуковая скорость поступательного перемещения КТ в пространстве вплоть до  $\sim 100$  км/с. Другие типичные плазменные параметры являются следующими: плотность электронов  $\sim 5 \times 10^{21}$  м<sup>-3</sup>, температура электронов  $\sim 30$ -50 эВ, и запас частиц  $\sim 0,5$ - $1,0 \times 10^{19}$ . Высокое кинетическое давление КТ обеспечивает возможность инжектируемой плазме проникать глубоко в FRC и осаждают частицы внутри сепаратриссы. В недавних экспериментах пополнение FRC-частицами привело к тому, что посредством КТ-инжекторов обеспечивается  $\sim 10$ -20% запаса FRC-частиц, успешно демонстрируя, что пополнение, может быть легко выполнено без нарушения плазмы FRC.

### *Направляющие катушки*

[0098] Чтобы достигать возбуждения током в установившемся состоянии и поддерживать требуемый ионный ток, желательно предотвращать или значительно уменьшать направленные вверх спины электронов, обусловленные силой трения между электронами и ионами (возникающей в результате переноса импульса ионно-электронного столкновения). FRC-система 10 использует инновационную технологию, чтобы обеспечивать разрыв электронов через прикладываемое извне статическое магнитное дипольное или квадрупольное поле. Это осуществляется через внешние направляющие катушки 460, проиллюстрированные на фиг. 15. Поперечно прикладываемое радиальное магнитное поле от направляющих катушек 460 индуцирует осевое электрическое поле во вращающейся плазме FRC. Результирующий осевой электронный ток взаимодействует с радиальным магнитным полем, создавая азимутальное разрывное воздействие на электроны,  $F_{\theta} = -\sigma V_{e\theta} \langle (B_r)^2 \rangle$ . Для типичных условий в FRC-системе 10 требуемое прикладываемое магнитное дипольное (или квадрупольное) поле внутри плазмы должно составлять только порядка 0,001 Т, с тем чтобы обеспечивать надлежащий разрыв электронов. Соответствующее внешнее поле примерно в 0,015 Т является достаточно слабым, чтобы не вызывать заметные потери быстрых частиц либо не оказывать иное отрицательное влияние на удержание. Фактически, прикладываемое магнитное дипольное (или квадрупольное) поле способствует подавлению неустойчивостей. В комбинации с тангенциальной инжекцией пучка нейтральных частиц и осевой инжекцией плазмы, направляющие катушки 460 обеспечивают дополнительный уровень управления относительно поддержания тока и устойчивости.

### *Зеркальные пробки*

[0099] Конструкция импульсных катушек 444 в пределах зеркальных пробках 440 обеспечивает локальную генерацию сильных магнитных полей (2-4 Т) с помощью умеренной емкостной энергии (примерно 100 кДж). Для формирования магнитных полей, типичных для предлагаемой работы FRC-системы 10, все силовые линии поля в формирующего объема проходят через сужения 442 в зеркальных пробках 440, как предполагается силовыми линиями магнитного поля на фиг. 2, и контакт плазмы со стенками не возникает. Кроме того, зеркальные пробки 440 совместно с магнитами 416 дивертора квазипостоянного тока могут регулироваться таким образом, чтобы направлять силовые линии поля на диверторные электроды 910 либо раздвигать силовые линии поля в конфигурации с заострением на конце (не показана). Второе повышает устойчивость и подавляет параллельную теплопроводность электронов.

[00100] Зеркальные пробки 440 непосредственно также способствуют управлению нейтральным газом. Зеркальные пробки 440 обеспечивают лучшее использование дейтериевого газа, напускаемого в кварцевые трубки во время формирования FRC, поскольку обратное протекание газа в диверторы 300 значительно уменьшается в силу малой способности пробок пропускать газ (такой малой, как 500 л/с). Большая часть остаточного газа, пропускаемого внутри формирующих трубок 210, быстро ионизируется.

Помимо этого, плазма высокой плотности, протекающая через зеркальные пробки 440, обеспечивает эффективную ионизацию нейтральных частиц, в силу чего - эффективный газовый барьер. Как результат, большинство нейтральных частиц, рециркулирующих в диверторах 300 из граничного слоя 456 FRC, не возвращается в камеру 100 удержания. Помимо этого, нейтральные частицы, связанные с работой плазменных пушек 350 (как пояснено ниже), должны удерживаться главным образом в диверторах 300.

[00101] В завершение, зеркальные пробки 440 имеют тенденцию улучшать удержание граничного FRC-слоя. С коэффициентами отражения зеркала (пробка/магнитные поля удержания) в диапазоне 20-40 и длине 15 м между северной и южной зеркальными пробками 440, время  $\tau_{\parallel}$  удержания частиц граничного слоя увеличивается вплоть до порядка величины. Улучшение  $\tau_{\parallel}$  легко увеличивает удержание FRC-частиц.

[00102] Предполагая, что обуславливаемые радиальной диффузией ( $D$ ) потери частиц из ограничиваемого сепаратриссой объема 453 сбалансированы осевыми потерями ( $\tau_{\parallel}$ ) из граничного слоя 456, получается  $(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s/\tau_{\parallel})$ , из чего длина градиента плотности у сепаратриссы может быть переписана как  $\delta = (D\tau_{\parallel})^{1/2}$ . Здесь  $r_s$ ,  $L_s$  и  $n_s$  являются радиусом сепаратриссы, длиной сепаратриссы и плотностью у сепаратриссы, соответственно. Время удержания частиц в FRC составляет  $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$ , где  $\tau_{\perp} = a^2/D$ , при  $a = r_s/4$ . Физически, улучшение  $\tau_{\parallel}$  приводит к увеличенному  $\delta$  (уменьшенному градиенту плотности и параметру дрейфа у сепаратриссы) и в силу этого к уменьшенным потерям частиц в FRC. Полное увеличение удержания частиц в FRC обычно несколько меньше квадратичного, поскольку  $n_s$  увеличивается с  $\tau_{\parallel}$ .

[00103] Существенное улучшение  $\tau_{\parallel}$  также требует, чтобы граничный слой 456 оставался чрезвычайно устойчивым (т.е. чтобы при  $n=1$  не было желобковой, рукавной или другой МГД-неустойчивости, типичной для открытых систем). Использование плазменных пушек 350 обеспечивает эту предпочтительную граничную устойчивость. В этом смысле зеркальные пробки 440 и плазменная пушка 350 образуют эффективную систему управления границей.

#### *Плазменные пушки*

[00104] Плазменные пушки 350 повышают устойчивость выпускаемых струй 454 FRC посредством линейного связывания. Плазмы пушек из плазменных пушек 350 генерируются без азимутального момента импульса, что оказывается полезным в управлении вращательными неустойчивостями FRC. По сути, пушки 350 представляют собой эффективное средство для того, чтобы управлять устойчивостью FRC без необходимости использования устаревшей технологии квадрупольной стабилизации. Как результат, плазменные пушки 350 позволяют использовать преимущество благоприятных эффектов быстрых частиц или доступа к усовершенствованному гибричному кинетическому FRC-режиму, как указано в этом раскрытии. Следовательно, плазменные пушки 350 обеспечивают возможность FRC-системе 10 работать с токами направляющих

катушек, подходящими только для разрыва электронов, но ниже порогового значения, что должно вызывать неустойчивость FRC и/или приводить к заметной диффузии быстрых частиц.

[00105] Как упомянуто в рассмотренном выше разделе «Зеркальные пробки», если  $\tau_{\parallel}$  может значительно улучшаться, подаваемая из пушек плазма должна быть сравнимой со скоростью потерь частиц в граничном слое ( $\sim 10^{22}/c$ ). Время жизни получаемой из пушек плазмы в FRC-системе 10 находится в миллисекундном диапазоне. Фактически, рассматривается плазма из пушек с плотностью  $n_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и температурой ионов примерно в 200 эВ, удерживаемая между торцевыми зеркальными пробками 440. Длина  $L$  захвата и коэффициент  $R$  отражения зеркала составляют примерно 15 м и 20, соответственно. Средняя длина свободного пробега ионов вследствие кулоновских столкновений составляет  $\lambda_{ii} \sim 6 \cdot 10^3 \text{ см}$ , и, поскольку  $\lambda_{ii} \ln R/R < L$ , ионы удерживаются в газодинамическом режиме. Время удержания плазмы в этом режиме составляет  $\tau_{gd} \sim RL/2V_s \sim 2 \text{ мс}$ , где  $V_s$  является скоростью ионного звука. Для сравнения, классическое время удержания ионов для этих параметров плазмы должно составлять  $\tau_c \sim 0,5\tau_{ii}(\ln R + (\ln R)^{0,5}) \sim 0,7 \text{ мс}$ . Аномальная поперечная диффузия, в принципе, позволяет сократить время удержания плазмы. Тем не менее, в FRC-системе 10, если предполагается скорость диффузии Бома, оценочное время поперечного удержания для плазмы из пушек составляет  $\tau_{\perp} > \tau_{gd} \sim 2 \text{ мс}$ . Следовательно, пушки должны обеспечивать значительное пополнение граничного FRC-слоя 456 и улучшенное общее удержание FRC-частиц.

[00106] Кроме того, потоки плазмы пушек могут быть включены примерно через 150-200 микросекунд, что обеспечивает их использование при запуске, поступательном перемещении и слиянии FRC в камере 100 удержания. Если включить примерно в  $t \sim 0$  (иницирование основного банка FRC), плазмы пушек помогают поддерживать предлагаемую динамически сформированную и сливающуюся FRC 450. Объединенные запасы частиц из формирующих FRC и из пушек удовлетворительны для захвата пучка нейтральных частиц, нагрева плазмы и длительного поддержания. Если включить при  $t$  в диапазоне от -1 до 0 мс, плазмы пушек могут заполнять кварцевые трубки 210 плазмой или ионизировать газ, напускаемый в кварцевые трубки, за счет этого обеспечивая формирование FRC с уменьшенным или, даже возможно, с нулевым напускаемым газом. Второе может требовать достаточно холодной формирующей плазмы для того, чтобы обеспечивать быструю диффузию магнитного поля с обратным смещением. Если включить при  $t < -2 \text{ мс}$ , потоки плазмы могут заполнять объем силовых линий поля примерно от 1 до 3 м<sup>3</sup> областей формирования и удержания формирующих секций 200 и камеры 100 удержания с целевой плотностью плазмы в несколько единиц на  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ , достаточной для того, чтобы обеспечивать возможность нарастания пучков нейтральных частиц до прибытия FRC. Формирующие FRC затем могут быть сформированы и поступательно перемещены в результирующую плазму в сосуде удержания. Таким образом, плазменные пушки 350 обеспечивают широкий спектр рабочих условий и режимов параметров.

*Электрическое смещение*



[00107] Управление профилем радиального электрического поля в граничном слое 456 является выгодным различными способами для обеспечения устойчивости и удержания FRC. Благодаря инновационным смещающим компонентам, развернутым в FRC-системе 10, можно прикладывать множество заблаговременно подготовленных распределений электрических потенциалов к группе открытых поверхностей потока по всей машине из областей далеко за пределами центральной области удержания в камере 100 удержания. Таким образом, радиальные электрические поля могут быть сгенерированы через граничный слой 456, расположенный сразу же за FRC 450. Эти радиальные электрические поля затем модифицируют азимутальное вращение граничного слоя 456 и осуществляют его удержание через сдвиг скоростей  $E \times B$ . Любое дифференциальное вращение между граничным слоем 456 и ядром FRC 453 затем может передаваться во внутреннюю часть плазмы FRC посредством сдвига. Как результат, управление граничным слоем 456 непосредственно оказывает влияние на ядро 453 FRC. Кроме того, поскольку свободная энергия при вращении плазмы также может причиной неустойчивостей, эта технология обеспечивает прямое средство для управления возникновением и ростом неустойчивостей. В FRC-системе 10 надлежащее граничное смещение предоставляет эффективное управление транспортировкой и вращением открытых силовых линии поля, а также вращением ядра FRC. Местоположение и форма различных предусмотренных электродов 900, 905, 910 и 920 обеспечивает возможность управления различными группами поверхностей 455 потока и при различных и независимых потенциалах. Таким образом, может реализовываться огромное количество различных конфигураций и напряженностей электрических полей, каждая из которых имеет различное характерное влияние на рабочие характеристики плазмы.

[00108] Ключевое преимущество всех этих инновационных технологий смещения представляет собой тот факт, что на поведение плазмы ядра и границы можно влиять из мест далеко снаружи плазмы FRC, т.е. нет необходимости в том, чтобы приводить какие-либо физические компоненты в соприкосновение с центральной горячей плазмой (что имело бы серьезные последствия для потерь энергии, потока и потерь частиц). Это имеет огромное положительное влияние на рабочие характеристики и все потенциальные варианты применения концепции высокоэффективного режима.

Экспериментальные данные: работа в высокоэффективном режиме

[00109] Инжекция быстрых частиц посредством пучков из пушек 600 пучков нейтральных частиц играет важную роль в обеспечении высокоэффективного режима. Фиг. 16A, 16B, 16C и 16D иллюстрируют этот факт. Изображен набор кривых, показывающих то, как время жизни FRC коррелируется с длительностью импульсов пучка. Все другие рабочие условия поддерживаются постоянными для всех разрядов, охватываемых этим исследованием. Данные усредняются по множеству выстрелов и в силу этого представляют типичное поведение. Абсолютно очевидно, что увеличенная длительность пучков создает FRC с большим временем жизни. Рассматривая эти данные, а также другие диагностические данные во время этого исследования, можно видеть, что пучки

увеличивают устойчивость и уменьшают потери. Корреляция между длиной импульсов пучков и временем жизни FRC не является идеальной, поскольку захват пучков становится неэффективным ниже определенного размера плазмы, т.е. по мере того, как FRC 450 сжимается в физическом размере, не все инжектированные пучки перехватываются и захватываются. Сокращение FRC обусловлено главным образом тем фактом, что чистые потери энергии (~4 МВт примерно на полпути через разряд) из плазмы FRC во время разряда в несколько превышают общую мощность, подаваемую в FRC через пучки нейтральных частиц (~2,5 МВт) для конкретной экспериментальной установки. Расположение пучков в местоположении ближе к средней плоскости сосуда 100 должно иметь тенденцию к уменьшению этих потерь и продлению времени жизни FRC.

[00110] Фиг. 17А, 17В, 17С и 17D иллюстрируют эффекты различных компонентов на достижение высокоэффективного режима. Они показывают семейство типичных кривых, иллюстрирующих время жизни FRC 450 как функцию от времени. Во всех случаях, постоянная, небольшая величина мощности пучков (примерно 2,5 МВт) инжектируется в течение полной длительности каждого разряда. Каждая кривая представляет различную комбинацию компонентов. Например, работа FRC-системы 10 без каких-либо зеркальных пробок 440, плазменных пушек 350 или геттерирования из систем 800 геттерирования приводит к быстрому появлению вращательной неустойчивости и потерям FRC-топологии. Добавление только зеркальных пробок 440 задерживает появление неустойчивостей и улучшает удержание. Использование совокупности зеркальных пробок 440 и плазменной пушки 350 дополнительно уменьшает неустойчивости и увеличивает время жизни FRC. Наконец, введение геттерирования ( $T_i$  в этом случае) вдобавок к пушкам 350 и пробкам 440 обеспечивает наилучшие результаты - результирующая FRC не содержит неустойчивостей и демонстрирует наибольшее время жизни. Из этой экспериментальной демонстрации очевидно, что полная совокупность компонентов дает наилучший эффект и обеспечивает пучки с наилучшими целевыми условиями.

[00111] Как показано на фиг. 1, недавно открытый высокоэффективный режим демонстрирует резко улучшенное поведение при транспортировке. Фиг. 1 иллюстрирует изменение времени удержания частиц в FRC-системе 10 между традиционным режимом и высокоэффективным режимом. Как можно видеть, в высокоэффективном режиме оно улучшено гораздо больше, чем в 5 раз. Помимо этого, фиг. 1 детализирует время удержания частиц в FRC-системе 10 относительно времени удержания частиц в традиционных FRC-экспериментах уровня техники. Что касается этих других машин, высокоэффективный режим FRC-системы 10 имеет улучшает удержание от 5 до почти 20 раз. Наконец, наиболее важно, что характер масштабирования удержания FRC-системы 10 в высокоэффективном режиме резко отличается от всех измерений уровня техники. До установления высокоэффективного режима в FRC-системе 10 различные эмпирические законы масштабирования извлекались из данных для прогнозирования времен удержания в FRC-экспериментах уровня техники. Все эти правила масштабирования зависят главным образом от отношения  $R^2/\rho_i$ , где  $R$  - радиус нуля магнитного поля (нестрогая мера

физического масштаба машины), а  $r_i$  ларморовский радиус ионов, вычисленный в прикладываемом извне поле (нестрогая мера прикладываемого магнитного поля). Из фиг. 1 очевидно, что длительное удержание в традиционных FRC является возможным только при большом размере машины и/или сильном магнитном поле. Работа FRC-системы 10 в традиционном FRC-режиме (CR) имеет тенденцию следовать тем правилам масштабирования, как указано на фиг. 1. Тем не менее, высокоэффективный режим является значительно превосходящим и показывает, что гораздо лучшее удержание достижимо без большого размера машины или сильных магнитных полей. Что еще более важно, из фиг. 1 также очевидно, что высокоэффективный режим приводит к улучшению времени удержания с уменьшенным размером плазмы по сравнению с традиционным режимом. Аналогичные тенденции также наблюдаются для времен удержания потока и энергии, как описано ниже, которые также увеличены более чем в 3-8 в FRC-системе 10. Прорыв высокоэффективного режима в силу этого обеспечивает использование умеренной мощности пучка, более слабых магнитных полей и меньшего размера для обеспечения устойчивости и поддержания FRC-равновесия в FRC-системе 10 и в будущих более высокоэнергетических машинах. Этим улучшениям сопутствуют более низкие эксплуатационные и конструктивные затраты, а также уменьшенная инженерно-техническая сложность.

[00112] Для дополнительного сравнения, фиг. 18A, 18B, 18C и 18D показывают данные из типичного разряда в высокоэффективном режиме в FRC-системе 10 как функцию от времени. Фиг. 18A иллюстрирует радиус исключаемого потока в средней плоскости. Для этих более длинных временных масштабов проводящая стальная стенка более не является хорошим консерватором потока, и магнитные зонды, внутренние по отношению к стенке, дополняются зондами снаружи стенки, чтобы надлежащим образом учитывать диффузию магнитного потока через сталь. По сравнению с типичными характеристиками в традиционном режиме (CR), как показано на фиг. 13A, 13B, 13C и 13D, рабочий высокоэффективный режим демонстрирует увеличенное более чем на 400 % время жизни.

[00113] Типичный график следа линейно-интегрированной плотности показан на фиг. 18B с его инвертированным по Абелю дополнением, контуры плотности, на фиг. 18C. По сравнению с традиционным FRC-режимом (CR), как показано на фиг. 13A, 13B, 13C и 13D, плазма является более статичной на протяжении всего импульса, что указывает на очень устойчивую работу. Пиковая плотность также немного ниже при выстрелах высокоэффективного режима - это следствие более высокой общей температуры плазмы (вплоть до 2 раз), как показано на фиг. 18D.

[00114] Для соответствующего разряда, проиллюстрированного на фиг. 18A, 18B, 18C и 18D, времена удержания энергии, частиц и потока составляют 0,5 мс, 1 мс и 1 мс, соответственно. В момент начала отсчета в 1 мс при вхождении в разряд, накопленная энергия плазмы составляет 2 кДж, тогда как потери составляют примерно 4 МВт, что приводит к тому, что эта цель является очень подходящей для поддержания пучков нейтральных частиц.

[00115] Фиг. 19 обобщает все преимущества высокоэффективного режима в виде недавно установленного экспериментального масштабирования удержания потока высокоэффективного режима. Как можно видеть на фиг. 19, на основе измерений, проведенных до и после  $t=0,5$  мс, т.е.  $t<0,5$  мс и  $t>0,5$  мс, удержание потока (и аналогично, удержание частиц и удержание энергии) масштабируется примерно с квадратом температуры электронов ( $T_e$ ) для заданного радиуса сепаратриссы ( $r_s$ ). Это сильное масштабирование с положительной степенью  $T_e$  (а не с отрицательной степенью) является полностью противоположным по отношению к масштабированию, демонстрируемому посредством традиционных токамаков, при котором удержание обычно является обратно пропорциональным некоторой степени температуры электронов. Проявление этого масштабирования является прямым следствием состояния высокоэффективного режима и крупноорбитальной (т.е. с орбитами в масштабе FRC-топологии и/или по меньшей мере в характерном масштабе длин градиента магнитного поля) популяции ионов. Фундаментально, это новое масштабирование в значительной степени предпочитает высокие рабочие температуры и обеспечивает реакторы относительно умеренного размера.

[00116] За счет преимуществ, которые обеспечивает высокоэффективный режим, является достижимым поддержание FRC или установившееся состояние, возбуждаемое пучками нейтральных частиц, что означает то, что глобальные параметры плазмы, такие как тепловая энергия плазмы, общие количества частиц, радиус и длина плазмы, а также магнитный поток, являются поддерживаемыми на приемлемых уровнях без существенного спада. Для сравнения, фиг. 20 показывает данные на графике А, полученные в типичном разряде в высокоэффективном режиме в FRC-системе 10 как функцию от времени, а на графике В для запланированного типичного разряда в высокоэффективном режиме в FRC-системе 10 как функцию от времени, в которой FRC 450 поддерживается без спада на протяжении длительности импульса пучка нейтральных частиц. Для графика А, пучки нейтральных частиц с полной мощностью в диапазоне примерно 2,5-2,9 МВт инжестированы в FRC 450 в течение длины активного импульса пучка примерно в 6 мс. Время жизни диамагнитной плазмы, проиллюстрированное на графике А, составляет примерно 5,2 мс. Более поздние данные показывают то, что время жизни диамагнитной плазмы примерно 7,2 мс является достижимым с длиной активного импульса пучка примерно в 7 мс.

[00117] Как отмечено выше относительно фиг. 16А, 16В, 16С и 16D, корреляция между длиной импульса пучка и временем жизни FRC не является идеальной, поскольку захват пучка становится неэффективным ниже определенного размера плазмы, т.е. поскольку FRC 450 сжимается в физическом размере, не все инжестированные пучки перехватываются и захватываются. Сокращение или спад FRC обусловлены главным образом тем фактом, что чистые потери энергии (-4 МВт примерно на полпути через разряд) из плазмы FRC во время разряда несколько превышают общую мощность, подаваемую в FRC через пучки нейтральных частиц (-2,5 МВт) для конкретной экспериментальной установки. Как отмечено относительно фиг. 3С, наклонная инжестия пучка из пушек 600

пучков нейтральных частиц к средней плоскости улучшает связь пучок-плазма даже по мере того, как плазма FRC сжимается или иным образом аксиально сужается в течение периода инъекции. Помимо этого, соответствующая подпитка таблетками должна поддерживать требуемую плотность плазмы.

[00118] График В представляет собой результат моделирований, выполненных с использованием длительности импульсов активных пучков примерно 6 мс и общей мощности пучков из пушек 600 пучков нейтральных частиц немного большей примерно 10 МВт, при этом пучки нейтральных частиц должны инжектировать нейтральные Н-(или D-) частицы с энергией частицы примерно 15 кэВ. Эквивалентный ток, инжектируемый посредством каждого из пучков, составляет примерно 110 А. Для графика В угол инъекции пучков к оси устройства составляет примерно  $20^\circ$ , целевой радиус составляет 0,19 м. Угол инъекции может изменяться в диапазоне  $15-25^\circ$ . Пучки должны инжектироваться в параллельном направлении азимутально. Чистая боковая сила, а также чистая осевая сила от инъекции импульсов пучков нейтральных частиц должны минимизироваться. Аналогично графику А, быстрые нейтральные (Н) частицы инжектируются из инжекторов 600 пучков нейтральных частиц с момента, когда северная и южная формирующие FRC сливаются в камере 100 удержания в одну FRC 450.

[00119] Моделирования, которые составляют основу для графика В, используют многомерные холловские МГД-решатели для фоновой плазмы и равновесия, полностью кинетические решатели на основе метода Монте-Карло для энергетических компонентов пучков и всех процессов рассеяния, а также множество связанных уравнений переноса для всех плазменных частиц, чтобы моделировать интерактивные процессы оценки потерь. Компоненты переноса эмпирически откалиброваны и тщательно сравниваются с экспериментальной базы данных.

[00120] Как показано на графике В, время жизни диамагнетика в установившемся состоянии FRC 450 представляет собой длительность импульса пучка. Тем не менее, важно отметить, что ключевой корреляционный график В показывает то, что когда пучки выключены, плазма или FRC начинает спадать в это время, но не раньше. Спад должен быть аналогичным спаду, который наблюдается в разрядах, которые не ассистируются пучками - вероятно, на порядок 1 мс после времени выключения пучков - и представляет собой просто отражение характерного времени спада плазмы, обусловленного внутренними процессами собственных потерь.

[00121] Обращаясь к фиг. 21А, 21В, 21С, 21D и 21Е, отмечаем, что результаты экспериментов, проиллюстрированные на чертежах, показывают поддержание FRC- или установившегося состояния, возбуждаемое от наклонных пучков нейтральных частиц, т.е. глобальные параметры плазмы, такие как радиус плазмы, плотность плазмы, температура плазмы, а также магнитный поток поддерживаются на постоянных уровнях без спада в корреляции с длительностью импульсов пучков нейтральных частиц (НП). Например, такие параметры плазмы поддерживаются практически постоянными в течение  $\sim 5+$  мс. Такие рабочие характеристики плазмы, включая признак поддержания, имеет сильную

корреляцию с длительностью импульсов НП, причем диамагнетизм сохраняется даже в течение нескольких миллисекунд окончания НП вследствие накопленных быстрых ионов. Как проиллюстрировано, рабочие характеристики плазмы ограничивается только посредством ограничений по длительности импульса, возникающих в результате конечных накопленных энергий в связанных источниках питания множества критических систем, таких как инжекторы НП, а также в других системных компонентах.

