

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(21) 202292116 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2022.11.07

(22) Дата подачи заявки
2021.01.13

(51) Int. Cl. *H05H 1/14* (2006.01)
H05H 1/16 (2006.01)
H05H 1/22 (2006.01)
G21B 1/05 (2006.01)

(54) СИСТЕМА И СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ FRC
ПОСРЕДСТВОМ ОБЪЕДИНЕНИЯ СФЕРОМАКОВ И ИНЖЕКЦИИ ПУЧКОВ
НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

(31) 62/960,585

(32) 2020.01.13

(33) US

(86) PCT/US2021/013295

(87) WO 2021/146329 2021.07.22

(71) Заявитель:

ТАЭ ТЕКНОЛОДЖИЗ, ИНК. (US)

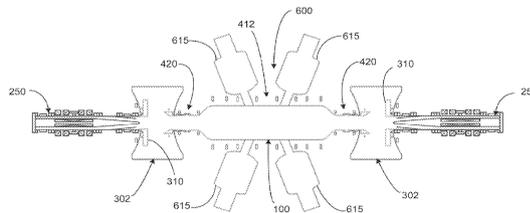
(72) Изобретатель:

Гота Хироси, Тадзима Тосики (US)

(74) Представитель:

Медведев В.Н. (RU)

(57) Предложенная высокоэффективная система с обращенной магнитной конфигурацией (FRC) включает в себя центральную камеру удержания, две камеры диверторов, связанные с камерой удержания, и два диаметрально противоположных инжектора сферомаков, связанные с камерами диверторов. Магнитная система включает в себя катушки квазипостоянного тока, расположенные аксиально вдоль компонентов системы с FRC.



A1

202292116

202292116

A1

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-574987EA/019

СИСТЕМА И СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ FRC ПОСРЕДСТВОМ ОБЪЕДИНЕНИЯ СФЕРОМАКОВ И ИНЖЕКЦИИ ПУЧКОВ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ, К КОТОРОЙ ОТНОСИТСЯ ИЗОБРЕТЕНИЕ

[0001] Варианты осуществления, описанные здесь, относятся в целом к системам магнитного удержания плазмы, а конкретнее - к системам и способам, которые облегчают формирование и сохранение высокоэнергетической и высокотемпературной плазмы в обращенной магнитной конфигурации (плазмы FRC) с превосходной устойчивостью, а также с удержанием частиц, энергии и потока.

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

[0002] Обращенная магнитная конфигурация (FRC, Field Reversed Configuration) принадлежит классу топологий магнитного удержания плазмы, известных как компактные тороиды (СТ, compact toroid). 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 сохранения, естественный неограниченный дивертор для облегчения вывода энергии и золоудаления и очень высокое β (β - это отношение среднего давления плазмы к среднему давлению магнитного поля внутри FRC), т.е., высокая плотность мощности. Природа высокого β является преимущественной для экономичной работы и для использования передовых, анейтронных видов топлива, таких как D-He3 и p-B11.

[0003] Традиционный способ формирования FRC предусматривает применение технологии Θ -пинча с обращенным полем, дающей 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 эжектируют из одного торца в камеру удержания. Потом осуществляют захват переносимого плазмоида между двумя прочными зеркалами на торцах камеры (см., например, H. Himura, S. Okada, S. Sugimoto и S. Goto, Phys. Plasmas 2, 191 (1995)). Как только этот плазмод оказывается в камере удержания, можно применять различные способы нагрева и возбуждения тока, такие, как инжекция пучка частиц (нейтральных или нейтрализованных), 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 устойчивость к внешним воздействиям, приспособляемость к динамическому формированию, переносу и интенсивным событиям захвата. Более того этого, 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 объединения 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 (RMF, rotating magnetic field) (см., например, I. R. Jones, Phys. Plasmas 6, 1950 (1999)), которое также обеспечивает дополнительную устойчивость.

[0004] Был существенно доработан метод столкновения и объединения, предложенный уже давно (см., например, D. R. Wells, Phys. Fluids 9, 1010 (1966)): два отдельных тета-пинча на противоположных торцах камеры удержания одновременно генерируют и ускоряют два плазмоида по направлению друг к другу на высокой скорости, которые затем сталкиваются в центре камеры удержания и объединяются, формируя составную FRC. При разработке и успешном проведении одного из наиболее крупномасштабных к настоящему времени экспериментов с FRC, обычный способ столкновения и объединения показал, что дает устойчивые высокотемпературные FRC с большим временем жизни и большой плотностью потока частиц (см., например, M. Binderbauer, et al., Phys. Rev. Lett. 105, 045003 (2010)). Совсем недавно достигнут значительный прогресс при использовании метода столкновения и объединения в экспериментах с возбуждаемой пучками FRC, которые дают относительно высокотемпературные плазмы FRC в течение длительного времени (типичные параметры плазмы: $T_e \sim 250$ эВ, $T_i \sim 1$ кэВ, $\langle n_e \rangle \sim 2-3 \times 10^{13}$ см⁻³, $B_e \sim 1$ кГс, время жизни плазмы ~ 30 мс) при использовании инжекции (NBI, neutral-beam injection) высокоэнергетических пучков нейтральных частиц (NB, neutral-beam) и эффективного граничного смещения (см., например, Gota, H. et al., Nucl. Fusion 57, 116021 (2017); Gota, H. et al., Nucl. Fusion 59, 112009 (2019); и Gota, H. et al., Bull. Am. Phys. Soc. 64, UP10.00123 (2019)). В таких экспериментах плазму-цель для NBI получают посредством столкновения и объединения двух плазм FRC с использованием метода динамического формирования тета-пинча с обращенным полем (FRTP, field-reversed theta-pinch) (Binderbauer, Phys. Rev. Lett. 105), в котором улавливаемый магнитный поток объединенной FRC изначально составляет ~ 5 мВб, что основано на модели жесткого ротора с внешним магнитным полем ~ 1 кГс в удерживающей секции. Путем инжекции высокоэнергетических NB мощностью > 13 МВт (увеличиваемой до ~ 21 МВт путем настройки энергии пучка во время импульса) в плазму-цель, происходит захват быстрых частиц изнутри и снаружи от сепаратрисы и перемещение их изнутри и снаружи от сепаратрисы с большой орбитой для нагрева в первую очередь электронов, а также для возбуждения тока, в котором происходит почти классическое удержание быстрых ионов. Эта инжекция высокоэнергетических NBI не достигалась ни в каком другом эксперименте с компактными тороидами (СТ) и оказалась очень важной демонстрацией жизнеспособности концепции возбуждаемых пучками FRC и ее технической готовности (Gota, Nucl. Fusion 59; Gota, Bull. Am. Phys. Soc. 64).

[0005] Желательны усовершенствованные системы, устройства и способы генерирования целевой плазмы FRC с высоким потоком и возможностью осевого пополнения.

СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0006] Возможные варианты осуществления систем, устройств и способов, предложенные здесь, предназначены для генерирования обладающей высоким потоком целевой плазмы FRC с возможностью осевого пополнения плазмы FRC. Чтобы генерировать оптимальную исходную целевую плазму FRC с высоким потоком, инжекторы сфероматов среднего масштаба (также называемые инжекторами компактных тороидов (СТ)) связывают друг напротив друга с торцами центрально расположенной камеры удержания плазмы. Инжекторы сфероматов инжектируют сфероматы по направлению к средней плоскости камеры удержания, где сфероматы объединяются и образуют плазму FRC в камерах удержания. Объединение противоположно направленных спиральностей двух сфероматов имеет тенденцию породить плазмы FRC с повышенным захватываемым магнитным потоком. С камерой удержания также связано множество инжекторов пучков нейтральных частиц для возбуждения и сохранения плазмы FRC.

[0007] В возможных вариантах осуществления инжекторы пучков нейтральных частиц выполнены с возможностью регулирования от некоторого исходного уровня мощности до некоторого повышенного уровня мощности.

[0008] В дополнительных возможных вариантах осуществления инжекторы сфероматов выполнены с возможностью многоимпульсной инжекции сфероматов в плазму FRC вдоль геометрической оси камеры удержания с целью эффективного пополнения и стекания.

[0009] Другие системы, устройства, способы, признаки и преимущества согласно описываемому здесь объекту изобретения будут или станут очевидными специалисту в данной области техники после просмотра нижеследующих чертежей и подробного описания. Предполагается, что все такие дополнительные системы, способы, признаки и преимущества должны быть заключены в пределах этого описания, находиться в рамках объема притязаний согласно описываемому здесь объекту изобретения и защищены прилагаемой формулой изобретения. Признаки возможных вариантов осуществления ни в коем случае не следует интерпретировать как ограничивающие прилагаемую формулу изобретения, если нет конкретного раскрытия тех признаков в формуле изобретения.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

[0010] Сопроводительные чертежи, которые включены в данное описание как его часть, иллюстрируют предпочтительные в настоящее время возможные варианты осуществления и вместе с общим описанием, приведенным выше, и подробным описанием возможных вариантов осуществления, приводимым ниже, служат для объяснения принципов данного изобретения и обучения им.

[0011] Фиг.1 иллюстрирует удержание частиц в предлагаемой системе FRC в высокоэффективном режиме FRC (режим HPF, high performance FRC regime) по

сравнению с обычным режимом FRC (режим CR, conventional FRC regime) и по сравнению с традиционными экспериментами с другими FRC.

[0012] Фиг.2 иллюстрирует компоненты предлагаемой системы FRC и магнитной топологии FRC, получаемой в предлагаемой системе FRC.

[0013] Фиг.3А иллюстрирует базовую компоновку предлагаемой системы FRC на виде сверху, включая предпочтительное расположение центральной емкости для удержания, формирующей секции, диверторов, пучков нейтральных частиц, электродов, плазменных пушек, зеркальных пробок и инжектора таблеток.

[0014] Фиг.3В иллюстрирует центральную емкость для удержания на виде сверху и показывает пучки нейтральных частиц, расположенные под прямым углом к главной оси симметрии центральной емкости для удержания.

[0027] Фиг.3С иллюстрирует центральную емкость для удержания на виде сверху и показывает пучки нейтральных частиц, расположенные под меньшим углом, чем прямой, к главной оси симметрии центральной емкости для удержания, и направленные на инъекцию частиц по направлению к средней плоскости центральной емкости для удержания.

[0016] Фиг.3D и 3Е иллюстрируют вид сверху и перспективное изображение, соответственно, базовой компоновки согласно альтернативному варианту осуществления предлагаемой системы FRC, включая предпочтительное расположение центральной емкости для удержания, формирующей секции, внутренних и внешних диверторов, пучков нейтральных частиц, расположенных под меньшим углом, чем прямой, к главной оси симметрии центральной емкости для удержания, электродов, плазменных пушек и зеркальных пробок.

[0017] Фиг.4 иллюстрирует схему компонентов системы импульсного питания для формирующих секций.

[0018] Фиг.5 иллюстрирует изометрическое изображение отдельного формирующего модуля импульсного питания.

[0019] Фиг.6 иллюстрирует изометрическое изображение узла формирующих труб.

[0020] Фиг.7 иллюстрирует изометрическое изображение в частичном сечении системы пучков нейтральных частиц и ключевых компонентов.

[0021] Фиг.8 иллюстрирует изометрическое изображение средств генерирования пучков нейтральных частиц на камере удержания.

[0022] Фиг.9 иллюстрирует изометрическое изображение в частичном сечении предпочтительного расположения систем Ti- и Li-геттерирования.

[0023] Фиг.10 иллюстрирует изометрическое изображение в частичном сечении плазменной пушки, установленной в камере диверторов. Также показаны соответствующая магнитная зеркальная пробка и электродный узел диверторов.

[0024] Фиг.11 иллюстрирует предпочтительную схему расположения кольцевого электрода смещения на осевом торце камеры удержания.

[0025] Фиг.12 иллюстрирует эволюцию радиуса исключаемого потока в системе

FRC, полученного исходя из ряда наружных диамагнитных контуров в 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 источниках для формирования, а расстояние z задается относительно осевой средней плоскости машины.

[0026] Фиг.13А, 13В, 13С и 13D иллюстрируют данные от типичного неподдерживаемого разряда в режиме не-HPF в предлагаемой системе FRC. Показаны как функции времени: (фиг.13А) радиус исключаемого потока на средней плоскости, (фиг.13В) δ хорд линейно-интегрированной плотности из находящегося в средней плоскости интерферометра для определения содержания CO_2 , (фиг.13С) радиальные профили плотности, инвертированные по Абелю, по данным интерферометра для определения содержания CO_2 и (фиг.13D) общая температура плазмы исходя из баланса давления.

[0027] Фиг.14 иллюстрирует осевые профили исключаемого потока в выбранные моменты времени для одного и того же разряда из предлагаемой системы FRC, показанной на фиг.13А, 13В, 13С и 13D.

[0028] Фиг.15 иллюстрирует изометрическое изображение отклоняющих катушек, установленных снаружи камеры удержания.

[0029] Фиг.16А, 16В, 16С и 16D иллюстрируют корреляции времени жизни FRC и длительности импульсов инжектируемых пучков нейтральных частиц. Как показано, более длительные импульсы пучка дают большее время жизни FRC.

[0030] Фиг.17А, 17В, 17С и 17D иллюстрируют отдельные и совокупные эффекты различных компонентов системы FRC на рабочие характеристики FRC и достижение режима HPF.

[0031] Фиг.18А, 18В, 18С и 18D иллюстрируют данные из типичного режима HPF неподдерживаемого разряда в предлагаемой системе FRC. Показаны как функции времени: (фиг.18А) радиус исключаемого потока на средней плоскости, (фиг.18В) δ хорд линейно-интегрированной плотности из находящегося в средней плоскости интерферометра для определения содержания CO_2 , (фиг.18С) радиальные профили плотности, инвертированные по Абелю, по данным интерферометра для определения содержания CO_2 и (фиг.18D) общая температура плазмы из баланса давления.

[0032] Фиг.19 иллюстрирует удержание потока как функцию температуры (T_e) электронов. Это дает графическое представление о вновь устанавливаемом режиме масштабирования, который превосходит известные, для разрядов в HPF.

[0033] Фиг. 20 иллюстрирует время жизни FRC, соответствующее длительности импульса не наклонных и наклонных инжектируемых пучков нейтральных частиц.

[0034] Фиг.21А, 21В, 21С, 21D и 21Е иллюстрируют влияние длительности импульса наклонного пучка нейтральных частиц и времени жизни плазмы FRC на такие параметры, как радиус плазмы, плотность плазмы, температура плазмы и магнитный поток, соответствующие длительности импульса наклонных инжектируемых пучков

нейтральных частиц.

[0035] Фиг.22А и 22В иллюстрируют базовую компоновку инжектора компактных тороидов (СТ).

[0036] Фиг.23А и 23В иллюстрируют центральную емкость для удержания, демонстрируя установленный на нее инжектор СТ.

[0037] Фиг.24А и 24В иллюстрируют базовую компоновку согласно альтернативному варианту осуществления инжектора СТ, имеющего связанную с ним дрейфовую трубку.

[0038] Фиг.25 иллюстрирует изометрическое изображение в сечении системы пучков нейтральных частиц и ключевые компоненты настраиваемой отдаваемой мощности пучков нейтральных частиц.

[0039] Фиг.26 схематически иллюстрирует систему пучков нейтральных частиц с настраиваемой отдаваемой мощностью пучков нейтральных частиц.

[0040] На фиг.27 представлено схематическое изображение, иллюстрирующее механизм управления осевым положением плазмы FRC в пределах емкости для удержания (CV, confining vessel).

[0041] На фиг.28 представлена блок-схема последовательности операций алгоритма управления основополагающим режимом скольжения.

[0042] На фиг.29 представлен составной график примеров моделирования управления осевым положением в режиме скольжения.

[0043] На фиг.30 представлен составной график примеров моделирования управления осевым положением в режиме скольжения.

[0044] На фиг.31А и 31В представлены схематические изображения, где показан возможный вариант осуществления системы удержания FRC с противоположными инжекторами сферомаков.

[0045] Фиг.32А, 32В, 32С и 32D иллюстрируют этапы в процессе формирования FRC посредством объединения сферомаков с противоположно направленными спиральностями.

[0046] На фиг.33 представлено схематическое изображение, где показан возможный вариант осуществления инжектора сферомаков.

[0047] Следует отметить, что чертежи не обязательно выполнены в масштабе и что элементы аналогичных конструкций или функций в общем случае обозначены одинаковыми позициями на всех чертежах в целях иллюстрации. Следует также отметить, что чертежи предназначены только для облегчения описания различных вариантов осуществления, о которых здесь идет речь. На чертежах не обязательно описывается каждый аспект предлагаемых здесь идей, и чертежи не ограничивают объем притязаний согласно формуле изобретения

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

[0048] Прежде, чем переходить к подробному описанию объекта данного изобретения, следует понять, что это изобретение не ограничивается описываемыми

конкретными вариантами осуществления, а - как таковое - конечно же, может быть изменено. Следует также понять, что употребляемая здесь терминология имеет целью лишь описание конкретных вариантов осуществления, а не предназначена для ограничения, поскольку объем притязаний данного изобретения будет ограничиваться только прилагаемой формулой изобретения.

[0049] Помимо этого, типичные примеры описываемых здесь вариантов осуществления, предусматривающие использование многих из указываемых дополнительных признаков, как вместе, так и по отдельности, теперь будут описаны с дополнительной подробностью со ссылками на прилагаемые чертежи. Это подробное описание предназначено просто для обучения специалиста в данной области техники практического воплощения предпочтительных дополнительных принципов аспектов изобретения и не предназначено для ограничения объема притязаний изобретения. Поэтому комбинации признаков и этапов, раскрываемые в нижеследующем подробном описании, могут и не оказаться необходимыми для практического осуществления изобретения в самом широком смысле, а вместо этого указаны лишь для того, чтобы конкретно описать типичные примеры принципов данного изобретения.

[0050] Помимо этого, различные признаки типичных примеров и зависимых пунктов формулы изобретения могут быть объединены способами, не перечисляемыми конкретно и в явном виде, с целью обеспечения дополнительных полезных вариантов осуществления принципов данного изобретения. Также явно видно, что все признаки, раскрытые в описании и/или формуле изобретения, предназначены для раскрытия по отдельности и независимо друг от друга с целью первоначального раскрытия, а также с целью ограничения заявляемого объекта изобретения независимо от составов признаков в вариантах осуществления и/или формуле изобретения. Также явно видно, что все диапазоны значений или указания групп объектов раскрывают каждое возможное промежуточное значение или каждый промежуточный объект с целью первоначального раскрытия, а также с целью ограничения заявляемого объекта изобретения.

[0051] Варианты осуществления данного изобретения, предложенные здесь, направлены на разработку систем и способов, которые облегчают формирование и сохранение FRC с превосходной устойчивостью, а также удержанием частиц, энергии и потока. Некоторые из вариантов осуществления данного изобретения, предложенных здесь, направлены на разработку систем и способов, которые облегчают формирование и сохранение FRC с повышенными энергиями системы и улучшенным поддержанием инжекторов пучков нейтральных частиц с возможностями настраиваемых энергий пучков вдоль оси симметрии камеры удержания плазмы FRC независимо от свойств осевой устойчивости равновесия плазмы FRC.

[0052] Прежде, чем обратиться к системам и способам, которые облегчают генерирование и сохранение целевой плазмы FRC с высоким потоком и осевое пополнение плазмы FRC с использованием пары инжекторов сфероматов среднего масштаба (или пары намагниченных коаксиальных плазменных пушек (MCPG, magnetized

coaxial plasma gun)), обсудим системы и способы формирования и сохранения высокоэффективных FRC, придавая им превосходную устойчивость, а также превосходное удержание частиц, энергии и потока по сравнению с обычными FRC. Такие высокоэффективные FRC обеспечивают путь к целому множеству приложений, включая компактные источники нейтронов (для производства изотопов медицинского назначения, восстановления отработанного ядерного топлива, исследований материалов, нейтронной радиографии и томографии), компактные источники фотонов (для химического производства и химической обработки), системы для разделения изотопов и обогащения, а также активные зоны реакторов для синтеза легких ядер с целью выработки энергии в будущем.

[0053] Чтобы оценить, существует ли режим удержания в FRC, превосходящий известные, исследованы различные вспомогательные системы и рабочие режимы. Эти усилия привели к важным научным открытиям и разработке парадигмы высокоэффективной FRC, описываемой здесь. В соответствии с этой новой парадигмой, данные системы и способы сочетают огромное количество новых идей и средств для резкого улучшения удержания посредством FRC, как иллюстрируется на фиг.1, а также обеспечивают контроль устойчивости без негативных побочных эффектов. Как подробнее рассматривается ниже, фиг.1 иллюстрирует удержание частиц в системе 10 FRC, описываемой ниже (см. фиг.2 и 3), во время работы в соответствии с высокоэффективным режимом FRC (режимом HPF) при формировании и сохранении FRC по сравнению с работой в соответствии с обычным режимом FRC (режимом CR) при формировании и сохранении FRC и по сравнению с удержанием частиц в соответствии с обычными режимами формирования и поддержания FRC, используемыми в других экспериментах. В данной публикации будут приведены общее и подробное описание новых отдельных компонентов системы 10 FRC и способов, а также их совокупные эффекты.

Система FRC

Вакуумная система

[0054] На фиг.2 и 3 иллюстрируется схематическое изображение предлагаемой системы 10 FRC. Система 10 FRC включает в себя центральную емкость 100 для удержания, окруженную двумя диаметрально противоположными формирующими секциями 200 тета-пинчей с обращенным полем, и две камеры 300 диверторов, находящиеся вне формирующих секций 200 и предназначенные для контроля плотности нейтральных частиц и загрязнения примесями. Предлагаемая система 10 FRC была построена так, что она приспособлена к сверхвысокому вакууму и работает при типичных начальных давлениях $1,333 \times 10^{-6}$ Па (10^{-8} торр). Такие вакуумметрические давления требуют использовать стыковочные фланцы спаренной откачки между стыкуемыми компонентами, металлические кольцевые уплотнения круглого поперечного сечения, высокочистые внутренние стенки, а также тщательное начальное кондиционирование поверхностей всех деталей перед сборкой, такое, как физическая и химическая очистка с последующими вакуумной сушкой в течение 24-х часов при 250°C и очисткой тлеющим

разрядом в водороде.

[0055] Формирующие секции 200 тета-пинчей с обращенным полем представляют собой стандартные тета-пинчи с обращенным полем (FRTP), хотя и с усовершенствованной формирующей системой импульсного питания, подробно обсуждаемой ниже (см. фиг.4—6). Каждая формирующая секция 200 выполнена из стандартных непрозрачных кварцевых труб промышленного класса, которые отличаются двухмиллиметровой внутренней футеровкой из сверхчистого кварца. Камера 100 удержания выполнена из нержавеющей стали для обеспечения множества радиальных и тангенциальных отверстий; она также служит в качестве консерватора потока во временном масштабе экспериментов, описываемых ниже, и ограничивает быстрые магнитные переходные процессы. Вакуумы создаются и сохраняются в пределах системы 10 FRC с помощью набора безмасляных спиральных форвакуумных насосов, турбомолекулярных насосов и крионасосов.

Магнитная система

[0056] На фиг.2 и 3 иллюстрируется магнитная система 400. На фиг.2 - среди прочих конструктивных особенностей - иллюстрируются профили магнитного потока и плотности FRC (как функции радиальных и осевых координат), свойственные FRC 450, создаваемой посредством системы 10 FRC. Эти профили получаются методом двумерного численного моделирования посредством резистивного магнитогидродинамического (MHD) генератора Холла с использованием кода, разработанного для моделирования систем и способов, соответствующих системе 10 FRC, и хорошо согласуются с экспериментальными данными измерений. Как видно на фиг.2, FRC 450 состоит из тора силовых линий замкнутого поля во внутреннем пространстве 453 FRC 450 изнутри от сепаратрисы 451 и кольцевого граничного слоя 456 на незамкнутых силовых линиях 452 поля только снаружи от сепаратрисы 451. Граничный слой 456 сходится в струи 454 за пределами длины FRC, обеспечивая естественный дивертор.