*Подстраиваемые энергии для пучков нейтральных частиц*

[00122] Как отмечено выше относительно фиг. 3А, 3В, 3С, 3D, 3Е и 8, пучки 600 нейтральных атомов развертываются в FRC-системе 10 для того, чтобы обеспечивать нагрев и возбуждение тока, а также развивать давление быстрых частиц. Отдельные линии движения пучков, содержащие инжекторные системы 600 пучков нейтральных атомов, расположены вокруг центральной камеры 100 удержания и, как показано на фиг. 3С, 3D и 3Е, предпочтительно под углом, чтобы инжектировать нейтральные частицы к средней плоскости камеры 100 удержания.

[00123] Чтобы дополнительно улучшить поддержание FRC и продемонстрировать линейное нарастание FRC до высоких температур плазмы и повышенных энергий системы, настоящая FRC-система 10 включает в себя систему инжекторов 600 пучков нейтральных частиц (NBI) с повышенной мощностью и увеличенной длиной импульса, например, только в примерных целях, с мощностью примерно 20+ МВт при длине импульса вплоть до 30 мс. NBI-система 600 включает в себя множество инжекторов 615 на основе положительных ионов (см. фиг. 3D и 3Е), обладающих гибкой модульной конструкцией, с поднабором NBI-инжекторов 615, например, с четырьмя (4) из восьми (8) NBI-инжекторов 615, имеющих возможность подстраивать энергию пучка во время выстрела от начальной более низкой энергии пучка до повышенной энергии пучка, например, примерно от 15 кэВ примерно до 40 кэВ при постоянном токе пучка. Эта возможность NBI-инжекторов 615 требуется для того, чтобы достигать более эффективного нагрева и результирующего создания повышенного давления в ядре 450 плазмы. В частности, эта возможность обеспечивает очень желательное повышение рабочих характеристик на рабочем уровне с пиковой энергией по сравнению с низким уровнем энергии: например, (i) более высокая мощность нагрева вплоть до 2 раз; (ii) почти 5-кратное уменьшение потерь на обмен зарядами; и (iii) вплоть до двойной эффективности нагрева. Помимо этого, непрерывно переменная энергия пучка, производимая посредством NBI-инжекторов 615, обеспечивает оптимальное согласование орбитальных параметров инжектированных и затем захваченных быстрых ионов относительно мгновенных профилей магнитного давления во время процесса линейного нарастания. Наконец, высокие темпы нарастания, обеспечивающие длительность линейного нарастания в 0,1-10 мс, вместе с быстрой (порядка 1 мс или менее) подстраиваемостью энергии и мощности пучков NBI-инжекторов 615 предусматривают дополнительные эффективные «ручки управления», т.е. управляемые признаки, для придания формы плазме и управления удержанием плазмы с активной обратной связью через модуляцию энергии и мощности пучка.

[00124] Достаточная мощность нагрева требуется для того, чтобы обеспечивать нагрев и создание повышенного давления FRC 450, как для поддержания, так и для линейного нарастания до высоких температур плазмы и повышенных энергий системы. При условии достаточно низких темпов темп линейного нарастания главным образом представляет собой функцию от того, сколько мощности может выделяться в FRC-ядре 450 посредством NBI-инжекторов 615 в любой момент времени. Более высокая общая мощность пучка нейтральных частиц через отверстие для инъекции в силу этого всегда является желательной.

[00125] Кроме того, эффективный темп нагрева благодаря NBI-инжекторам 615 представляет собой сложное взаимодействие между характеристиками инжектированного пучка и имеющими место постоянными мгновенными профилями температур всех частиц, плотностями электронов и ионов, концентрацией нейтральных частиц, а также магнитным полем через FRC-ядро 450. Из них, профили магнитного поля преднамеренно изменяются на временных масштабах в доли миллисекунд в ходе линейного нарастания посредством системы управления, тогда как связанные с кинетическим давлением профили эволюционируют через внутренние изменения, производные от произвольно организуемых процессов и турбулентности в плазме, а также от энергии, выделяемой посредством процесса инъекции. Подстраиваемость профилей пучков обеспечивает средство для того, чтобы наиболее оптимально адаптироваться к этим варьирующимся условиям.

[00126] Например, поперечное сечение обмена зарядами, т.е. вероятность захвата электронов посредством быстрого иона для формирования нейтрального атома, представляет собой строгую функцию от энергии пучка. Для диапазона в 15-40 кэВ, основной темп обмена зарядами резко снижается как функция от энергии пучка. Следовательно, при любом данном уровне поля, сохранение энергии в плазме является наибольшим при инъекции частиц при наибольшей энергии, совместимой для такого уровня поля (в числе прочего, это требует, чтобы энергия инжектированных частиц приводила к радиусу орбиты захваченных ионов, который вписывается внутрь внутренней стенки системы удержания).

[00127] Другой пример влияния профиля на полную эффективность нагрева имеет отношение к тому, где выделяется мощность. Более высокая энергия пучка типично должна приводить к относительно более высокому энерговыделению в FRC-периферии по сравнению с ядром. Нарастание магнитного поля при поддержании энергии пучка неизменной должно приводить к более плотным орбитам захваченных ионов и соразмерно более сильному связыванию с плазмой FRC-ядра за счет мощности. Эти факты также затем оказывают сильное влияние на сохранение энергии, например, периферийно выделяемая энергия гораздо проще транспортируется из системы вдоль структуры открытых силовых линий поля, в то время как выделяемая в ядре мощность теряется сравнительно более медленно вследствие меньших времен транспортировки в поперечном поле. Таким образом, требуется тесная координация нарастания магнитного поля и соответствующих

увеличений энергии пучка.

[00128] Пучковая система 600 конструируется с возможностью быстрого нарастания напряжения в диапазоне 0,1-10 мс. Это обеспечивает потенциал для того, чтобы увеличивать температуры ионов и электронов в 2 и 10 раз, соответственно, и достигать означенного во временных масштабах, меньших типичных макроскопических времен роста неустойчивости. Следовательно, устойчивость плазмы фундаментально увеличивается, как и рабочая надежность и воспроизводимость.

[00129] Переменные времена возрастания напряжения от 0,05 до 1 мс предусматривают достаточно малые времена отклика, так что пучки могут использоваться в качестве части системы с активной обратной связью. Таким образом, модуляция пучка может использоваться для того, чтобы управлять макро- и микроустойчивостью. Например, при моментальном сдвиге радиального профиля выделения мощности посредством изменения энергии пучка (и сдвига за счет этого радиального рисунка энерговыделения), можно влиять на градиенты давления, которые могут уравнивать начало нестабильных плазменных мод. FRC-система 10, показанная на фиг. 3D и 3E, использует эту возможность вместе с быстрой магнитной обратной связью для того, чтобы управлять внутренним наклоном, темпами вращения, развитием дрейфовых волн и другими рабочими сценариями.

[00130] Фиг. 25 показывает иллюстрацию NBI-инжектора 615 настоящей FRC-системы 10. NBI-инжектор 615 показан в примерном варианте осуществления как включающий в себя: возбудитель 650 дуги; плазменный ящик 651; ионно-оптическую систему 652, содержащую триодную или тетродную группировку вытягивающих и ускоряющих сеток; прицельный подвес 653; нейтрализатор 654, содержащий дуговые испарители 655, такие как, например, дуговые Ti-испарители, крионасос 656, имеющий поверхностные структуры, такие как, например, ребристые поверхностные структуры, выполненные с возможностью увеличенной криоткачки, и отклоняющий магнит 656 для удаления ненейтрализованных ионов; и коллимирующую апертуру 658, включающую в себя вставляемый калориметр 659 для прерывистой характеристики, диагностики и перекалибровки пучка.

[00131] Более конкретно и ссылаясь на фиг. 26, реализация подстраиваемой пучковой системы, как показано, предпочтительно основана на триодной ионно-оптической системе (= IOS) 660. Идея заключается в ускоряюще-замедляющей схеме. Как проиллюстрировано на фиг. 26, первая сетка G1 задается равной напряжению V1, в то время как вторая сетка G2 задается равной напряжению V2, и конечная сетка G3 задается равной напряжению V3. Вытягиваемые ионы сначала ускоряются до энергии  $E1=e*(V1-V2)$  при прохождении через промежуток между G1 и G2 (e здесь означает электрический заряд иона). Затем они замедляются в промежутке между G2 и G3 таким образом, что  $E2=E1+e*(V2-V3)$ . Напряжения типично регулируются таким образом, что  $V1>V2<V3$ . На основе соответствующих отдельных источников PS1, PS2, PS3 питания напряжения на сетке могут инкрементно регулироваться во время импульса, с тем чтобы изменять вывод эмитированных ионов 662. Например, чтобы начинать импульс пучка атомов водорода,



рабочие напряжения могут регулироваться до  $V_1=15$  кВ,  $V_2=-25$  кВ и  $V_3=0$  В. Ионы начального пучка затем должны ускоряться сначала до 40 кэВ и затем появляться из IOS с энергией в 15 кэВ. Позднее в импульсе источники мощности могут переключаться для того, чтобы обеспечивать  $V_1=40$  кВ,  $V_2=-1$  кВ,  $V_3=0$  В. Замедление пучка во втором промежутке в таком случае на практике должно отсутствовать, давая в результате выходную энергию пучка примерно в 40 кэВ. Источники мощности могут управляться отдельно и предусматривают соответствующую модуляцию напряжением. Ионы начального пучка вытаскиваются из множества стандартных дуговых или плазменных RF-источников (PS). После появления из IOS 660 ионы 662 пучка проходят нейтрализатор 664, в котором быстрые ионы преобразуются в нейтральные ионы через обмен зарядами электронов вне холодного нейтрального газа, присутствующего в нейтрализаторе 664. Надлежащая криооткачка предотвращает истечение нейтрального газа из нижерасположенного диафрагменного отверстия нейтрализатора 664. На конце нейтрализатора также предусмотрен надлежащий отклоняющий магнит 666, который обеспечивает удаление ненейтрализованных быстрых ионов 663, и связанный поглотитель 668 ионов для того, чтобы поглощать быстрые ионы и их энергию. Появляющийся пучок 670 атомов затем проходит через соответствующую апертуру 6720 для того, чтобы уменьшать расходимость пучка и обеспечивать хорошо коллимированный поток нейтральных атомов к ядру реактора.

[00132] В альтернативной версии IOS основана на тетродной конструкции. В этом случае, IOS состоит из четырех сеток, которые имеют такой же ускоряюще-замедляющий принцип, как пояснено для триодного случая. Специалисты в области техники должны легко признавать подобие между системными компонентами и принципами работы. Введение четвертой сетки обеспечивает дополнительные возможности подстройки и большую общую гибкость в работе.

[00133] Примерные варианты осуществления, предусмотренные в данном документе, описываются в предварительной заявке на патент США номер 62/414574, которая включена в данный документ по ссылке.

#### *Управление устойчивостью и осевым положением плазмы*

[00134] Традиционные решения для FRC-неустойчивостей типично обеспечивают устойчивость в осевом направлении за счет неустойчивости в радиальном направлении либо устойчивость в радиальном направлении за счет осевой неустойчивости, но не устойчивость в обоих направлениях одновременно. В первом приближении равновесие, при котором положение плазмы является поперечно или радиально устойчивым, имеет требуемое свойство осесимметричности, за счет осевой неустойчивости. В связи с вышеизложенным варианты осуществления, предусмотренные в данном документе, направлены на системы и способы, которые способствуют устойчивости плазмы FRC в радиальном и осевом направлениях и управлению осевым положением плазмы FRC вдоль оси симметрии камеры удержания для плазмы FRC независимо от свойств осевой устойчивости равновесия плазмы FRC. Тем не менее, неустойчивость осевого положения

активно управляется с использованием набора внешних осесимметричных катушек, которые управляют осевым положением плазмы FRC. Системы и способы обеспечивают управление с обратной связью осевым положением плазмы FRC независимо от свойств устойчивости плазменного равновесия посредством действия с напряжениями, прикладываемыми к набору внешних катушек, концентрических с плазмой, и с использованием технологии нелинейного управления.

[00135] Варианты осуществления, представленные в данном документе, используют аксиально неустойчивые равновесия FRC, чтобы принудительно активировать радиальную устойчивость при стабилизации или управлении осевой неустойчивостью. Таким образом, может получаться устойчивость в осевом и радиальном направлениях. Технология управления проектируется с возможностью изменять внешнее или равновесное магнитное поле для того, чтобы задавать плазму FRC радиально или поперечно стабильной за счет осевой неустойчивости, и затем действовать на ток в радиальной полевой катушке для того, чтобы быстро восстанавливать положение плазмы FRC к средней плоскости при минимизации перерегулирования и/или колебаний вокруг средней плоскости камеры удержания. Преимущество этого решения состоит в том, что оно уменьшает сложность актуаторов, требуемых для управления. По сравнению с традиционными решениями с несколькими степенями свободы, технология варианта осуществления, представленного в данном документе, уменьшает сложность до проблемы управления вдоль оси вращения плазмы FRC, имеющей одну степень свободы.

[00136] Комбинация форм сигналов в токах в катушках, пополнении топливом и в мощности пучка нейтральных частиц, которые в результате приводят к аксиально неустойчивой плазме, задает сценарий управления плазмой, который переводит плазму в аксиально неустойчивую ситуацию. Сценарий может предварительно программироваться с использованием накопленных знаний моделирований или экспериментов либо управляться с обратной связью таким образом, чтобы поддерживать равновесие, которое является аксиально неустойчивым. Положение плазмы должно управляться во время разрядов независимо от свойств устойчивости равновесия, например, схема управления должна работать для аксиально устойчивых или аксиально неустойчивых плазм, вплоть до предела. Наиболее аксиально неустойчивая плазма, которая может управляться, имеет время роста, сравнимое со временем нарастания оболочки сосуда.

[00137] Обращаясь теперь к системам и способам, которые способствуют устойчивости плазмы FRC в радиальном и осевом направлениях и управлению осевым положением плазмы FRC вдоль оси симметрии камеры удержания плазмы FRC, фиг. 27 показывает упрощенную схему, чтобы проиллюстрировать примерный вариант осуществления механизма 510 управления осевым положением. Вращающаяся плазма FRC 520, показанная в камере 100 удержания, имеет ток 522 плазмы и направление 524 осевого смещения. Равновесное поле (не показано) производится в камере 100 посредством симметричных компонентов тока, таких как, например, катушки 412 квазипостоянного тока (см. фиг. 2, 3А, 3D и 3Е). Равновесное поле не производит результирующую силу в

направлении 524 осевого смещения, но может подстраиваться таким образом, чтобы производить поперечно/радиально или аксиально устойчивую плазму. Для целей варианта осуществления, представленного в данном документе, равновесное поле подстраивается, чтобы производить поперечно/радиально устойчивую плазму FRC 520. Как отмечено выше, это приводит к осевой неустойчивости и в силу этого к осевому смещению плазмы FRC 520 в направлении 524 осевого смещения. По мере того, как плазма FRC 520 перемещается аксиально, она индуцирует токи 514 и 516, которые являются антисимметричными, т.е. во встречных направлениях в стенках камеры 100 удержания с каждой стороны от средней плоскости камеры 100 удержания. Плазма FRC 520 индуцирует эти типы компонентов тока как в сосуде, так и во внешних катушках. Эти антисимметричные компоненты 514 и 516 тока производят радиальное поле, которое взаимодействует с тороидальным током 522 плазмы для того, чтобы создать силу, которая противодействует перемещению плазмы FRC 520, и результат этой силы заключается в том, что она замедляет осевые смещения плазмы. Эти токи 514 и 516 постепенно рассеиваются со временем вследствие удельного сопротивления камеры 100 удержания.

[00138] Радиальные полевые катушки 530 и 531, расположенные около камеры 100 удержания с каждой стороны от средней плоскости, обеспечивают дополнительные радиальные компоненты поля, которые обусловлены токами 532 и 534, индуцированными во встречных направлениях в катушках 530 и 531. Радиальные полевые катушки 530 и 531 могут содержать набор осесимметричных катушек, которые могут располагаться внутренне или внешне по отношению к сосуду 100 удержания. Радиальные катушки 530 и 531 показаны как расположенные внешне по отношению к сосуду 100 удержания, аналогично катушкам 412 квазипостоянного тока (см. фиг. 2, 3А, 3D и 3Е). Каждая из катушек 530 и 531 или наборов катушек может переносить ток, отличный от тока катушек с противоположной стороны от средней плоскости, но токи являются антисимметричными относительно средней плоскости сосуда 100 удержания и формируют структуру магнитного поля с  $B_z \neq 0$ ,  $B_r = 0$  вдоль средней плоскости. Радиальные полевые катушки 530 и 531 создают дополнительный радиальный компонент поля, который взаимодействует с тороидальным током 522 плазмы для того, чтобы создавать осевую силу. Осевая сила в свою очередь перемещает плазму обратно к средней плоскости камеры 100 удержания.

[00139] Управляющий механизм 510 включает в себя систему управления, выполненную с возможностью действовать на ток в радиальной полевой катушке, чтобы быстро восстанавливать положение плазмы к средней плоскости при минимизации перерегулирования и/или колебаний вокруг средней плоскости машины. Система управления включает в себя процессор, функционально соединенный с радиальными полевыми катушками 530 и 531, катушки 412 квазипостоянного тока, их соответствующие источники питания и другие компоненты, такие как, например, магнитные датчики, обеспечивающие измерения положения плазмы, скорости плазмы и тока в активной катушке. Процессор может быть выполнен с возможностью выполнять вычисления и анализ, описанные в настоящей заявке, и может включать в себя или функционально

соединяться с одним или более запоминающих устройств, включающих в себя энергонезависимый машиночитаемый носитель. Он может включать в себя процессорную или микропроцессорную систему, включающую в себя системы с использованием микроконтроллеров, компьютеров с сокращенным набором команд (RISC), специализированных интегральных схем (ASIC), логических схем и любую другую схему или процессор, допускающий выполнение функций, описанных в данном документе. Вышеуказанное приводится только в качестве примера и в силу этого не имеет намерение каким-либо образом ограничивать определение и/или значение термина «процессор» или «компьютер».

[00140] Функции процессора могут реализовываться с использованием программных процедур, аппаратных компонентов либо комбинаций вышеозначенного. Аппаратные компоненты могут реализовываться с использованием множества технологий, включающих в себя, например, интегральные схемы или дискретные электронные компоненты. Процессор типично включает в себя считываемое/записываемое запоминающее устройство и типично также включает в себя аппаратные средства и/или программное обеспечение, чтобы записывать в и/или считывать из запоминающего устройства.

[00141] Процессор может включать в себя вычислительное устройство, устройство ввода, модуль отображения и интерфейс, например, для осуществления доступа в Интернет. Компьютер или процессор может включать в себя микропроцессор. Микропроцессор может соединяться с шиной связи. Компьютер или процессор также может включать в себя запоминающее устройство. Запоминающее устройство может включать в себя оперативное запоминающее устройство (RAM) и постоянное запоминающее устройство (ROM). Компьютер или процессор также может включать в себя устройство хранения данных, которое может представлять собой жесткий диск или съемный накопитель хранения данных, к примеру, накопитель на гибких дисках, накопитель на оптических дисках и т.п. Устройство хранения данных также может представлять собой другое аналогичное средство для загрузки компьютерных программ или других инструкций в компьютер или процессор.

[00142] Процессор выполняет набор инструкций, которые сохраняются в одном или более элементов хранения данных, чтобы обрабатывать входные данные. Элементы хранения данных также могут сохранять данные или другую информацию требуемым образом. Элемент хранения данных может иметь форму источника информации либо физического запоминающего элемента в машине для обработки.

[00143] Проблема управления положением аксиально устойчивой или неустойчивой FRC-конфигурации с использованием актуаторов радиальных полевых катушек решается с использованием ветви теории нелинейного управления, известной как управление в скользящем режиме. Линейная функция состояний системы (скользящая поверхность) выступает в качестве сигнала ошибки с требуемым асимптотически устойчивым (скользящим) поведением. Скользящая поверхность конструируется с использованием

теории Ляпунова, чтобы демонстрировать асимптотическую стабильность в широком диапазоне динамических параметров FRC. Предложенная схема управления затем может использоваться для аксиально устойчивых и неустойчивых плазм без необходимости перенастраивать параметры, используемые в скользящей поверхности. Это свойство является преимущественным, поскольку, как упомянуто выше, равновесие, возможно, должно переходить между аксиально устойчивым и аксиально устойчивым равновесиями в различных фазах FRC-разряда.

[00144] Конфигурация схемы 500 управления показана на фиг 28. Фильтр нижних частот ограничивает частоты переключения в требуемой управляющей полосе пропускания. Допускается Цифровой контур управления, требующий дискретизации и передачи сигналов с задержкой в одну выборку. Сигнал ошибки (скользящая поверхность) представляет собой линейную комбинацию тока в катушке, положения плазмы и скорости плазмы. Положение плазмы и скорость плазмы получают из внешних магнитных измерений. Токи в системах активных катушек могут измеряться посредством стандартных способов.

[00145] Токи в катушках и положение плазмы требуются для того, чтобы реализовывать управление положением. Скорость плазмы требуется для того, чтобы повышать производительность, но является необязательной. Нелинейная функция этого сигнала ошибки (закон релейного управления) генерирует дискретные уровни напряжения для каждой пары источников питания, соединенных с симметричными в средней плоскости катушками. Симметричные в средней плоскости катушки питаются релейными напряжениями с идентичной интенсивностью, но с противоположным знаком. Это создает радиальный компонент поля, чтобы восстанавливать положение плазмы к средней плоскости.

[00146] Чтобы продемонстрировать выполнимость схемы управления, жесткая плазменная модель используется для того, чтобы имитировать динамику плазмы. Модель использует геометрию магнитов. Распределение тока плазмы соответствует аксиально неустойчивым равновесиям со временем роста 2 мс, когда рассматриваются только плазма и сосуд. Источники питания предположительно работают с дискретными уровнями напряжения, типично с шагами в 800 В.

[00147] Фиг. 29 показывает несколько моделирований управления плазмой, которые подчеркивают взаимосвязь между прикладываемыми напряжениями к катушкам и временами успокоения положения плазмы, вместе с требуемым пиковым током в катушке и темпами нарастания, чтобы возвращать в среднюю плоскость плазму, которая смещается аксиально на 20 см. Эти примеры моделирований управления осевым положением в скользящем режиме выполняются при 0,3 Т с использованием четырех пар внешних подстроечных катушек. Четыре случая показаны согласно источникам мощности с дискретными уровнями напряжения с шагами 200 В (заштрихованный квадрат), 400 В (заштрихованный кружок), 800 В (заштрихованный треугольник) и 1600 В (незаштрихованный квадрат). Для всех четырех случаев управляющая полоса пропускания

составляет 16 кГц, и частота дискретизации составляет 32 кГц. Показываются положение плазмы (верхний чертеж), ток в крайней внешней паре катушек (средний) и темп нарастания тока в катушке (нижний). Смещение плазмы может становиться устойчивым до тех пор, пока оно не достигает 20 см. В этой точке, применяется управление с обратной связью.

[00148] Результаты моделирования указывают то, что:

1. Для того, чтобы возвращать плазму к средней плоскости в течение 5 мс (следы заштрихованного квадрата), достаточно темпа линейного нарастания тока в катушке в 0,5 МА/с, что требует 200-вольтового источника питания.

2. Для того, чтобы возвращать плазму к средней плоскости в течение 2,3 мс (следы заштрихованного кружка), достаточно темпа линейного нарастания тока в катушке в 1 МА/с, что требует 400-вольтового источника питания.

3. Для того, чтобы возвращать плазму к средней плоскости в течение 1,3 мс (следы заштрихованного треугольника), достаточно темпа линейного нарастания тока в катушке в 2 МА/с, что требует 800-вольтового источника питания.

4. Для того, чтобы возвращать плазму к средней плоскости в течение 1,0 мс (следы незаштрихованного квадрата), достаточно темпа линейного нарастания тока в катушке в 4 МА/с, что требует 1600-вольтового источника питания.

[00149] Пиковые токи для всех подстроечных катушек для третьего случая, изученного выше (случая темпа нарастания 2 МА/с), также показаны на фиг. 30 как функция положения подстроечной катушки. Примеры моделирования управления осевым положением в скользящем режиме выполняются при 0,3 Т с использованием четырех пар внешних подстроечных катушек с использованием источника питания с тремя уровнями (+800 В, 0, -800 В), управляющей полосой пропускания в 16 кГц и частотой дискретизации в 32 кГц. Для того, чтобы возвращать плазму к средней плоскости в течение 1,3 мс, требуется темп линейного нарастания тока в катушке в 2 МА/с. Пиковый ток, требуемый во всей паре катушек, меньше 1,5 кА. Фактическая требуемая частота переключения (примерно 2 кГц) значительно ниже полосы пропускания системы управления.

[00150] Система управления также может реализовываться как целевая поверхность, которая представляет собой функцию только от тока в катушке и скорости плазмы, без положения плазмы. В этом случае контур управления осевым положением обеспечивает только стабилизацию осевой динамики, но не управление. Это означает то, что плазма находится в метастабильной ситуации и может медленно дрейфовать вдоль своей оси. Управление положением затем обеспечивается с использованием дополнительного контура обратной связи, который управляет плазменными промежутками между сепаратриссой плазмы и сосудом, в силу чего он выполняет управление формой и положением плазмы одновременно.

[00151] Другое устройство удержания плазмы, в котором используются аналогичные системы управления, представляет собой токамак. Чтобы поддерживать удержание плазмы, ток плазмы в токамаке должен поддерживаться между нижним и

верхним пределом, которые являются примерно пропорциональными плотности плазмы и тороидальному полю, соответственно. Чтобы работать при высокой плотности плазмы, ток плазмы должен увеличиваться. Одновременно полоидальное поле должно поддерживаться максимально возможно низким, так что коэффициент  $q$  запаса надежности составляет выше  $q=2$ . Это достигается за счет удлинения плазмы вдоль осевого направления машины, что позволяет приспособивать большой ток плазмы (и в силу этого обеспечивать возможность высокой плотности плазмы) без увеличения граничного магнитного поля выше его пределов надежности. Эти продолговатые плазмы являются неустойчивыми вдоль осевого направления машины (известного на жаргоне, связанном с токамаками, в качестве вертикального направления) и также требуют механизмов стабилизации плазмы. Управление вертикальным положением плазмы в токамаках также восстанавливается с использованием набора радиальных полевых катушек, так что оно сильно напоминает проблему управления RFC-положением. Тем не менее, причины требовать стабилизации в токамаке и FRC отличаются. В токамаке, вертикальная неустойчивость плазмы представляет собой штраф, который должен выплачиваться, чтобы работать при большом токе плазмы, который требует удлинения плазмы для того, чтобы работать с сильным тороидальным полем. В случае FRC, неустойчивость плазмы представляет собой штраф, который должен выплачиваться, чтобы получать поперечную стабильность. Токмаки имеют тороидальное поле, которое стабилизирует конфигурацию, так что они не требуют поперечной стабилизации.