[0057] Главная магнитная система 410 включает в себя ряд катушек 412, 414 и 416 квазипостоянного тока, которые находятся в конкретных осевых положениях вдоль компонентов системы 10 FRC, т.е. Вдоль камеры 100 удержания, формирующих секций 200 и диверторов 300. Питание катушек 412, 414 и 416 квазипостоянного тока осуществляется посредством импульсных источников питания квазипостоянного тока, так что катушки создают базовые магнитные поля смещения с индукцией примерно 0,1 Тл в камере 100 удержания, формирующих секциях 200 и диверторах 300. Помимо катушек 412, 414 и 416 квазипостоянного тока, главная магнитная система 410 включает в себя зеркальные катушки 420 квазипостоянного тока (питаемые посредством импульсных источников питания) между любым торцом камеры 100 удержания и соседними формирующими секциями 200. Зеркальные катушки 420 квазипостоянного тока обеспечивают коэффициенты отражения магнитного зеркала до 5 и обеспечивают возможность независимого возбуждения для контроля придания равновесной формы. Кроме того, между каждыми из формирующих секций 200 и диверторов 300 расположены

зеркальные пробки 440. Зеркальные пробки 440 содержат компактные зеркальные катушки 430 квазипостоянного тока и зеркальные пробочные катушки 444. Зеркальные катушки 430 квазипостоянного тока включают в себя три катушки 432, 434 и 436 (питаемые посредством импульсных источников питания), которые создают дополнительные направляющие поля для нацеливания поверхностей 455 магнитного потока по направлению к каналу 442 малого диаметра, проходящему сквозь зеркальные пробочные катушки 444. Зеркальные пробочные катушки 444, которые обвивают канал 442 малого диаметра и питаются посредством импульсных силовых LC-схем, создают сильные поля магнитного зеркала с индукцией до 4 Тл. Назначение всей этой компоновки катушек заключается в том, чтобы плотно увязывать и направлять поверхности 455 магнитного потока и текущие к торцу струи 454 плазмы в отдаленные камеры 310 диверторов 300. И, наконец, снаружи камеры 100 удержания расположен набор «антенн» 460 на основе отклоняющих катушек (см. фиг.15), по две с каждой стороны средней плоскости, которые питаются посредством источников питания постоянного тока. Конфигурация антенн 460 на основе отклоняющих катушек может обеспечивать квазистатическое магнитное дипольное или квадрупольное поле с индукцией примерно 0,01 Тл для контроля неустойчивостей вращения и/или контроля электронного тока. Антенны 460 на основе отклоняющих катушек могут гибко обеспечивать магнитные поля, являющиеся либо симметричными, либо антисимметричными относительно средней плоскости машины, в зависимости от направления прикладываемых токов.

Формирующие системы импульсного питания

[0058] Формирующие системы 210 импульсного питания работают по принципу модифицированного тета-пинча. Имеются две системы, каждая из которых питает одну из формирующих секций 200. На фиг.4-6 иллюстрируются главные составляющие блоки и расположение формирующих систем 210. Формирующая система 210 состоит из модульной конструкции импульсного питания, которая состоит из отдельных блоков (модулей) 220, каждый из которых возбуждает 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 схем 222 запуска и 224 сброса заряда. Каждая формирующая система 210 запасает емкостную энергию в диапазоне 350-400 кДж, которая обеспечивает до 35 ГВт мощности для формирования и ускорения FRC. Координированная работа этих компонентов достигается посредством известной системы 222 и 224 запуска и управления, которая обеспечивает синхронизацию между формирующими системами 210 на каждой формирующей секции 200 и минимизирует неустойчивую синхронизацию переключения, ограничивая ее десятками наносекунд. Преимуществом этой модульной конструкции является гибкая работа: FRC могут быть сформированы на месте, а затем ускорены и инжектированы (= статическое формирование), или сформированы и ускорены одновременно (= динамическое формирование).

Инжекторы пучков нейтральных частиц

[0059] Пучки 600 нейтральных атомов развертывают в системе 10 FRC, чтобы обеспечить нагрев и возбуждение тока, а также развитие давление быстрых частиц. Как показано на фиг.3А, 3В и 8, отдельные тракты пучков, содержащие системы 610 и 640 инъекции пучков нейтральных атомов, расположены вокруг центральной камеры 100 удержания и инжектируют быстрые частицы в плазму FRC тангенциально (и перпендикулярно или под прямым углом к основной оси симметрии центральной емкости 100 для удержания) с некоторым параметром прицеливания, так что целевая зона захвата лежит в пределах сепаратрисы 451 (см. фиг.2). Каждая система 610 и 640 инъекции способна инжектировать пучки нейтральных частиц мощностью до 1 МВт в плазму FRC с энергиями частиц в диапазоне между 20 и 40 кэВ. Системы 610 и 640 основаны на многодырочных источниках выделения положительных ионов и предусматривают использование геометрической фокусировки, инерционного охлаждения ионовывделяющих решеток и дифференциальной откачки. Помимо использования различных источников плазмы, системы 610 и 640 различаются главным образом по соответствию их физической конструкции соответственным местам их установки, предоставляя возможности инъекции сбоку и сверху. Типичные компоненты этих инжекторов пучков нейтральных частиц иллюстрируются, в частности, на фиг.7 для систем 610 инъекции сбоку. Как показано на фиг.7, каждая отдельная система 610 инъекции пучков нейтральных частиц сбоку включает в себя источник 612 высокочастотной (RF) плазмы на входном торце (заменяемый дуговым источником в системах 640) с магнитным экраном 614, накрывающим этот торец. С источником 612 плазмы связан блок 616, включающий в себя оптический источник ионов и ускоряющие сетки, а запорный клапан 620 расположен между блоком 616, включающим в себя оптический источник ионов и ускоряющие сетки, и нейтрализатором 622. Отклоняющий магнит 624 и поглотитель 628 ионов находятся между нейтрализатором 622 и нацеливающим устройством 630 на выходном торце. Система охлаждения содержит две криогенных холодильных машины 634, две криопанели 636 и кожух 638 с охлаждением жидким азотом. Эта универсальная конструкция обеспечивает работу в широком диапазоне параметров FRC.

[0060] Альтернативной конфигурацией для инжекторов 600 пучков нейтральных атомов является конфигурация, обеспечивающая тангенциальную инъекцию быстрых частиц в плазму FRC, но под углом α меньше 90° относительно главной оси симметрии центральной емкости 100 для удержания. Эти типы ориентации инжекторов 615 пучков показаны на фиг. 3С. Кроме того, инжекторы 615 пучков могут быть ориентированы так, что инжекторы 615 пучков на любой стороне средней плоскости центральной емкости 100 для удержания будут инжектировать свои частицы к средней плоскости. И, наконец, осевое положение этих систем 600 пучков можно выбрать ближе к средней плоскости. Эти альтернативные варианты осуществления инъекции воплощают «более центрированный» вариант пополнения, который обеспечивает лучшую связь пучков и

более высокую эффективность захвата инжектируемых быстрых частиц. Помимо этого, в зависимости от угла и осевого положения, это расположение инжекторов 615 пучков обеспечивает более непосредственный и независимый контроль осевого удлинения и других характеристик FRC 450. Например, инъекция пучков под малым углом A относительно главной оси симметрии упомянутой емкости приведет к созданию плазмы FRC с увеличенным осевым удлинением и пониженной температурой, тогда как подбор «более прямого» угла A приведет к плазме, которая короче в осевом направлении, но горячее. Таким образом, угол A инъекции и местоположение инжекторов 615 пучков можно оптимизировать для различных целей. В дополнение к этому, такое регулирование угла установки и местоположения инжекторов 615 пучков может обеспечить пучки повышенной энергии (что в общем случае благоприятнее для воздействия большей мощностью с меньшим расхождением пучков), которые должны быть инжектированы в более слабые магнитные поля, чем были бы необходимы в противном случае для захвата таких пучков. Причина этого связана с азимутальной составляющей энергии, которая определяет масштаб орбит быстрых ионов (который оказывается постепенно уменьшающимся по мере уменьшения угла инъекции относительно главной оси симметрии упомянутой емкости при постоянной энергии пучков). Кроме того, наклонная инъекция к средней плоскости и с осевыми положениями пучков, близкими к средней плоскости, улучшает связь «пучок-плазма» даже тогда, когда плазма FRC сокращается или иным образом сжимается в осевом направлении в течение периода инъекции.

[0061] Обращаясь к фиг.3D и 3E, отмечаем, что еще одна альтернативная конфигурация системы 10 FRC 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 переключающие магнитные катушки, в сущности, неактивны во время процесса формирования, чтобы позволить формирующим FRC проходить через внутренние диверторы 302, когда формирующие FRC поступательно перемещаются к средней плоскости камеры 100 удержания. После прохождения формирующих FRC через внутренние диверторы 302 в камеру 100 удержания внутренние диверторы активируются для работы, по существу, аналогично внешним диверторам и изолируют камеру 100 удержания от формирующих секций 200.

Инжектор таблеток

[0062] Чтобы обеспечить средство для инъекции новых частиц и лучшего контроля общего количества частиц FRC, в системе 10 FRC используется 12-тиствольный инжектор 700 таблеток (см., например, I. Vinyar et al, "Pellet Инжекторов Developed at PELIN for JET, TAE, and HL-2A," Proceedings of the 26th Fusion Science and Technology Symposium, 09/27 - 10/01 (2010)). Фиг.3 иллюстрирует схему расположения инжектора 700 таблеток в системе 10 FRC. 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

5×10^{19} атомов водорода, что сопоставимо с общим количеством частиц FRC.

Системы геттерирования

[0063] Хорошо известно, что нейтральный галоидный газ является серьезной проблемой во всех системах удержания. Процессы обмена зарядами и рециркуляции (высвобождения холодного примесного материала из стенки) могут оказывать пагубное воздействие на удержание энергии и частиц. Кроме того, любая значительная плотность нейтрального газа на границе или вблизи нее приведет к быстрым потерям или, по меньшей мере, значительному сокращению времени жизни инжектируемых частиц большой орбиты (высокой энергии) (термин «большая орбита» относится к частицам, имеющим орбиты в масштабе топологии FRC или, по меньшей мере, радиусы орбиты, намного превышающие масштаб характерной длины градиента магнитного поля) - факт, который наносит ущерб всем энергетическим приложениям плазмы, включая синтез через дополнительный нагрев пучка.

[0064] Кондиционирование поверхностей является средством, с помощью которого можно бороться с пагубными воздействиями нейтрального газа и примесей или уменьшать эти воздействия в системе для удержания. С этой целью, в предлагаемой здесь системе 10 FRC используются системы 810 и 822 осаждения титана и лития, которые покрывают обращенные к плазме поверхности камеры 100 удержания (или емкости для удержания) и диверторов 300 пленками Ti и/или Li (толщина которых составляет десятки микрон). Эти покрытия наносятся методами осаждения из паровой фазы. Твердый Li и/или Ti испаряются и/или сублимируются и напыляются на близлежащие поверхности, образуя покрытия. Источниками являются ядерные печи 822 с направляющими соплами (в случае Li) или нагретые сферы твердого вещества с направляющими бандажами 812 (в случае Ti). Системы для испарения Li, как правило, работают в непрерывном режиме, в то время как сублиматоры Ti в большинстве случаев работают в перерывах между работой с плазмой. Рабочие температуры этих систем превышают 600 °C для получения больших скоростей осаждения. Чтобы достичь приемлемого покрытия стенок, необходимы множественные стратегически локализованные системы испарения и/или сублимации. На фиг.9 подробно иллюстрируется предпочтительное расположение систем 810 и 820 осаждения путем геттерирования в системе 10 FRC. Покрытия действуют как геттерирующие поверхности и эффективно откачивают нейтральные атомы и атомарные ионы в целом, а также молекулярные ионы и нейтральные молекулы (H и D) в целом. Эти покрытия также снижают содержание других типичных примесей, таких, как углерод и кислород, до незначительных уровней.

Зеркальные пробки

[0065] Как указано выше, в системе 10 FRC применяются наборы зеркальных катушек 420, 430 и 444, показанных на фиг.2 и 3. Первый набор зеркальных катушек 420 находится на двух осевых торцах камеры 100 удержания и независимо возбуждается от удерживающей, формирующей и диверторной катушек 412, 414 и 416 главной магнитной системы 410. Первый набор зеркальных катушек 420 способствует главным образом

управлению и удержанию в осевом направлении FRC 450 во время объединения и обеспечивает контроль придания равновесной формы во время удержания. Первый набор 420 зеркальных катушек создает магнитные поля с номинально большей индукцией (примерно 0,4-0,5 Тл), чем у центрального удерживающего поля, создаваемого центральной удерживающей катушкой 412. Второй набор зеркальных катушек 430, который включает в себя три компактные зеркальные катушки 432, 434 и 436 квазипостоянного тока, находится между формирующими секциями 200 и диверторами 300 и возбуждается посредством общего импульсного источника питания. Зеркальные катушки 432, 434 и 436 вместе с более компактными импульсными зеркальными пробочными катушками 444 (питаемыми посредством емкостного источника питания) и физическим сужением 442 образуют зеркальные пробки 440, которые обеспечивают узкий тракт с низкой электропроводностью газа и магнитными полями с очень высокой индуктивностью (в диапазоне 2-4 Тл при временах нарастания примерно 10-20 мс). Наиболее компактные импульсные зеркальные катушки 444 имеют компактные радиальные размеры - расточенное отверстие диаметром 20 см и аналогичную длину - по сравнению с плоской конструкцией, предусматривающей высверленные отверстия с плюсовыми метрическими допусками удерживающих катушек 412, 414 и 416. Назначение зеркальных пробок 440 многозначно. (1) Катушки 432, 434, 436 и 444 плотно увязывают и направляют поверхности 455 магнитного потока и текущие к торцу струи 454 плазмы в отдаленные камеры 310 диверторов. Это подразумевает, что выпускаемые частицы достигают диверторов 300 надлежащим образом и что имеются поверхности 455 непрерывного потока, которые следуют из области незамкнутых силовых линий 452 поля центральной FRC 450 на всем пути к диверторам. (2) Физические сужения 442 в системе 10 FRC, через которые упомянутые катушки 432, 434, 436 и 444 дают возможность проходить поверхностям 455 магнитного потока и струям 454 плазмы, затрудняют течение нейтрального газа из плазменных пушек 350, которые сидят в диверторах 300. Подобным же образом, сужения 442 предотвращают обратное течение газа от формирующих секций 200 к диверторам 300, тем самым уменьшая количество нейтральных частиц, которые приходится вводить во всю систему 10 FRC в начале запуска FRC. (3) Строго осевые зеркала, образуемые катушками 432, 434, 436 и 444, уменьшают осевые потери частиц и тем самым снижают способность частиц к параллельной диффузии по незамкнутым силовым линиям поля.

[0066] В альтернативной конфигурации, показанной на фиг.3D и 3E, набор низкопрофильных обжимных катушек 421 представляет собой положения между внутренними диверторами 302 и формирующими секциями 200.

Осевые плазменные пушки

[0067] Потоки плазмы из пушек 350, установленных в камерах 310 диверторов 300, предназначены для улучшения рабочих характеристик устойчивости и пучков нейтральных частиц, как изображено на фиг.3 и 10, и получения плазмы, текущей вдоль незамкнутых линий 452 потока в дивертор 300 и по направлению к центральной камере

100 удержания. Пушки 350 работают при высокоплотном газовом разряде в канале из пакета шайб и предназначены для генерирования нескольких тысяч ампер полностью ионизированной плазмы в течение 5—10 мс. Пушки 350 включают в себя импульсную магнитную катушку, которая согласует выходной поток плазмы с желаемыми размерами плазмы в камере 100 удержания. Технические параметры пушек 350 характеризуются каналом, имеющим внешний диаметр 5—13 см и внутренний диаметр до примерно 10 см, и обеспечивают разрядный ток 10—15 кА при 400—600 В посредством внутреннего магнитного поля пушки, имеющего индукцию в диапазоне от 0,5 до 2,3 Тл.

[0068] Потоки плазмы из пушек могут пронизывать магнитные поля зеркальных пробок 440 и течь в формирующую секцию 200 и камеру 100 удержания. Эффективность переноса плазмы через зеркальные пробки 440 увеличивается с уменьшением расстояния между пушками 350 и пробками 440, а также с расширением и укорочением пробок 440. В приемлемых условиях, каждая из пушек 350 может поставлять приблизительно 1022 протона в секунду через зеркальные пробки 440 с индуктивностью 2—4 Тл при высоких температурах ионов и электронов, составляющих примерно 150—300 эВ и примерно 40—50 эВ, соответственно. Пушки 350 обеспечивают значительное пополнение граничного слоя 456 FRC и улучшенное общее удержание частиц посредством FRC.

[0069] Чтобы дополнительно повысить плотность плазмы, можно было бы использовать газосепаратор для отгона дополнительного газа в поток плазмы из пушек 350. Этот метод обеспечивает увеличение плотности инжектируемой плазмы в несколько раз. Газосепаратор, установленный в системе 10 FRC на обращенной к диверторам 300 стороне зеркальных пробок 440, улучшает пополнение граничного слоя 456 FRC, формирование FRC 450 и линейное связывание плазмы.

[0070] Задаваясь всеми регулируемыми параметрами, рассмотренными выше, а также учитывая возможность работы лишь с одной или двумя пушками, легко понять, что доступен широкий спектр рабочих режимов.

Смещающие электроды

[0071] Электрическое смещение незамкнутых поверхностей потока может обеспечить радиальные потенциалы, которые приводят к азимутальному движению, $E \times B$, обеспечивающему механизм управления, аналогичный повороту рукоятки, для управления вращением линейной плазмы незамкнутого поля, а также фактической активной зоной 450 FRC посредством разрыва скорости. Чтобы достичь этого управления, в системе 10 FRC применяются различные электроды, стратегически размещенные в различных частях машины. Фиг.3 иллюстрирует смещающие электроды, расположенные в предпочтительных местоположениях в пределах системы 10 FRC.

[0072] В принципе, существуют 4 класса электродов: (1) точечные электроды 905 в камере 100 удержания, которые вступают в контакт с конкретными незамкнутыми силовыми линиями 452 поля на границе FRC 450, обеспечивая локальную зарядку; (2) кольцевые электроды 900 между камерой 100 удержания и формирующими секциями 200, предназначенные для азимутально-симметричной зарядки удаленных от границы слоев

456 потока; (3) пакеты концентрических электродов 910 в диверторах 300 для зарядки множественных концентрических слоев 455 потока (вследствие чего выбором слоев можно управлять посредством регулирования катушек 416 с целью регулирования магнитного поля диверторов так, чтобы завершать желаемые слои 456 потока на должных электродах 910); и, наконец, (4) аноды 920 (см. фиг.10) самих плазменных пушек 350 (которые перехватывают незамкнутые внутренние поверхности 455 поля около сепаратрисы FRC 450). На фиг.10 и 11 показаны некоторые типичные конструкции некоторых электродов.

[0073] Во всех случаях, эти электроды возбуждаются посредством импульсных источников питания или источников питания постоянного тока при напряжениях примерно до 800 В. В зависимости от размеров электродов и мест, где те пересекают поверхности потока, оказывается возможным потребление токов в килоамперном диапазоне.

Неподдерживаемая работа системы FRC - обычный режим

[0074] Стандартное формирование плазмы в системе 10 FRC следует хорошо разработанному методу тета-пинча с обращенным полем. Типичный процесс запуска FRC начинается возбуждением катушек 412, 414, 416, 420, 432, 434 и 436 квазипостоянного тока для работы в установившемся состоянии. Затем цепи импульсной мощности формирующих систем 210 импульсного питания, предназначенные для создания высокочастотной термической плазмы, возбуждают катушки 232 возбуждения импульсного быстро обращаемого магнитного поля, создавая временное обратимое смещение примерно $-0,05$ Тл в формирующих секциях 200. В этот момент в два формирующих объема, ограниченных камерами 240 в форме кварцевых труб (северной и южной) формирующих секций 200, инжектируют заранее заданное количество нейтрального газа при 9—20 фн/кв.д (фунтов на квадратный дюйм) через множество азимутально-ориентированных продувочных клапанов во фланцах, находящихся на внешних торцах формирующих секций 200. Затем из набора антенн на поверхности кварцевых труб 240 генерируют поле на малых высоких частотах (\sim сотни килогерц), создавая предварительную ионизацию в форме областей локальной начальной ионизации в пределах столбов нейтрального газа. За этим следует применение тета-кольцевой модуляции к току, возбуждающему катушки 232 возбуждения импульсного быстро обращаемого магнитного поля, что приводит к более общей предварительной ионизации столбов газа. В заключение, запитывают основные импульсные источники питания формирующих систем 210 импульсного питания для возбуждения катушек 232 возбуждения импульсного быстро обращаемого магнитного поля, создавая поле с прямым смещением и индуктивностью до $0,4$ Тл. Этот этап можно проводить в такой последовательности во времени, что по всей длине кварцевых труб 240 равномерно генерируется поле с прямым смещением (статическое формирование) или достигается последовательная перистальтическая модуляция поля вдоль оси формирующих труб 240 (динамическое формирование).

[0075] Во всем этом процессе формирования фактическое обращение поля в плазме происходит быстро в пределах примерно 5 мкс. Многогигаватная импульсная мощность, подводимая к формируемой плазме, легко создает горячие FRC, которые затем эжектируются из формирующих секций 200 посредством применения либо последовательно осуществляемой во времени модуляции магнитного поля в переднем полупространстве (магнитная перистальтика), либо временно увеличенных токов в последней катушке из наборов 232 катушек около осевых внешних торцов формирующих труб 210 (формирование осевого градиента магнитного поля, который обращен в осевом направлении к камере 100 удержания). Обе формирующие FRC (северная и южная), сформированные таким образом и ускорившиеся, потом расширяются в камеру 100 удержания, имеющую больший диаметр, где катушки 412 квазипостоянного тока создают поле с прямым смещением для управления радиальным расширением и обеспечения равновесного внешнего магнитного потока.

[0076] Как только северная и южная формирующие FRC прибывают в окрестность средней плоскости камеры 100 удержания, эти FRC сталкиваются. Осевые кинетические энергии во время столкновения северной и южной формирующих FRC большей частью термализуются, поскольку FRC, в конечном счете, объединяются в единую FRC 450. В камере 100 удержания возможен большой набор методов диагностики плазмы для изучения равновесий FRC 450. Типичные рабочие условия в FRC-системе 10 дают составную FRC с радиусами сепаратрисы примерно 0,4 м и осевой протяженностью примерно 3 м. Дополнительными характеристиками являются внешние магнитные поля с индуктивностью примерно 0,1 Тл, плотности плазмы примерно $5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и полной температурой плазмы до 1 кэВ. Без какой-либо поддержки, т.е., при отсутствии нагрева и/или возбуждения тока с помощью инжекции пучков нейтральных частиц или других вспомогательных средств, время жизни этих FRC, т.е. время распада коренной характеристической конфигурации, ограничивается величиной примерно 1 мс.

Экспериментальные данные неподдерживаемой работы - обычный режим

[0077] На фиг.12 показана типичная эволюция во времени радиуса $r_{\Delta\phi}$ исключаемого потока, который аппроксимирует радиус r_c сепаратрисы, для иллюстрации динамики происходящего в тета-пинче процесса объединения FRC 450. Оба индивидуальных плазмоида (северный и южный) создаются одновременно, а потом ускоряются, выходя из соответствующих формирующих секций 200 со сверхзвуковой скоростью $v_z \sim 250 \text{ км/с}$, и сталкиваются вблизи средней плоскости при $z=0$. Во время столкновения плазмиды претерпевают осевое сжатие, за которым следует быстрое радиальное и осевое расширение, прежде чем, в конце концов, объединиться, образуя одну FRC 450. О наличии как радиальной, так и осевой динамики, свидетельствуют подробные измерения профиля плотности и томография на основе болометра.

[0078] Данные, полученные в результате неподдерживаемого разряда, системы 10 FRC 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 матрицы магнитных зондов, которые размещены чуть-чуть изнутри от выполненной из нержавеющей стали стенки камеры удержания и измеряют осевое магнитное поле. Стальная стенка является хорошим средством сохранения потока во временных рамках этого разряда.

[0079] На фиг.13В показаны линейно интегрированные плотности, полученные из работающего по 6 хордам интерферометра для определения содержания $\text{CO}_2/\text{He-Ne}$, расположенного в $z=0$. С учетом вертикального перемещения (y) FRC, измеряемого посредством болометрической томографии, инверсия по Абелю дает профили распределения плотности согласно фиг.13С. После некоторого осевого и радиального колебания в течение первой 0,1 мс, устанавливается FRC с некоторым «полым» профилем плотности. Этот профиль является достаточно плоским, с существенной плотностью на оси, как требуют равновесия в типичных плоских FRC.

[0080] На фиг.13(D) показана полная температура плазмы, выведенная исходя из равенства давлений и полностью соответствующая рассеянию по Томпсону и спектроскопическим измерениям.

[0081] Анализ всего массива данных исключаемого потока указывает на то, что форма сепаратрисы FRC (приближаемая осевыми профилями исключаемого потока) постепенно эволюционирует от круговой к эллиптической. Эта эволюция, показанная на фиг.14, согласуется с постепенным магнитным переключением с переходом от двух FRC к одной. В самом деле, грубые оценки позволяют предположить, что в этом конкретном случае во время столкновения перезапускаются примерно 10 % магнитных потоков двух первоначальных FRC.

[0082] Длина FRC монотонно сокращается с 3 м до примерно 1 м в течение времени жизни FRC. Это сокращение, видимое на фиг.14, предполагает, что при удержании FRC доминируют главным образом конвективные потери энергии. Поскольку давление плазмы изнутри от сепаратрисы уменьшается быстрее, чем магнитное давление снаружи, натяжение силовых линий магнитного поля в торцевых областях приводит к осевому сжатию FRC, восстанавливая осевое и радиальное равновесие. Для разряда, рассматриваемого в связи с фиг.13 и 14, отметим, что магнитный поток, общее количество частиц и тепловая энергия FRC (примерно 10 мВб, 7×10^{19} частиц и 7 кДж, соответственно) уменьшаются, грубо говоря, на порядок величины за первую миллисекунду, когда выявляется исчезновение равновесия FRC.

Поддерживаемая работа - режим HPF

[0083] На фиг.12—14 приведены примеры, характеризующие разрушение FRC без какой-либо поддержки. Вместе с тем, в системе 10 FRC применяются несколько методов для дальнейшего улучшения удержания FRC (внутренней активной зоны и граничного слоя) для достижения режима HPF и поддержки конфигурации.

Пучки нейтральных частиц

[0084] Сначала быстрые нейтральные частицы (Н) в виде пучков инжектируются из восьми инжекторов 600 пучков нейтральных частиц перпендикулярно B_z . Пучки быстрых

нейтральных частиц инжектируются с момента объединения северной и южной формирующих FRC в камере 100 удержания в одну FRC 450. Быстрые ионы, создаваемые главным образом посредством обмена зарядами, имеют бетатронные орбиты (с первичными радиусами в рамках топологии FRC или, по меньшей мере, значительно превышающими характеристический линейный масштаб длины градиента магнитного поля), которые способствуют азимутальному току FRC 450. После прохождения некоторой доли разряда (через 0,5—0,8 мс на импульс), достаточно большая популяция быстрых ионов значительно улучшает свойства внутренней устойчивости и удержания FRC (см., например, M. W. Binderbauer and N. Rostoker, *Plasma Phys.* 56, part 3, 451 (1996)). Кроме того, из перспективы поддержки вытекает, что пучки из инжекторов 600 пучков нейтральных частиц тоже являются первичными средствами возбуждения тока и нагрева плазмы FRC.

[0085] В режиме плазмы системы 10 FRC быстрые ионы замедляются в первую очередь 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, в первую очередь, электронами. Быстрые ионы совершают большие радиальные экскурсы наружу от сепаратрисы, потому что внутреннее магнитное поле FRC по своей природе имеет малую индукцию (в среднем, примерно 0,03 Тл для внешнего осевого поля с индукцией 0,1 Тл). Быстрые ионы были бы подвержены потерям при обмене зарядами, если бы плотность нейтрального газа снаружи от сепаратрисы была слишком большой. Поэтому геттерирование стенки и другие методы (такие, как предусматривающие использование плазменной пушки 350 и зеркальных пробок 440, которые, помимо всего прочего, вносят вклад в контроль газа), используемые в системе 10 FRC, демонстрируют тенденцию к минимизации граничных нейтральных частиц и обеспечивают требуемое нарастание тока, обусловленного быстрыми ионами.

Инъекция таблеток

[0086] Когда в пределах FRC 450 вырастает значительная популяция быстрых ионов и при этом температуры электронов являются повышенными, а времена жизни FRC увеличенными, в FRC 450 инжектируют замороженные таблетки H или D из инжектора 700 таблеток, чтобы поддержать общее количество частиц в FRC, требуемое для FRC 450. Предполагаемые временные интервалы абляции являются достаточно короткими, чтобы обеспечить источник значительного количества частиц для FRC. Эта скорость также может быть увеличена за счет увеличения площади поверхности инжектируемого кусочка путем разламывания отдельной таблетки на меньшие фрагменты, когда они находятся в стволах или инъекционных трубах инжектора 700 таблеток и до того, как они попадают в камеру 100 удержания - этап, который можно воплотить путем увеличения трения между таблеткой и стенками инъекционной трубы за счет уменьшения радиуса изгиба последнего сегмента инъекционной трубы непосредственно перед входом в камеру 100 удержания. Путем изменения последовательности и скорости стрельбы из 12 стволов (инъекционных труб), а также фрагментации, можно настроить систему 700 инъекции

таблеток на обеспечение как раз желаемого уровня поддержки общего количества частиц. В свою очередь, это способствует сохранению внутреннего кинетического давления в FRC 450, а также поддерживаемой работы и времени жизни FRC 450.

[0087] Как только подвергнутые абляции атомы встречаются со значительным количеством плазмы в FRC 450, они становятся полностью ионизированными. Потом получающаяся в результате часть холодной плазмы нагревается при столкновении с собственной плазмой FRC. Энергия, необходимая для сохранения желаемой температуры FRC, в конечном счете, подводится инжекторами 600 пучков. В этом смысле, инжекторы 700 таблеток вместе с инжекторами 600 пучков нейтральных частиц образуют систему, которая сохраняет установившееся состояние FRC 450 и поддерживает ее.

Инжектор СТ

[0088] В качестве альтернативы инжектору таблеток предлагается инжектор компактных тороидов (СТ), в основном, для пополнения плазмы обращенных магнитных конфигураций (FRC). Инжектор 720 СТ содержит намагниченную коаксиальную плазменную пушку (MCPG), которая, как показано на фиг.22А и 22В, включает в себя коаксиальные цилиндрические внутренний и внешний электроды 722 и 724, катушку 726 смещения, расположенную внутри внутреннего электрода, и электрический разрыв 728 на конце, противоположном выпуску инжектора 720 СТ. 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 путем разряда и выталкивается из пушки силой Лоренца. Как показано на фиг.23А и 23В, пара инжекторов 720 СТ связаны с емкостью 100 для удержания вблизи и по противоположащим сторонам средней плоскости емкости 100 для инъекции СТ в центральную плазму FRC в пределах сосуда 100 для удержания. Выпускной конец инжекторов 720 СТ направлен к средней плоскости емкости 100 для удержания под углом к продольной оси емкости 100 для удержания, аналогично инжекторам 615 пучков нейтральных частиц.

[0089] В альтернативном варианте осуществления инжектор 720 СТ, как показано на фиг. 24А и 24В, включает в себя дрейфовую трубу 740, содержащую вытянутую цилиндрическую трубу, связанную с выпускным концом инжектора 720 СТ. Как показано, дрейфовая труба 740 включает в себя катушки 742 дрейфовой трубы, расположенные вокруг и аксиально разнесенные вдоль трубы. Вдоль длины трубы изображено множество диагностических отверстий 744.

[0090] Преимущества инжектора 720 СТ: (1) контроль и регулируемость общего количества частиц на инжектируемый СТ; (2) осаждается теплая плазма (вместо криогенных таблеток); (3) система может работать в режиме частоты повторения, чтобы обеспечить непрерывную загрузку; (4) система также может восстанавливать некоторый магнитный поток, поскольку инжектируемые СТ 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 покрыта

вольфрамом, чтобы уменьшить примеси, выходящие из электрода 722. Как показано, катушка 726 смещения установлена внутри внутреннего электрода 722.

[0091] В недавних экспериментах была достигнута сверхзвуковая скорость поступательного перемещения СТ вплоть до ~ 100 км/с. Другими типичными параметрами плазмы являются следующие: плотность электронов $\sim 5 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$, температура электронов $\sim 30\text{—}50$ эВ и общее количество частиц $\sim 0,5\text{—}1,0 \times 10^{19}$. Высокое кинетическое давление СТ позволяет инжектируемой плазме проникать глубоко в FRC и осаждают частицы изнутри от сепаратрисы. В недавних экспериментах загрузка частиц FRC дала такой результат, что $\sim 10\text{--}20$ % общего количества частиц FRC, обеспечиваемого инжекторами СТ, успешно демонстрирующими пополнение, может быть легко проведена без нарушения плазмы FRC.

Отклоняющие катушки

[0092] Для достижения возбуждения тока в установившемся состоянии и сохранения требуемого тока ионов желательно предотвращать или значительно уменьшать направленные вверх спины электронов, обусловленные силой трения между электронами и ионами (являющейся результатом переноса импульса ионно-электронного столкновения). Система 10 FRC использует инновационную методику для обеспечения электронного разрыва через прикладываемое извне статическое магнитное дипольное или квадрупольное поле. Это достигается посредством внешних отклоняющих катушек 460, изображенных на фиг.15. Поперечно приложенное радиальное магнитное поле от отклоняющих катушек 460 индуцирует осевое электрическое поле во вращающейся плазме FRC. Результирующий осевой ток электронов взаимодействует с радиальным магнитным полем, создавая азимутальное разрывное воздействие на электроны $F_{\theta} = -\sigma V_{z\theta} \langle |B_r|^2 \rangle$. Для типичных условий в системе 10 FRC требуемое прикладываемое магнитное дипольное (или квадрупольное) поле внутри плазмы должно быть лишь порядка 0,001 Тл для обеспечения адекватного электронного разрыва. Соответствующее внешнее поле величиной примерно 0,015 Тл является достаточно слабым, чтобы вызывать заметные потери быстрых частиц или иным образом отрицательно влиять на удержание. Фактически, прикладываемое магнитное дипольное (или квадрупольное) поле способствует подавлению неустойчивостей. В комбинации с тангенциальной инжекцией пучков нейтральных частиц и осевой инжекцией плазмы отклоняющие катушки 460 обеспечивают дополнительный уровень контроля в отношении сохранения тока и устойчивости.

Зеркальные пробки

[0093] Конструкция импульсных катушек 444 в пределах зеркальных пробок 440 допускает локальную генерацию сильных магнитных полей (от 2 до 4 Тл) с помощью небольшой (примерно 100 кДж) емкостной энергии. При формировании магнитных полей, типичных для предлагаемой эксплуатации системы 10 FRC, все силовые линии поля в пределах формирующего объема проходят через сужения 442 у зеркальных пробок 440, как это предполагается силовыми линиями магнитного поля на фиг.2, и контакт плазмы со

стенкой не происходит. Кроме того, зеркальные пробки 440 совместно с диверторными магнитами 416 квазипостоянного тока могут быть отрегулированы так, чтобы направлять силовые линии на диверторные электроды 910 или выставлять силовые линии в конфигурации торцевых выступов (не показана). Последняя повышает устойчивость и подавляет параллельную теплопроводность электронов.

[0094] Зеркальные пробки 440 сами по себе также способствуют контролю нейтрального газа. Зеркальные пробки 440 позволяют лучше использовать дейтериевый газ, вдуваемый в кварцевые трубы во время формирования FRC, поскольку поток газа, текущий обратно в диверторы 300, значительно уменьшается благодаря малой способности пробок пропускать газ (составляющей скромные 500 л/с). Большая часть остаточного газа, продуваемого внутри формирующих труб 210, быстро ионизируется. Кроме того, высокоплотная плазма, протекающая через зеркальные пробки 440, обеспечивает эффективную ионизацию нейтральных частиц, а следовательно - и эффективный газовый барьер. В результате, большинство нейтральных частиц, рециркулированных в диверторах 300 из граничного слоя 456 FRC, не возвращается в камеру 100 удержания. Кроме того, нейтральные частицы, связанные с работой плазменных пушек 350 (как обсуждается ниже), будут в основном удерживаться в диверторах 300.

[0095] Наконец, зеркальные пробки 440 имеют тенденцию улучшать удержание граничного слоя FRC. С коэффициентами отражения зеркала (пробка/магнитные поля удержания) в диапазоне от 20 до 40 и при длине 15 м между северной и южной зеркальными пробками 440, время τ_{\parallel} удержания частиц граничного слоя увеличивается на порядок величины. Улучшение τ_{\parallel} легко увеличивает удержание частиц FRC.

[0096] Предполагая, что обуславливаемые радиальной диффузией (D) потери частиц из ограничиваемого сепаратрисой объема 453 балансируются осевыми потерями (τ_{\parallel}) из граничного слоя 456, получаем $(2\pi r_c L_c)(Dn_c/\delta) = (2\pi r_c L_c \delta)(n_c/\tau_{\parallel})$, откуда следует, что длину градиента плотности у сепаратрисы можно переписать в виде $\delta = (D\tau_{\parallel})^{1/2}$. Здесь r_c , L_c и n_c - это радиус сепаратрисы, длина сепаратрисы и плотность у сепаратрисы, соответственно. Время удержания частиц в FRC составляет $\tau_N = [\pi r_c^2 L_c \langle n \rangle] / [(2\pi r_c L_c)(Dn_c/\delta)] = (\langle n \rangle / n_c)(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$, где $\tau_{\perp} = a^2/D$ и при этом $a = r_c/4$. Физически, увеличение τ_{\parallel} ведет к увеличенному δ (уменьшенному градиенту плотности и параметру дрейфа у сепаратрисы), а значит - и к уменьшенным потерям частиц в FRC. Общее увеличение параметра удержания частиц в FRC обычно несколько меньше, чем квадратичное, поскольку n_c увеличивается вместе с τ_{\parallel} .

[0097] Значительное улучшение τ_{\parallel} также требует того, чтобы граничный слой 456 оставался по большому счету устойчивым (т.е. чтобы при $n=1$ не было желобковой, рукавной или другой MHD-неустойчивости, характерной для незамкнутых систем). Использование плазменных пушек 350 обеспечивает эту предпочтительную граничную устойчивость. В этом смысле зеркальные пробки 440 и плазменная пушка 350 образуют эффективную систему контроля границы.

Плазменные пушки

[0098] Плазменные пушки 350 улучшают устойчивость выходящих струй 454 FRC посредством линейного связывания. Плазмы пушек, испускаемые из плазменных пушек 350, генерируются без азимутального момента импульса, что оказывается полезным для борьбы с вращательными неустойчивостями FRC. Таким образом, пушки 350 являются эффективным средством для управления устойчивостью FRC без необходимости использования более старого метода квадрупольной стабилизации. В результате, плазменные пушки 350 позволяют использовать преимущества благоприятных эффектов быстрых частиц или получить доступ к режиму усовершенствованной гибридной кинетической FRC, как изложено в этом изобретении. Следовательно, плазменные пушки 350 позволяют системе 10 FRC работать с токами отклоняющих катушек, подходящими как раз для электронного разрыва, но ниже порога, который вызвал бы неустойчивость FRC и/или привел бы к интенсивной диффузии быстрых частиц.

[0099] Как упоминалось в рассмотренном выше разделе «Зеркальные пробки», если бы можно было значительно увеличить τ_{\parallel} , то подаваемая из пушек плазма была бы сопоставимой со скоростью ($\sim 10^{22}/\text{с}$) потерь частиц в граничном слое. Время жизни получаемой из пушек плазмы в системе 10 FRC находится в миллисекундном диапазоне. В самом деле, рассмотрим плазму из пушек, имеющую плотность $n_3 \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и температуру ионов примерно 200 эВ, заключенную между торцовыми зеркальными пробками 440. Длина L захвата и коэффициент R отражения зеркала составляют примерно 15 м и 20, соответственно. Средняя длина свободного пробега ионов благодаря кулоновским столкновениям составляет $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3$ см, а поскольку $\lambda_{ii} \ln R/R < L$, ионы удерживаются в газодинамическом режиме. Время удержания плазмы в этом режиме составляет $\tau_{\text{сет}} \sim RL/2V_c \sim 2$ мс, где V_c - скорость ионного звука. Для сравнения, классическое время удержания ионов для этих параметров плазмы составляло бы $\tau_c \sim 0,5 \tau_{ii} (\ln R + (\ln R)^{0,5}) \sim 0,7$ мс. Аномальная поперечная диффузия может, в принципе, сократить время удержания плазмы. Однако, если предположить, что в системе 10 FRC имеет место скорость диффузии Бома, то оценочное время поперечного удержания для плазмы из пушек составляет $\tau_{\perp} > \tau_{\text{сет}} \sim 2$ мс. Следовательно, пушки обеспечили бы значительное пополнение граничного слоя 456 FRC и улучшенное общее удержание частиц FRC.

[00100] Кроме того, потоки плазмы пушек могут быть включены примерно на 150-200 микросекунд, что позволяет использовать их при запуске, поступательном перемещении и объединении FRC в камеру 100 удержания. Если включить примерно в $t \sim 0$ (инициирование основного банка FRC), плазма пушек поможет поддерживать предлагаемую динамически сформированную и слившуюся FRC 450. Объединенные общие количества частиц из формирующих FRC и из пушек удовлетворительны для захвата пучков нейтральных частиц, нагревания плазмы и длительного поддержания. Если включить при t в диапазоне от -1 до 0 мс, плазма пушек может заполнить кварцевые трубы 210 плазмой или ионизировать газ, вдутый в кварцевые трубы, что позволяет

сформировать FRC с уменьшенным или даже, возможно, нулевым вдуемым газом. Последнее может потребовать достаточно холодной формирующей плазмы, чтобы обеспечить быструю диффузию магнитного поля с обратным смещением. Если включить при $t < -2$ мс, потоки плазмы могут заполнить объем силовых линий от 1 до 3 м³ областей формирования и удержания формирующих секций 200 и камеры 100 удержания с целевой плотностью плазмы в несколько единиц на 10^{13} см⁻³, достаточной для обеспечения нарастания пучков нейтральных частиц до прибытия FRC. Затем формирующие FRC могут быть сформированы и поступательно перемещены в результирующую плазму емкости для удержания. Таким образом, плазменные пушки 350 обеспечивают широкий спектр рабочих условий и режимов параметров.

Электрическое смещение

[00101] Управление профилем радиального электрического поля в граничном слое 456 выгодно различными способами для обеспечения устойчивости и удержания FRC. Благодаря инновационным смещающим компонентам, развернутым в системе 10 FRC, можно прикладывать множество заблаговременно подготовленных распределений электрических потенциалов к группе незамкнутых поверхностей потока по всей машине из областей далеко снаружи 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 скорости $E \times B$. Любое дифференциальное вращение между граничным слоем 456 и активной зоной 453 FRC может затем передаваться внутрь плазмы FRC посредством сдвига. В результате, управление граничным слоем 456 непосредственно воздействует на активную зону 453 FRC. Кроме того, поскольку свободная энергия при вращении плазмы также может быть причиной неустойчивостей, этот метод обеспечивает прямое средство для управления возникновением и ростом неустойчивостей. В системе 10 FRC надлежащее граничное смещение обеспечивает эффективное управление транспортировкой вдоль и вращением незамкнутых силовых линий поля, а также вращением активной зоны FRC. Расположение и форма различных предусмотренных электродов 900, 905, 910 и 920 позволяет управлять различными группами поверхностей 455 потока и при разных и независимых потенциалах. Таким образом, может быть реализован широкий спектр разных конфигураций электрических полей и напряженностей, каждая из которых имеет отличающееся характерное влияние на рабочие характеристики плазмы.

[00102] Ключевым преимуществом всех этих инновационных методов смещения является тот факт, что на поведение плазмы активной зоны и границы можно влиять из мест далеко снаружи плазмы FRC, т.е. нет необходимости приводить какие-либо физические компоненты в контакт с центральной горячей плазмой (что имело бы серьезные последствия для потерь энергии, потока и частиц). Это имеет существенное благоприятное воздействие на рабочие характеристики и все потенциальные приложения

концепции режима HPF.

Экспериментальные данные - работа в режиме HPF

[00103] Инжекция быстрых частиц посредством пучков из пушек 600, испускающих пучки нейтральных частиц, играет важную роль в обеспечении режима HPF. Фиг.16А, 16В, 16С и 16D иллюстрируют этот факт. Изображен набор кривых, показывающих, как время жизни FRC коррелируется с длительностью импульсов пучков. Все другие рабочие условия поддерживаются неизменными для всех разрядов, охватываемых этим исследованием. Данные усредняются по многим импульсам и поэтому отображают типичное поведение. Совершенно очевидно, что увеличенная длительность пучков дает «дольше живущие» FRC. Изучение этого факта, а также других результатов диагностики в течение этого исследования выявляет, что пучки увеличивают устойчивость и уменьшают потери. Корреляция между длительностью импульсов пучков и временем жизни FRC не является совершенной, поскольку захват пучков становится неэффективным, когда размеры плазмы меньше определенных, т.е. когда физические размеры FRC 450 сокращаются и не все инжестируемые пучки перехватываются и захватываются. Сокращение размеров FRC происходит в первую очередь из-за того, что чистые потери энергии (~4 МВт примерно на полпути через разряд) из плазмы FRC во время разряда несколько больше, чем общая мощность, подводимая в FRC посредством пучков нейтральных частиц (~2,5 МВт) для конкретного экспериментального запуска. Расположение пучков в месте, находящемся ближе к средней плоскости емкости 100, может привести к тенденции уменьшения этих потерь и продления времени жизни FRC.

[00104] Фиг.17А, 17В, 17С и 17D иллюстрируют воздействия разных компонентов на достижение режима HPF. Здесь показано семейство типичных кривых, отображающих время жизни FRC 450 как функцию времени. Во всех случаях предусматривается, что постоянная, небольшая по величине мощность пучков (примерно 2,5 МВт) инжестируется на протяжении всей длительности каждого разряда. Каждая кривая является характерной для отличающейся комбинации компонентов. Например, работа системы 10 FRC без каких-либо зеркальных пробок 440, плазменных пушек 350 или геттерирования благодаря системам 800 геттерирования приводит к быстрому появлению неустойчивости вращения и утрате топологии FRC. Введение 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. И, наконец, введение геттерирования (T_i в этом случае) вдобавок к пушке 350 и пробкам 440 дает наилучшие результаты - в получаемой FRC нет неустойчивостей, и она демонстрирует самое продолжительное время жизни. Из этой экспериментальной демонстрации ясно, что вся совокупность компонентов дает наилучший эффект и обеспечивает пучки с наилучшими расчетными условиями.

[00105] Как показано на фиг.1, новый обнаруженный режим HPF демонстрирует резко улучшенное поведение при переносе. Фиг.1 иллюстрирует изменение времени удержания частиц в системе FRC при переходе из обычного режима в режим HPF. Как

можно увидеть, упомянутое время в режиме HPF увеличилось более чем в 5 раз. Кроме того, фиг.1 конкретизирует время удержания частиц в системе 10 FRC по отношению к времени удержания частиц в экспериментах с известными FRC. Что касается этих других машин, то режим HPF у системы 10 FRC имеет удержание, коэффициент увеличения которого находится между 5 и значением, близким к 20. Наконец - и это важнее всего - природа масштабной инвариантности удержания для системы 10 FRC в режиме HPF резко отличается от всех известных измерений. Перед установлением режима HPF в системе 10 FRC, выводили различные эмпирические законы масштабирования из данных, чтобы спрогнозировать времена удержания в экспериментах с известными FRC. Все те правила масштабирования зависят главным образом от отношения $R^2/\rho_{и}$, где R - радиус нуля магнитного поля (нестрогая мера физического масштаба машины), а $\rho_{и}$ - ларморовский радиус иона, оцениваемый в прикладываемом извне поле (нестрогая мера прикладываемого магнитного поля). Из фиг.1 ясно, что длительное удержание в обычной FRC возможно лишь при больших габаритах машины и/или сильном магнитном поле. Работа системы 10 FRC в обычном режиме FRC (режиме CR) отражает тенденцию следования обычным правилам, как указано на фиг.1. Вместе с тем режим HPF значительно превосходит упомянутый режим и показывает, что гораздо лучшее удержание достижимо и без больших габаритов машины или сильных магнитных полей. Из фиг.1 также ясно: важнее то, что режим HPF по сравнению с режимом CR (обычным режимом) приводит к большему времени удержания при сокращенных размерах плазмы. Аналогичные тенденции заметны также для времен удержания потока и энергии, как описывается ниже, которые в системе 10 FRC тоже увеличились в 3—8 раз. Следовательно, крупным достижением режима HPF является возможность использования небольшой мощности пучков, менее сильных магнитных полей и меньших габаритов для поддержки и сохранения равновесий FRC в системе 10 FRC и будущих более мощных машинах. Этим усовершенствованиям сопутствуют меньшие затраты на эксплуатацию и сооружение, а также уменьшенная инженерная сложность.