#### *Пучок электронов для плазменного нагрева*

[00152] Обращаясь к фиг. 31-25, представляются примерные варианты осуществления пучка электронов с высоким уровнем мощности для плазменного нагрева в системе магнитного удержания плазмы. В примерных вариантах осуществления пучок электронов обеспечивает электронный ток вплоть до примерно 100-120 А при ускоряющем напряжении примерно 30 кВ с длительностью импульса вплоть до примерно 6-10 мс. Электроны вытягиваются от плазменного эмиттера и ускоряются посредством вложенных многоапертурных ускоряющих сеток. Пучок транспортируется к отверстию для инъекции в заземленной дрейфовой трубке. Плазменный эмиттер электронов погружается во внешнее осевое магнитное поле, чтобы обеспечивать условия для осевой инъекции в системы удержания плазмы, имеющие сильное магнитное поле. В данном документе представлены примерные варианты осуществления источника пучка электронов с плазменными эмиттерами, которые упрощают генерацию длинно-импульсных пучков электронов с высоким уровнем мощности для нагрева плазм FRC, .

[00153] Как показано на фиг. 31, примерный вариант осуществления пучка 750 электронов включает в себя дуговой плазменный источник 754, электронно-оптическую систему 770, состоящую из системы вложенных ускоряющих сеток, и линию движения пучка, которая включает в себя магнитную систему 760 для обеспечения эффективного формирования, транспортировки и, в конечном счете, инъекции пучка электронов в представляющее интерес устройство удержания плазмы. Как проиллюстрировано на фиг.

31, магнитная система 760 включает в себя катушку 762 плазменного генератора и катушку 764 плазменного эмиттера, и как дополнительно проиллюстрировано на фиг. 36, катушку 766 для транспортировки пучка. Как проиллюстрировано на фиг. 31, дуговой плазменный источник 754, например, плазменно-дуговой генератор, расположен таким образом, чтобы создавать плазму в объеме 756 расширения плазмы плазменной камеры 758. Электронно-оптическая система 770 со своими вложенными ускоряющими сетками для вытягивания пучка расположены рядом с плазменной камерой 758 и, вместе с плазменной камерой 758 и плазменным источником 754, внутри электростатического экрана 752.

[00154] В примерном варианте осуществления процесс формирования пучка электронов включает в себя следующие этапы: генерирование плазмы, расширение плазмы, вытягивание и ускорение электронов. Начальная водородная плазма создается посредством плазменно-дугового генератора 754 в объеме 756 расширения плазменной камеры 758. Плазменный генератор 754 формирует гидродинамический поток плазмы для того, чтобы покрывать поверхность первого сетчатого электрода или плазменного сетчатого электрода 772 (см. фиг. 33) электронно-оптической системы 770. принимая во внимание, что генерирование плазмы и расширение плазмы являются относительно простыми для достижения с помощью современной технологии, моделирование вытягивания электронов из плазмы и их ускорения является достижимой с помощью компьютерного моделирования, к примеру, показанной на чертеже 32.

[00155] Электронный ток вытягивается и ускоряется в электронно-оптической системе 770, которая выполнена с возможностью формировать пучок электронов с наименьшей излучательной способностью. Иными словами, с возможностью вытягивать элементарный пучок с наименьшим угловым среднеквадратическим расхождением из апертуры единичной ячейки. Каждая элементарная ускоряющая ячейка сетчатого электрода вносит небольшой ток во весь пучок.

[00156] Как показано на фиг. 33, электронно-оптическая система 770 включает в себя плазменный сетчатый электрод 772, подавляющий сетчатый электрод 774 и заземленный сетчатый электрод 776. Каждый из сетчатых электродов 772, 774 и 776 имеет матрицу отдельных апертур или ячеек 782, 792 и 794, соответственно. Плазменная сетка 772 находится в непосредственном контакте с плазмой в объеме 756 расширения плазменной камеры 758. Она принимает высокий потенциал, который представляет собой ускоряющее напряжение системы, и она формирует мениск плазменного эмиттера конкретной искривленной формы, чтобы обеспечивать начальную фокусировку элементарного пучка в области вытягивания. Каждая апертура 782 плазменного эмиттера имеет конкретную форму, образованную из первого раззенкованного отверстия 783, простирающегося со стороны 778 плазмы плазменной сетки 772, и второго раззенкованного отверстия 785, простирающегося со стороны 779 пучка плазменной сетки 772, выходящей из кольцевого выступа 787, с внутренним скосом под углом  $P$  в электростатически объяснимые 60 градусов к оси  $V$  пучка для фокусировки пучка. Подавляющая сетка 774 служит для цели подавления обратного протекания ионов из вторичной плазмы, которая генерируется из



окружающего газа сразу после последней (заземленной) сетки 776. Каждая апертура 792 подавляющей сетки 774 включает в себя раззенковку в 0-30 градусов, чтобы уменьшать дефокусирующую силу электростатической линзы для того, чтобы упростить формирование пучка.

[00157] Заземленная сетка 776 требуется для того, чтобы обеспечивать потенциальную опорную точку для пучка и служит в качестве анода ускоряющей ячейки.

[00158] Пучок электронов транспортируется во внешних осевых магнитных полях, сформированных посредством катушек (см., например, 762, 764, 766) магнитной системы 760. Магнитная система 760 должна включать в себя по меньшей мере две катушки и необязательно может включать в себя больше катушек.

[00159] Если пучок должен инжектироваться в область с собственным магнитным полем, то необходимо создавать осевое магнитное поле для эмиттера пучка. Вследствие закрепления обобщенного момента количества движения, частица пучка может входить только в область с ненулевым осевым магнитным полем при условии, что в катоде частица захватывает определенную величину магнитного потока внутри окружности размера радиальной координаты частицы, которая измеряется относительно оси симметрии пучка.

[00160] Если плазменный генератор расположен в области с ненулевыми магнитными полями, то, в зависимости от абсолютной величины внешнего поля, плазменный поток может иметь тенденцию придерживаться силовых линий магнитного поля для внешнего поля. Для целей покрытия поверхности первого (плазменного) электрода электронно-оптической системы относительно однородным плазменным потоком, также может возникать потребность размещать сильную катушку поверх местоположения анода плазменно-дугового генератора 754.

[00161] В примерных вариантах осуществления, как проиллюстрировано на фиг. 34А и 34В, пучок включает в себя маскирующую часть плазменной сетки 772 эмиттера, чтобы формировать полый пучок, который должен уменьшать эффекты пространственного заряда пучка и улучшать динамику пучка в целом. Как показано на фиг. 34А, маска 784, к примеру, в форме шестиугольника, расположена по центру со стороны 778 плазмы плазменной сетки 772 поверх матрицы 780 апертур, имеющей множество апертур 782. Маска 784 упрощает формирование полого или кольцеобразного пучка.

[00162] Для более однородного полого или кольцеобразного пучка, плазменный эмиттер 772 может включать в себя вторую маску 786, имеющую идентичную форму с первой маской 784, с тем чтобы формировать идентичные внутренние и внешние маскирующие профили на сетке 772 эмиттера.

[00163] При инъекции пучка аксиально в сосуд 100 системы удержания плазмы, например, в зеркальное устройство, как показано на фиг. 35 и 36, может возникать сложность при транспортировке пучка через объем дивертора 300, 302, в котором отсутствует дрейфовая трубка, например, см. заземленную дрейфовую трубку 755, как показано на фиг. 36, и магнитное поле является меньшим, чем требуется. В этом случае, можно основываться на транспортировке с применением плазмы. Плазма, которая

присутствует в объеме дивертора, должна компенсировать пространственный заряд и ток пучка, что приводит к значительному уменьшению эффектов, которые нормально должны предотвращать распространение пучка через открытое пространство, такое как объем дивертора.

[00164] В альтернативных примерных вариантах осуществления пучок может формироваться с помощью LaB<sub>6</sub>-катода вместо плазменного катода.

[00165] Преимущества примерных вариантов осуществления пучка электронов по сравнению с традиционными пучками электронов включают в себя длинный импульс, высокий ток пучка и плазменный эмиттер, характеристики которого не ухудшаются. Примерные варианты осуществления преодолевают проблему ухудшения характеристик катода посредством использования плазменного катода вместо катода из твердого материала. Плазменный эмиттер представляется посредством системы сетчатых электродов, при этом каждая элементарная ячейка сетки формирует единичный элементарный пучок. Плазменный эмиттер обеспечивает возможность почти неограниченных циклов вытягивания пучка, в отличие от твердых катодов, которые имеют ограниченное число циклов, и характеристики которых ухудшаются после определенного числа импульсов. Кроме того, плазменный катод может противостоять гораздо большим длительностям импульса вплоть до ~1 с при пассивной охлаждении и еще большим за счет специальных мер, предпринимаемых для активного охлаждения сетчатых электродов.

[00166] Эффекты пространственного заряда пучка электронов с высоким первенсом могут управляться посредством конструкции магнитной системы, которая создает внешние магнитные поля вдоль линии движения пучка. Это обеспечивает возможность вариантам осуществления, предусмотренным в данном документе, регулировать огибающую пучка согласно условиям и транспортировать пучок в то место, в котором он требуется, в том числе и при присутствии дополнительных внешних магнитных полей, например, магнитных полей устройства удержания плазмы.

[00167] Примерные варианты осуществления, предусмотренные в данном документе, описываются в предварительной заявке на патент США номер 63/111446, которая включена в данный документ по ссылке.

[00168] Согласно варианту осуществления настоящего раскрытия способ генерирования и поддержания плазмы с конфигурацией с обращенным полем (FRC) содержит формирование FRC вокруг плазмы в камере удержания, осевую инжекцию пучка электронов из источника пучка электронов в плазму FRC и инжекцию множества пучков нейтральных частиц в плазму FRC под углом к средней плоскости камеры удержания.

[00169] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия источник пучка электронов включает в себя дуговой плазменный источник, электронно-оптическую систему, содержащую систему ускоряющих сеток, и линию движения пучка, включающую в себя магнитную систему, выполненную с обеспечением формирования, транспортировки и инжекцию пучка электронов в плазму FRC.

[00170] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия

источник пучка электронов включает в себя эмиттер пучка, выполненный с обеспечением кольцевого пучка.

[00171] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия эмиттер пучка включает в себя многоапертурную сетку эмиттера и маску, покрывающую апертуры в центральной области сетки эмиттера.

[00172] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия эмиттер пучка включает в себя многоапертурную сетку эмиттера и первую и вторую маски, покрывающие апертуры в центральной области сетки эмиттера и во внешней области с разнесением с центральной областью.

[00173] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия вторая маска имеет форму внутреннего профиля, совпадающую с формой внешнего профиля первой маски.

[00174] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия магнитная система включает в себя катушку плазменного генератора, катушку плазменного эмиттера, катушку линзы и катушку для транспортировки пучка.

[00175] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия этап осевой инжекции пучка электронов включает в себя генерирование плазмы, расширение плазмы, вытягивание электронов из плазмы и ускорение вытягиваемых электронов.

[00176] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия подстройка энергий пучков для упомянутого множества пучков нейтральных частиц между первой энергией пучка и второй энергией пучка, при этом вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка.

[00177] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия вторая энергия пучка выше первой энергии пучка.

[00178] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия упомянутое множество пучков нейтральных частиц переключаются между первой и второй энергиями пучка в течение длительности выстрела инжекции.

[00179] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия способ дополнительно содержит управление энергиями пучков для упомянутого множества пучков нейтральных частиц посредством сигнала обратной связи, принимаемого из системы управления удержанием плазмы с активной обратной связью.

[00180] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия способ дополнительно содержит управление энергиями пучков для упомянутого множества пучков нейтральных частиц посредством сигнала обратной связи, принимаемого из системы управления удержанием плазмы с активной обратной связью.

[00181] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия управление энергиями пучков для множества пучков нейтральных частиц включает в себя регулирование энергий пучков для множества пучков нейтральных частиц, чтобы регулировать радиальный профиль выделения мощности пучка, чтобы регулировать

значение градиента давления.

[00182] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия способ дополнительно содержит генерирование магнитного поля в камере удержания с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг камеры удержания, и зеркального магнитного поля в пределах противоположных торцов камеры удержания с помощью зеркальных катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг противоположных торцов камеры удержания.

[00183] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия формирование FRC включает в себя формирование формирующей FRC в расположенных напротив друг друга первой и второй формирующих секциях, соединенных с камерой удержания, и ускорение формирующей FRC из первой и второй формирующих секций к середине через плоскость камеры удержания, причем две формирующие FRC сливаются для того, чтобы сформировать FRC.

[00184] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия способ дополнительно содержит направление поверхностей магнитного потока FRC в первый и второй внутренние диверторы.

[00185] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия система для генерирования и поддержания плазмы с конфигурацией с обращенным полем (FRC) содержит камеру удержания, первые и вторые диверторы, соединенные с первой и второй формирующими секциями, первую и вторую осевые плазменные пушки, функционально соединенные с первыми и вторыми диверторами, первой и второй формирующими секциями и камерой удержания, множество инжекторов пучков нейтральных атомов, соединенных с камерой удержания и ориентированных с возможностью инъекции пучков нейтральных атомов к средней плоскости камеры удержания под углом, отклоненным от нормали к продольной оси камеры удержания, магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, расположенных вокруг камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первых и вторых диверторов, первый и второй набор зеркальных катушек квазипостоянного тока, расположенных между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями, и первую и вторую зеркальные пробки, расположенные между первой и второй формирующими секциями и первыми и вторыми диверторами, систему геттерирования, соединенную с камерой удержания и первыми и вторыми диверторами, один или более смещающих электродов для смещения открытых поверхностей потока сгенерированной FRC, причем упомянутые один или более смещающих электродов расположены в одном или более из камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первых и вторых диверторов, две или более направляющих катушек, соединенных с камерой удержания, и один или более пучков электронов, аксиально соединенных с одним или более из первых и вторых диверторов.

[00186] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия система для генерирования и поддержания плазмы с конфигурацией с обращенным полем

(FRC) содержит камеру удержания, первые и вторые диверторы, соединенные с первой и второй формирующими секциями, одно или более из множества плазменных пушек, одного или более смещающих электродов и первой и второй зеркальных пробок, причем упомянутое множество плазменных пушек включают в себя первую и вторую осевые плазменные пушки, функционально соединенные с первыми и вторыми диверторами, первой и второй формирующими секциями и камерой удержания, при этом упомянутые один или более смещающих электродов расположены в одном или более из камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первых и вторых диверторов, и при этом упомянутые первая и вторая зеркальные пробки расположены между первой и второй формирующими секциями и первыми и вторыми диверторами, систему геттерирования, соединенную с камерой удержания и первыми и вторыми диверторами, множество инжекторов пучков нейтральных атомов, соединенных с камерой удержания и ориентированных по нормали к оси камеры удержания, магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, расположенных вокруг камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первых и вторых диверторов, первый и второй набор зеркальных катушек квазипостоянного тока, расположенных между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями, и один или более пучков электронов, аксиально соединенных с одним или более из первых и вторых диверторов, причем система выполнена с возможностью генерировать FRC и поддерживать FRC без спада в то время, когда пучки нейтральных частиц инжектируются в плазму.

[00187] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия пучок электронов содержит дуговой плазменный источник, электронно-оптическую систему, содержащую систему ускоряющих сеток, и линию движения пучка, включающую в себя магнитную систему, выполненную с обеспечением формирования, транспортировки и инъекции пучка электронов в представляющее интерес устройство удержания плазмы.

[00188] Тем не менее, примерные варианты осуществления, предусмотренные в данном документе, служат просто в качестве иллюстративных примеров и никоим образом не являются ограничивающими.

[00189] Все признаки, элементы, компоненты, функции и этапы, описанные относительно любого варианта осуществления, предусмотренного в данном документе, имеют намерение быть свободно комбинируемыми и заменяемыми на признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из любого другого варианта осуществления. Если определенный признак, элемент, компонент, функция или этап описывается относительно только одного варианта осуществления, то следует понимать, что этот признак, элемент, компонент, функция или этап может использоваться со всеми остальными вариантами осуществления, описанными в данном документе, если в явной форме не указано иное. В силу этого, этот абзац служит в качестве базовых сведений и письменного подтверждения для введения пунктов формулы изобретения, в любое время, которые комбинируют функции, элементы, компоненты, функции и этапы из различных вариантов осуществления либо которые заменяют признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из одного

варианта осуществления на признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из другого, даже если нижеприведенное описание явно не утверждает, в конкретном примере, что такие комбинации или замены являются возможными. Специальное перечисление каждой возможной комбинации и замены является чрезмерно обременительным, в частности, с учетом того, что допустимость каждой такой комбинации и замены должна легко признаваться специалистами в данной области техники после прочтения этого описания.

[00190] Во многих случаях, объекты описываются в данном документе как соединенные с другими объектами. Следует понимать, что термины «связанный» и «соединенный» (либо любая из их форм) используются взаимозаменяемо в данном документе и, в обоих случаях, являются общими для прямой связи двух объектов (вообще без заметных (например, паразитных) промежуточных объектов) и для косвенной связи двух объектов (с одним или более заметных промежуточных объектов). Если объекты показаны как непосредственно связанные между собой либо описываются как связанные между собой без описания промежуточных объектов, следует понимать, что эти объекты могут также косвенно связываться между собой, если контекст явно не предписывает иное.

[00191] Хотя варианты осуществления допускают различные модификации и альтернативные формы, их конкретные примеры показаны на чертежах и подробно описаны в данном документе. Тем не менее, следует понимать, что эти варианты осуществления не должны ограничиваться конкретной раскрытой формой, но наоборот, эти варианты осуществления должны охватывать все модификации, эквиваленты и альтернативы, попадающие в пределы сущности раскрытия. Кроме того, любые признаки, функции, этапы или элементы вариантов осуществления могут излагаться или добавляться в формулу изобретения, как и отрицательные ограничения, которые задают изобретаемый объем формулы изобретения посредством признаков, функций, этапов или элементов, которые не находятся в пределах этого объема.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ генерирования и поддержания плазмы с конфигурацией с обращенным полем (FRC), содержащий этапы:

формирования FRC вокруг плазмы в камере удержания,  
осевой инъекции пучка электронов из источника пучка электронов в плазму FRC, и  
поддержания плазмы FRC при постоянном значении или около него без спада  
посредством инъекции пучков быстрых нейтральных атомов из инжекторов пучков  
нейтральных частиц в плазму FRC под углом к средней плоскости камеры удержания.

2. Способ по п. 1, причем источник пучка электронов содержит:

дуговой плазменный источник,  
электронно-оптическую систему, содержащую систему ускоряющих сеток, и  
линию движения пучка, включающую в себя магнитную систему, выполненную с  
возможностью осуществлять формирование, транспортировку и инъекцию пучка  
электронов в плазму FRC.

3. Способ по п. 2, причем источник пучка электронов дополнительно содержит  
эмиттер пучка, выполненный с возможностью осуществлять кольцевой пучок.

4. Способ по п. 3, причем эмиттер пучка включает в себя многоапертурную сетку  
эмиттера и маску, покрывающую апертуры в центральной области сетки эмиттера.

5. Способ по п. 3, причем эмиттер пучка включает в себя многоапертурную сетку  
эмиттера и первую и вторую маски, покрывающие апертуры в центральной области сетки  
эмиттера и во внешней области с разнесением с центральной областью.

6. Способ по п. 5, причем вторая маска имеет форму внутреннего профиля,  
совпадающую с формой внешнего профиля первой маски.

7. Способ по п. 2, причем магнитная система содержит:

катушку плазменного генератора,  
катушку плазменного эмиттера,  
катушку линзы и  
катушку для транспортировки пучка.

8. Способ по п. 1, причем осевая инъекция пучка электронов включает в себя:

генерирование плазмы,  
расширение плазмы,  
вытягивание электронов из плазмы и  
ускорение вытягиваемых электронов.

9. Способ по пп. 1-5, причем этап инъекции пучков быстрых нейтральных атомов  
включает в себя одно из этапа подстройки энергий пучков для упомянутого множества  
пучков нейтральных частиц между первой энергией пучка и второй энергией пучка, при  
этом вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка, или этапа подстройки  
энергий пучков для упомянутого множества пучков нейтральных частиц между первой  
энергией пучка и второй энергией пучка, при этом вторая энергия пучка отличается от  
первой энергии пучка, и при этом вторая энергия пучка выше первой энергии пучка, или

этапа подстройки энергий пучков для упомянутого множества пучков нейтральных частиц между первой энергией пучка и второй энергией пучка, при этом вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка, и при этом упомянутое множество пучков нейтральных частиц переключаются между первой и второй энергиями пучка в течение длительности выстрела инъекции.

10. Способ по пп. 1-5, дополнительно содержащий одно из этапа генерирования магнитного поля в камере с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг камеры, или этапа генерирования магнитного поля в камере с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг камеры, и генерирования зеркального магнитного поля в пределах противоположных торцов камеры с помощью зеркальных катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг противоположных торцов камеры.

11. Способ по пп. 1-5, причем этап формирования плазмы FRC включает в себя формирование первой и второй формирующих плазм FRC в первой и второй формирующих секциях, соединенных с противоположными торцами камеры удержания, и ускорение формирующих плазм FRC к средней плоскости камеры, чтобы сформировать FRC.

12. Способ по п. 8, дополнительно содержащий этап направления поверхностей магнитного потока FRC в диверторы, соединенные с торцами формирующих секций.

13. Система для генерирования и поддержания плазмы с конфигурацией с обращенным полем (FRC), содержащая:

камеру удержания,

первые и вторые диверторы, соединенные с первой и второй формирующими секциями,

первую и вторую осевые плазменные пушки, функционально соединенные с первым и вторым диверторами, первой и второй формирующими секциями и камерой удержания,

множество инжекторов пучков нейтральных атомов, соединенных с камерой удержания и ориентированных с возможностью инъекции пучков нейтральных атомов к средней плоскости камеры удержания под углом, отклоненным от нормали к продольной оси камеры удержания,

магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, расположенных вокруг камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первых и вторых диверторов, первый и второй набор зеркальных катушек квазипостоянного тока, расположенных между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями, и первую и вторую зеркальные пробки, расположенные между первой и второй формирующими секциями и первыми и вторыми диверторами,

систему геттерирования, соединенную с камерой удержания и первым и вторым диверторами,

один или более смещающих электродов для смещения открытых поверхностей потока сгенерированной FRC, причем упомянутые один или более смещающих электродов расположены в одном или более из камеры удержания, первой и второй формирующих



секций и первых и вторых диверторов,

две или более направляющих катушек, соединенных с камерой удержания, и один или более пучков электронов, аксиально соединенных с одним или более из первых и вторых диверторов.

14. Система по п. 10, причем пучок электронов содержит:

дуговой плазменный источник,  
электронно-оптическую систему, содержащую систему ускоряющих сеток, и линию движения пучка, включающую в себя магнитную систему, выполненную с возможностью осуществлять формирование, транспортировку и инжекцию пучка электронов в плазму FRC.

15. Система по п. 11, причем пучок электронов дополнительно содержит эмиттер пучка, выполненный с возможностью осуществлять кольцевой пучок.

16. Система по п. 15, причем эмиттер пучка включает в себя многоапертурную сетку эмиттера и маску, покрывающую апертуры в центральной области сетки эмиттера.

17. Способ по п. 15, причем эмиттер пучка включает в себя многоапертурную сетку эмиттера и первую и вторую маски, покрывающие апертуры в центральной области сетки эмиттера и во внешней области с разнесением с центральной областью.

18. Способ по п. 17, причем вторая маска имеет форму внутреннего профиля, совпадающую с формой внешнего профиля первой маски.

19. Система по п. 14, содержащая:

катушку плазменного генератора,  
катушку плазменного эмиттера,  
катушку линзы и  
катушку для транспортировки пучка.

20. Система для генерирования и поддержания плазмы с конфигурацией с обращенным полем (FRC), содержащая:

камеру удержания,  
первые и вторые диверторы, соединенные с первой и второй формирующими секциями,

одно или более из множества плазменных пушек, одного или более смещающих электродов и первой и второй зеркальных пробок, при этом упомянутое множество плазменных пушек включают в себя первую и вторую осевые плазменные пушки, функционально соединенные с первыми и вторыми диверторами, первой и второй формирующими секциями и камерой удержания, при этом упомянутые один или более смещающих электродов расположены в пределах одного или более из камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первых и вторых диверторов, и при этом упомянутые первая и вторая зеркальные пробки расположены между первой и второй формирующими секциями и первыми и вторыми диверторами,

систему геттерирования, соединенную с камерой удержания и первыми и вторыми диверторами,

множество инжекторов пучков нейтральных атомов, соединенных с камерой удержания и ориентированных по нормали к оси камеры удержания,

магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, расположенных вокруг камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первых и вторых диверторов, первый и второй набор зеркальных катушек квазипостоянного тока, расположенных между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями, и

один или более пучков электронов, аксиально соединенных с одним или более из первых и вторых диверторов,

при этом система выполнена с возможностью генерировать FRC и поддерживать FRC без спада в то время, когда пучки нейтральных частиц инжектируются в плазму.

21. Система по п. 20, причем пучок электронов содержит:

дуговой плазменный источник,

электронно-оптическую систему, содержащую систему ускоряющих сеток, и

линию движения пучка, включающую в себя магнитную систему, выполненную с возможностью осуществлять формирование, транспортировку и инжекцию пучка электронов в плазму FRC.

22. Система по п. 21, причем пучок электронов дополнительно содержит эмиттер пучка, выполненный с возможностью осуществлять кольцевой пучок.

23. Система по п. 22, причем эмиттер пучка включает в себя многоапертурную сетку эмиттера и маску, покрывающую апертуры в центральной области сетки эмиттера.

24. Способ по п. 22, причем эмиттер пучка включает в себя многоапертурную сетку эмиттера и первую и вторую маски, покрывающие апертуры в центральной области сетки эмиттера и во внешней области с разнесением с центральной областью.

25. Способ по п. 24, причем вторая маска имеет форму внутреннего профиля, совпадающую с формой внешнего профиля первой маски.

26. Система по п. 22, содержащая:

катушку плазменного генератора,

катушку плазменного эмиттера,

катушку линзы и

катушку для транспортировки пучка.

27. Пучок электронов, содержащий:

дуговой плазменный источник,

электронно-оптическую систему, содержащую систему ускоряющих сеток, и

линию движения пучка, включающую в себя магнитную систему, выполненную с возможностью осуществлять формирование, транспортировку и инжекцию пучка электронов в представляющее интерес устройство удержания плазмы.

28. Система по п. 27, причем пучок электронов содержит:

дуговой плазменный источник,

электронно-оптическую систему, содержащую систему ускоряющих сеток, и

линию движения пучка, включающую в себя магнитную систему, выполненную с возможностью осуществлять формирование, транспортировку и инжекцию пучка электронов в плазму FRC.

29. Система по п. 28, причем пучок электронов дополнительно содержит эмиттер пучка, выполненный с возможностью осуществлять кольцевой пучок.

30. Система по п. 29, причем магнитная система содержит:

катушку плазменного генератора,

катушку плазменного эмиттера,

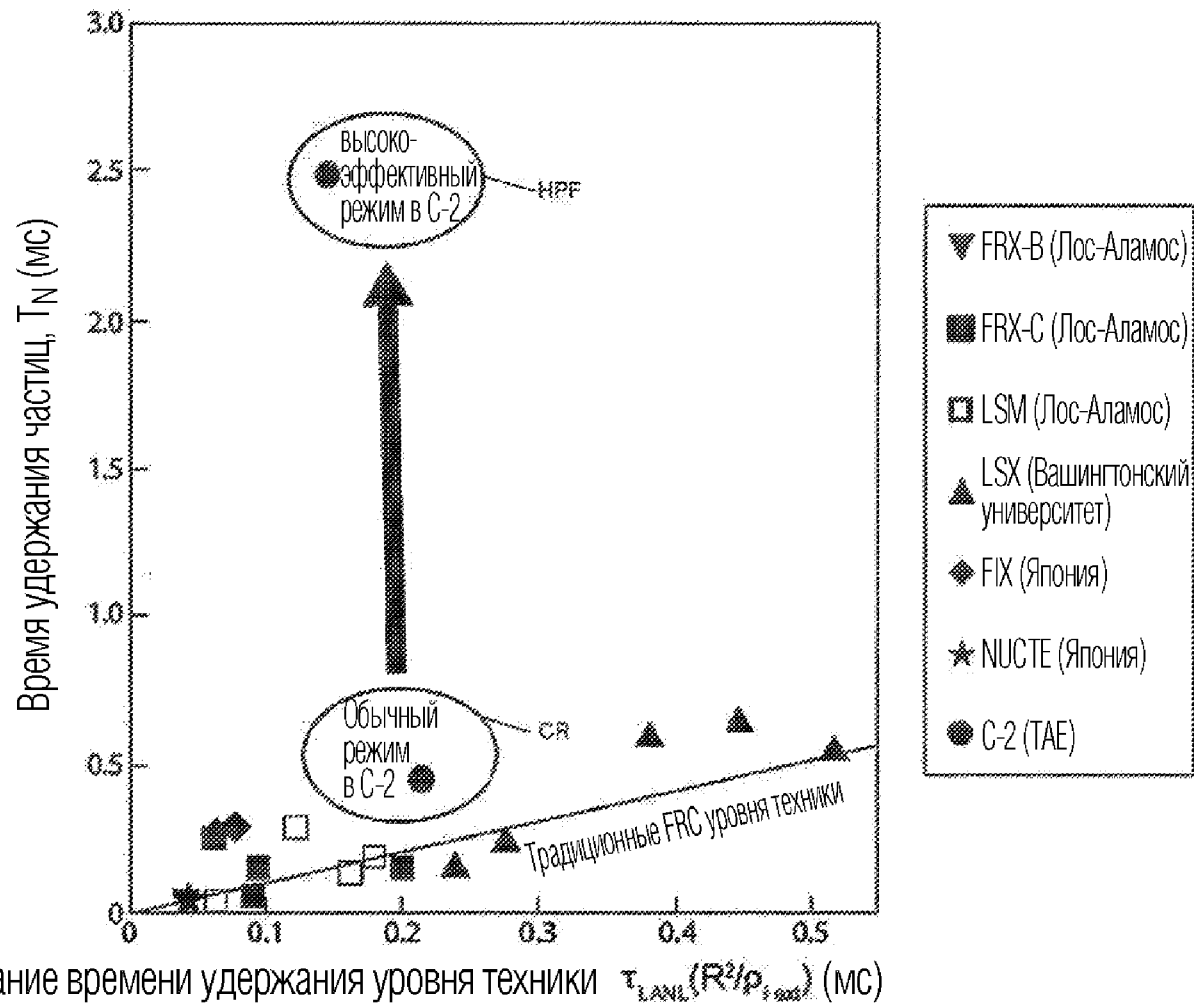
катушку линзы и

катушку для транспортировки пучка.

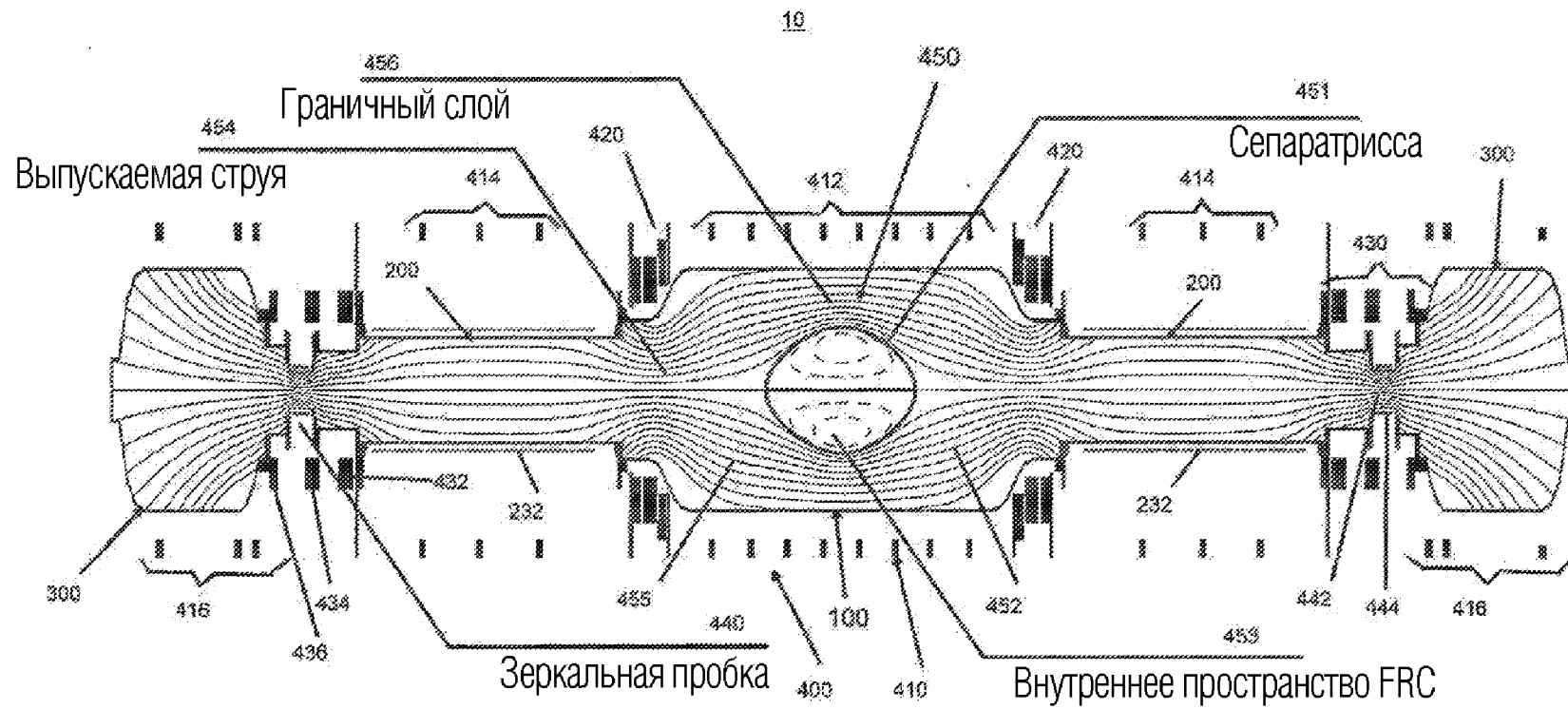
31. Система по п. 29, причем эмиттер пучка включает в себя многоапертурную сетку эмиттера и маску, покрывающую апертуры в центральной области сетки эмиттера.

32. Способ по п. 29, причем эмиттер пучка включает в себя многоапертурную сетку эмиттера и первую и вторую маски, покрывающие апертуры в центральной области сетки эмиттера и во внешней области с разнесением с центральной областью.

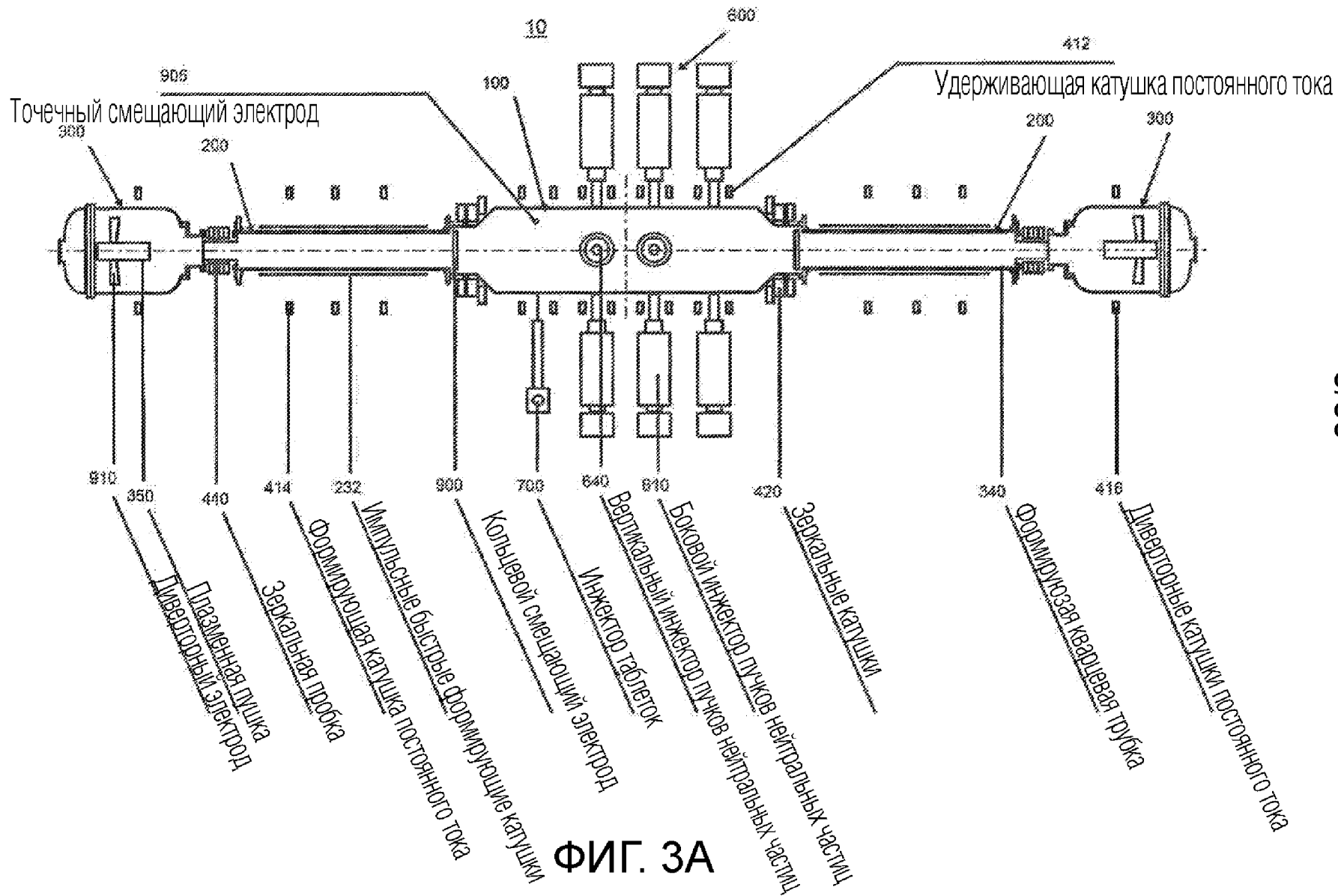
33. Способ по п. 32, причем вторая маска имеет форму внутреннего профиля, совпадающую с формой внешнего профиля первой маски.