[00106] Для дальнейшего сравнения, на фиг. 18A, 18B, 18C и 18D показаны данные из типичного разряда в режиме HPF в системе 10 FRC как функцию времени. Фиг.18(A) изображает радиус исключаемого потока на средней плоскости. Для этих более длительных временных масштабов проводящая стальная стенка больше не является хорошим консерватором потока, и магнитные зонды, внутренние по отношению к стенке, дополняются зондами снаружи стенки, чтобы должным образом учитывать диффузию магнитного потока через сталь. По сравнению с типичными рабочими характеристиками в обычном режиме, как показано на фиг.13A, 13B, 13C и 13D, режим работы, соответствующий режиму HPF, демонстрирует увеличенное более чем на 400 % время жизни.

[00107] Типичный график следа линейно интегрированной плотности показан на фиг.18B с его инвертированным по Абелю дополнением, профили плотности - на фиг.18C. По сравнению с обычным режимом FRC (режимом CR), как показано на фиг.13A, 13B,

13С и 13D, плазма является более статичной на протяжении всего импульса, что свидетельствует об очень устойчивой работе. В импульсах HPF также немного ниже пиковая плотность - это следствие более высокой общей температуры плазмы (вплоть до 2 раз), как показано на фиг.18D.

[00108] Для соответствующего разряда, проиллюстрированного на фиг.18А, 18В, 18С и 18D, времена удержания энергии, частиц и потока составляют 0,5 мс, 1 мс и 1 мс, соответственно. В момент начала отсчета 1 мс при вхождении в разряд, аккумулированная энергия плазмы составляет 2 кДж в то время, как потери составляют примерно 4 МВт, что делает этот целевой набор параметров весьма подходящим для поддержки пучков нейтральных частиц.

[00109] На фиг.19 все преимущества режима HPF подытожены в форме вновь устанавливаемой масштабной инвариантности экспериментального удержания потока в HPF. Как можно увидеть на фиг.19, на основании измерений, проведенных до и после момента $t=0,5$ мс, т.е. когда $t \leq 0,5$ мс и $t > 0,5$ мс, масштабы удержания потока (и, аналогично, удержания частиц и удержания энергии), грубо говоря, зависят от квадрата температуры электронов (T_e) для некоторого заданного радиуса сепаратрисы (r_c). Это строгое масштабирование положительной мощностью T_e (а не отрицательной мощностью) полностью противоположно тому, которое демонстрируется обычными токамаками, где удержание, как правило, обратно пропорционально некоторой мощности согласно температуре электронов. Проявление этой масштабной инвариантности является прямым следствием состояния HPF и популяции ионов на орбитах больших радиусов (т.е. орбитах в масштабе топологии FRC и/или по меньшей мере линейном масштабе длины градиента характеристического магнитного поля). По большому счету, эта новая масштабная инвариантность существенно благоприятствует высоким рабочим температурам и позволяет получить реакторы относительно небольших размеров.

[00110] При наличии преимуществ, которые дает режим HPF, достижимо поддержание или статическое состояние FRC, возбуждаемое пучками нейтральных частиц, которое может быть поддержано с помощью инжекции надлежащих таблеток, а это значит, что глобальные параметры плазмы, такие, как термическая энергия плазмы, суммарные количества частиц, радиус и длина плазмы, а также магнитный поток, поддерживаются на обоснованных уровнях без существенного спада. Для сравнения, на фиг.20 показаны данные на графике А, полученные в результате разряда в характерном режиме HPF в системе 10 FRC как функция времени, и на графике В для проектируемого характерного режима HPF в системе 10 FRC как функция времени, при этом FRC 450 поддерживается без спада на всем протяжении импульса пучка нейтральных частиц. Для получения графика А, пучки нейтральных частиц с полной мощностью в диапазоне примерно 2,5—2,9 МВт инжектировали в FRC 450 при длительности активных импульсов пучков примерно 6 мс. Время жизни плазмы как диамагнетика, отображенное на графике А, составляло примерно 5,2 мс. Более новые данные показывают, что при длительности активных импульсов пучков примерно 7 мс достижимо время жизни плазмы как

диамагнетика, составляющее примерно 7,2 мс.

[00111] Как отмечалось выше в связи с фиг.16А, 16В, 16С и 16D, корреляция между длительностью импульсов пучков и временем жизни FRC не является совершенной, поскольку захват пучков становится неэффективным, когда размеры плазмы меньше определенных, т.е. когда физические размеры FRC 450 сокращаются и не все инжектируемые пучки перехватываются и захватываются. Сокращение размеров или спад FRC происходит в первую очередь из-за того, что чистые потери энергии (~4 МВт примерно на полпути через разряд) из плазмы FRC во время разряда несколько больше, чем общая мощность, подводимая в FRC посредством пучков нейтральных частиц (~2,5 МВт) для конкретного экспериментального запуска. Как отмечалось выше в связи с фиг.3С, наклонная инжекция из пушек 600, стреляющих пучками нейтральных частиц, к средней плоскости улучшает связь «пучок-плазма» даже тогда, когда плазма FRC сокращается или иным образом сжимается в осевом направлении в течение периода инжекции. Кроме того, надлежащая подпитка таблетками позволит сохранить требуемую плотность плазмы.

[00112] На графике В представлен результат этапов моделирования, проведенных с использованием длительности активных импульсов пучков примерно 6 мс и общей мощности пучков из пушек 600, стреляющих пучками нейтральных частиц, несколько превышавшей примерно 10 МВт, при этом пучки нейтральных частиц приведут к инжекции быстрых (Н) или диффузионных (D) нейтральных частиц с энергией частиц примерно 15 кэВ. Эквивалентный ток, инжектируемый каждым из пучков, составляет примерно 110 А. Для графика В угол инжекции пучков относительно оси устройства составлял примерно 20°, а целевой радиус - 0,19 м. Угол инжекции можно изменять в пределах диапазона 15°-25°. Пучки следует направлять в азимутальном направлении так, чтобы токи были параллельными. Равнодействующая боковых сил, а также равнодействующая осевых сил, возникающих в результате пучков нейтральных частиц с некоторым количеством движения, будут минимизироваться. Как и при получении графика А, быстрые (Н) нейтральные 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.

[00113] Этапы моделирования, послужившие основой для построения графика В, предусматривали использование многомерных алгоритмов решения посредством магнитогидродинамического (МНД) генератора Холла для получения плазмы и равновесия в соответствии с известными методами, полностью кинетических алгоритмов решения методом Монте-Карло для составляющих интенсивных пучков и всех процессов рассеяния, а также использование системы уравнений для всех семейств плазмы с целью моделирования интерактивных процессов потерь. Транспортные компоненты эмпирически калиброваны и отмечены реперами по отношению к экспериментальной базе данных.

[00114] Как показано посредством графика В, срок службы диамагнетиков в

установившемся состоянии FRC 450 будет равен длительности импульса пучка. Вместе с тем, важно отметить, что ключевой корреляционный график В показывает, что когда пучки отключают, плазма или FRC начинает спадать в этот момент, но не раньше. Этот спад аналогичен наблюдаемому при разрядах, которые не стимулируются пучками, - вероятно, по истечении порядка 1 мс после момента отключения, - и просто отражает характеристическое время спада плазмы, возбуждаемой процессами собственных потерь.

[00115] Обращаясь к фиг.21В, 21С, 21D и 21Е, отмечаем, что результаты экспериментов, проиллюстрированные на этих чертежах, показывают сохранение FRC или установившееся состояние, 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 (NB). Например, такие параметры плазмы поддерживаются, по существу, постоянными в течение ~5+ мс. Такие рабочие характеристики плазмы, включая признак поддержания, имеют сильную корреляцию с длительностью импульсов NB, при этом диамагнетизм сохраняется даже в течение нескольких миллисекунд после окончания NB благодаря накапливаемым быстрым ионам. Как изображено, рабочие характеристики плазмы, ограничиваются лишь ограничениями по длительности импульсов, возникающими из-за конечных аккумулированных энергий в связанных с этим источниках питания многих критических систем, таких, как инжекторы NB, а также в других компонентах систем.

Настраиваемые энергии пучков, получаемые из пучков нейтральных частиц

[00116] Как отмечалось выше в связи с фиг. 3А, 3В, 3С, 3D, 3Е и 8, в системе 10 FRC развертывают пучки 600 нейтральных атомов, чтобы обеспечить нагрев и возбуждение тока, а также развить давление быстрых частиц. Вокруг центральной камеры 100 удержания расположены отдельные тракты пучков, содержащие системы 600 инъекции пучков нейтральных атомов, и - как показано на фиг.3С, 3D и 3Е - предпочтительно наклоненные для инъекции быстрых нейтральных частиц к средней плоскости камеры 100 удержания.

[00117] Чтобы дополнительно улучшить сохранение FRC и продемонстрировать разгон FRC до высоких температур плазмы и повышенных энергий системы, предлагаемая система FRC 10 включает в себя обладающую повышенной мощностью и увеличенной длительностью импульсов систему 600 инжекторов пучков нейтральных частиц (NBI, neutral beam injector), например, возможно - лишь в целях подвода мощности около 20+ МВт с длительностью импульсов вплоть до 30 мс. Система 600 NBI включает в себя множество инжекторов 615 на основе положительных ионов (см. Фиг.3D и 3Е), обладающих универсальной модульной конструкцией с поднабором инжекторов NBI 615, например - с четырьмя (4) из восьми (8) инжекторов NBI 615, обладающими способностью настраивать энергию пучка во время выстрела от более низкой начальной энергии пучка при выстреле до повышенной энергии пучка, например - от примерно 15 кэВ до примерно 40 кэВ at при постоянном токе пучка. Эта способность инжекторов NBI

615 желательна для того, чтобы достичь более эффективного разгона и вытекающего отсюда нагнетания давления активной зоны 450 плазмы. В частности, эта способность позволяет получить весьма желательное повышение рабочих характеристик на пиковом рабочем уровне энергии по сравнению с низким уровнем энергии: например, (i) коэффициент более высокой мощности нагрева доходит до 2-х; (ii) снижение потерь из-за обмена зарядами близко к 5-тикратному; и (iii) рост теплопроизводительности вплоть до двукратного. Кроме того, непрерывно изменяющаяся энергия пучка, производимая инжекторами NBI 615, обеспечивает оптимальное согласование орбитальных параметров инжектируемых, а потом захватываемых быстрых ионов по отношению к мгновенным профилям значений магнитного давления во время процесса разгона. И, наконец, высокие скорости изменения, позволяющие достичь длительности разгона, составляющей 0,1-10 мс, наряду с быстрой (порядка 1 мс или менее) настраиваемостью энергии пучка, а мощность инжекторов NBI 615 обеспечивает дополнительные эффективные «рукоятки управления», т.е., управляемые конструктивные элементы для придания плазме формы и активного управления плазмой с обратной связью посредством модуляции энергии пучка и мощности.

[00118] Для обеспечения нагрева и нагнетания давления FRC 450 необходима достаточная мощность, как для поддержания, так и для разгона до высокотемпературных плазм и повышенных энергий системы. В предположении достаточно низких скоростей потерь, скорость разгона является функцией главным образом того, насколько большую мощность можно поглотить в активной зоне 450 FRC посредством инжекторов NBI 615 в любой заданный момент времени. Следовательно, всегда желательна повышенная мощность основного пучка нейтральных частиц через порт инъекции.

[00119] Более того, эффективная скорость нагрева благодаря инжекторам NBI 615 является результатом сложного взаимодействия между характеристиками инжектируемого пучка и последующими устойчивыми мгновенными профилями температур всех типов частиц, плотностей электронов и ионов, концентрации нейтральных частиц, а также магнитного поля, проходящего через активную зону 450 FRC. Из них, профили магнитного поля намеренно изменяют в субмиллисекундных временных масштабах посредством системы управления во время разгона, тогда как связанные с кинетическим давлением профили эволюционируют за счет внутренних изменений, являющихся результатом процессов самоорганизации и турбулентности в пределах плазмы, а также энергии, поглощаемой процессом инъекции. Настраиваемость пучков обеспечивает средство наиболее оптимальной адаптации к этим изменяющимся условиям.

[00120] Например, поперечное сечение обмена зарядами, т.е., вероятность захвата электрона быстрым ионом с образованием нейтрального атома, сильно зависит от энергии пучка. Для диапазона 15—40 кэВ, скорость обмена основными зарядами резко уменьшается как функция энергии пучка. Следовательно, при любом заданном уровне поля, удержание энергии в плазме оказывается наивысшим, когда инъекция частиц при

наибольшей энергии совместима с таким уровнем поля (среди прочего, это требует, чтобы энергия инжектируемых частиц приводила к нахождению радиуса орбиты захватываемого иона в пределах внутренней стенки системы для удержания).

[00121] Еще один пример воздействий профилей на общую теплопроизводительность имеет отношение к ситуации поглощения мощности. Более высокая энергия пучка в типичных случаях будет приводить к большему поглощению энергии на периферии FRC по сравнению с активной зоной. Нарастание магнитного поля, сопровождаемое поддержанием той же энергии пучка в нем, приведет к более сжатым орбитам захватываемых ионов и соразмерно большей связи по мощности с плазмой активной зоны FRC. Тогда эти факты обладают также сильным влиянием на удержание энергии; например, поглощаемую на периферии энергию гораздо легче транспортировать из системы вдоль структуры незамкнутых силовых линий поля, тогда как поглощаемая в активной зоне энергия теряется сравнительно медленнее благодаря меньшим временам пересечения поля. Таким образом, желательна тесная координация разгона магнитного поля и надлежащих увеличений энергии пучков.

[00122] Система 600 пучков предназначена для быстрого линейного изменения напряжения в диапазоне 0,1—10 мс. Это обеспечивает потенциал для увеличения температур ионов и электронов с коэффициентами 2 и 10, соответственно, и совершения этого во временных масштабах, меньших, чем типичные времена нарастания макроскопических неустойчивостей. Следовательно, происходит фундаментальное увеличение устойчивости плазмы, как и эксплуатационной надежности и воспроизводимости.

[00123] Различные времена нарастания напряжения, составляющие от 0,05 до 1 мс, обеспечивают времена достаточно быстрого отклика, так что пучки можно использовать как часть системы активной обратной связи. Таким образом, для управления макро- и микроустойчивостью можно использовать модуляцию пучков. Например, проводя кратковременный сдвиг радиального профиля поглощения мощности за счет изменения энергии пучков (и тем самым - сдвига модели радиального поглощения энергии), можно повлиять на градиенты давления, которые могут послужить противовесом подмножеству неустойчивых режимов плазмы. Система 10 FRC, показанная на фиг.3D и 3E, использует эту способность наряду с быстрой магнитной обратной связью для управления внутренними опрокидываниями, скоростями вращения, развитием дрейфовых волн, и другие сценарии эксплуатации.

[00124] Фиг.25 иллюстрирует изображение инжектора 615 NBI предлагаемой системы FRC 10. Инжектор 615 NBI показан в возможном варианте осуществления включающим в себя: возбудитель 650 дуги; плазменную камеру 651; ионно-оптическую систему 652, содержащую группировку триодов или тетродов выделяющих и ускоряющих решеток; направляющую подвеску 653; нейтрализатор 654, содержащий дуговые испарители 655, например, такие, как дуговые испарители титана, крионасос 656, имеющий поверхностные структуры, например, такие, как ребристые поверхностные

структуры, конфигурация которых обеспечивает интенсифицированную циркуляцию криогенной жидкости, и отклоняющий магнит 656 для удаления не нейтрализованных ионов; и коллимирующую апертуру 658, в которую заключен вставляемый калориметр 659 для определения характеристик, диагностики и повторной калибровки пульсирующих пучков.

[00125] Говоря конкретное и обращаясь к фиг.26, отмечаем, что, как показано здесь, воплощение настраиваемой системы пучков предпочтительно основано на ионооптической системе (IOS, ion optical system) 660 триодного типа. Замысел заключается в алгоритме ускорения-замедления. Как изображено на фиг.26, на первой сетке G1 установлено напряжение V_1 , тогда как на второй сетке G2 установлено напряжение V_2 , а на заключительной сетке G3 установлено напряжение V_3 . Выводимые ионы сначала ускоряют до энергии $E_1=e \times (V_1 - V_2)$ в процессе пересечения промежутка между G1 и G2 («e» здесь обозначает электрический заряд иона). Потом их замедляют в промежутке между G2 и G3 таким образом, что $E_2=E_1 + e \times (V_2 - V_3)$. Напряжения в типичных случаях регулируют так, что $V_1 > V_2 > V_3$. На основе надлежащих отдельных источников питания PS1, PS2, PS3 напряжениям сеток можно регулируемо придавать приращения в течение импульса, чтобы изменить выход 662 испускаемых ионов. Например, чтобы запустить импульс пучка атомов водорода, можно регулировать рабочие напряжения, достигая $V_1=15$ кВ, $V_2=-25$ кВ и $V_3=0$ В. Тогда ионы первичного пучка будут ускоряться сначала до 40 кэВ, а потом выходят из IOS с энергией 15 кэВ. Позже в импульсе можно переключать источники питания, обеспечивая $V_1=40$ кВ, $V_2=-1$ кВ, $V_3=0$ В. Тогда замедление пучков во втором промежутке будет практически отсутствовать, давая выход энергии пучков приблизительно 40 кэВ. Управление каждым из источников питания осуществляют по отдельности, и это обеспечивает надлежащую модуляцию напряжений. Ионы первичного пучка вытягиваются из многообразия ионов стандартного дугового или радиочастотного плазменного источника PS. После испускания из IOS 660 пучки 662 ионов проходят нейтрализатор 664, где быстрые ионы преобразуются в нейтральные ионы посредством обмена зарядами с электронами холодного нейтрального газа, присутствующего в нейтрализаторе 664. Надлежащая циркуляция криогенной жидкости предотвращает вытекание нейтрального газа из расположенного ниже по течению отверстия нейтрализатора 664. На торце нейтрализатора также имеется надлежащий поворотный магнит 666, который обеспечивает отвод не нейтрализованных быстрых ионов 663, и связанный с ним поглотитель 668 ионов, предназначенный для поглощения быстрых ионов и их энергии. Испускаемый пучок 670 атомов затем пропускают через подходящую апертуру 672, чтобы уменьшить расходимость пучка и обеспечить хорошо коллимированный поток нейтральных атомов к активной зоне реактора

[00126] В альтернативном варианте, IOS выполнен на основе тетродной конструкции. В этом случае IOS состоит из четырех сеток, которые имеют такой же основной блок ускорения-замедления, как пояснявшийся для случая триодной

конструкции. Специалисты в данной области техники легко распознают аналогию между компонентами системы и принципы работы. Введение четвертой сетки обеспечивает возможности точной настройки и общий повышенный эксплуатационный универсализм.

[00127] Возможные варианты осуществления, представленные здесь, были описаны в предварительной заявке на патент США № 62/414,574, которая включена в настоящий документ посредством ссылки.

Управление стабильностью плазмы и ее осевым положением

[00128] Обычные решения проблем неустойчивостей FRC в типичных случаях обеспечивают устойчивость в осевом направлении за счет неустойчивости в радиальном направлении, или устойчивость в радиальном направлении за счет осевой неустойчивости, а не устойчивость в обоих направлениях одновременно. В первом приближении, равновесие, при котором положение плазмы поперечно или радиально устойчиво, обладает желательным свойством, являясь осесимметричным, за счет осевой неустойчивости. Ввиду вышеизложенного, представленные здесь варианты осуществления направлены на создание систем и способов, которые способствуют устойчивости плазмы FRC, как в радиальном, так и в осевом направлении, а также управление осевым положением плазмы FRC вдоль оси симметрии камеры удержания плазмы FRC независимо от свойств осевой устойчивости равновесия плазмы FRC. Вместе с тем, предусматривается активное управление неустойчивостью осевого положения с помощью набора внешних осесимметричных катушек, которые управляют осевым положением плазмы FRC. Предлагаемые системы и способы обеспечивают осуществляемое с обратной связью управление осевым положением плазмы FRC независимо от свойств устойчивости равновесия плазмы за счет воздействия на напряжения, прикладываемые к набору внешних катушек, концентричных с плазмой, и использования метода нелинейного управления.

[00129] Представленные здесь варианты осуществления предусматривают использование аксиально неустойчивых равновесий FRC, чтобы добиться радиальной устойчивости, стабилизируя или устраняя при этом осевую неустойчивость. Таким образом, можно получить устойчивость, как в осевом, так и в радиальном направлении. Для чередования внешнего или равновесного магнитного поля разработана методология управления, позволяющая сделать плазму FRC радиально или поперечно устойчивой за счет придания осевой неустойчивости, а потом воздействовать на ток катушки радиального поля, чтобы безотлагательно вернуть положение плазмы FRC к средней плоскости, минимизируя при этом перерегулирование и/или колебания около средней плоскости камеры удержания. Преимущество этого решения заключается в том, что оно снижает сложность исполнительных механизмов, необходимых для управления. По сравнению с обычными решениями с несколькими степенями свободы, методология представленного здесь варианта осуществления снижает сложность, вносимую в задачу управления вдоль оси вращения плазмы FRC, имеющей одну степень свободы.

[00130] Комбинация форм колебаний в токах катушек, загрузки и мощности пучка

нейтральных частиц, которая приводит к аксиально неустойчивой плазме, определяет сценарий управления плазмой, который переводит плазму в аксиально неустойчивую ситуацию. Сценарий может быть предварительно запрограммирован с использованием предшествующих знаний об этапах моделирования или экспериментах, или управляться с обратной связью для сохранения равновесия, которое является аксиально неустойчивым. Положением плазмы следует управлять во время разрядов независимо от свойств устойчивости равновесия, например, схема управления должна работать либо для аксиально устойчивой, либо для аксиально неустойчивой плазмы, вплоть до предела. Самая аксиально неустойчивая плазма, которой можно управлять, имеет время роста, сравнимое со скин-временем емкости.

[00131] Обратимся теперь к системам и способам, которые облегчают стабилизацию плазмы FRC как в радиальном, так и в осевом направлениях, и управление осевым положением плазмы FRC вдоль оси симметрии камеры удержания плазмы FRC. На фиг.27 показана упрощенная схема для иллюстрации возможного варианта осуществления механизма 510 управления осевым положением. Вращающаяся плазма 520 FRC, показанная в пределах камеры 100 удержания, имеет ток 522 плазмы и направление 524 осевого смещения. Равновесное поле (не показано) создается в пределах камеры 100 создающими симметричные токи компонентами, такими как, например, катушки 412 квазипостоянного тока (см. фиг.2, 3A, 3D и 3E). Равновесное поле не создает равнодействующей силы в направлении 524 осевого смещения, но может быть настроено на создание либо поперечно/радиально, либо аксиально устойчивой плазмы. Для целей варианта осуществления, представленного здесь, равновесное поле настроено на создание поперечно/радиально устойчивой плазмы 520 FRC. Как отмечалось выше, это приводит к осевой неустойчивости и, таким образом, осевому смещению плазмы 520 FRC в направлении 524 осевого смещения. Поскольку плазма 520 FRC перемещается аксиально, она индуцирует токи 514 и 516, которые являются антисимметричными, т.е. В противоположных направлениях в стенках камеры 100 удержания на каждой стороне средней плоскости камеры 100 удержания. Плазма 520 FRC будет индуцировать эти типы составляющих тока как в емкости, так и во внешних катушках. Эти антисимметричные составляющие 514 и 516 токов создают радиальное поле, которое взаимодействует с тороидальным током 522 плазмы, создавая силу, которая противодействует перемещению плазмы 520 FRC, и результатом этой силы является то, что она замедляет осевые смещения плазмы. Ввиду сопротивления камеры 100 удержания, происходит постепенная утечка этих токов 514 и 516 со временем.

[00132] Катушки 530 и 531 радиального поля, расположенные вокруг камеры 100 удержания на каждой стороне средней плоскости, обеспечивают дополнительные составляющие радиального поля, которые обусловлены токами 532 и 534, индуцированными в противоположных направлениях в катушках 530 и 531. Катушки 530 и 531 радиального поля могут содержать набор осесимметричных катушек, которые могут быть размещены внутри или снаружи емкости 100 для удержания. Катушки 530 и 531

радиального поля, как показано, расположены снаружи емкости 100 для удержания, аналогично катушкам 412 (см. фиг.2, 3A, 3D и 3E) квазипостоянного тока. Каждая из катушек 530 и 531 или наборов катушек может нести другой ток, нежели катушки на противоположной стороне средней плоскости, но токи являются антисимметричными относительно средней плоскости емкости 100 для удержания и создают структуру магнитного поля с $B_z \neq 0$, $B_r = 0$ вдоль средней плоскости. Катушки 530 и 531 радиального поля создают дополнительную составляющую радиального поля, которая взаимодействует с тороидальным током 522 плазмы, создавая осевую силу. Осевая сила, в свою очередь, перемещает плазму обратно к средней плоскости камеры 100 удержания.

[00133] Механизм 510 управления включает в себя систему управления, выполненную с возможностью воздействия на ток катушек радиального поля, чтобы оперативно возвращать положение плазмы к средней плоскости, минимизируя при этом перерегулирование и/или колебания около средней плоскости машины. Система управления включает в себя процессор, функционально связанный с катушками 530 и 531 радиального поля, катушками 412 квазипостоянного тока, их соответствующими источниками питания и другими компонентами, такими, как, например, магнитные датчики, предоставляющие измерения положения плазмы, скорости плазмы и тока активных катушек. Конфигурация процессора может обеспечивать выполнение вычислений и анализов, описанных в данной заявке, и может включать в себя или быть коммуникативно связан с одним или более запоминающими устройствами, включая машиночитаемый носитель для долговременного хранения. Он может включать в себя систему на основе процессора или микропроцессора, включая системы, использующие микроконтроллеры, компьютеры с сокращенным набором команд (RISC, reduced instruction set computer), интегральные схемы прикладной ориентации (ASIC, application specific integrated circuit), логические схемы и любую другую схему или процессор, способный выполнять функции, описанные здесь. Вышеприведенные примеры являются лишь иллюстративными и, следовательно, не предназначены для ограничения каким-либо образом определения и/или значения термина «процессор» или «компьютер».

[00134] Функции процессора могут быть реализованы с использованием программных процедур, аппаратных компонентов или их комбинаций. Аппаратные компоненты могут быть реализованы с использованием различных технологий, включая, например, интегральные схемы или отдельные электронные компоненты. Процессорный блок, как правило, включает в себя считываемое/записываемое устройство хранения данных и, как правило, также включает в себя аппаратное и/или программное обеспечение для записи и/или считывания устройства хранения данных.

[00135] Процессор может включать в себя вычислительное устройство, устройство ввода, блок отображения и интерфейс, например, для доступа к сети Internet. Компьютер или процессор может включать в себя микропроцессор. Микропроцессор может быть подключен к шине 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 быть жестким диском или съемным накопителем, таким, как дисковод гибких дисков, оптический дисковод и т.п. Устройство хранения также может быть другим аналогичным средством для загрузки компьютерных программ или других команд в компьютер или процессор.

[00136] Процессор выполняет набор команд, которые хранятся в одном или более элементах хранения, для обработки входных данных. Элементы хранения также могут хранить данные или другую информацию по желанию или по необходимости. Элемент хранения может быть выполнен в виде источника информации или физического элемента памяти в пределах вычислительной машины.

[00137] Задача управления положением аксиально устойчивой или неустойчивой конфигурации FRC с использованием приводов катушек радиального поля решена с использованием ветви теории нелинейного управления, известной как управление со скользящим режимом. Линейная функция состояний системы (поверхность скольжения) выступает в роли сигнала ошибки с требуемым асимптотически устойчивым (скользящим) поведением. Поверхность скольжения разработана с использованием теории Ляпунова для проявления асимптотической устойчивости в широком диапазоне динамических параметров FRC. Предлагаемая схема управления затем может быть использована как для аксиально устойчивой, так и неустойчивой плазмы без необходимости перенастройки параметров, используемых на поверхности скольжения. Это свойство является преимущественным, поскольку, как упоминалось ранее, равновесию, возможно, придется совершать переход между аксиально устойчивым и неустойчивым равновесиями на разных фазах разряда FRC.

[00138] Конфигурация схемы 500 управления показана на фиг.28. Фильтр нижних частот (LPF) ограничивает частоты переключения в пределах требуемой ширины полосы управления. Предполагается наличие цифрового контура управления, требующего дискретизации и передачи сигнала с задержкой на одну выборку. Сигнал ошибки (поверхность скольжения) представляет собой линейную комбинацию тока катушек, положения плазмы и скорости плазмы. Положение и скорость плазмы берутся из внешних магнитных измерений. Токи в системах активных катушек могут быть измерены стандартными способами.

[00139] Токи катушек и положение плазмы необходимы для осуществления управления положением. Скорость плазмы требуется для улучшения эффективности, но она не является обязательной. Нелинейная функция этого сигнала ошибки (закон управления реле) генерирует дискретные уровни напряжения для каждой пары источников питания, подключенных к симметричным катушкам средней плоскости. Симметричные катушки средней плоскости питаются напряжением реле одинаковой интенсивности, но противоположного знака. Это создает составляющую радиального поля для возврата положения плазмы к средней плоскости.

[00140] Чтобы продемонстрировать осуществимость схемы управления, для моделирования динамики плазмы используется модель жесткой плазмы. Модель использует геометрию магнита. Распределение тока плазмы соответствует аксиально неустойчивым равновесиям с временем роста 2 мс, когда рассматриваются только плазма и емкость. Предполагается, что источники питания работают с дискретными уровнями напряжения, обычно - с шагами по 800 В.

[00141] На фиг.29 показаны несколько этапов моделирования управления плазмой, которые выделяют отношения между напряжениями, прикладываемыми к катушкам, и временами установления положения плазмы, а также требуемым пиковым током катушек и скоростями линейного изменения, чтобы вернуть к средней плоскости плазму, которая была смещена в осевом направлении на 20 см. Эти примеры моделирования управления осевым положением со скользящим режимом выполняются при 0,3 Тл с использованием четырех пар внешних обрезающих катушек. Показаны четыре случая, соответствующие источникам питания с дискретными уровнями напряжения с шагами по 200 В (сплошной квадрат), 400 В (сплошной круг), 800 В (сплошной треугольник) и 1600 В (полый квадрат). Для всех четырех случаев ширина полосы управления составляет 16 кГц, а частота дискретизации - 32 кГц. Показаны положение плазмы (верхний график), ток в крайней снаружи паре катушек (средний) и скорость линейного изменения тока катушек (нижний). Смещению плазмы разрешено расти неустойчиво, пока оно не достигнет 20 см. На этом этапе применяется управление с обратной связью.

[00142] Результаты моделирования показывают, что:

1. чтобы вернуть плазму к средней плоскости в течение 5 мс (следы сплошных квадратов), достаточно скорости разгона катушки в 0,5 МА/с с требованием источника питания в 200 В;
2. чтобы вернуть плазму к средней плоскости в течение 2,3 мс (следы сплошных кругов), достаточно скорости разгона катушки в 1 МА/с с требованием источника питания в 400 В;
3. чтобы вернуть плазму к средней плоскости в течение 1,3 мс (следы сплошных треугольников), достаточно скорости разгона катушки в 2 МА/с с требованием источника питания в 800 В;
4. Чтобы вернуть плазму к средней плоскости в течение 1,0 мс (следы полых квадратов), достаточно скорости разгона катушки в 4 МА/с с требованием источника питания в 1600 В.

[00143] Пиковые токи для всех обрезающих катушек для третьего случая, рассмотренного выше (случай скорости разгона в 2 МА/с), также показаны на фиг.30 в зависимости от положения обрезающей катушки. Примеры моделирования управления осевым положением со скользящим режимом выполняются при 0,3 Тл с использованием четырех пар внешних обрезающих катушек с использованием источника питания с тремя уровнями (+800 В, 0, -800 В), ширины полосы управления 16 кГц и частоты дискретизации 32 кГц. Чтобы вернуть плазму к средней плоскости в течение 1,3 мс,

требуется скорость разгона катушки 2 МА/с. Пиковый ток, требуемый во всей паре катушек, составляет менее 1,5 кА. Фактическая требуемая частота переключения (примерно 2 кГц) значительно ниже ширины полосы системы управления.

[00144] Система управления также может быть реализована на целевой поверхности, которая является функцией только тока катушек и скорости плазмы, без положения плазмы. В этом случае контур управления осевым положением обеспечивает только стабилизацию осевой динамики, но не управление. Это означает, что плазма находится в метастойчивой ситуации и может медленно дрейфовать вдоль своей оси. Тогда управление положением обеспечивается с использованием дополнительного контура обратной связи, который управляет промежутками плазмы между сепаратрисой плазмы и емкостью, а следовательно - выполняет одновременно управление формой и положением плазмы.

[00145] Еще одним устройством удержания плазмы, в котором используются аналогичные системы управления, является токамак. Для сохранения удержания плазмы ток плазмы в токамаке должен поддерживаться между нижним и верхним пределами, которые примерно пропорциональны плотности плазмы и тороидальному полю, соответственно. Для работы при высокой плотности плазмы ток плазмы должен быть увеличен. В то же время, полоидальное поле должно поддерживаться как можно более слабым, чтобы коэффициент q безопасности был выше $q=2$. Это достигается за счет удлинения плазмы вдоль направления оси машины, что позволяет налаживать большой ток плазмы (а следовательно - и обеспечивать высокую плотность плазмы) без увеличения граничного магнитного поля за его пределы безопасности. Эти удлиненные плазмы неустойчивы вдоль направления оси машины (известного на жаргоне токамаков как вертикальное направление), а также требуют механизмов стабилизации плазмы. Управление вертикальным положением плазмы в токамаках также восстанавливается с использованием набора катушек радиального поля, поэтому оно сильно напоминает проблему управления положением FRC. Однако причины, требующие устойчивости в токамаке и FRC, различны. В плазме токамака вертикальная неустойчивость - это штраф, который следует заплатить, чтобы работать при большом токе плазмы, для чего требуется удлинение плазмы для работы с сильным тороидальным полем. В случае FRC, неустойчивость плазмы - это штраф, который следует заплатить, чтобы получить поперечную устойчивость. Токамаки имеют тороидальное поле, которое делает конфигурацию устойчивой, поэтому им не нужна поперечная устойчивость.

[00146] Данное изобретение направлено на облегчение генерирования и сохранения целевой плазмы FRC с высоким потоком и осевым пополнением. В возможном варианте осуществления процесс включает в себя формирование FRC с большим потоком (до 30 мВб) путем объединения двух сферомаков с противоположно направленными спиральностями. Эксперименты по объединению проведены на различных устройствах для исследования магнитного переключения путем объединения друг с другом двух плазменных тороидов типа сферомаков за счет контакта и

переключения вдоль тороидально симметричной линии. Сферомак - это плазма сферической или тороидальной формы, в которой не подверженные действию сил токи ($\mathbf{j} \times \mathbf{B} = 0$) устанавливают равновесную конфигурацию в зависимости от того, существует ли разрыв тока (потока) на главной оси. Два тороидальных сферомака, несущие одинаковый тороидальный ток с тем же самым или противоположным тороидальным полем, принудительно объединяют, управляя токами внешних катушек; эти случаи называются объединением с одинаково направленными спиральностями или объединением с противоположно направленными спиральностями, соответственно. Как описано в первоисточнике Yamada, M., et al., Phys. Rev. Lett. 65, 721 (1990), объединение с противоположно направленными спиральностями приводит к генерированию переключения силовых линий магнитного поля в местах переключения, где ожидалось весьма эффективное осуществление переключения (Bhattacharjee, A., Phys. Fluids 26, 3332 (1983)). Экспериментальные результаты также указали, что в глобальном смысле объединение с противоположно направленными спиральностями действительно привело к значительно более быстрому переключению, чем в случае объединения с одинаково направленными спиральностями, и последующему форсированию структуры FRC с высоким магнитным потоком (состоящей лишь из полоидального поля) после исключения противоположно направленных тороидальных полей сферомаков благодаря объединению.

[00147] В возможном варианте осуществления процесс включает в себя:

1. генерирование целевой плазмы FRC с большим магнитным потоком ($\Phi_p \sim 25\text{—}30$ мВб) посредством объединения сферомаков с противоположно направленными спиральностями с использованием MCPG;

2. усиление, стабилизацию и запитывание плазмы FRC, приходя к условиям, характерным для плазмы реактора термоядерного синтеза, путем формирования целевой плазмы с достаточным магнитным потоком и инъекции пучков высокоэнергетических нейтральных частиц, тем самым осуществляя дальнейшее преобразование энергии тех пучков в тепловую энергию;

3. формирование и инъекцию дополнительных многоимпульсных сферомаков в плазму FRC для пополнения частиц и стекания с целью поддержания и улучшения свойств удержания плазмы FRC, а также достижение режима плотной FRC с высоким потоком.

[00148] Обращаясь к фиг.31А и 31В, отмечаем, что здесь иллюстрируется возможный вариант осуществления системы удержания FRC как имеющей камеру 100 удержания и пару диверторов 302, связанных с камерой 100 удержания на каждом торце. Чтобы генерировать оптимальную исходную целевую плазму 453 FRC с высоким потоком, с противоположенными торцами расположенной по центру камеры 100 удержания связана пара инжекторов 250 сферомаков среднего масштаба (или намагниченных коаксиальным плазменных пушек (MCPG)). Инжекторы 250 сферомаков инжектируют плазмы сферомаков с высоким магнитным потоком (>20 мВб) по направлению к средней плоскости камеры 100 удержания, где сферомаки объединяются и

образуют плазму FRC в камере 100 удержания. Объединение с противоположно направленными спиральностями двух сферомаков обычно вызывает генерирование целевой плазмы FRC с большим магнитным потоком ($\Phi_p \sim 25\text{—}30$ мВб), обладающей увеличенным захваченным магнитным потоком. С камерой 100 удержания также связано множество инжекторов 615 пучков нейтральных частиц под некоторым углом по направлению к средней плоскости камеры 100 удержания с целью возбуждения и сохранения плазмы 453 FRC. В возможных вариантах осуществления инжекторы 615 пучков нейтральных частиц выполнены с возможностью регулирования от исходного уровня мощности до повышенного уровня мощности. В дополнительных возможных вариантах осуществления инжекторы 250 сферомаков выполнены с возможностью многоимпульсной инъекции сферомаков в плазму FRC вдоль геометрической оси камеры удержания для пополнения и стекания.

[00149] Предыдущие исследования объединения сферомаков (см. фиг.32А—32D) продемонстрировали жизнеспособность и потенциал термоядерной плазмы компактных тороидов. В кампании экспериментов по исследованию магнитного переключения, проведенной в 2004—2008 г.г. в лаборатории плазмы Принстонского университета (США), методику объединения противоположно направленных спиральностей применяли для исследований формирования устойчивости и поддержания сплюснутых FRC. Продемонстрировано, что центральный соленоид омического нагрева, использовавшийся в токамаках, можно использовать для усиления тороидальных токов в FRC с целью поддержания их на протяжении времен, превышающих время резистивного распада (Gerhardt, S.P., et al., Phys. Плазмы 15, 032503 (2008)). Кроме того, для управления формой границ и удлинением FRC использовали катушки формирующих полей. Это позволило провести исследование влияния тех формирующих полей на устойчивость. Экспериментально продемонстрировано, что в сплюснутой FRC можно стабилизировать режим наклона $n=1$ (n : номер тороидальной моды) (Gerhardt, S.P., et al., Phys. Rev. Lett. 99, 245003 (2007)). Скорость роста в случае $n \geq 2$ мод также замедлялась благоприятным формообразованием. Эти результаты дали значительные преимущества в понимании физики FRC с незамкнутыми границами. В дополнение к этим результатам по устойчивости и выдерживанию, при экспериментах по объединению противоположно направленных спиральностей наблюдался значительный ионный нагрев. Объединение двух сферомаков с одинаково направленными спиральностями приводило к генерированию меньшего нагрева, но - с достаточно высоким бета плазмы сферомаков ($\beta \sim 0,2\text{—}0,3$). Способность получать объединенные плазмы с не пренебрежимо малой ионной температурой ($T_i > 25$ эВ, $T_e \cong 10$ эВ, $n_e > 10^{14}$ см⁻³) позволяет исследовать характеристики устойчивости плазм с высоким бета составляющей переменного тороидального поля.

[00150] В возможном варианте осуществления, как иллюстрируется на фиг.33, инжектор 250 сферомаков представляет собой инжектор относительно компактных сферомаков, имеющий внешний электрод 254, внутренний электрод 255, покрытый

вольфрамом, выходную катушку 252 смещения, расположенную вокруг внешнего электрода 254, имеющую железный сердечник катушку 253 смещения, расположенную в пределах внутреннего электрода 255, газодувку 256 и высоковольтный источник 258 питания. Инжектор 250 сферомаков создает достаточный магнитный поток за счет использования и обновления недавно разработанной системы 253 катушек смещения с железными сердечниками (см. Edo, T., et al., *Jrnl of Plasma and Fusion Res.* 13, 3405062 (2018)). В недавно проведенных предварительных тестах применяли имеющую воздушный сердечник катушку смещения с источником питания постоянного тока, обеспечивающую магнитный поток сформированного сферомака с масштабным коэффициентом $\sim 1,67$ мкВб/А, тогда как МСРГ с системой имеющих железный сердечник (чугун; магнитная проницаемость $\mu \sim 250$) катушек смещения может дать, грубо говоря, 100-кратно больший магнитный поток на ампер (т.е., $\sim 0,16$ мВб/А). Поддерживая плотность тока постоянной, можно адекватно масштабировать размер инжектора сферомаков, получая гораздо более высокий магнитный поток (>30 мВб) и не вызывая при этом нежелательные эффекты, как правило, ассоциирующиеся с электродными разрядами. В дополнительном возможном варианте осуществления железный сердечник формируют, используя чистое железо (99,9% Fe; $\mu > 200000$), которое демонстрирует тенденцию к достижению более высокого магнитного потока с приемлемым током смещения.

[00151] На фиг.3D и 3E иллюстрируется система 10 удержания плазмы FRC с объединением СТ, содержащая камеру 100 удержания, первую пару внутренних диверторов 302, связанных с противоположными торцами камеры 100 удержания и находящихся напротив формирующих и инжектирующих СТ систем 200, связанных на первом торце с внутренними диверторами 302, и вторую пару внешних диверторов 300, связанных со вторым торцом формирующих и инжектирующих СТ систем 200. Чтобы достичь объединения сферомаков, как показано на фиг.31A, формирующие и инжектирующие СТ секции 200 и внешние диверторы 300, показанные на фиг.3D и 3E, удалены и заменены инжекторами 250 сферомаков, связанными с внутренними диверторами, как изображено на фиг.31A и 31B. Инжекторы 250 сферомаков размещены непосредственно внутри концентрических электродов 310 диверторов, которые используют для управления устойчивостью FRC 453 посредством граничного смещения. Система граничного смещения создает радиальное электрическое поле на незамкнутых силовых линиях поля, тем самым генерируя азимутальное течение посредством $E_r \times B_z$ вокруг сепаратрисы FRC (область соскребаемого слоя), что стабилизирует глобальные MHD режимы синергически с помощью инъекции пучков нейтральных пучков (NBI). Инжекторы 250 сферомаков эксплуатируются и управляются по отдельности, чтобы получить различные плазмы сферомаков, а также исходную FRC, что позволяет изменять плотность исходной плазмы и захватываемый магнитный поток с целью найти оптимальную целевую FRC для эффективной инъекции пучков нейтральных частиц. В течение процесса формирования, переноса и объединения сферомаков, в секции удержания прикладывают относительно слабые равновесные и зеркальные поля ($B_e \sim 1$

кГс, зеркальное отношение ~ 2) с помощью уравнивающих и зеркальных катушек 412 и 420, вследствие чего можно адекватно сформировать плазму 453 FRC, после чего эти поля следует постепенно увеличить (B_e вплоть до 3 кГс, зеркальное отношение $\sim 3—3,5$) для удержания и поддержания плазмы 453 FRC. Пучки нейтральных частиц также инжектируют в камеру 100 удержания из инжекторов 615 в течение всего разряда, а энергию пучков тоже можно увеличивать от некоторого исходного до некоторого повышенного уровня мощности, например, от ~ 15 кэВ до 40 кэВ, наряду с разгоном B_e , соответственно. Помимо этого, можно активно управлять системой магнитов и инжекторов пучков нейтральных частиц, так что стабилизация и сохранение плазмы FRC будет происходить в реальном масштабе времени.

[00152] Для удовлетворительного пополнения частиц, а также стекания уже сформированной FRC внутрь камеры 100 удержания, инжекторы 250 сферомаков запитывают индивидуально управляемыми источниками 258 питания. Когда около средней плоскости камеры удержания устанавливаются противоположно ориентированные инжекторы СТ с многоимпульсными функциональными возможностями, инжекторы СТ радиально инжектируют сферомакоподобный плазмод в FRC; иными словами, инжектируемому СТ приходится проникать в поперечное магнитное поле ($B_z \sim 1$ кГс), не разбиваясь на составляющие или не внося сильное магнитное возмущение или возмущение плотности. Помимо этого, радиальная инжекция СТ около средней плоскости негативно влияет - до некоторой степени - на удержание быстрых ионов, и система, как правило, оказывается не масштабируемой с получением термоядерного устройства. Следовательно, инжекция СТ из инжекторов 250 сферомаков на геометрической оси (т.е., «осевая» инжекция КТ) значительно выгоднее, чем радиальная инжекция СТ, с нескольких научных точек зрения.

[00153] Вместо этого, в возможных вариантах осуществления конфигурацию системы, проиллюстрированную на фиг.2, 3А, 3D и 3Е, которая включает в себя две диаметрально противоположные секции 200 формирования тета-пинчей с обращенным полем, можно модифицировать так, что она будет включать в себя диаметрально противоположные инжекторы 250 сферомаков, связанные с внешними диверторами 300, для пополнения плазмы FRC, содержащейся в пределах камеры удержания.

[00154] В соответствии с вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ генерирования и сохранения магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC), предусматривающий объединение плазм первых и вторых сферомаков и формирование FRC вокруг объединенной плазмы в камере удержания, а также сохранение FRC на уровне постоянного значения или около него без спада посредством инжекции пучков быстрых нейтральных атомов из инжекторов пучков нейтральных частиц в плазму FRC под некоторым углом к средней плоскости камеры удержания.

[00155] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий инжекцию плазм

сфероматов из противоположных первого и второго инжекторов сфероматов по направлению к средней плоскости камеры и объединение плазм сфероматов для формирования FRC.

[00156] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий объединение плазм сфероматов, поступающих из сфероматов с противоположно направленными спиральностями и инжектируемых в камеру удержания из первого и второго инжекторов сфероматов.

[00157] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, первый и второй инжекторы сфероматов содержат намагниченную коаксиальную плазменную пушку.

[00158] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, первый и второй инжекторы сфероматов содержат систему катушек смещения с железными сердечниками.

[00159] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, система катушек смещения с железными сердечниками содержит чугун с магнитной проницаемостью примерно 250.

[00160] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, железный сердечник системы катушек смещения с железными сердечниками содержит примерно 99,9 % Fe с магнитной проницаемостью, равной примерно 200000 или большей.

[00161] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий раздельное управление первым и вторым инжекторами сфероматов.

[00162] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, плазма сфероматов, инжектируемая из первого инжектора сфероматов, отличается от плазмы сфероматов, инжектируемой из второго сферомата.

[00163] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий пополнение плазмы FRC одной или несколькими плазмами сфероматов из одного или более из первого и второго инжекторов сфероматов вдоль геометрической оси камеры удержания.

[00164] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий многоимпульсную инъекцию одной или нескольких плазм сфероматов в плазму FRC из одного или более из первого и второго инжекторов сфероматов.

[00165] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий формирование и инъекцию многоимпульсных сфероматов в плазму FRC.

[00166] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий настройку энергий

пучков множества пучков нейтральных частиц между первой энергией пучков и второй энергией пучков, где вторая энергия пучков отличается от первой энергии пучков, или настройку энергий пучков множества пучков нейтральных частиц между первой энергией пучков и второй энергией пучков, где вторая энергия пучков отличается от первой энергии пучков и при этом вторая энергия пучков выше, чем первая энергия пучков, или настройку энергий пучков множества пучков нейтральных частиц между первой энергией пучков и второй энергией пучков, где вторая энергия пучков отличается от первой энергии пучков, и при этом множество пучков нейтральных частиц переключают между первой и второй энергиями пучков в течение длительности инжекционного импульса.