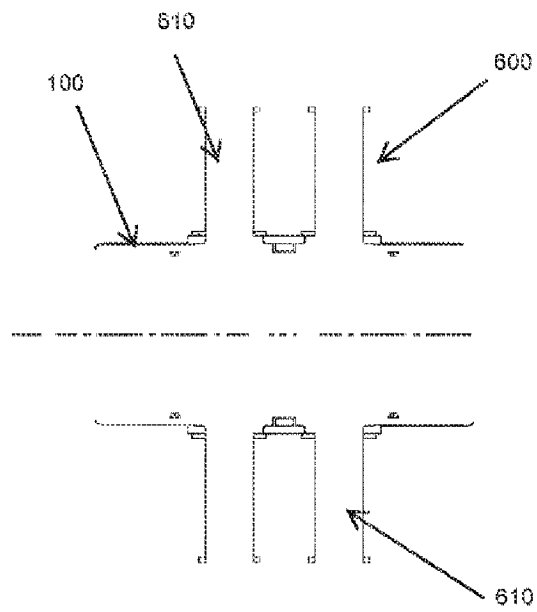


ФИГ. 1

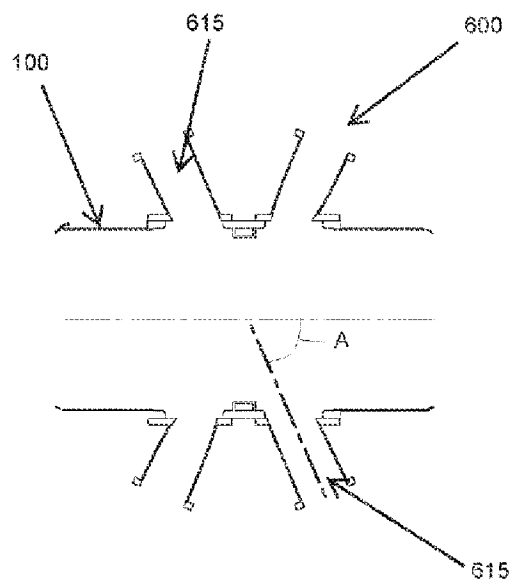


ФИГ. 2

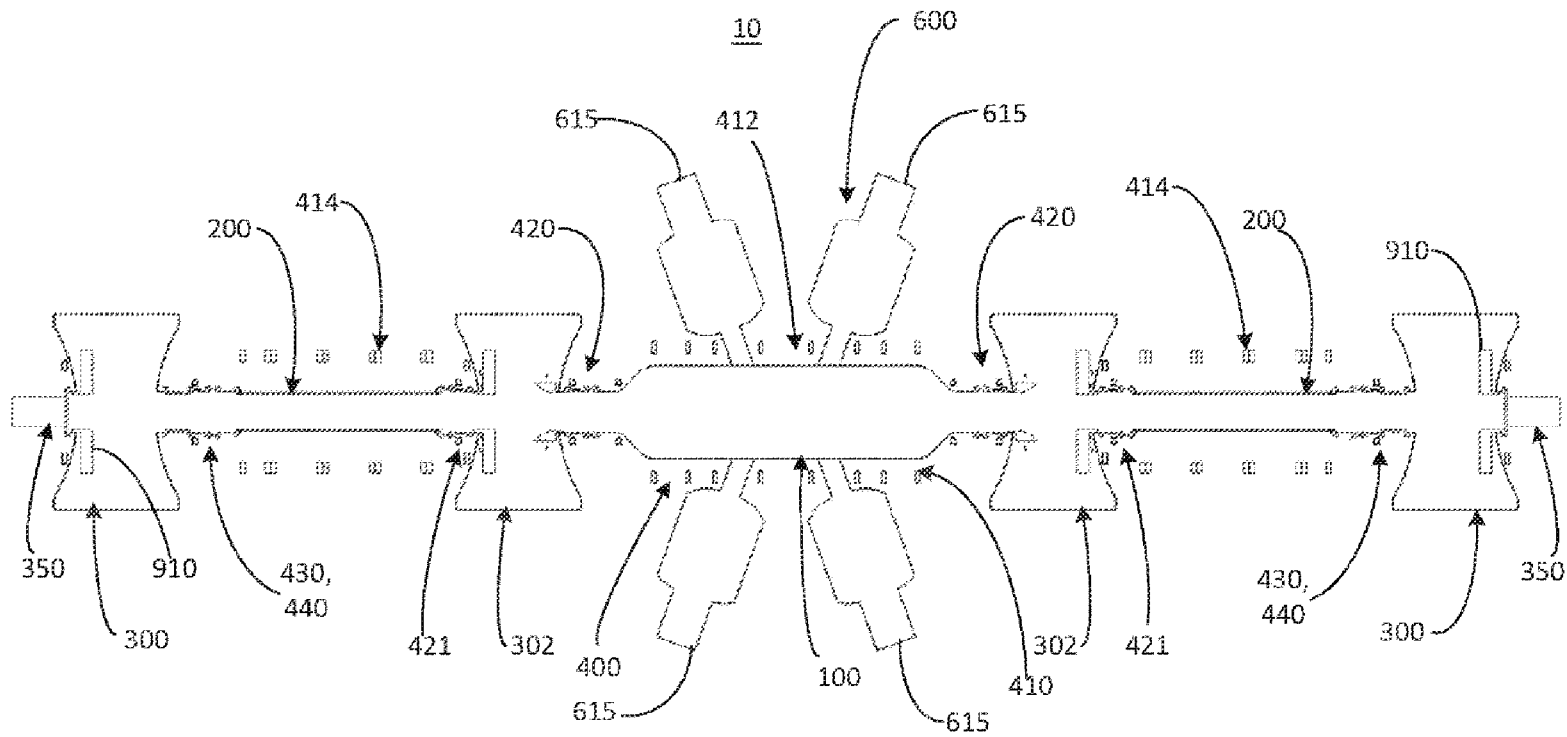




ФИГ. 3В



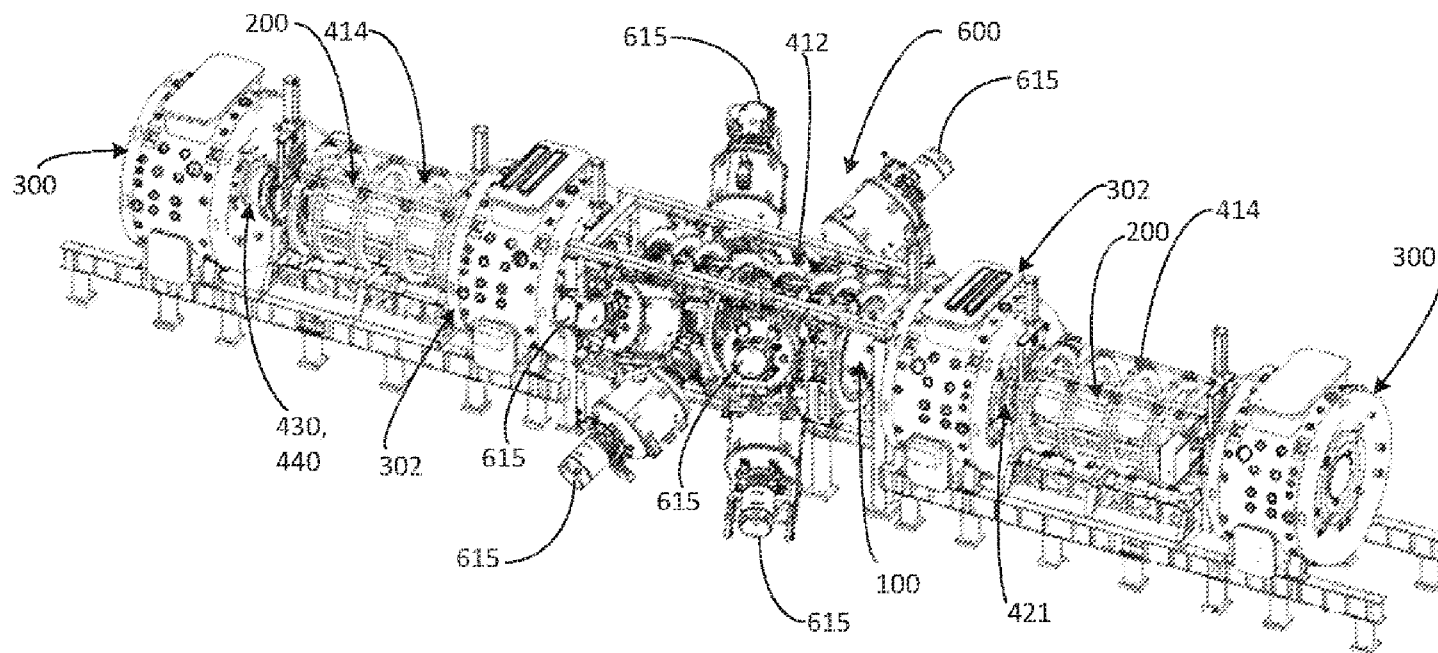
ФИГ. 3С



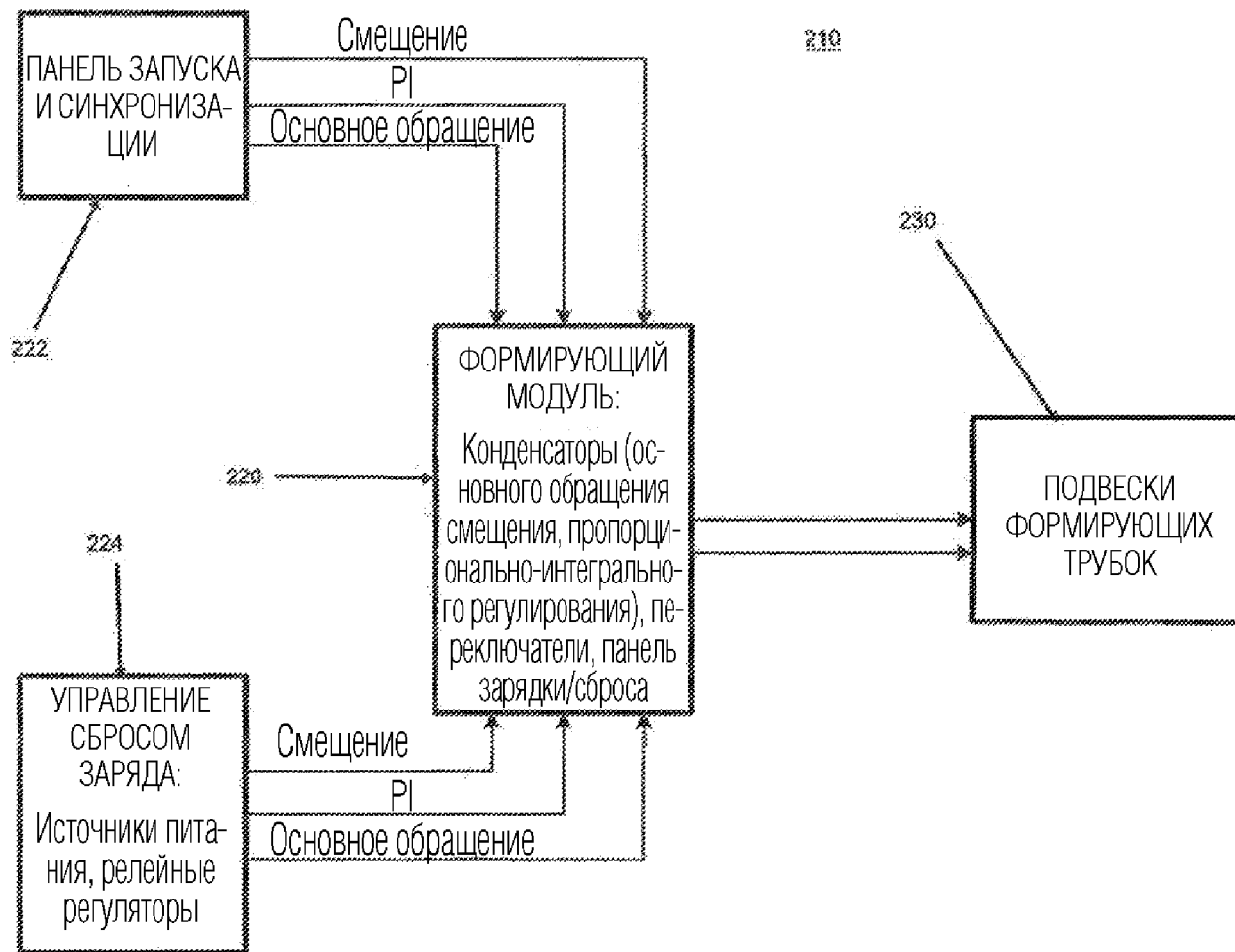
ФИГ. 3D



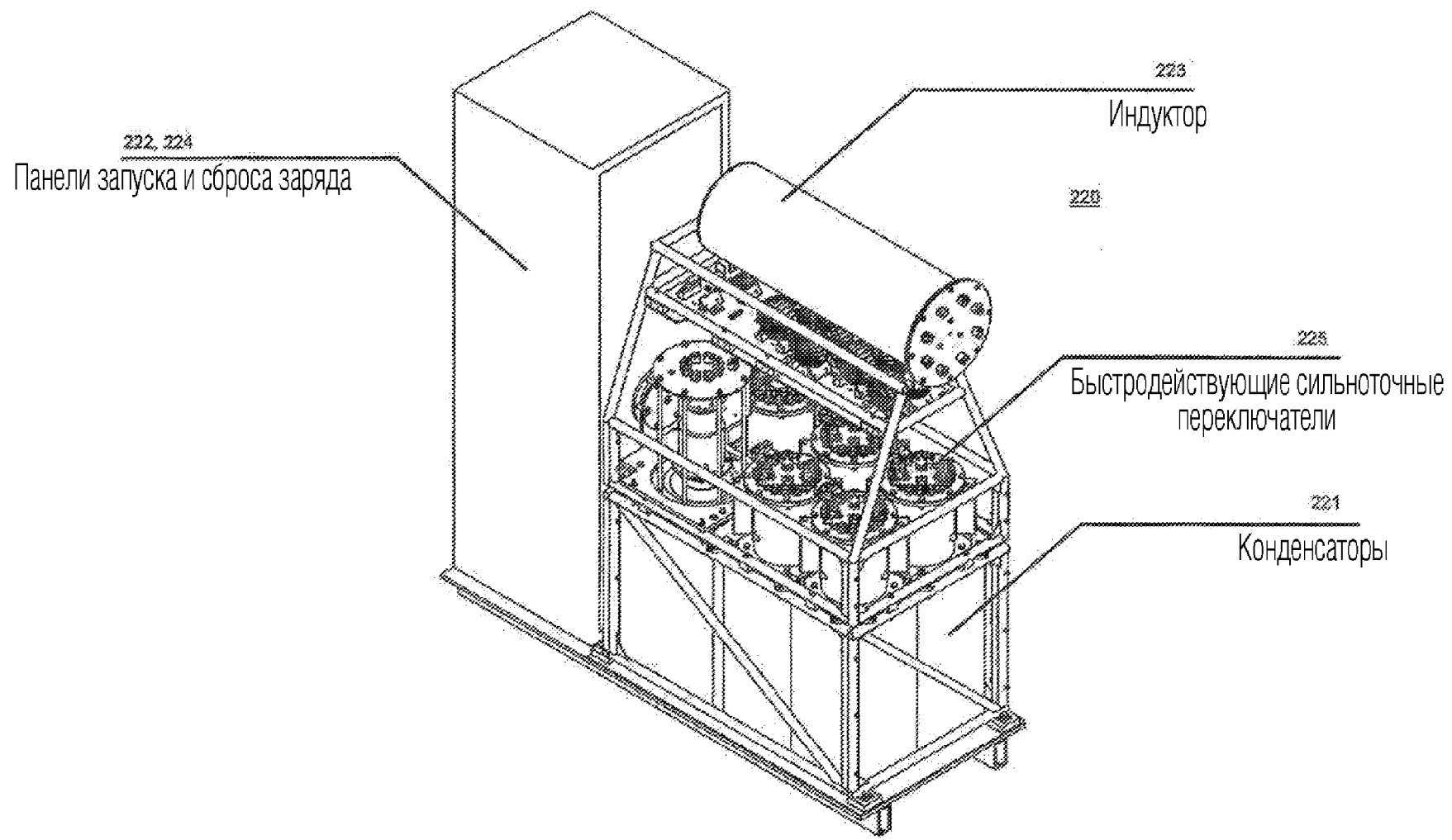
10



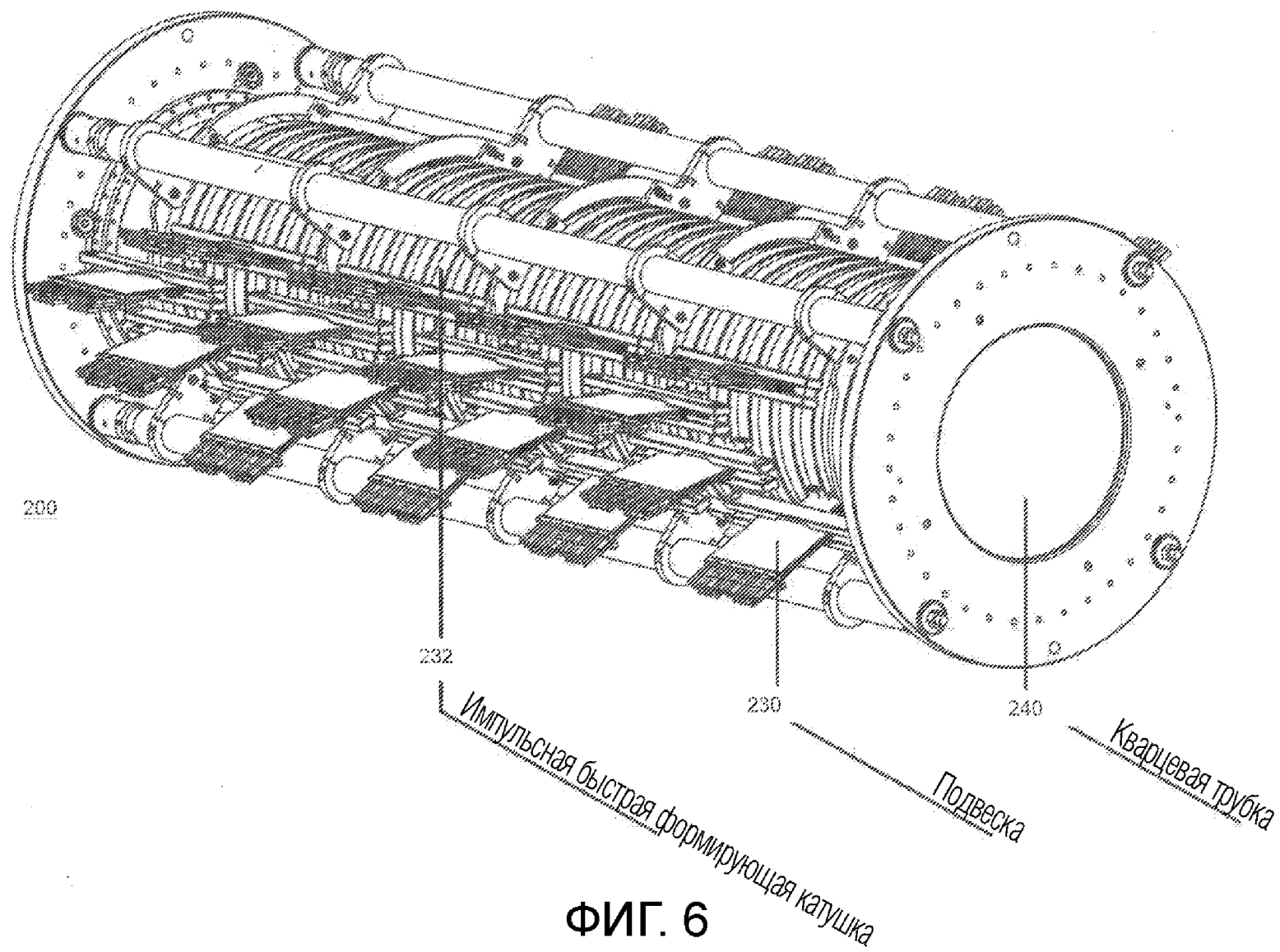
ФИГ. 3Е



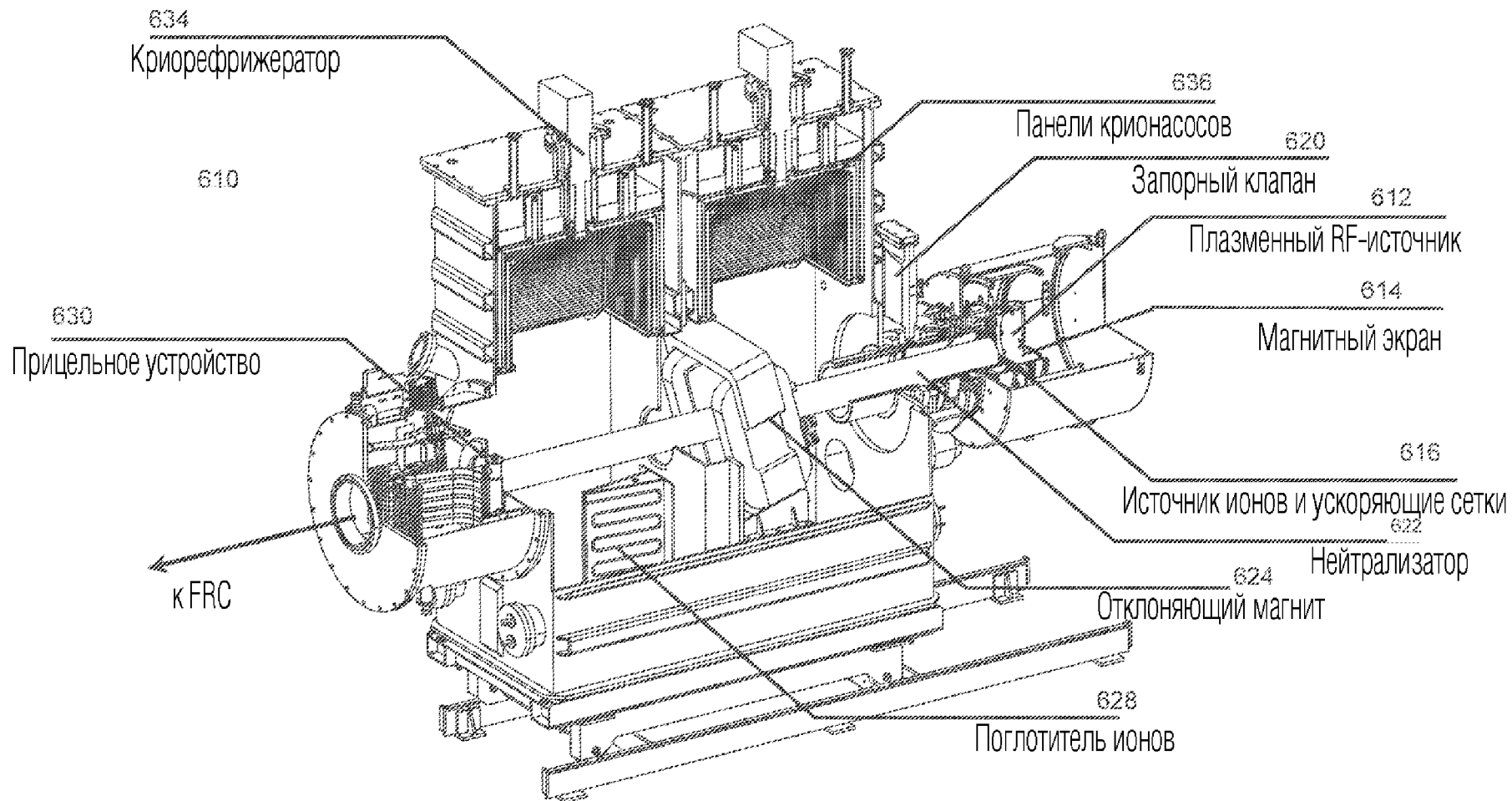
ФИГ. 4



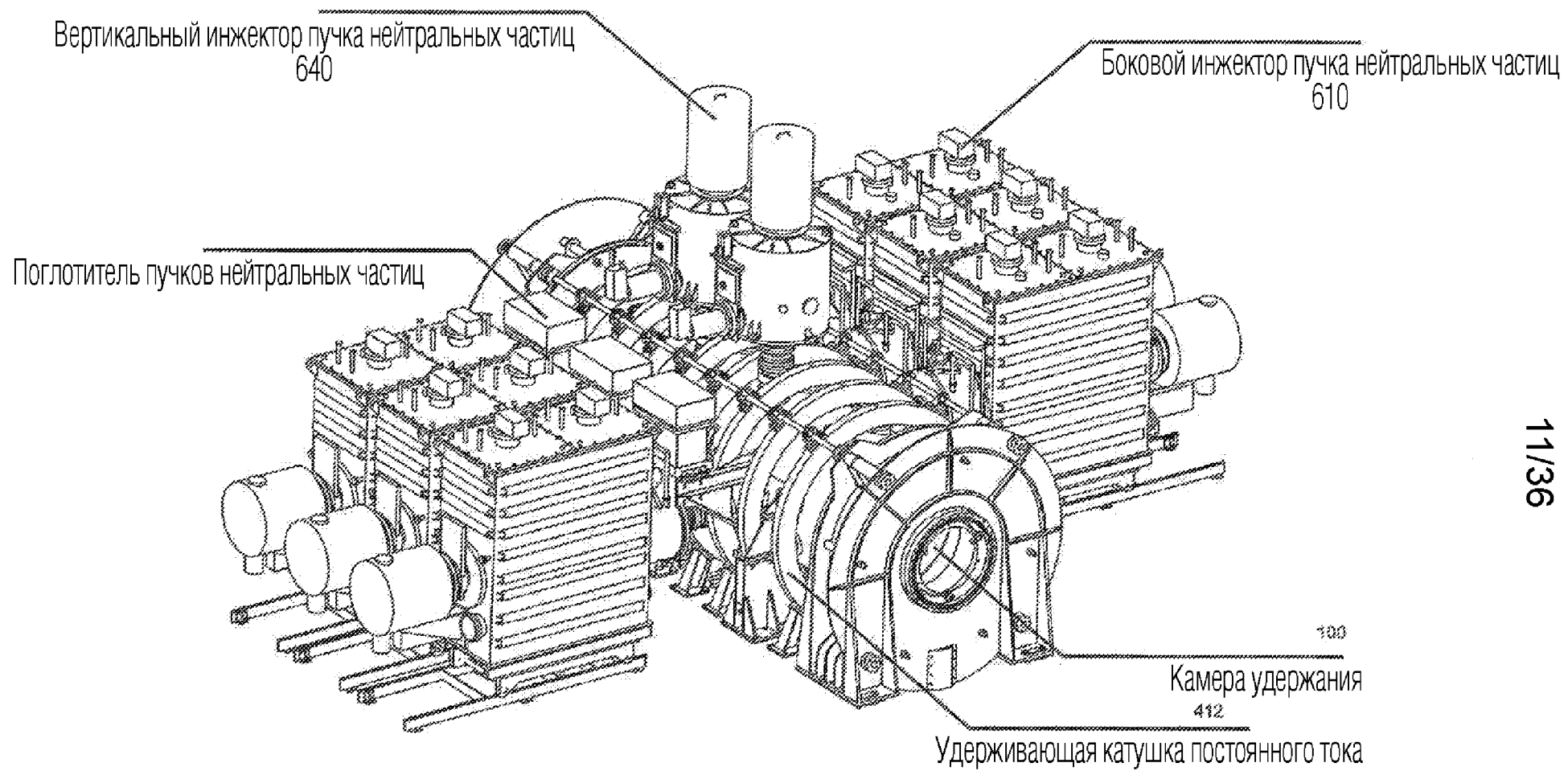
ФИГ. 5



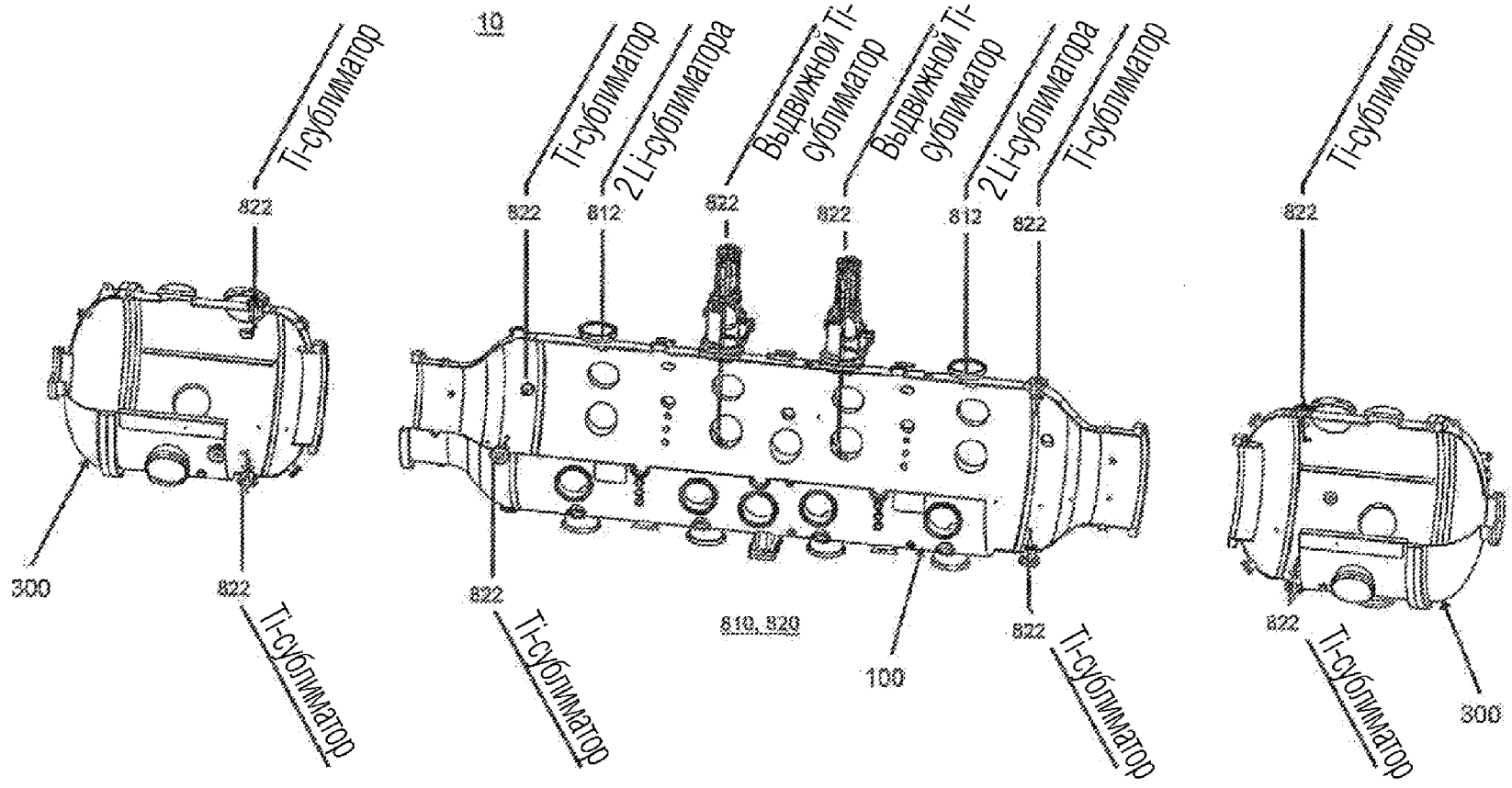
ФИГ. 6



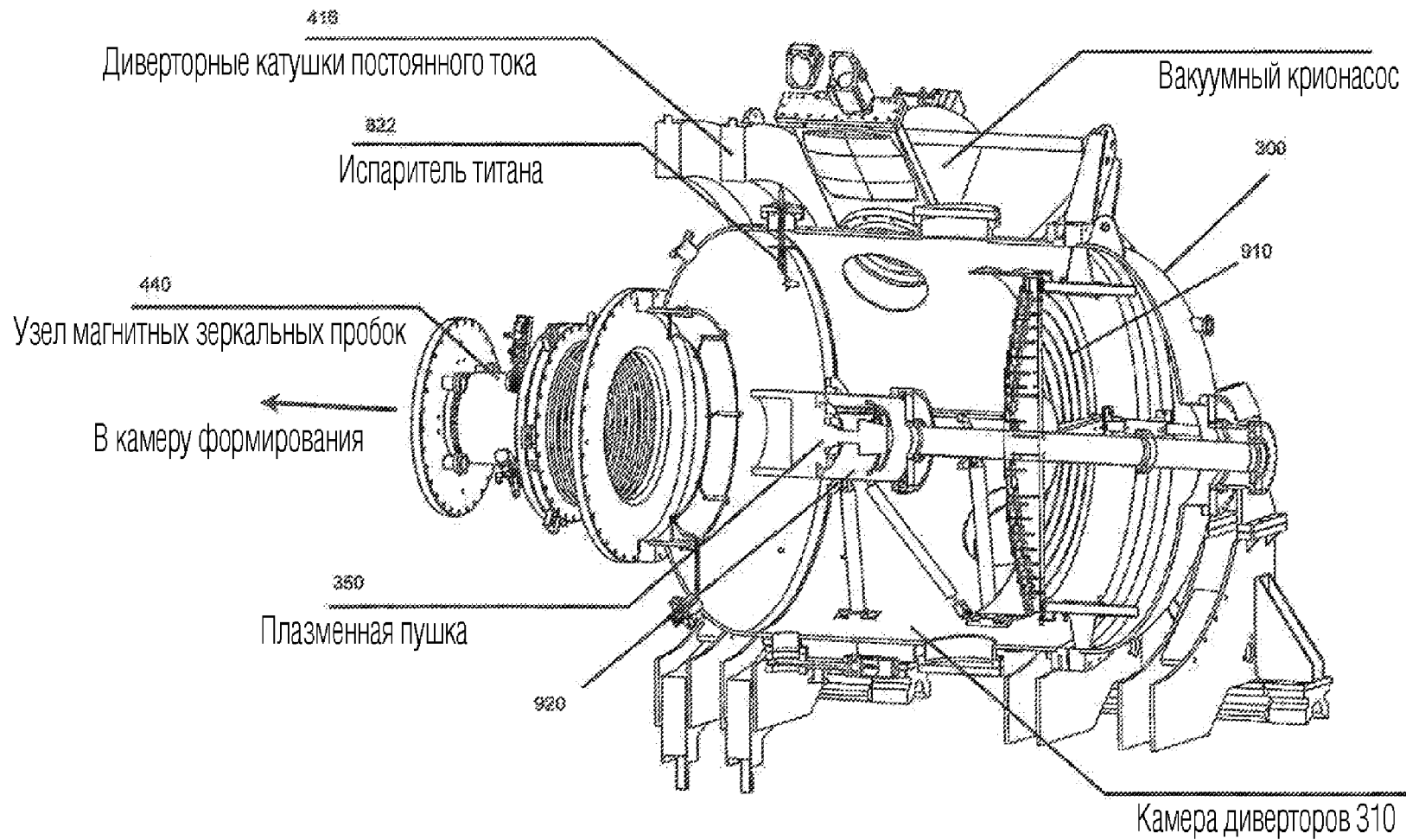
ФИГ. 7



ФИГ. 8

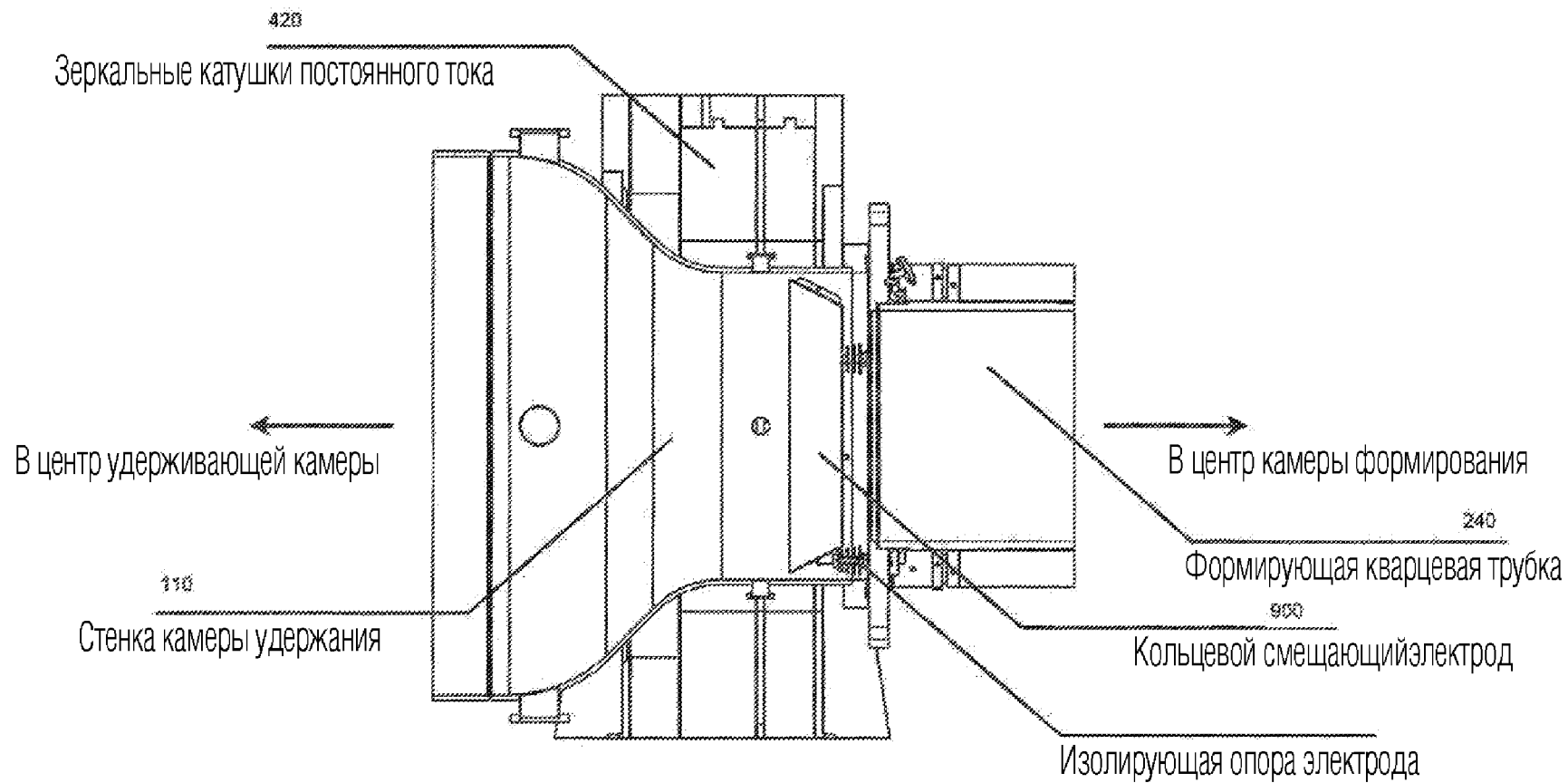


ФИГ. 9

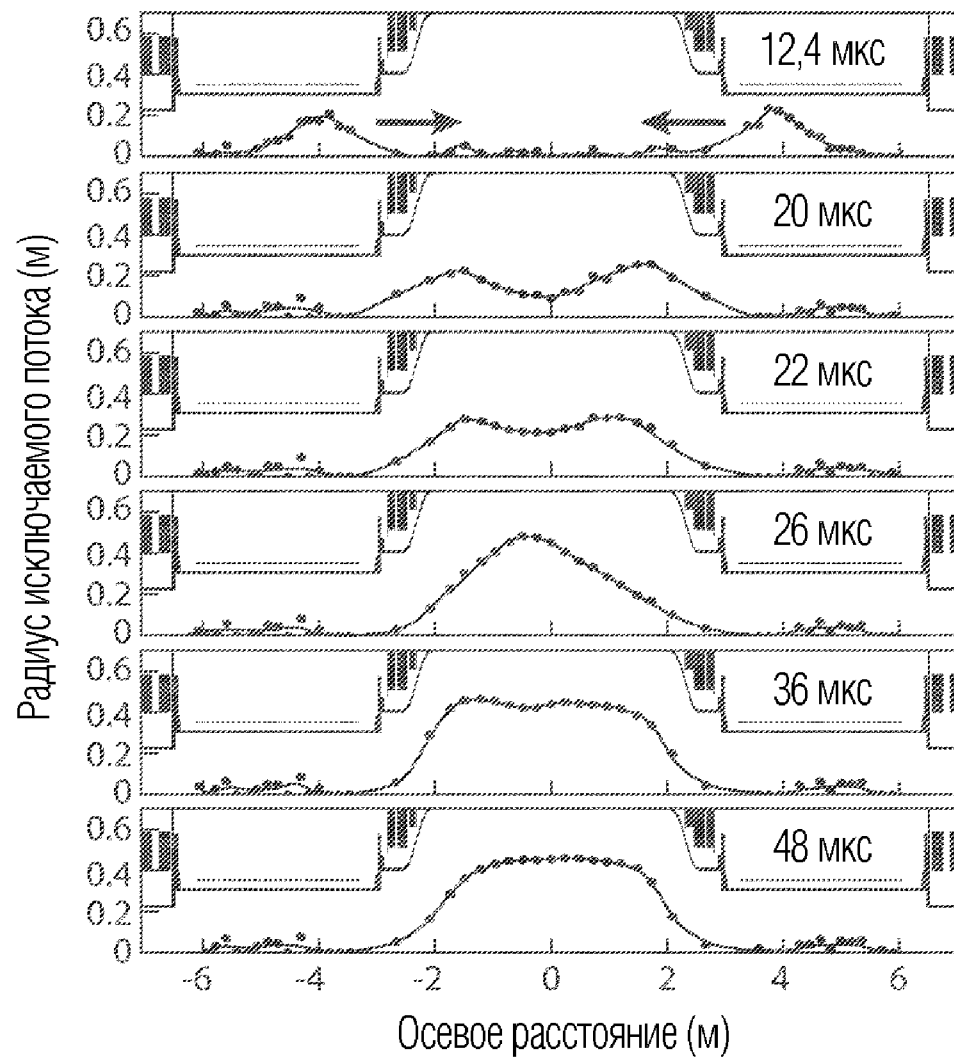


ФИГ. 10



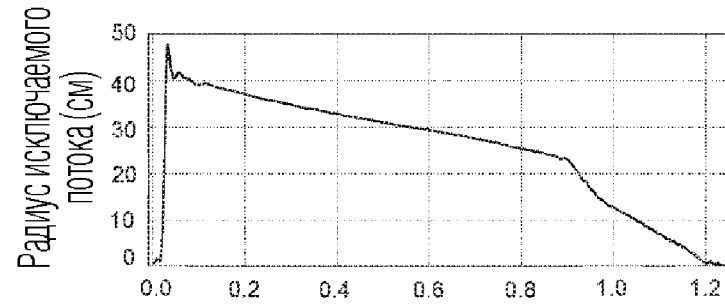


ФИГ. 11

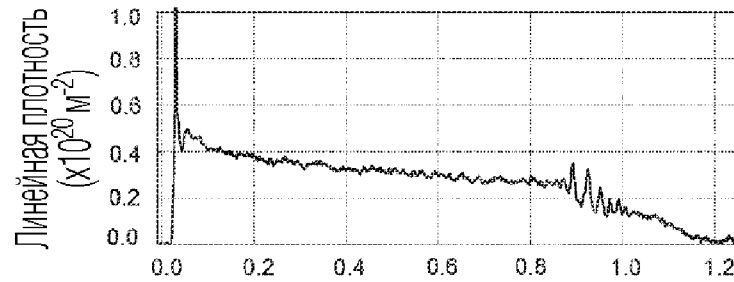


ФИГ. 12

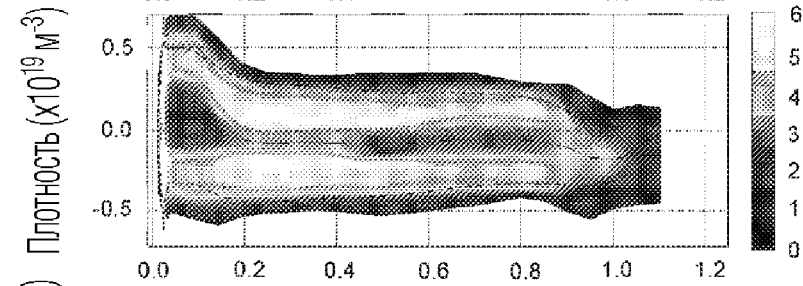
ФИГ. 13А