[00167] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий генерирование магнитного поля в пределах камеры с катушками квазипостоянного тока, простирающимися вокруг камеры с катушками квазипостоянного тока, простирающимися вокруг камеры.

[00168] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий направление поверхностей магнитного потока FRC в диверторы, связанные с торцами камеры удержания.

[00169] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий генерирование магнитного поля в пределах диверторов с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг формирующих секций и диверторов.

[00170] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий генерирование зеркального магнитного поля в пределах противоположных торцов камеры с помощью зеркальных катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг противоположных торцов камеры.

[00171] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий генерирование одного из магнитного дипольного поля и магнитного квадрупольного поля в пределах камеры с помощью отклоняющих катушек, связанных с камерой.

[00172] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий кондиционирование внутренних поверхностей камеры и диверторов с помощью системы геттерирования.

[00173] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, система геттерирования включает в себя одну из системы осаждения титана и системы осаждения лития.

[00174] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, способ дополнительно предусматривает управление радиальным профилем электрического поля в граничном слое плазмы FRC.

[00175] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, управление радиальным профилем электрического поля в граничном слое FRC включает в себя приложение распределения электрического потенциала к группе незамкнутых поверхностей потока FRC с помощью смещающих электродов.

[00176] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложен способ, дополнительно предусматривающий одну из инъекции плазмы сферомаков из первого и второго инжекторов сферомаков, имеющих магнитный поток более чем 20 мВб, или инъекции плазм сферомаков из первого и второго инжекторов сферомаков, имеющих магнитный поток более чем примерно 25-30 мВб.

[00177] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложена система для генерирования и сохранения магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC), содержащая: камеру удержания; первый и второй диверторы, связанные с камерой удержания; первый и второй диаметрально противоположные инжекторы сферомаков, связанные с первым и вторым диверторами, для генерирования плазмы сферомаков и переноса плазмы сферомаков по направлению к средней плоскости камеры удержания; множество инжекторов пучков нейтральных атомов, связанных с камерой удержания и ориентированных на инъекцию пучков нейтральных атомов по направлению к средней плоскости камеры удержания под меньшим углом, чем прямой, к продольной оси симметрии камеры удержания; магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, расположенных вокруг камеры удержания и первого и второго диверторов; первый и второй наборы зеркальных катушек квазипостоянного тока, расположенных между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями; первую и вторую зеркальные пробки, расположенные между камерой удержания и первым и вторым диверторами; систему геттерирования, связанную с камерой удержания и первым и вторым диверторами; один или несколько смещающих электродов для электрического смещения незамкнутой поверхности потока генерируемой FRC, причем один или несколько смещающих электродов расположены в пределах одного или более из камеры удержания и первого и второго диверторов; и две или более отклоняющих катушек, связанных с камерой удержания.

[00178] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложена система для генерирования и сохранения магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC), содержащая: камеру удержания; первый и второй диверторы, связанные с камерой удержания; первый и второй диаметрально противоположные инжекторы сферомаков, связанные с первым и вторым диверторами; один или несколько из множества смещающих электродов и первую и вторую зеркальные пробки, причем один или несколько смещающих электродов расположены в пределах одного или более из камеры удержания и первого и второго диверторов, и при этом первая и вторая зеркальные пробки расположены между камерой удержания и первым и вторым диверторами; систему геттерирования, связанную с камерой удержания и первым и вторым диверторами; множество инжекторов пучков нейтральных атомов, связанных с

камерой удержания и ориентированных под углом по направлению к средней плоскости камеры удержания; и магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, расположенных вокруг камеры удержания и первого и второго диверторов, и при этом первый и второй наборы зеркальных катушек квазипостоянного тока расположены в промежутке камеры удержания; причем система выполнена с возможностью генерирования FRC и сохранения FRC без спада при инъекции пучков нейтральных частиц в плазму.

[00179] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, первый и второй инжекторы сферомаков выполнены с возможностью инъекции плазм сферомаков по направлению к средней плоскости камеры для объединения и формирования плазмы FRC.

[00180] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, первый и второй инжекторы сферомаков выполнены с возможностью формирования и инъекции в камеру удержания плазм первых и вторых сферомаков, имеющих противоположно направленные спиральности.

[00181] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, первый и второй инжекторы сферомаков содержат намагниченную коаксиальную плазменную пушку (MCPG).

[00182] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, первый и второй инжекторы сферомаков включают в себя систему катушек смещения с железными сердечниками.

[00183] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, железный сердечник системы катушек смещения с железными сердечниками содержит чугун с магнитной проницаемостью примерно 250.

[00184] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, железный сердечник системы катушек смещения с железными сердечниками содержит примерно 99,9% Fe с магнитной проницаемостью, равной примерно 200000 или большей.

[00185] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, первый и второй инжекторы сферомаков выполнены с возможностью отдельного управления.

[00186] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, первый и второй инжекторы сферомаков выполнены с возможностью многоимпульсной инъекции плазм более одного сферомака в камеру удержания.

[00187] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, множество пучков нейтральных частиц выполнены с возможностью регулирования между первой энергией пучков и второй энергией пучков, причем вторая энергия пучков отличается от первой энергии пучков и при этом возможно переключение энергии множества пучков, принадлежащих множеству пучков нейтральных частиц, между первой и второй энергиями пучков в течение длительности инъекционного

импульса.

[00188] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, смещающие электроды включают в себя один или несколько из одного или нескольких точечных электродов, расположенных в пределах камеры удержания, для контакта с незамкнутыми силовыми линиями поля, набор кольцевых электродов между камерой удержания и первым и вторым диверторами, и множество электродов, концентрично уложенных в стопу, расположенных в первом и втором диверторах, для зарядки нескольких концентрических слоев потока.

[00189] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложена система, дополнительно содержащая первые и вторые диаметрально противоположные формирующие секции тета-пинчей с обращенным полем, установленные между первым и вторым диверторами и камерой удержания.

[00190] В соответствии с дополнительным вариантом осуществления данного изобретения, предложена система, дополнительно содержащая третий и четвертый диверторы, установленные между первым и вторым диаметрально противоположными формирующими секциями тета-пинчей с обращенным полем и камерой удержания.

[00191] Однако возможные варианты осуществления, представленные здесь, предназначены лишь в качестве иллюстративных примеров и никоим образом не ограничительных.

[00192] Все признаки, элементы, компоненты, функции и этапы, описанные в отношении любого варианта осуществления, представленного здесь, предназначены быть свободно комбинируемыми и заменяемыми соответствующими из любого другого варианта осуществления. Если некоторый признак, элемент, компонент, функция или этап описаны в отношении только одного варианта осуществления, то следует понимать, что тот признак, элемент, компонент, функция или этап могут использоваться с любым другим вариантом осуществления, описанным здесь, если явно не указано иное. Этот абзац, таким образом, в любое время служит антецедентной основой и письменной поддержкой для введения формулы изобретения, которая комбинирует признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из разных вариантов осуществления или заменяет признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из одного варианта осуществления соответствующими из другого, даже если следующее описание явно не указывает, в конкретном случае, что такие комбинации или замены возможны. Явное перечисление каждой возможной комбинации и замены является чрезмерно обременительным, особенно учитывая, что допустимость всякой и каждой такой комбинации и замены будет легко понята специалистами в данной области техники по прочтении этого описания.

[00193] Во многих случаях объекты описываются здесь как связанные с другими объектами. Следует понять, что термины «связанный (-ая, -ое, -ие)» и «соединенный (-ая, -ое, -ие)» или любые из их форм употребляются здесь взаимозаменяемо и в обоих случаях являются родовыми для непосредственной связи двух объектов (без каких-либо

существенных (например - паразитных) промежуточных объектов) и косвенной связи двух объектов (с одним или несколькими промежуточными объектами). Если объекты показаны как непосредственно связанные воедино или описаны как связанные воедино без описания какого-либо промежуточного объекта, следует понять, что эти объекты тоже могут быть непосредственно связаны воедино, если в контексте явно не диктуется иное

[00194] Хотя варианты осуществления могут быть подвергнуты внесению различных модификаций и альтернативных форм, их конкретные примеры показаны на чертежах и описаны здесь подробно. Однако должно быть ясно, что эти варианты осуществления не ограничиваются раскрытой конкретной формой, а наоборот, эти варианты осуществления следует считать охватывающими все модификации, эквиваленты и альтернативы, находящиеся в рамках существа изобретения. Помимо этого, приводить в формуле изобретения или вносить в нее можно любые признаки, функции, этапы или элементы согласно вариантам осуществления, а также отрицательные ограничения, которые определяют объем притязаний согласно изобретению признаками, функциями, этапами или элементами, находящимися вне этого объема.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ генерирования и сохранения магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC), включающий в себя этапы, на которых:

объединяют плазмы первого и второго сферомаков и формируют FRC вокруг объединенной плазмы в камере удержания; и

сохраняют FRC на уровне постоянного значения 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, в котором этап формирования FRC включает в себя инъекцию плазм сферомаков из противоположных первого и второго инжекторов сферомаков по направлению к средней плоскости камеры и объединение плазм сферомаков для формирования FRC.

3. Способ по п.2, в котором этап объединения плазм сферомаков и формирования плазмы FRC включает в себя объединение плазм сферомаков, поступающих из сферомаков с противоположно направленными спиральностями и инжектируемых в камеру удержания из первого и второго инжекторов сферомаков.

4. Способ по пп.2 и 3, в котором первый и второй инжекторы сферомаков содержат намагниченную коаксиальную плазменную пушку (MCPG).

5. Способ по пп.2-4, в котором первый и второй инжекторы сферомаков содержат систему катушек смещения с железными сердечниками.

6. Способ по п.5, в котором железный сердечник системы катушек смещения с железными сердечниками представляет собой чугун с магнитной проницаемостью примерно 250.

7. Способ по п.5, в котором железный сердечник системы катушек смещения с железными сердечниками содержит примерно 99,9 % Fe с магнитной проницаемостью, равной примерно 200000 или большей.

8. Способ по пп.2-7, дополнительно включающий в себя отдельное управление первым и вторым инжекторами сферомаков.

9. Способ по п.8, в котором плазма сферомаков, инжектируемая из первого инжектора сферомаков, отличается от плазмы сферомаков, инжектируемой из второго сферомака.

10. Способ по пп.2-9, дополнительно включающий в себя пополнение плазмы FRC одной или несколькими плазмами сферомаков из одного или более из первого и второго инжекторов сферомаков вдоль геометрической оси камеры удержания.

11. Способ по п.10, в котором этап пополнения включает в себя многоимпульсную инъекцию одной или нескольких плазм сферомаков в плазму FRC из одного или более из первого и второго инжекторов сферомаков.

12. Способ по пп.2-9, дополнительно включающий в себя формирование и инъекцию многоимпульсных сферомаков в плазму FRC.

13. Способ по пп.1-12, в котором этап инъекции пучков быстрых нейтральных

атомов включает в себя один из этапа настройки энергий пучков для множества пучков нейтральных частиц между первой энергией пучков и второй энергией пучков, где вторая энергия пучков отличается от первой энергии пучков, или этапа настройки энергий пучков для множества пучков нейтральных частиц между первой энергией пучков и второй энергией пучков, где вторая энергия пучков отличается от первой энергии пучков и при этом вторая энергия пучков выше, чем первая энергия пучков, или этапа настройки энергий пучков для множества пучков нейтральных частиц между первой энергией пучков и второй энергией пучков, где вторая энергия пучков отличается от первой энергии пучков, и при этом множество пучков нейтральных частиц переключают между первой и второй энергиями пучков в течение длительности инжекционного импульса.

14. Способ по пп.1-13, дополнительно включающий в себя генерирование магнитного поля в пределах камеры с катушками квазипостоянного тока, простирающимися вокруг камеры с катушками квазипостоянного тока, простирающимися вокруг камеры.

15. Способ по п.14, дополнительно включающий в себя этап направления поверхностей магнитного потока FRC в диверторы, связанные с торцами камеры удержания.

16. Способ по п.15, дополнительно включающий в себя этап генерирования магнитного поля в пределах диверторов с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг формирующих секций и диверторов.

17. Способ по п.16, дополнительно включающий в себя этап генерирования зеркального магнитного поля в пределах противоположных торцов камеры с помощью зеркальных катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг противоположных торцов камеры.

18. Способ по пп.14-17, дополнительно включающий в себя этап генерирования одного из магнитного дипольного поля и магнитного квадрупольного поля в пределах камеры с помощью отклоняющих катушек, связанных с камерой.

19. Способ по пп.15-18, дополнительно предусматривающий этап кондиционирования внутренних поверхностей камеры и диверторов с помощью системы геттерирования.

20. Способ по п.19, в котором система геттерирования включает в себя одну из системы осаждения титана и системы осаждения лития.

21. Способ по пп.1-20, дополнительно включающий в себя этап управления радиальным профилем электрического поля в граничном слое плазмы FRC.

22. Способ по п.21, в котором этап управления радиальным профилем электрического поля в граничном слое FRC включает в себя приложение распределения электрического потенциала к группе незамкнутых поверхностей потока FRC с помощью смещающих электродов.

23. Способ по пп.2-22, дополнительно включающий в себя одно из инъекции плазм сферомаков из первого и второго инжекторов сферомаков, имеющих магнитный поток

более чем 20 мВб, или инъекции плазм сферомаков из первого и второго инжекторов сферомаков, имеющих магнитный поток более чем примерно 25-30 мВб.

24. Система для генерирования и сохранения магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC), содержащая:

камеру удержания;

первый и второй диверторы, связанные с камерой удержания;

первый и второй диаметрально противоположные инжекторы сферомаков, связанные с первым и вторым диверторами, для генерирования плазмы сферомаков и переноса плазмы сферомаков по направлению к средней плоскости камеры удержания;

множество инжекторов пучков нейтральных атомов, связанных с камерой удержания и ориентированных на инъекцию пучков нейтральных атомов по направлению к средней плоскости камеры удержания под меньшим углом, чем прямой, к продольной оси камеры удержания;

магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, расположенных вокруг камеры удержания и первого и второго диверторов, первый и второй наборы зеркальных катушек квазипостоянного тока, расположенных между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями, и первую и вторую зеркальные пробки, расположенные между камерой удержания и первым и вторым диверторами;

систему геттерирования, связанную с камерой удержания и первым и вторым диверторами;

один или несколько смещающих электродов для электрического смещения незамкнутой поверхности потока генерируемой FRC, причем один или несколько смещающих электродов расположены в пределах одного или более из камеры удержания и первого и второго диверторов; и

две или более отклоняющих катушек, связанных с камерой удержания.

25. Система для генерирования и сохранения магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC), содержащая:

камеру удержания;

первый и второй диверторы, связанные с камерой удержания;

первый и второй диаметрально противоположные инжекторы сферомаков, связанные с первым и вторым диверторами;

один или несколько из множества смещающих электродов и первую и вторую зеркальные пробки, причем один или несколько смещающих электродов расположены в пределах одного или нескольких из камеры удержания и первого и второго диверторов, и при этом первая и вторая зеркальные пробки расположены между камерой удержания и первым и вторым диверторами;

систему геттерирования, связанную с камерой удержания и первым и вторым диверторами;

множество инжекторов пучков нейтральных атомов, связанных с камерой

удержания и ориентированных под углом по направлению к средней плоскости камеры удержания; и

магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, расположенных вокруг камеры удержания и первого и второго диверторов, при этом первый и второй наборы зеркальных катушек квазипостоянного тока расположены в промежутке камеры удержания,

причем система выполнена с возможностью генерирования FRC и сохранения FRC без спада при инъекции пучков нейтральных частиц в плазму.

26. Система по пп.24 и 25, в которой первый и второй инжекторы сфероматов выполнены с возможностью инъекции плазм сфероматов по направлению к средней плоскости камеры для объединения и формирования плазмы FRC.

27. Система по п.26, в которой первый и второй инжекторы сфероматов выполнены с возможностью формирования и инъекции в камеру удержания плазм первых и вторых сфероматов, имеющих противоположно направленные спиральности.

28. Система по пп.24-27, в которой первый и второй инжекторы сфероматов содержат намагниченную коаксиальную плазменную пушку (MCPG).

29. Система по пп.24-27, в которой первый и второй инжекторы сфероматов включают в себя систему катушек смещения с железными сердечниками.

30. Система по п.29, в которой железный сердечник системы катушек смещения с железными сердечниками представляет собой чугун с магнитной проницаемостью примерно 250.

31. Система по п.29, в которой железный сердечник системы катушек смещения с железными сердечниками содержит примерно 99,9% Fe с магнитной проницаемостью, равной примерно 200000 или большей.

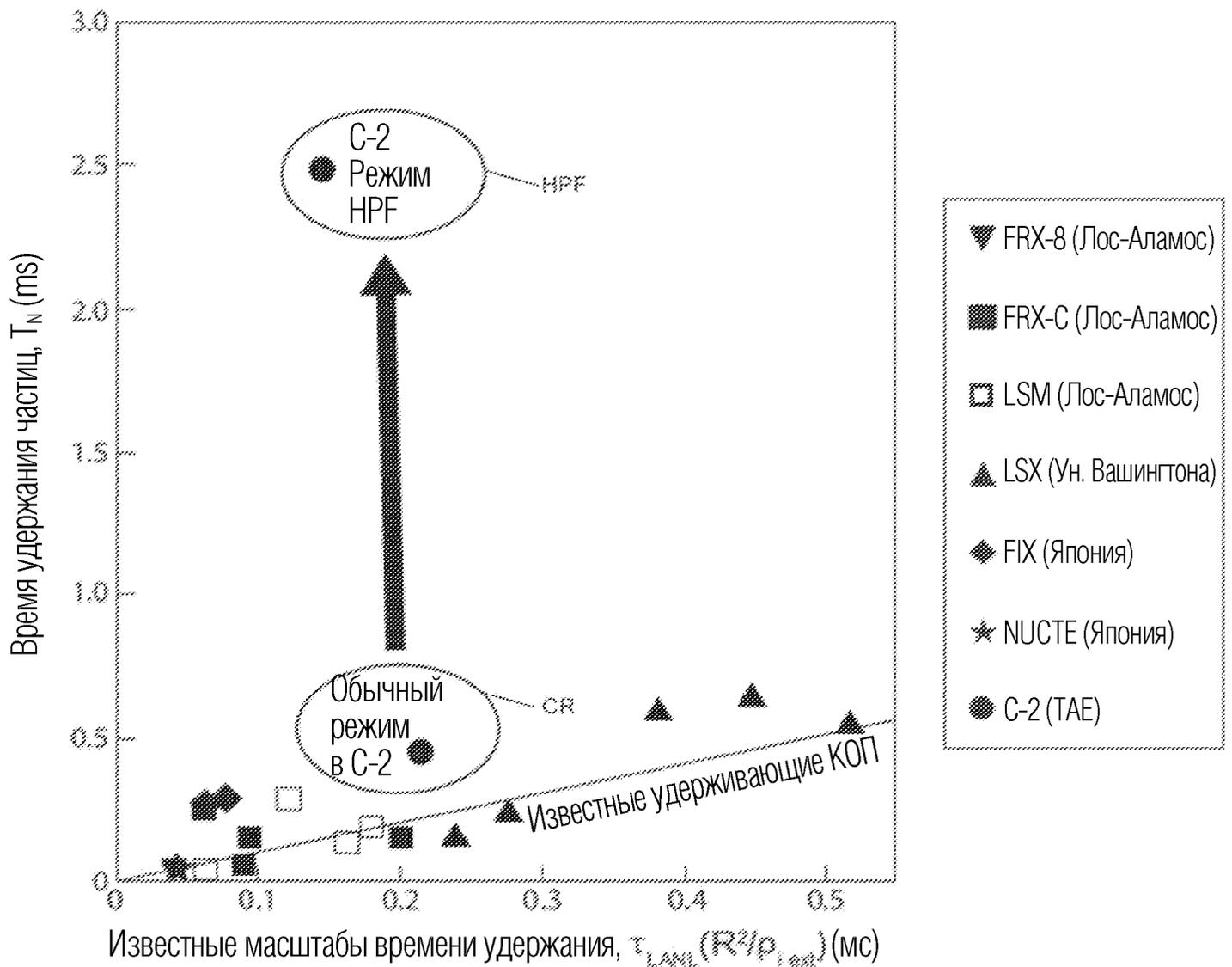
32. Система по пп.24-27, в которой первый и второй инжекторы сфероматов выполнены с возможностью отдельного управления.

33. Система по п.32, в которой первый и второй инжекторы сфероматов выполнены с возможностью многоимпульсной инъекции плазм более одного сферомата в камеру удержания.

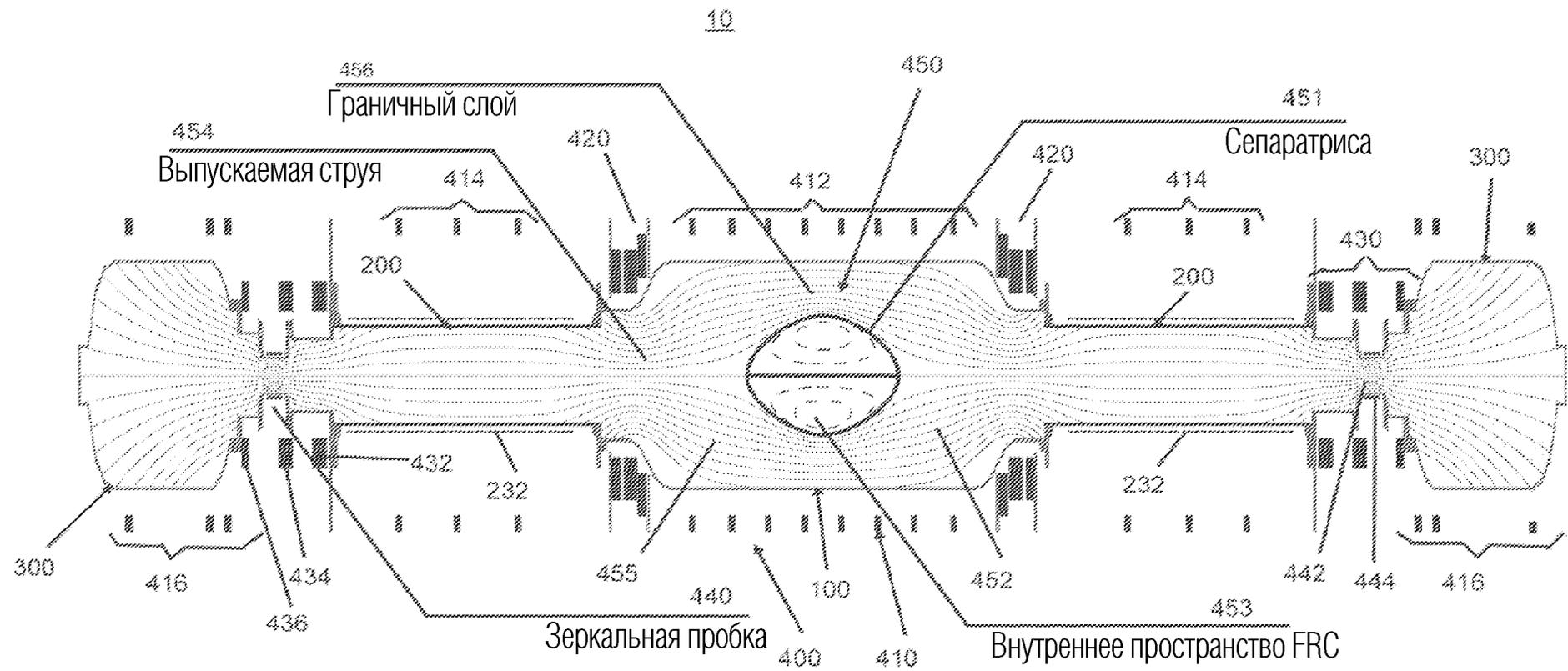
34. Система по пп.24-33, в которой множество пучков нейтральных частиц выполнены с возможностью регулирования между первой энергией пучков и второй энергией пучков, причем вторая энергия пучков отличается от первой энергии пучков и при этом возможно переключение энергии множества пучков нейтральных частиц, между первой и второй энергиями пучков в течение длительности инъекционного импульса.

35. Система по пп.24-34, дополнительно содержащая первую и вторую диаметрально противоположные формирующие секции тета-пинчей с обращенным полем, установленные между первым и вторым диверторами и камерой удержания.

36. Система по п. 36, дополнительно содержащая третий и четвертый диверторы, установленные между первой и второй диаметрально противоположными формирующими секциями тета-пинчей с обращенным полем и камерой удержания.

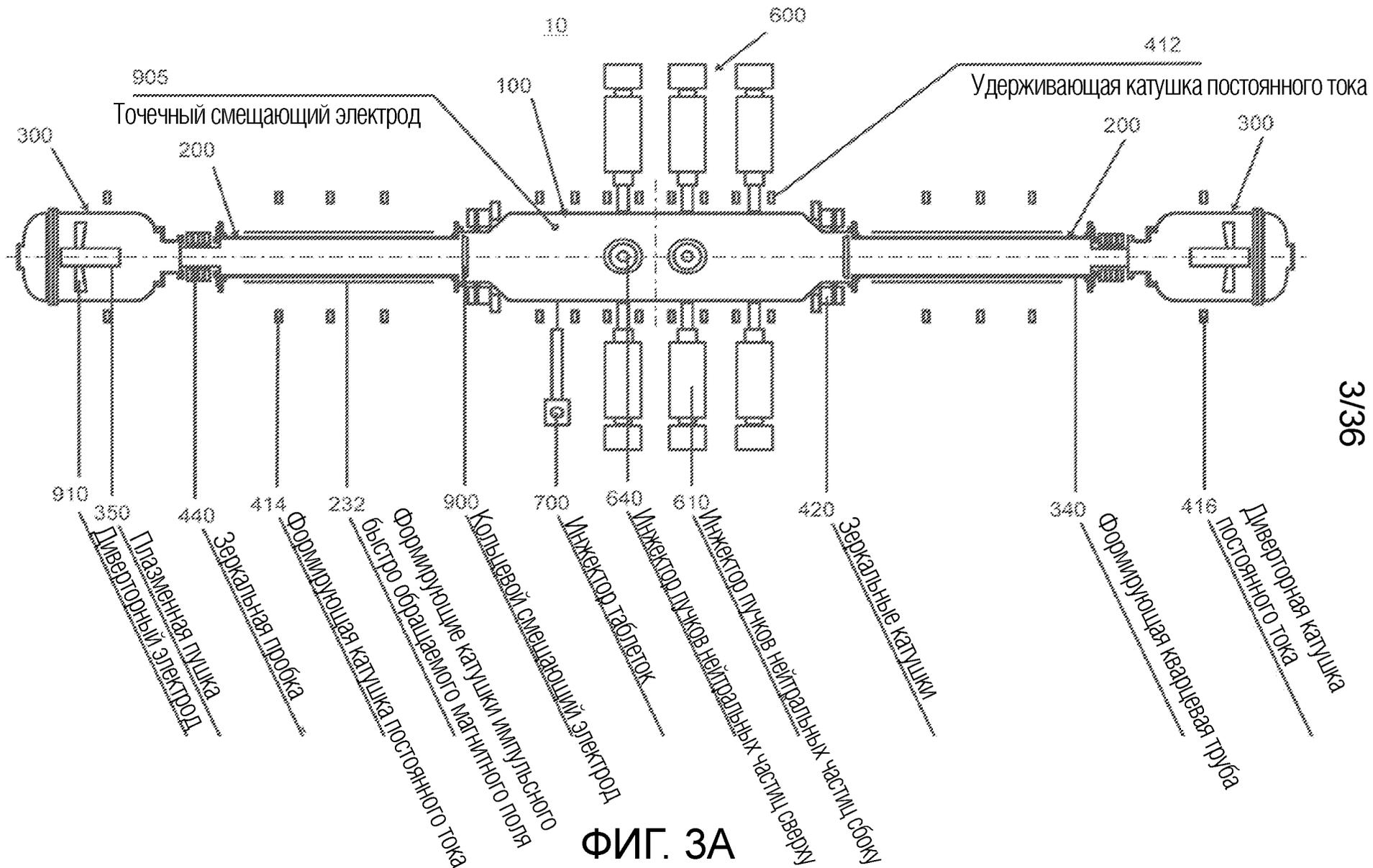


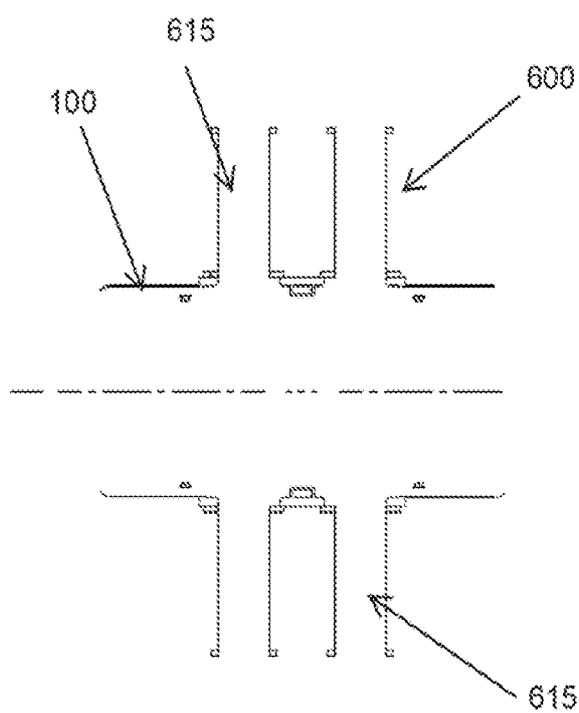
ФИГ. 1



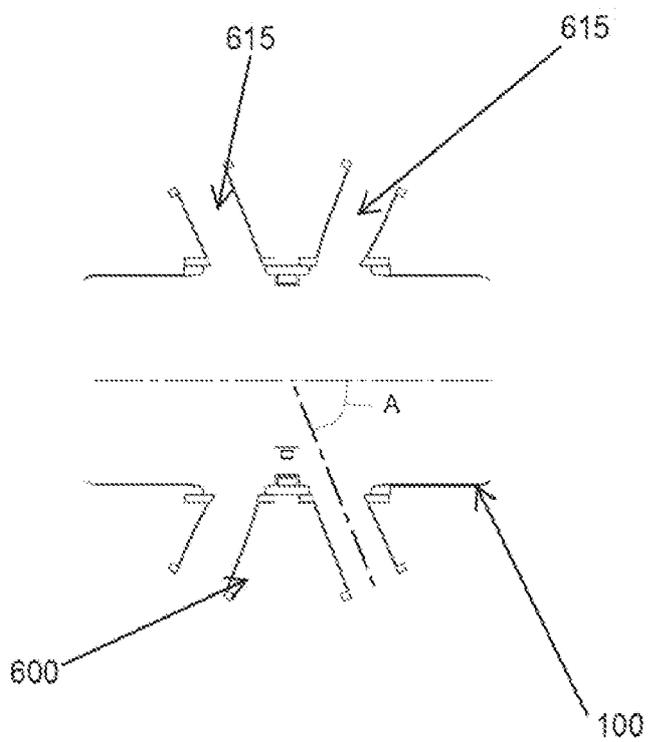
2/36

ФИГ. 2

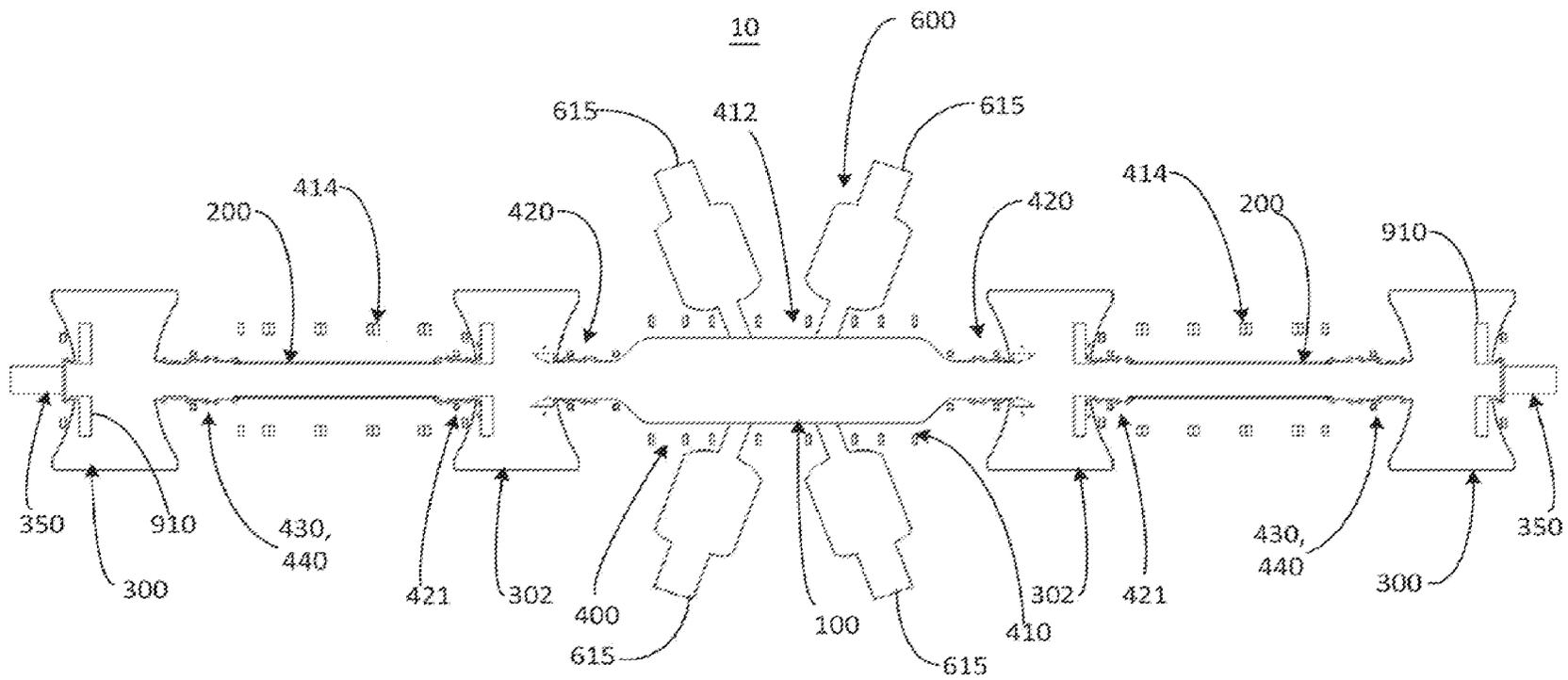




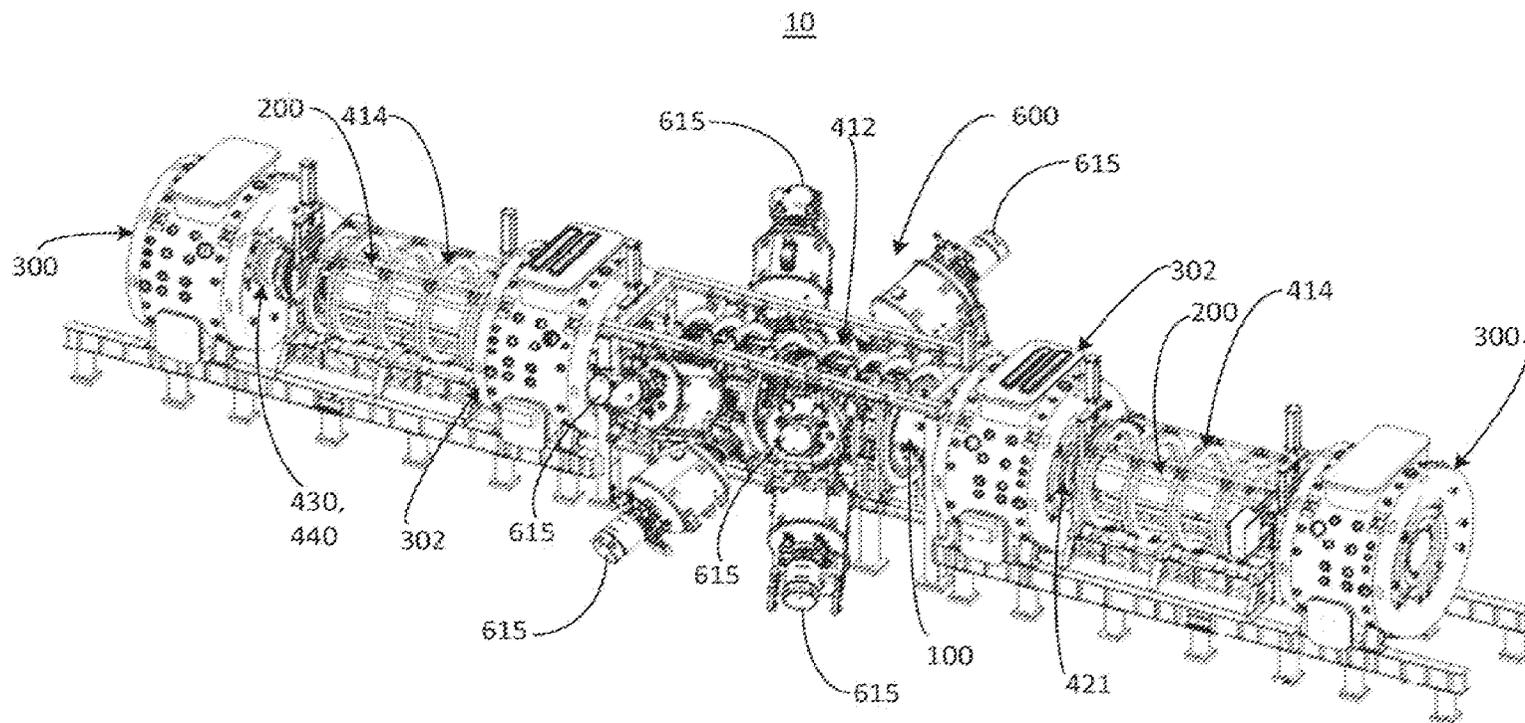
ФИГ. 3В



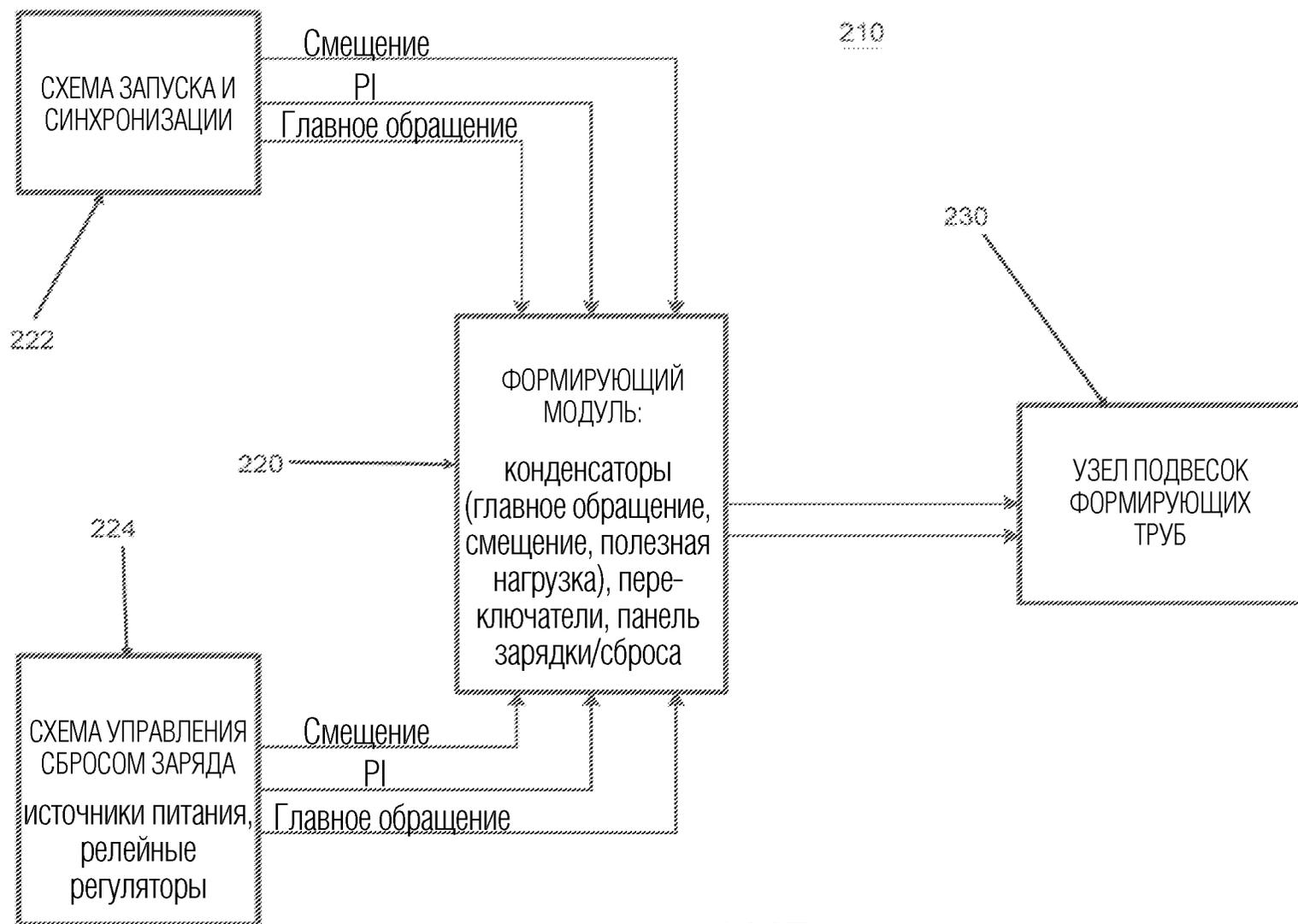
ФИГ. 3С



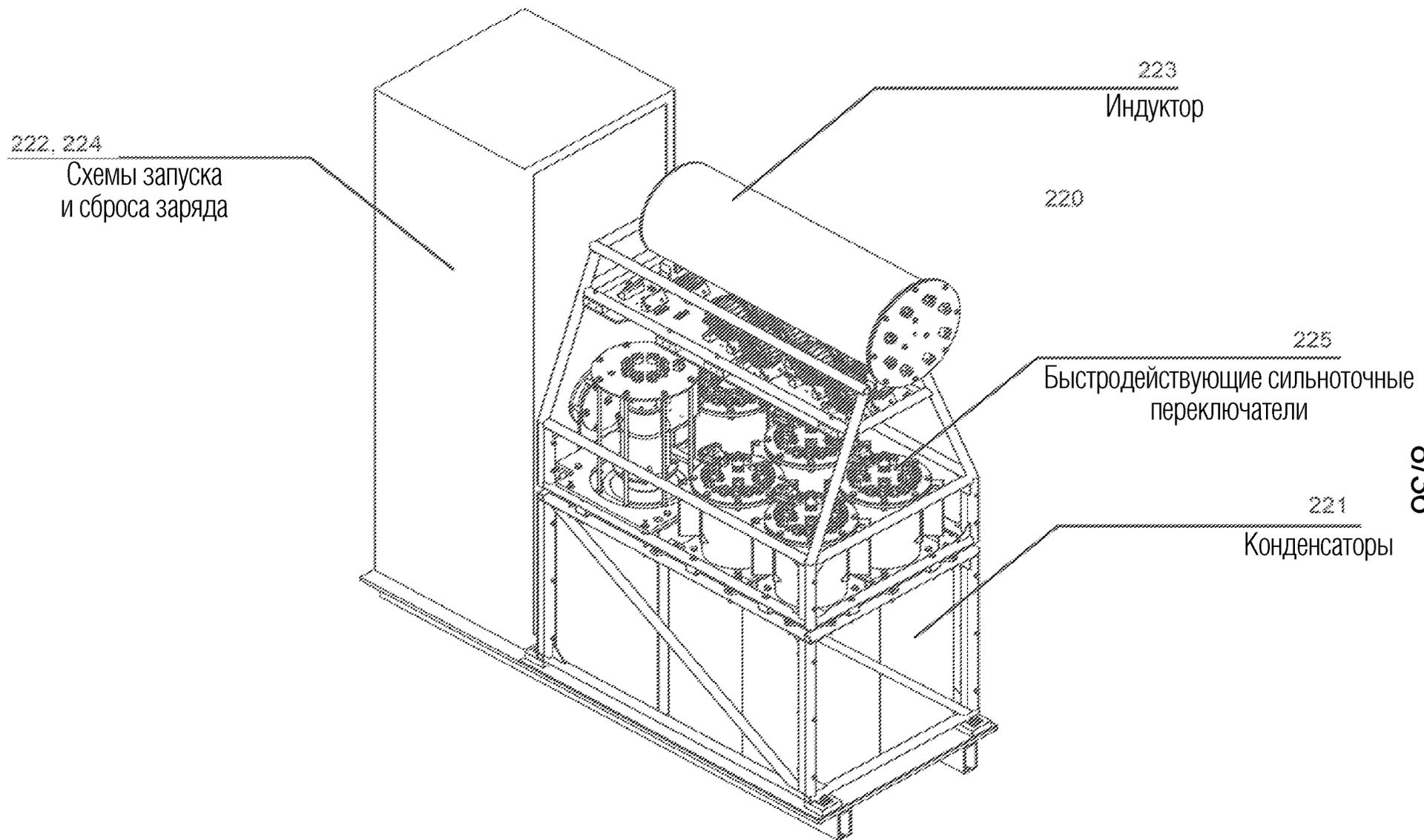
ФИГ. 3D



ФИГ. 3Е

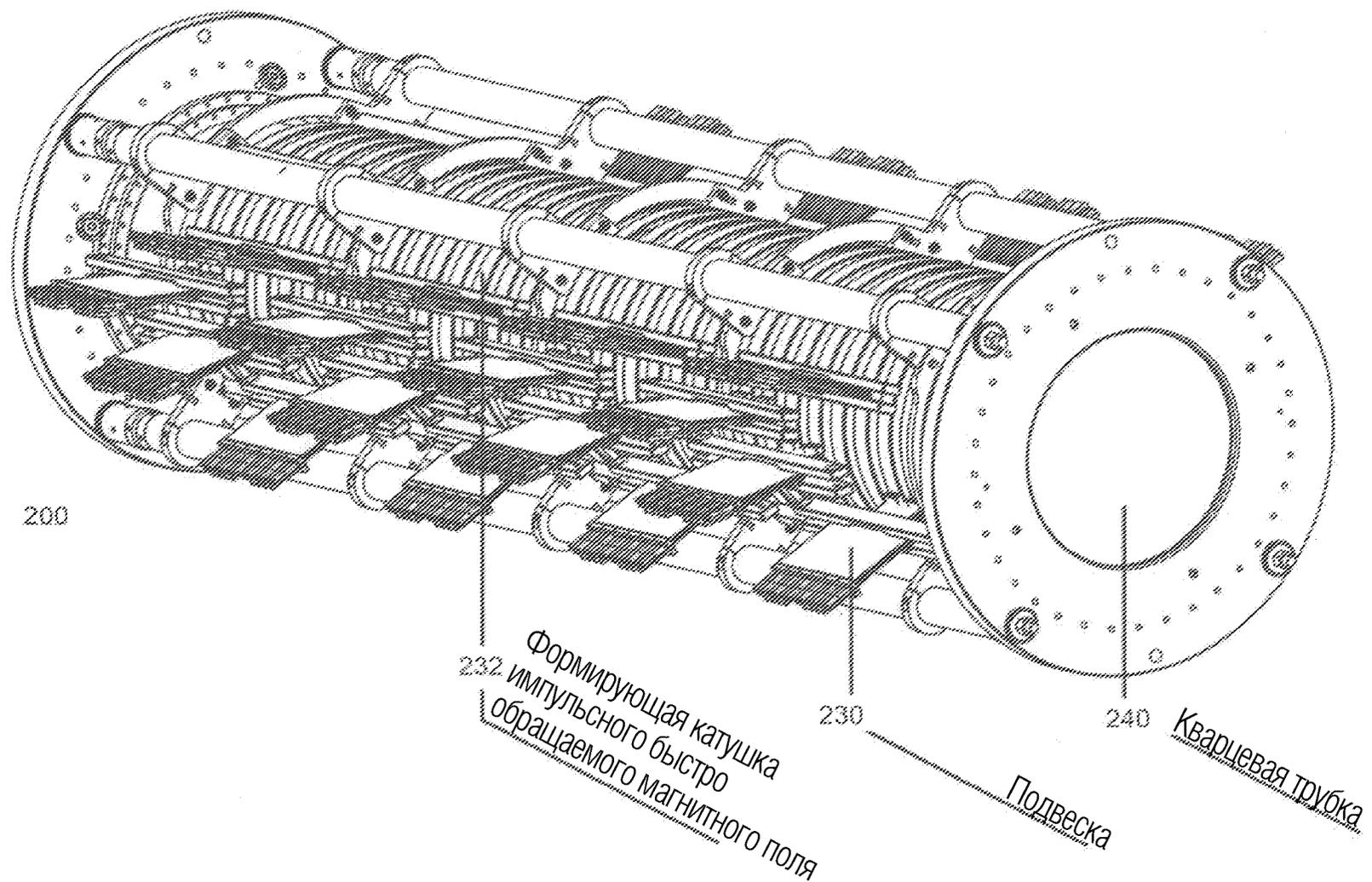


ФИГ. 4