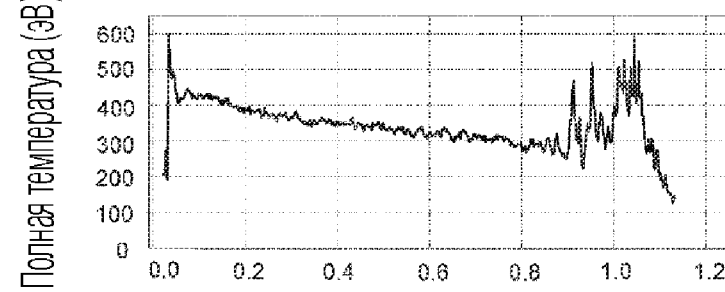
ФИГ. 13В



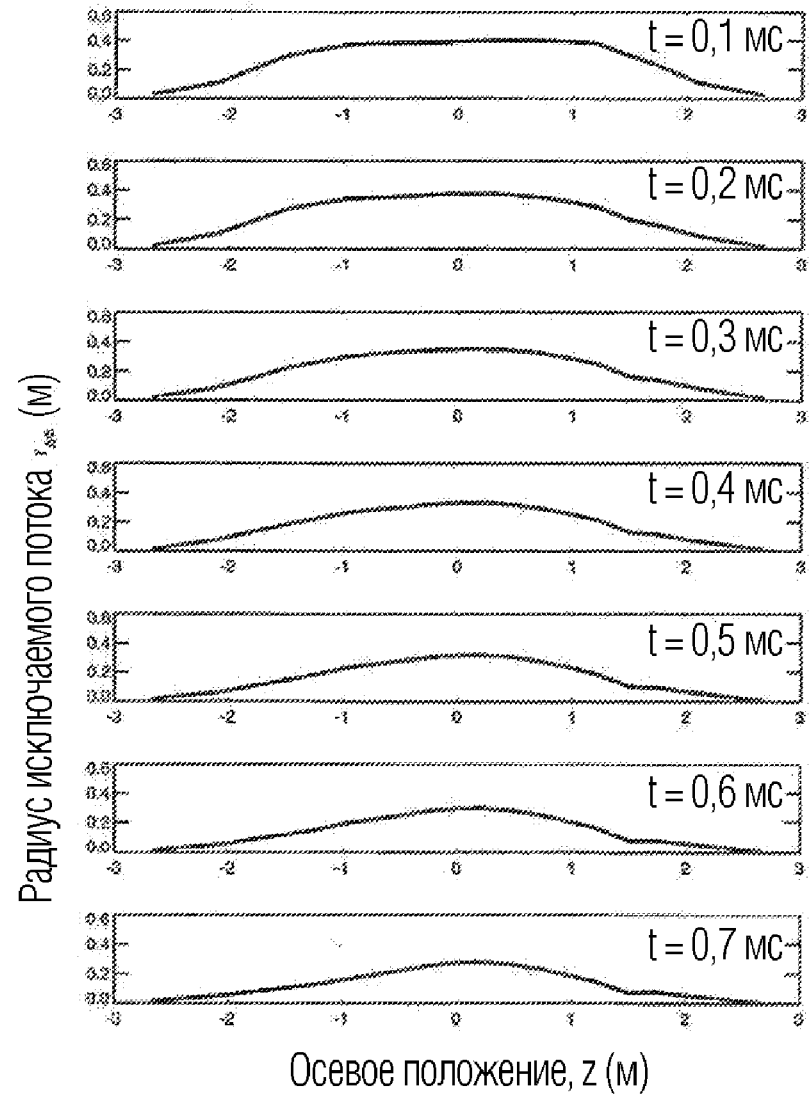
ФИГ. 13С



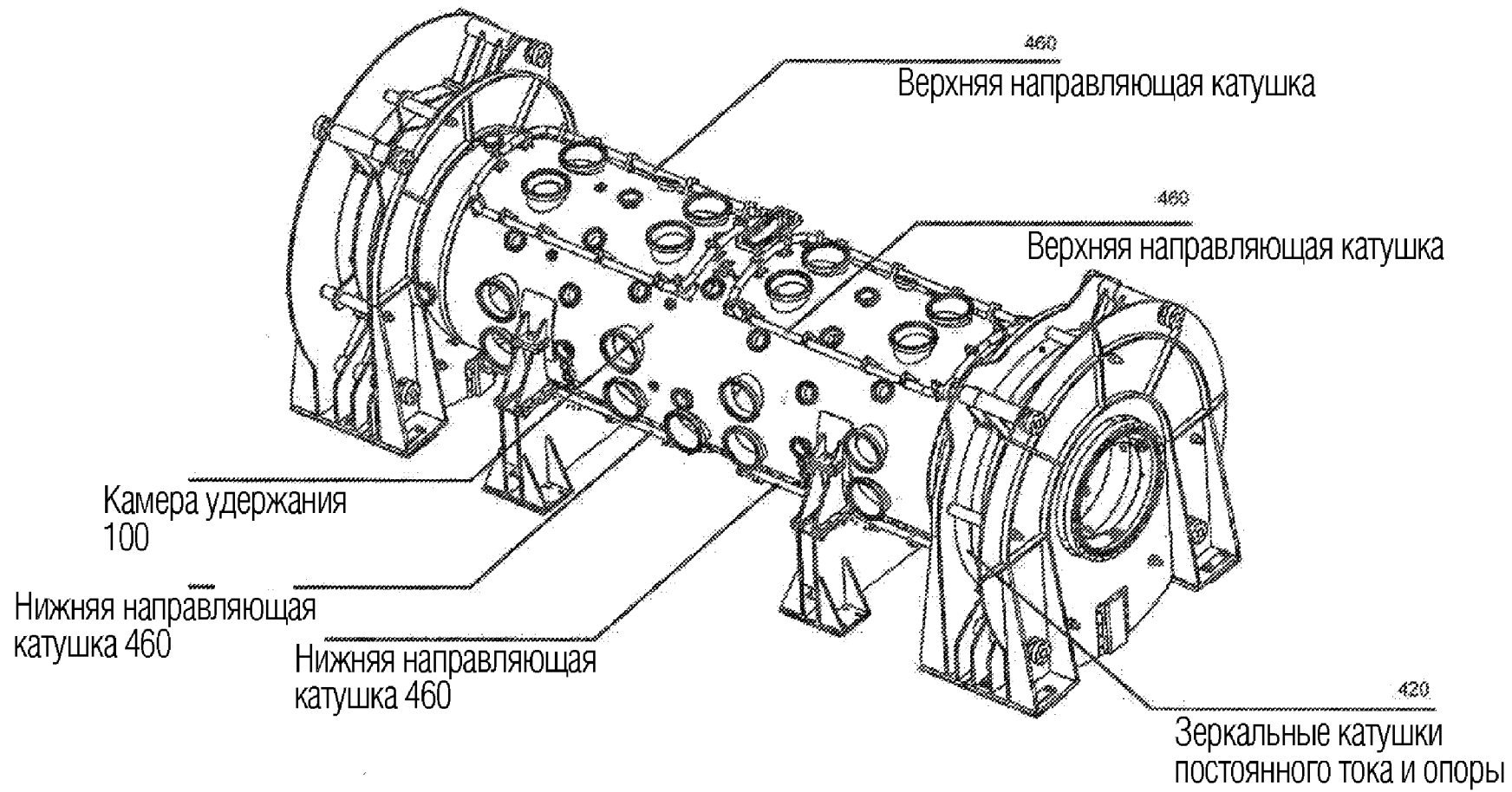
ФИГ. 13D



Время (мс)

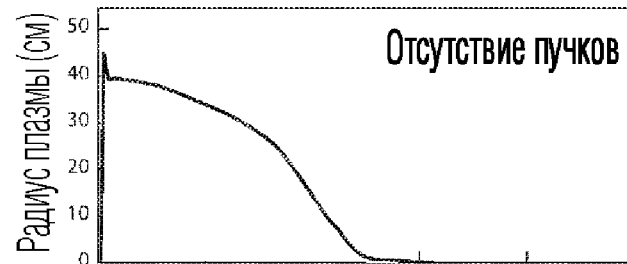


ФИГ. 14



ФИГ. 15

ФИГ. 16А



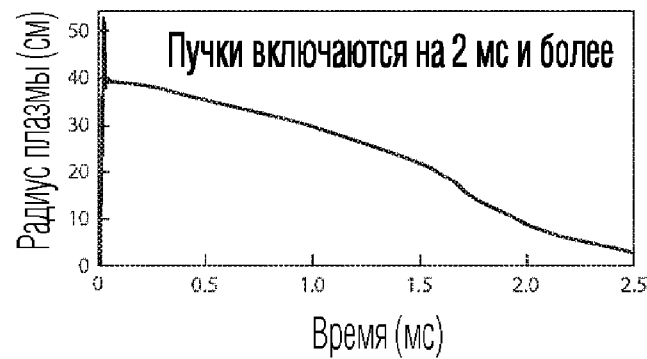
ФИГ. 16В



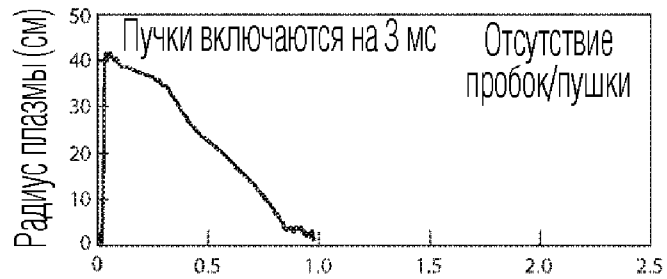
ФИГ. 16С



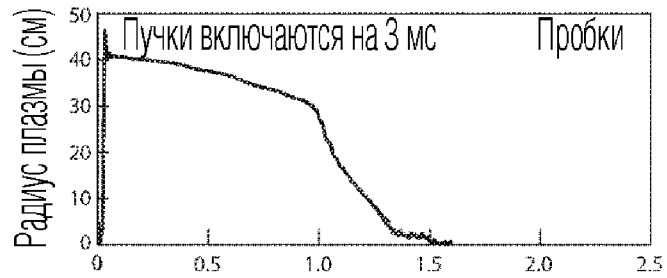
ФИГ. 16D



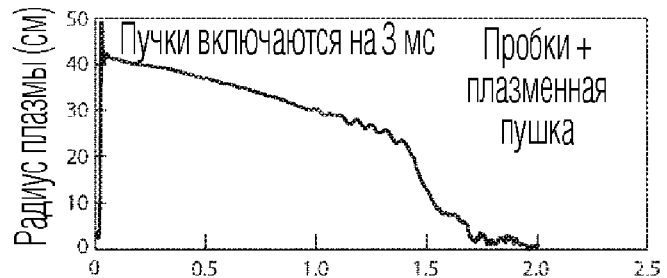
ФИГ. 17А



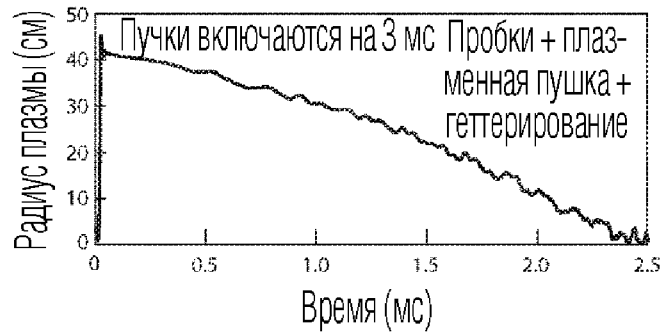
ФИГ. 17В



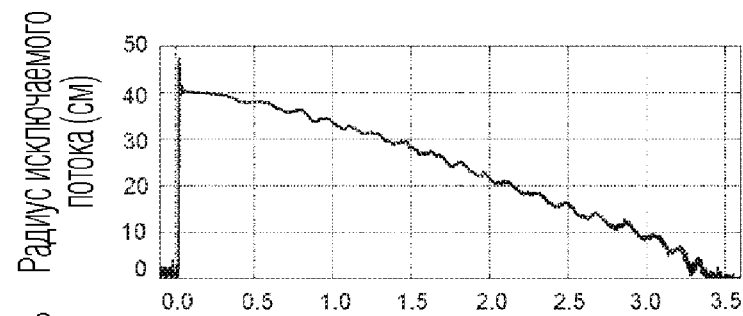
ФИГ. 17С



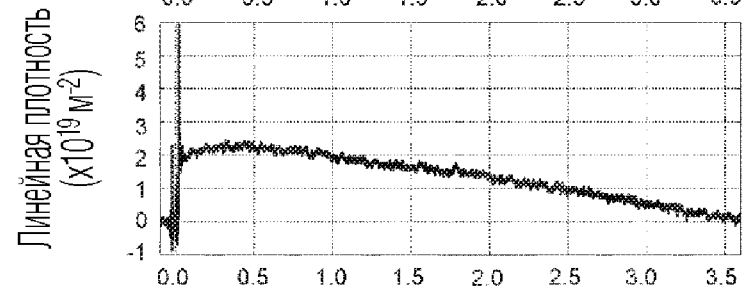
ФИГ. 17D



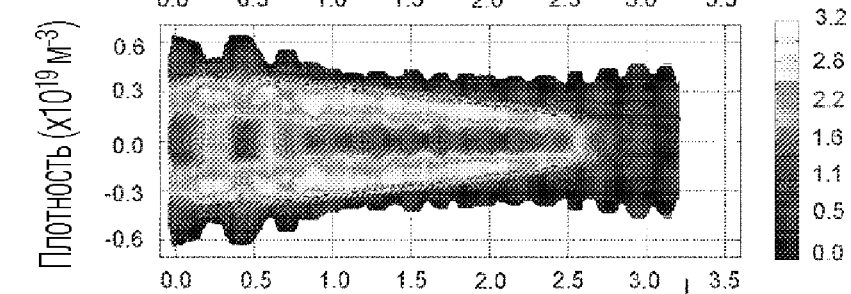
ФИГ. 18А



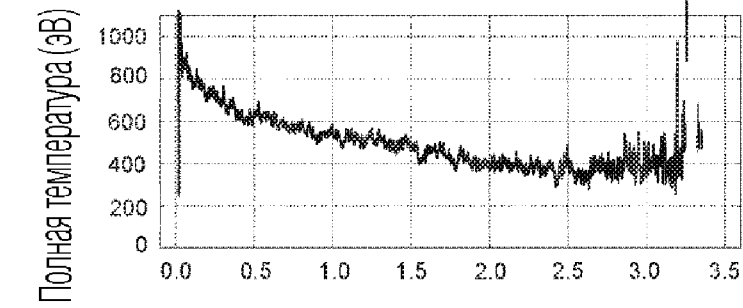
ФИГ. 18В



ФИГ. 18С

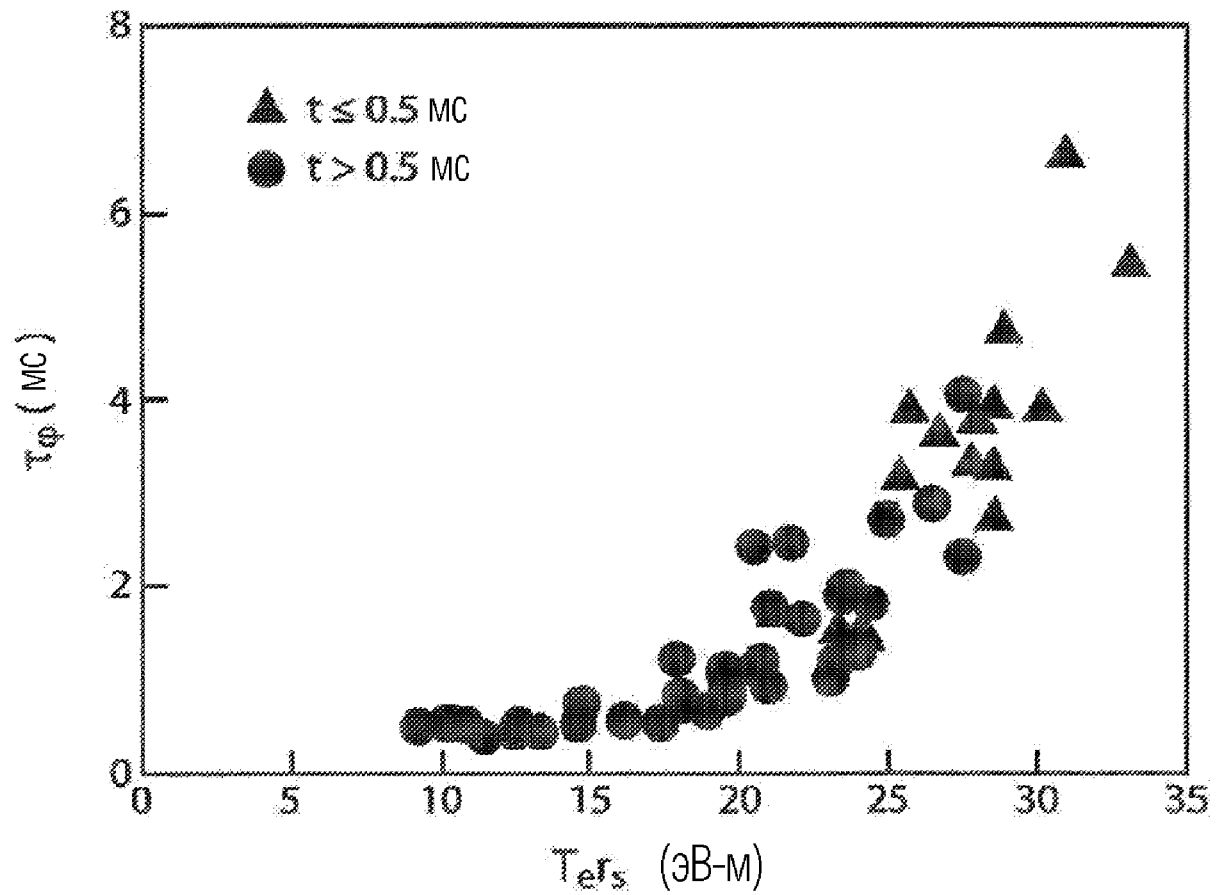


ФИГ. 18D

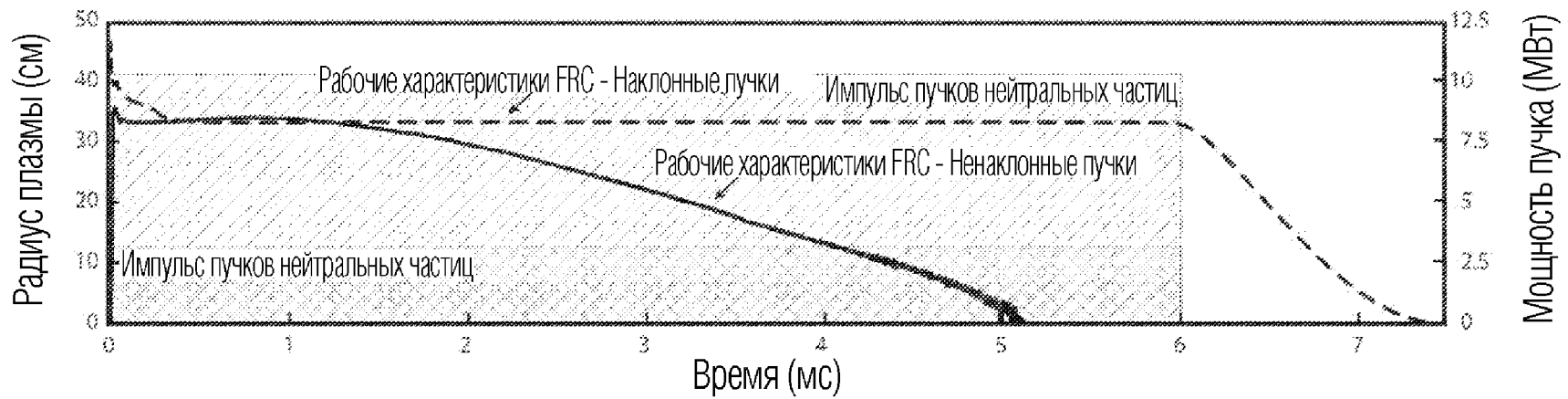


Время (мс)

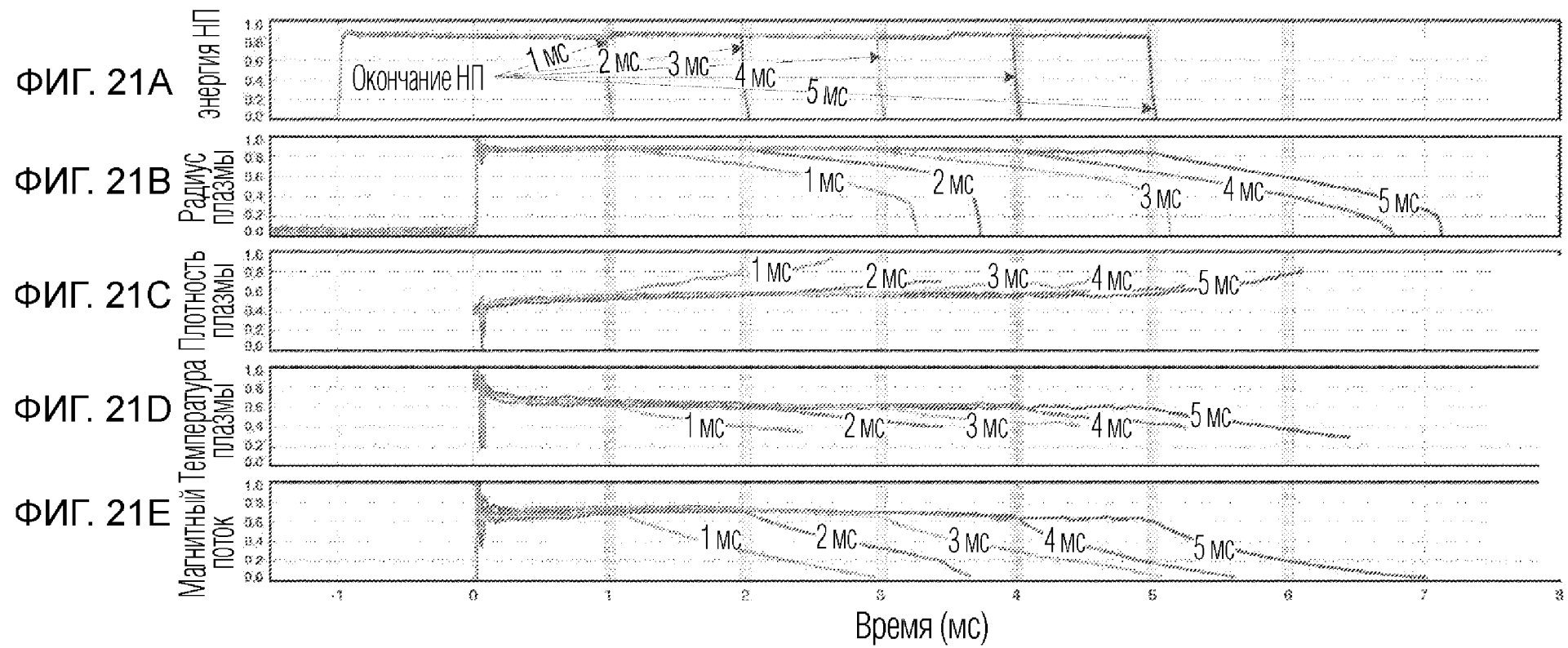


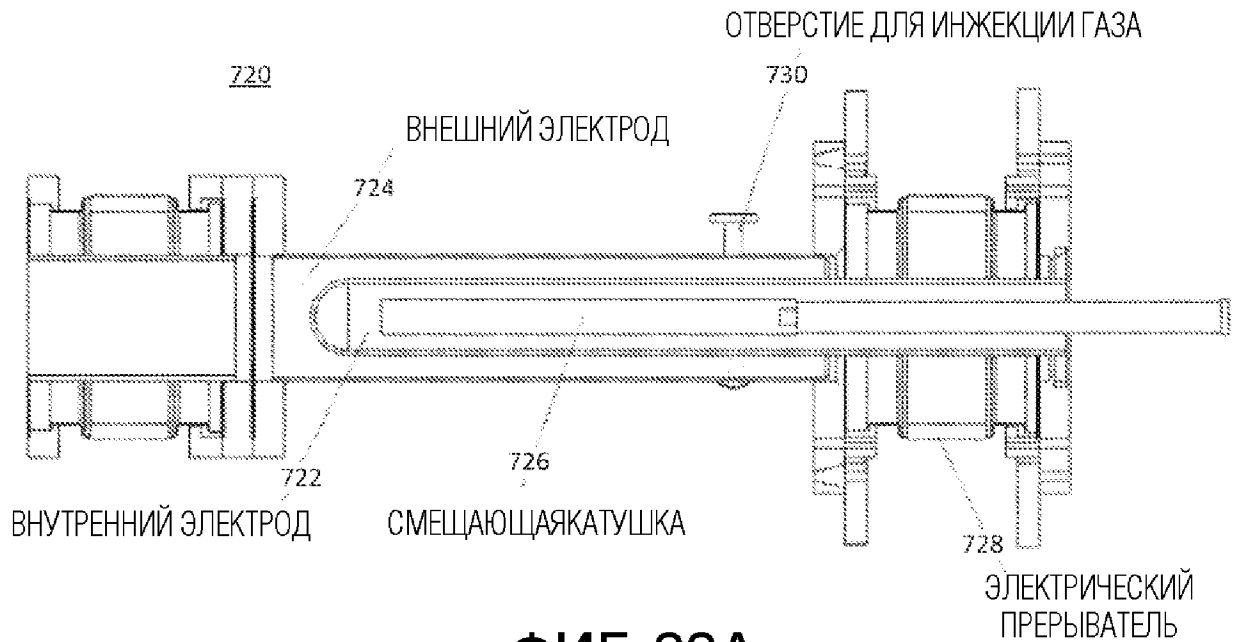


ФИГ. 19

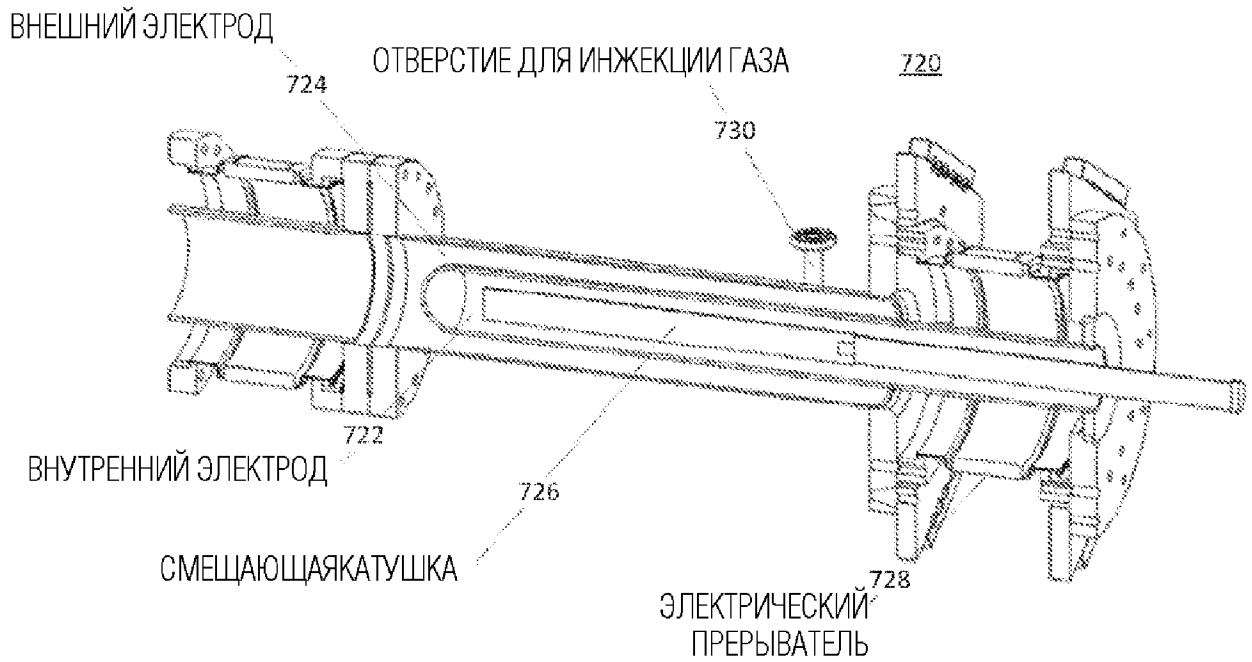


ФИГ. 20

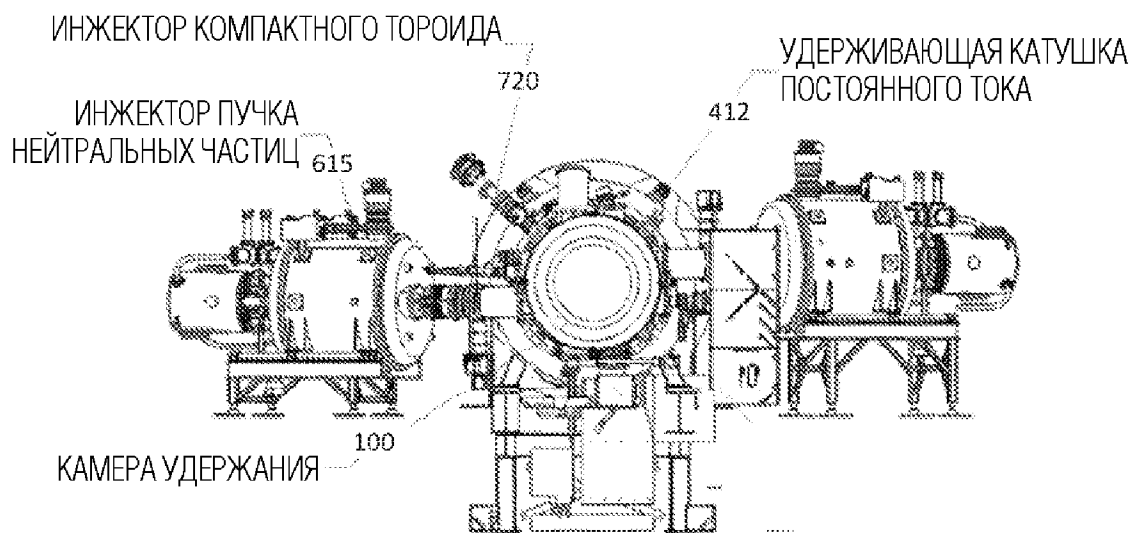
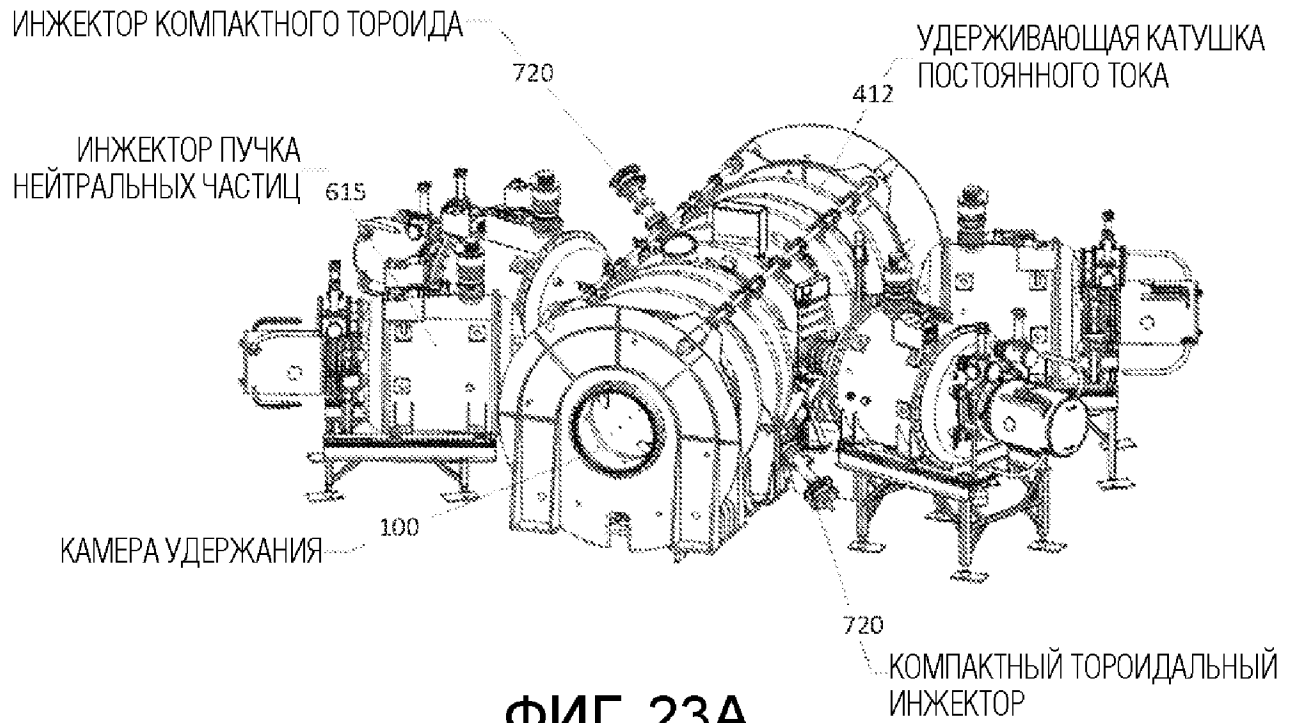


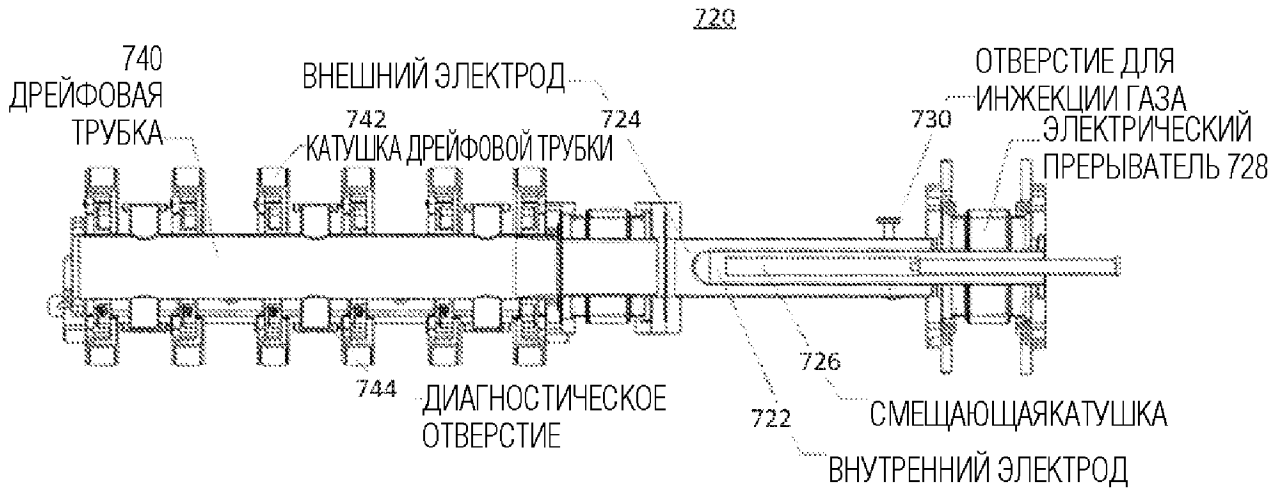


ФИГ. 22А

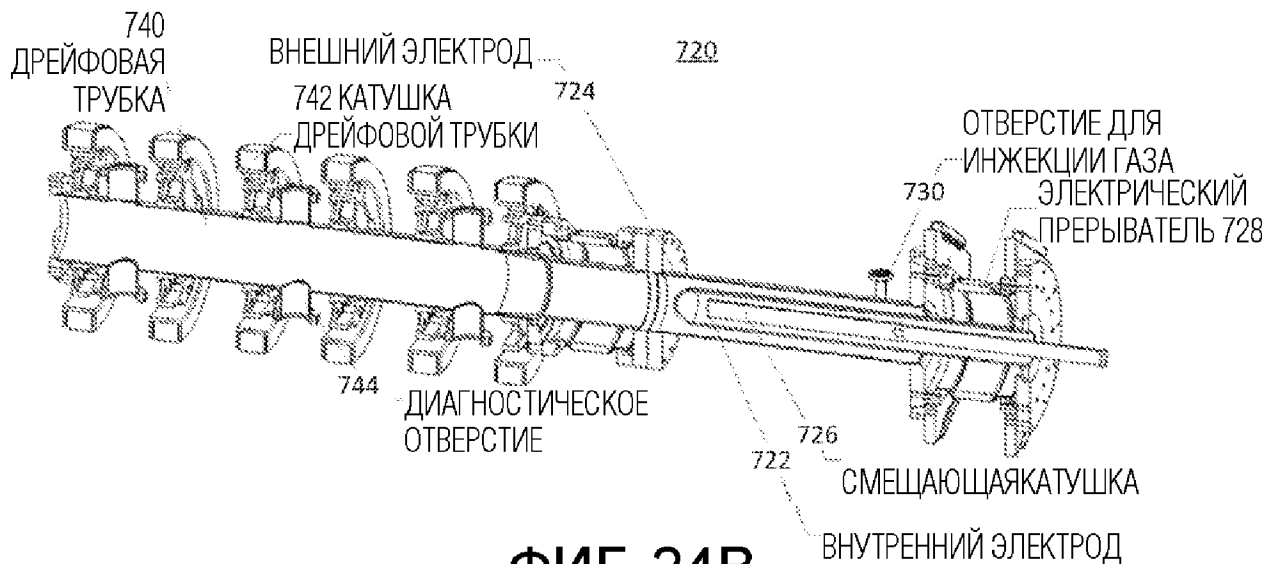


ФИГ. 22В

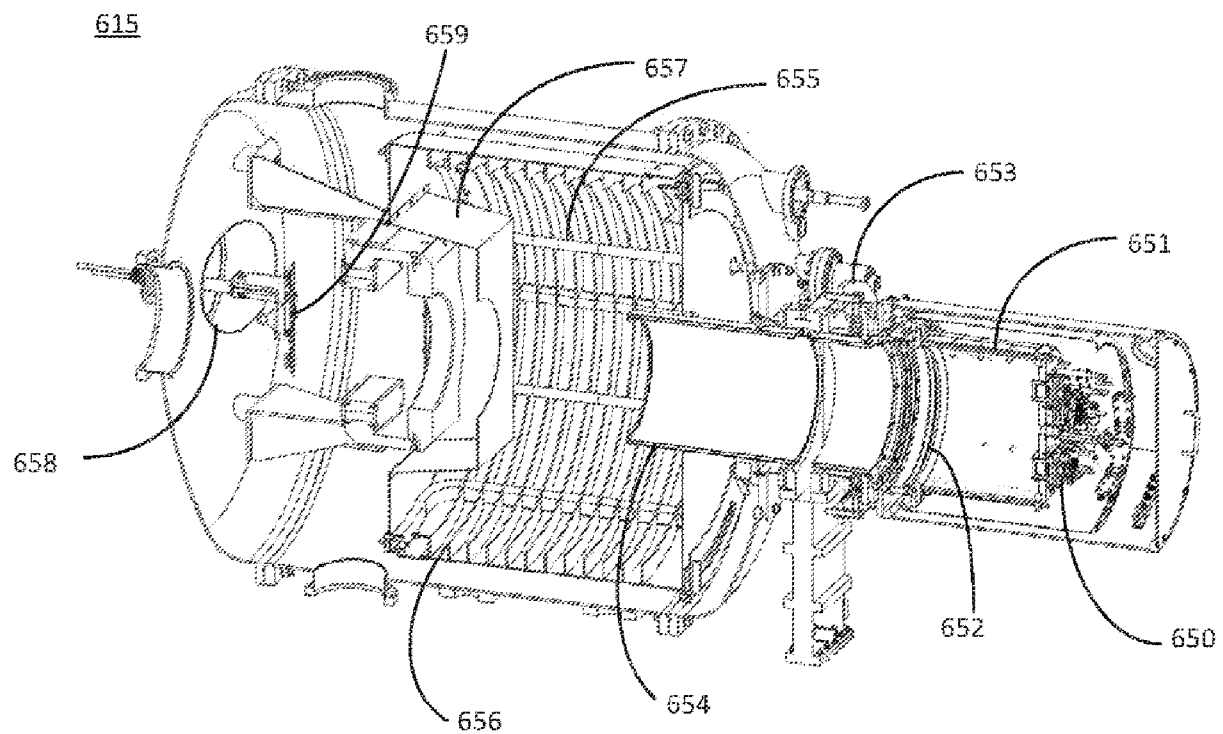




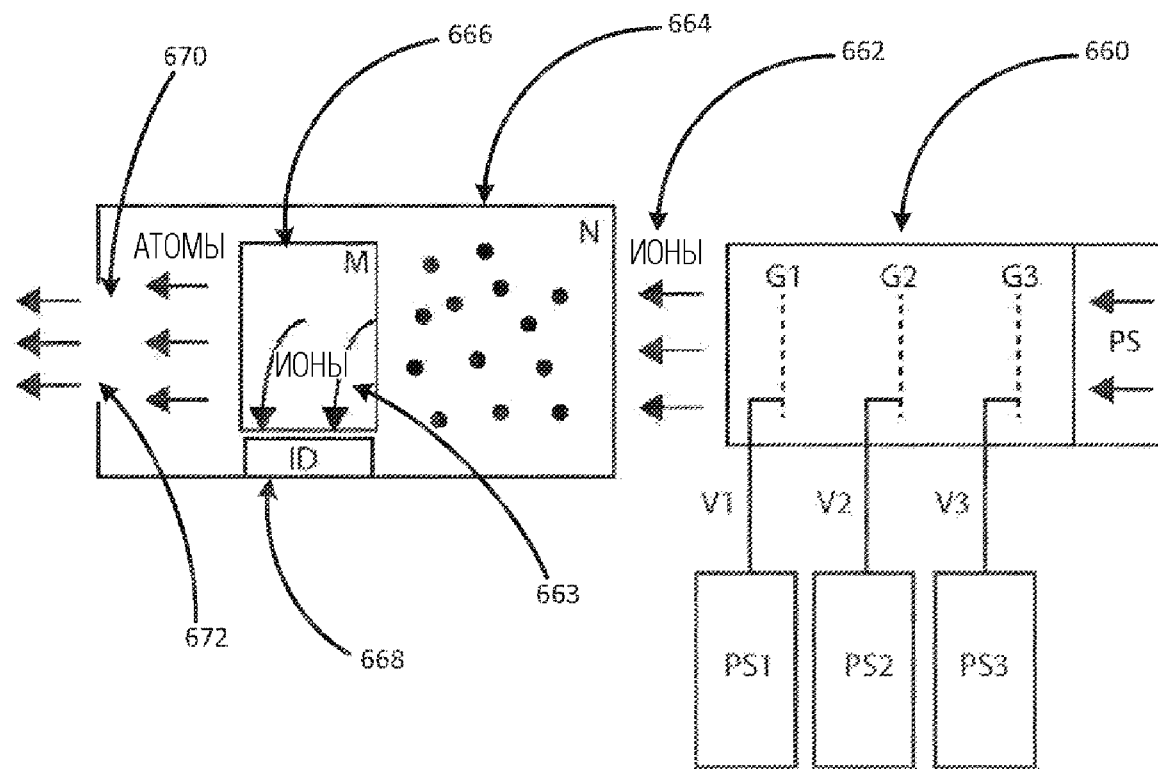
ФИГ. 24А



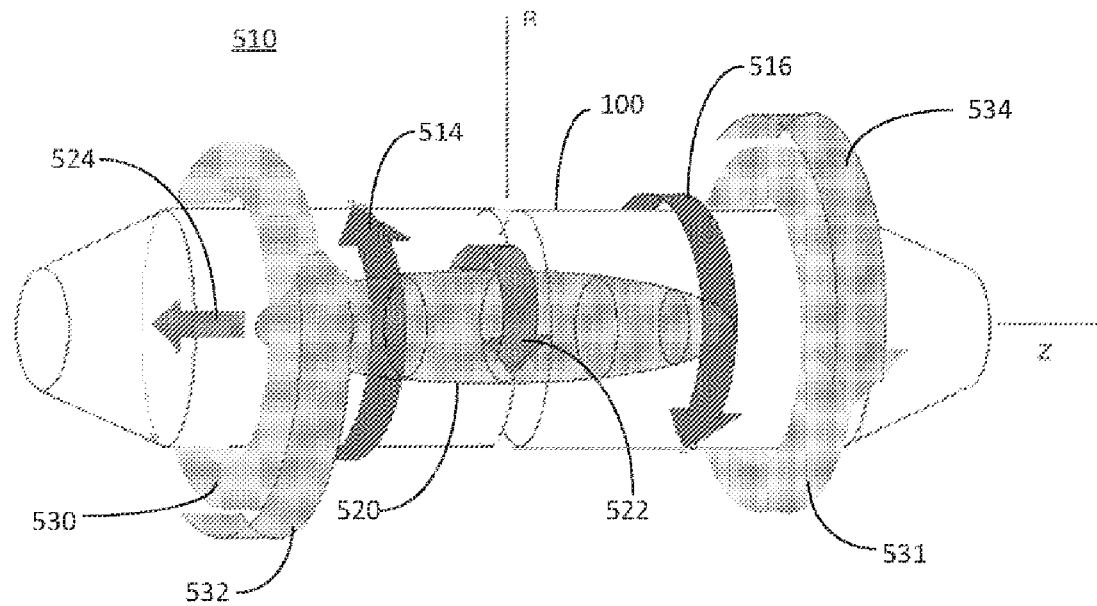
ФИГ. 24В



ФИГ. 25



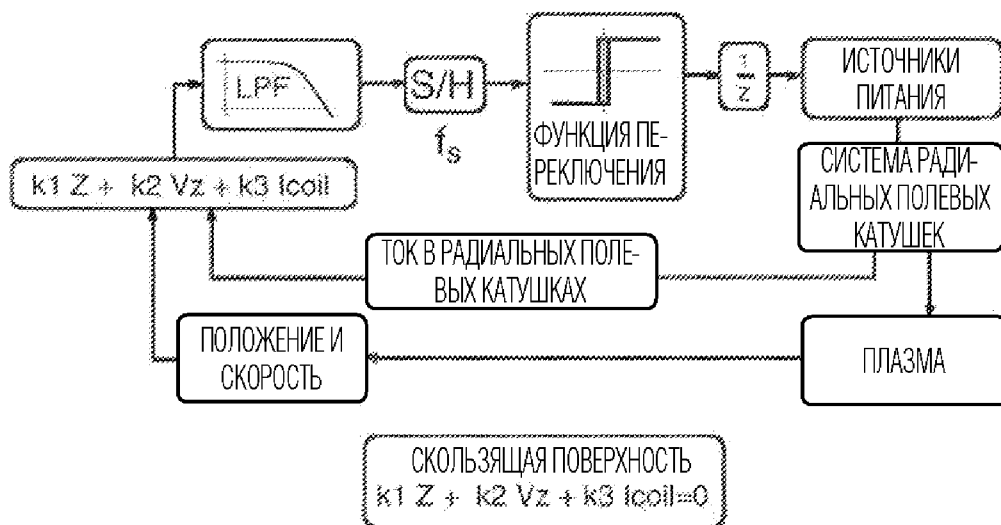
ФИГ. 26



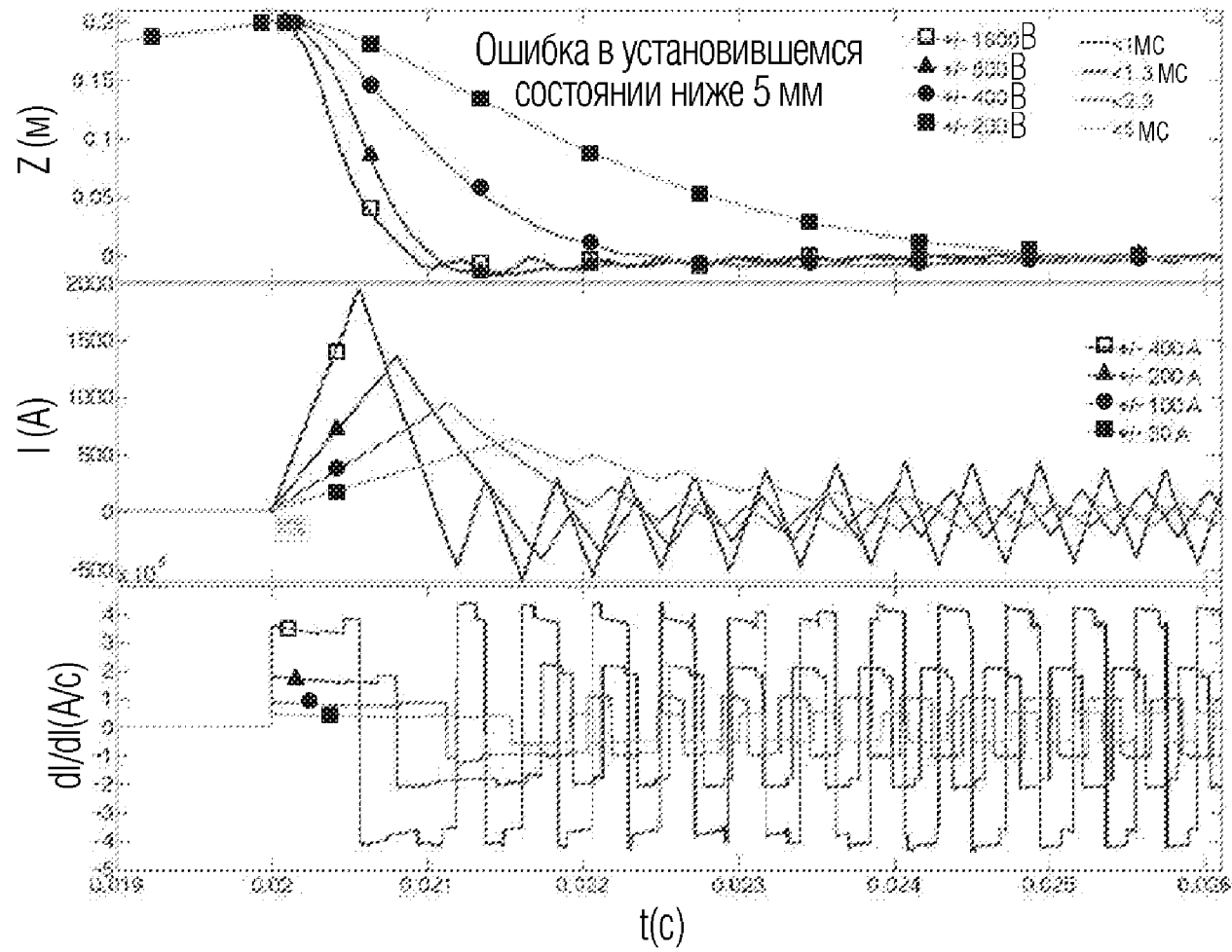
ФИГ. 27



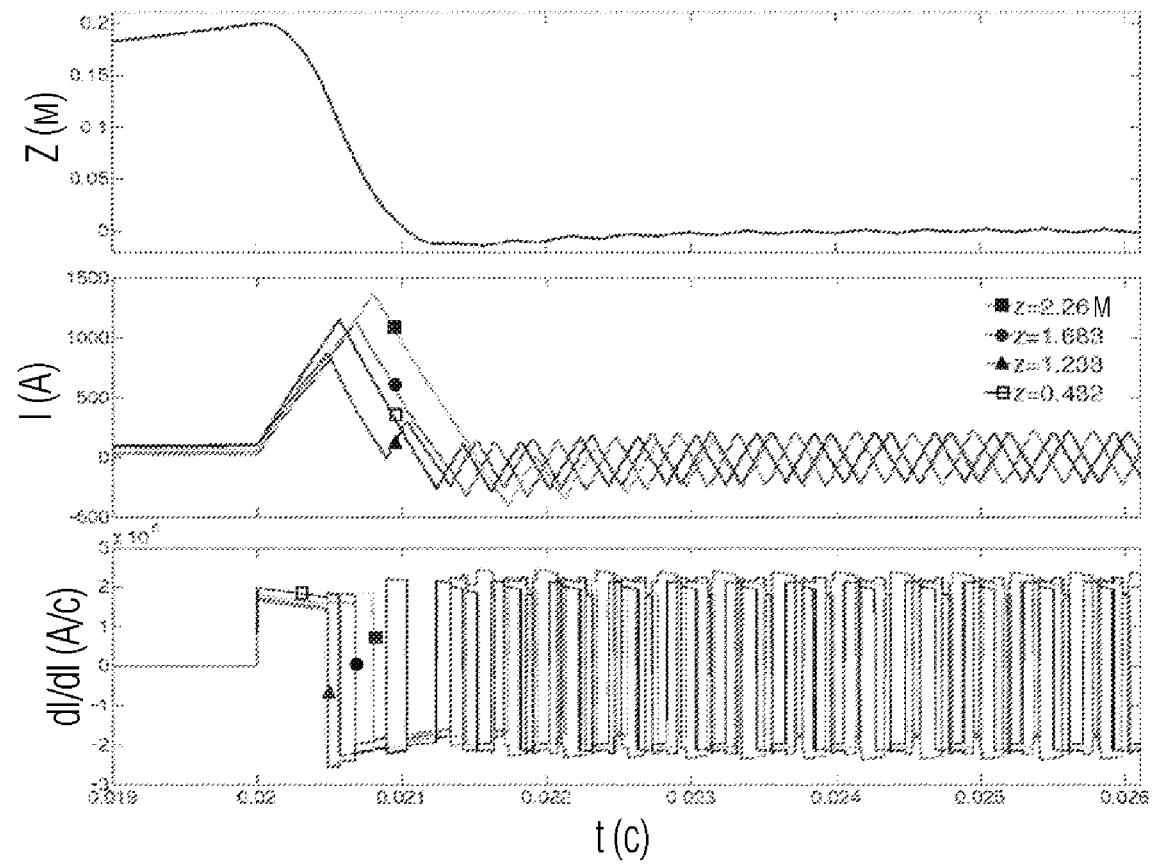
500



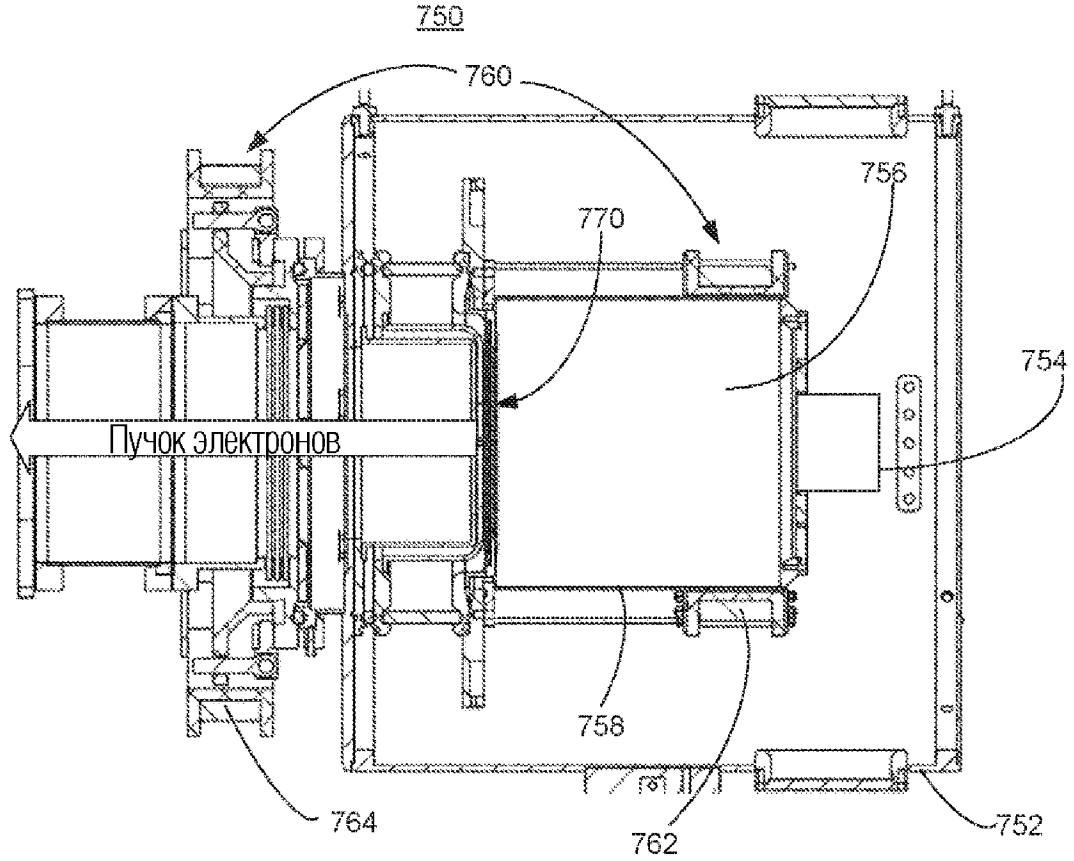
ФИГ. 28



ФИГ. 29

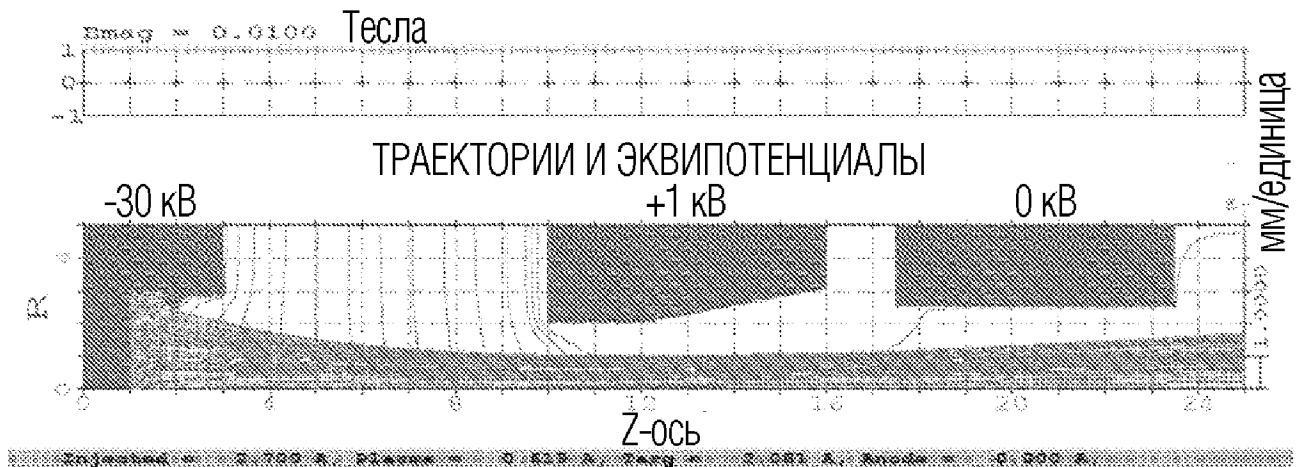


ФИГ. 30

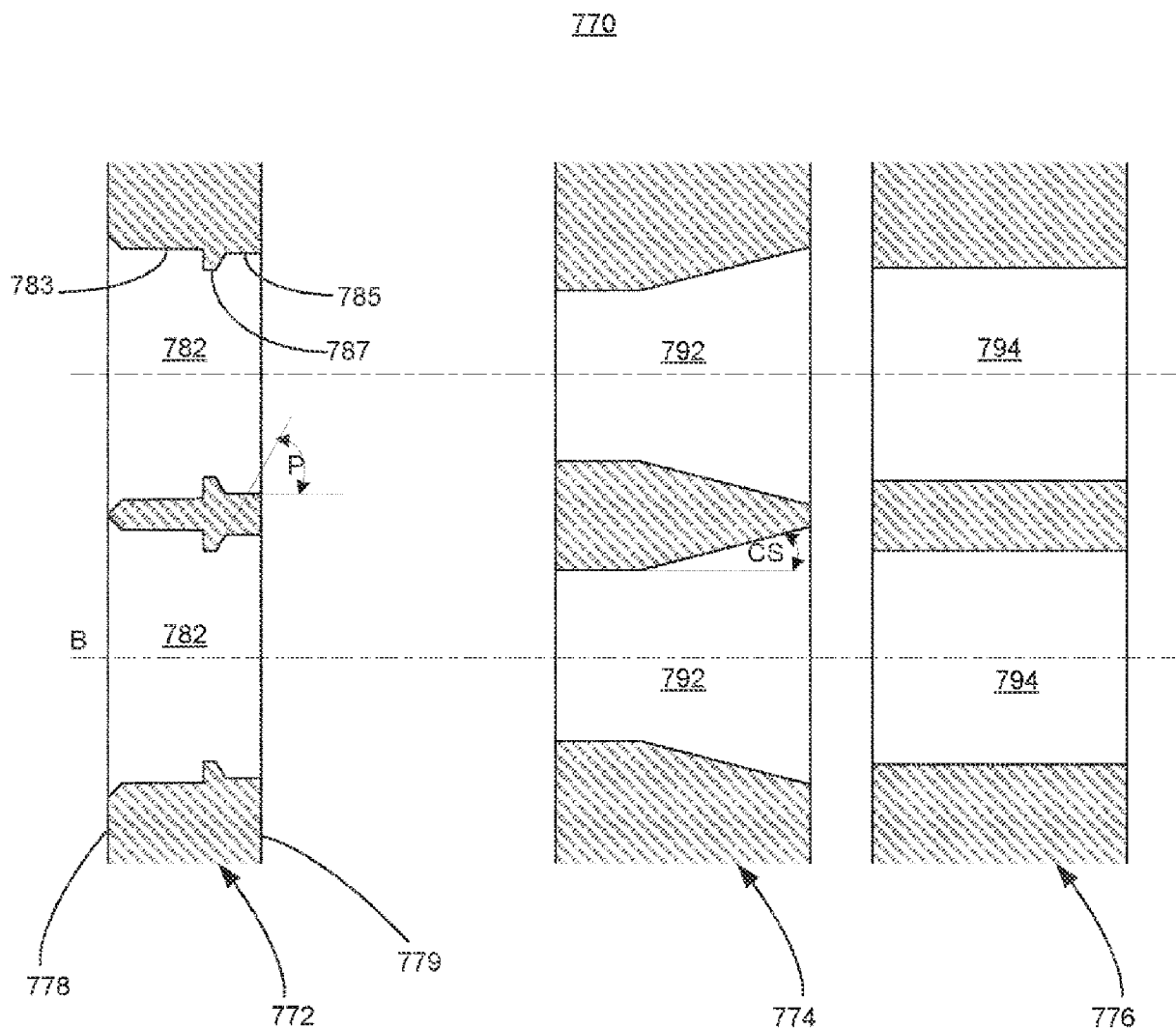


ФИГ. 31

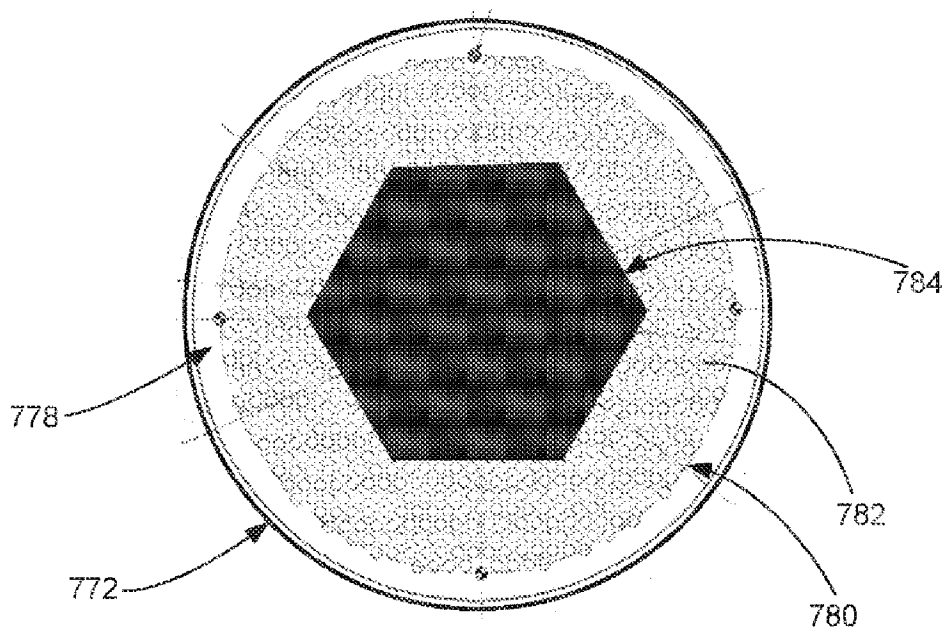
ОСЕВОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



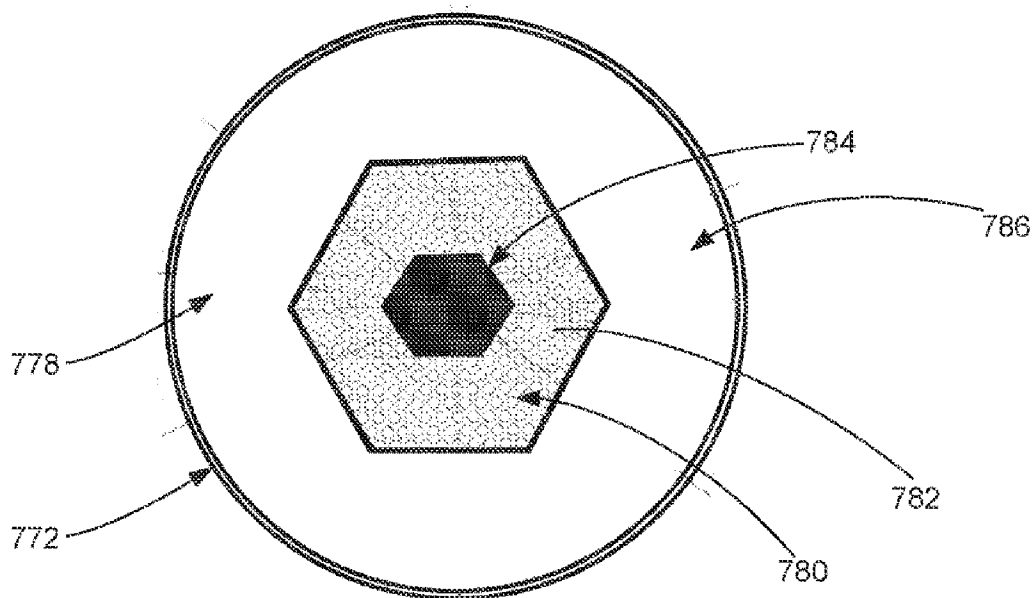
ФИГ. 32



ФИГ. 33

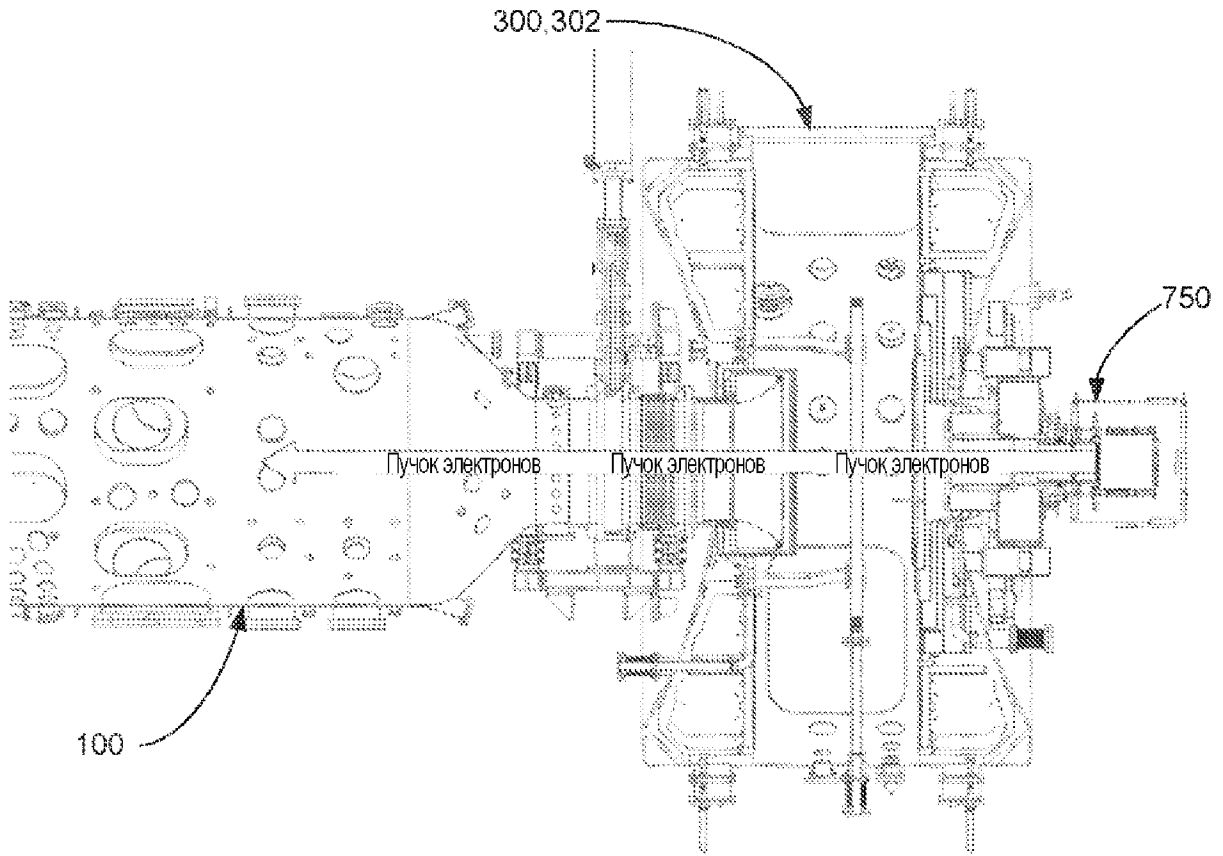


ФИГ. 34А

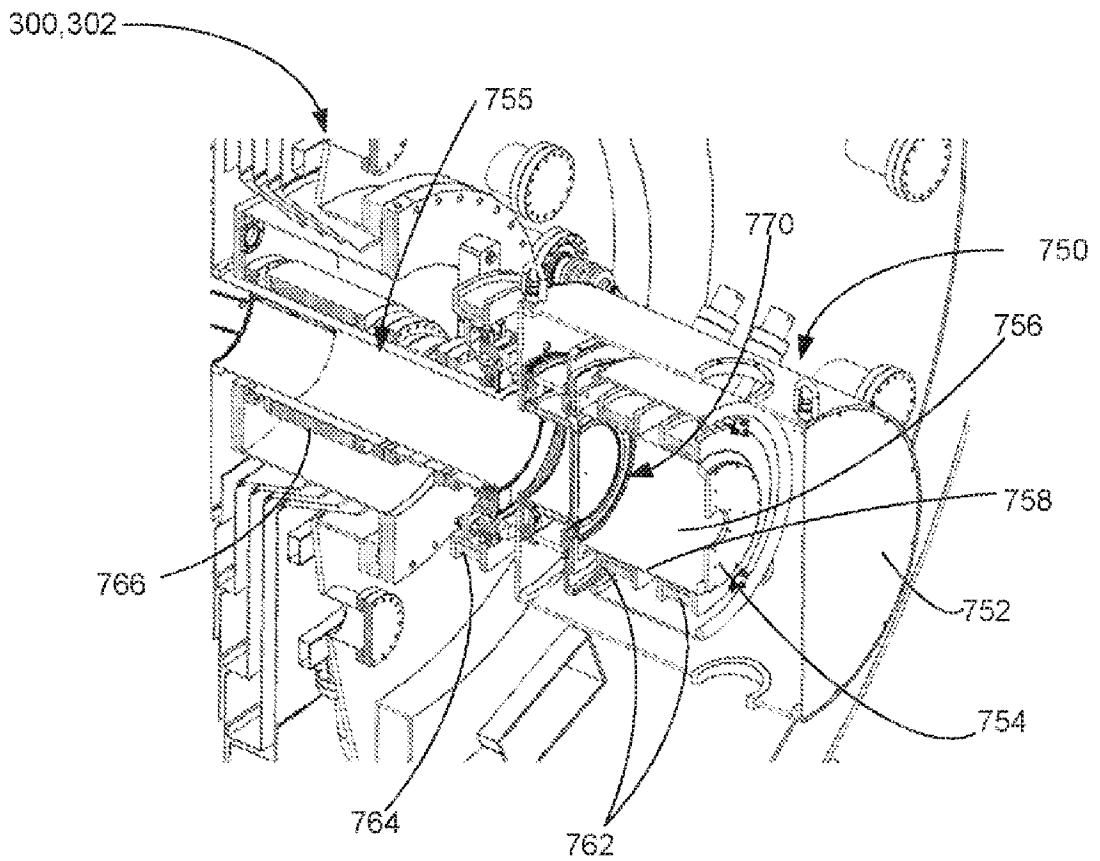


ФИГ. 34В

36/36



ФИГ. 35



ФИГ. 36