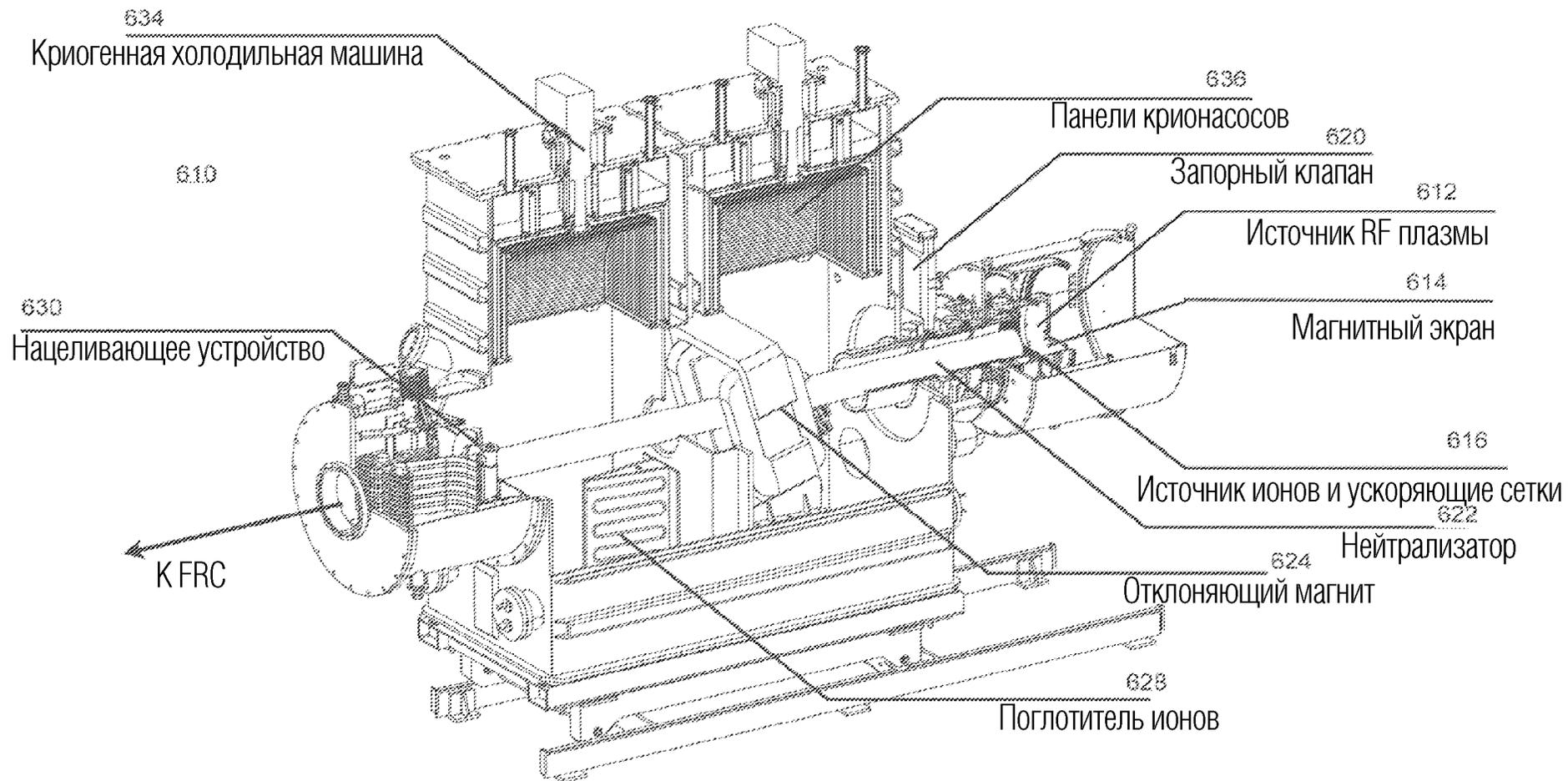


8/36

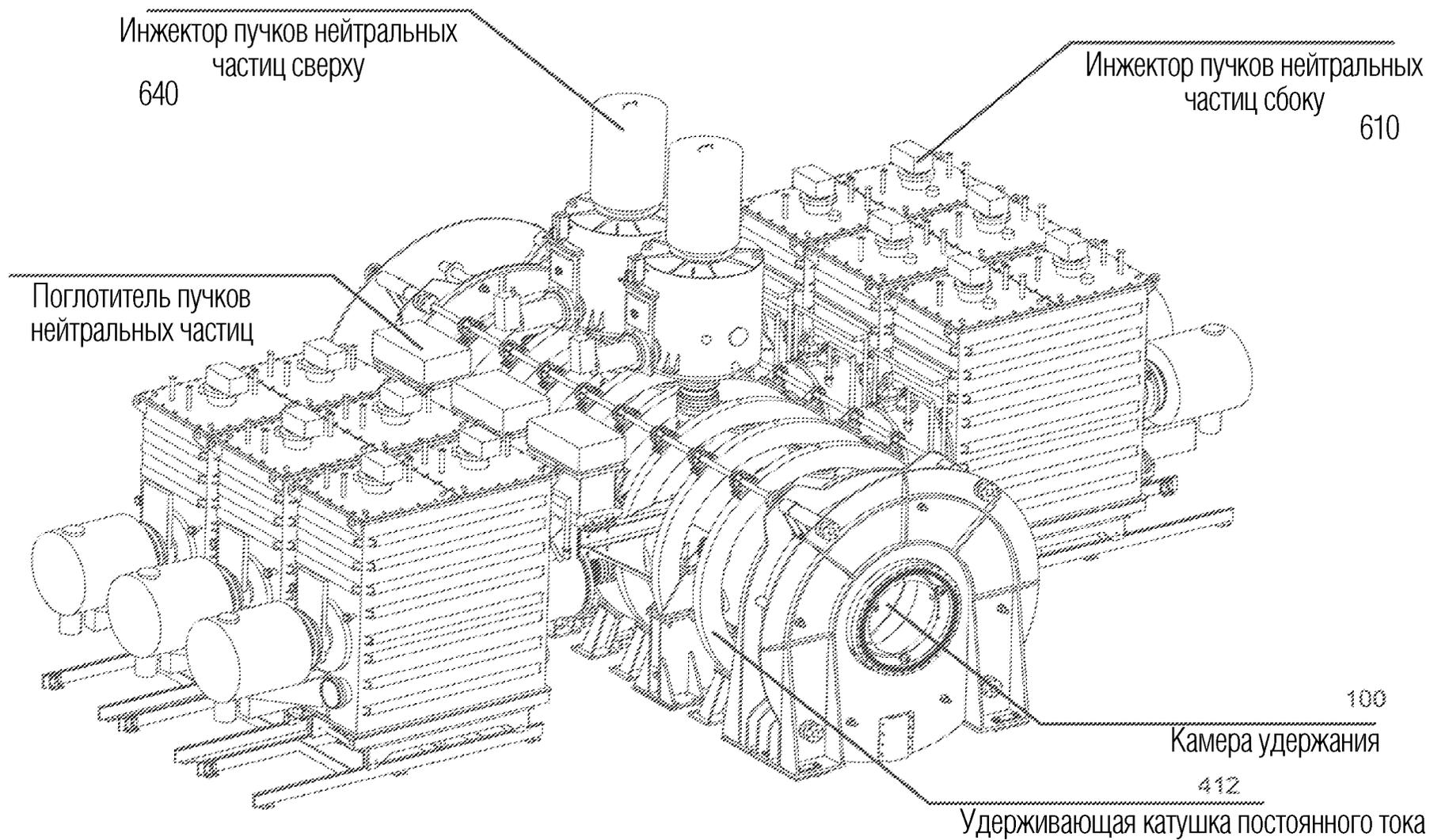
ФИГ. 5



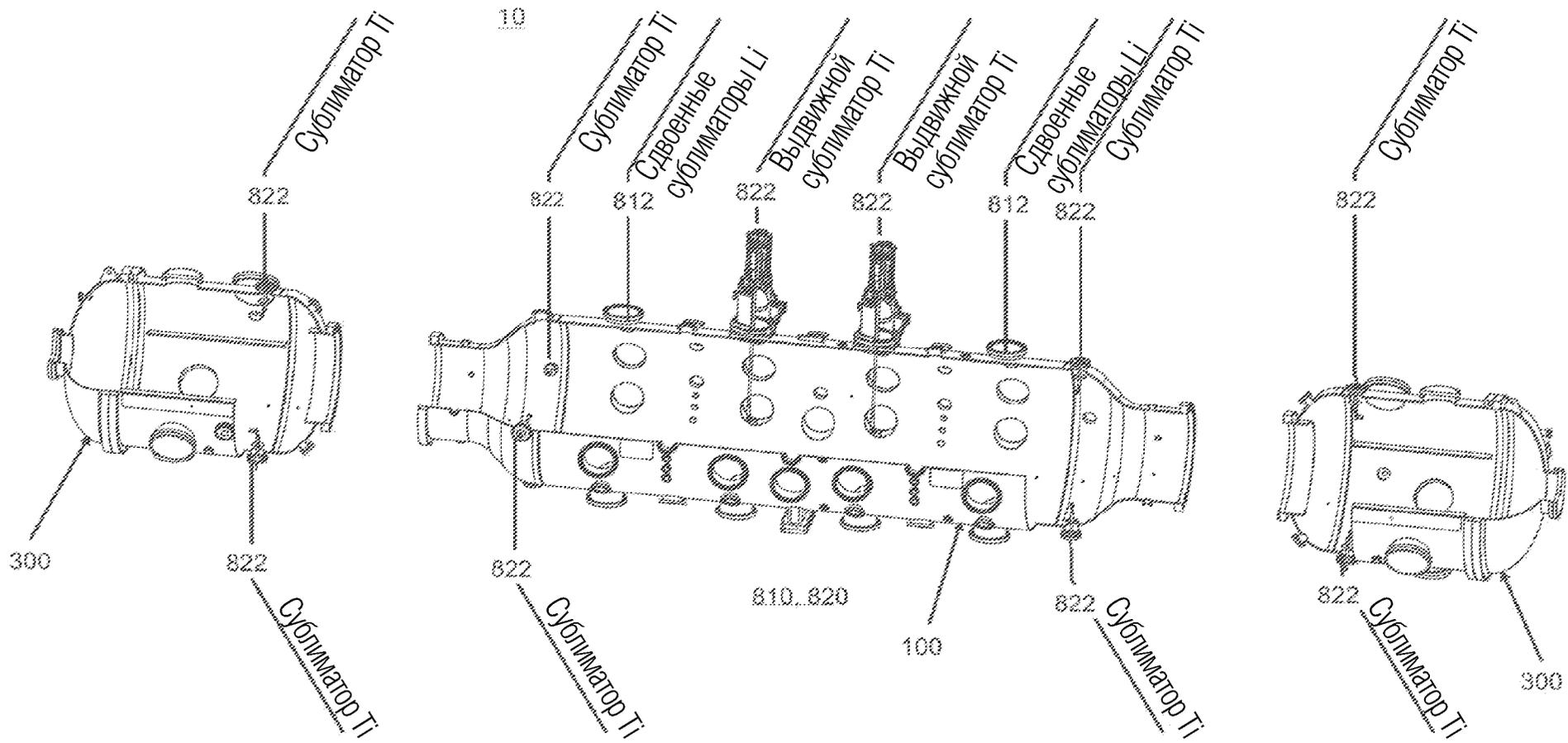
ФИГ. 6



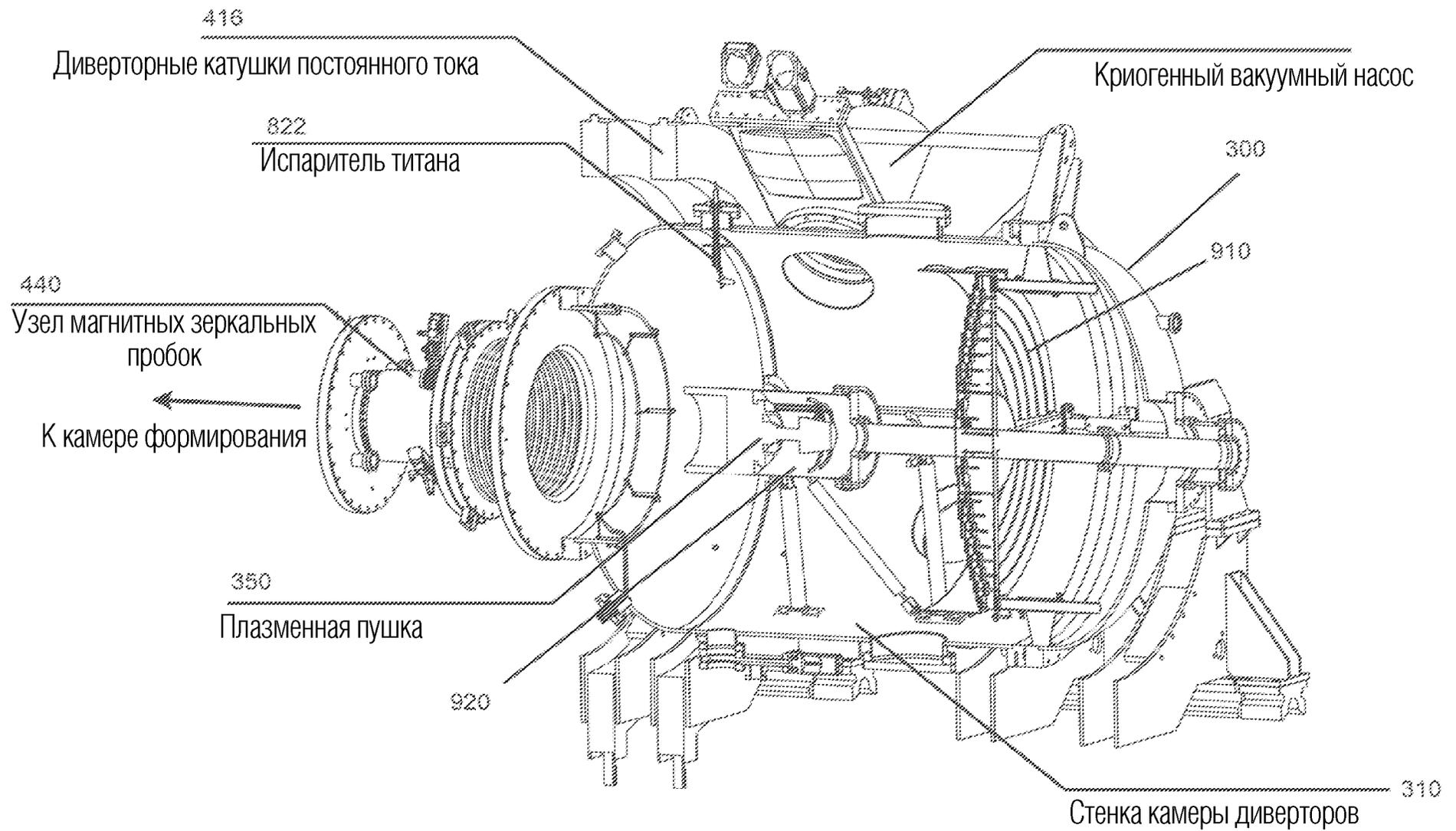
ФИГ. 7



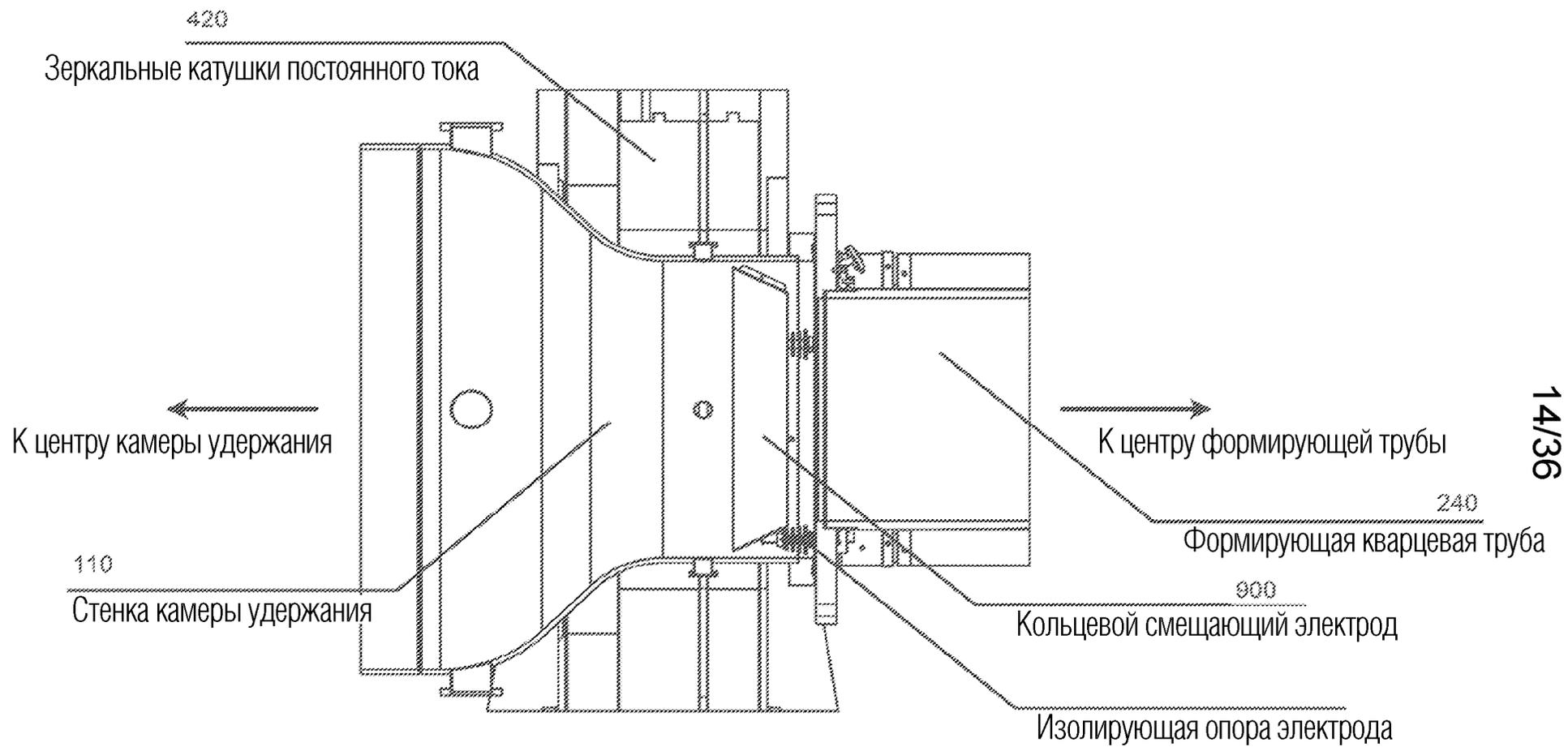
ФИГ. 8



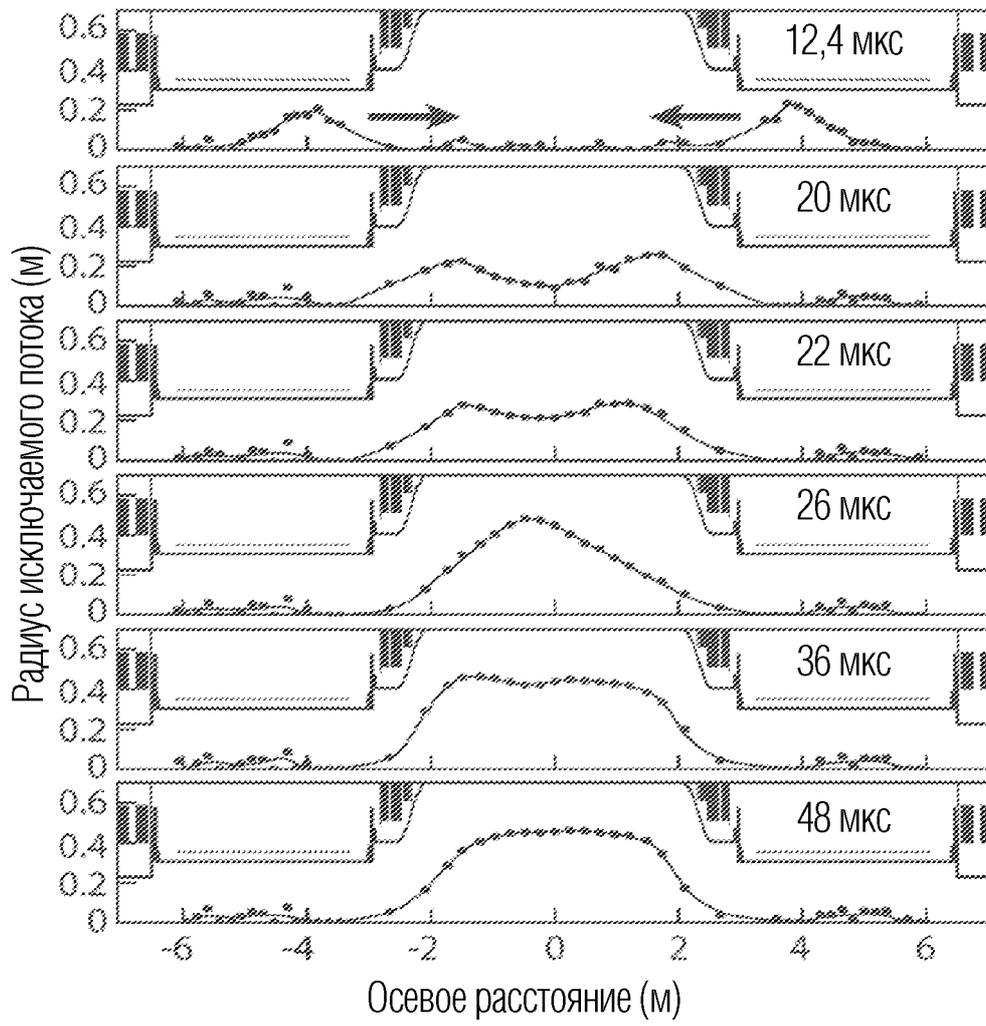
ФИГ. 9



ФИГ. 10

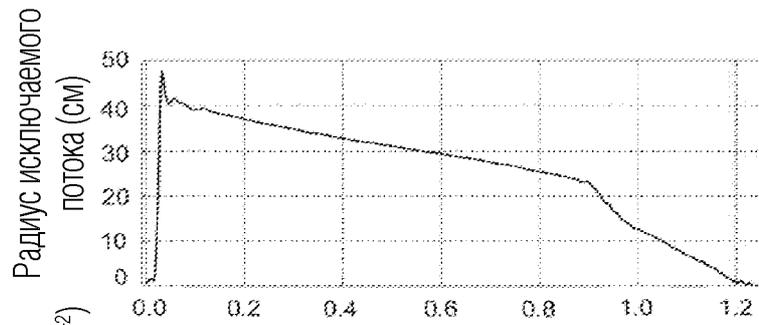


ФИГ. 11

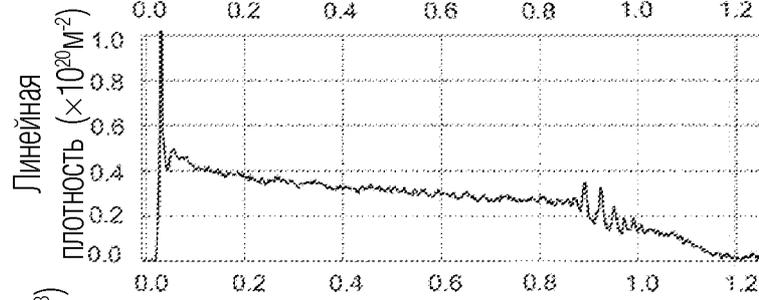


ФИГ. 12

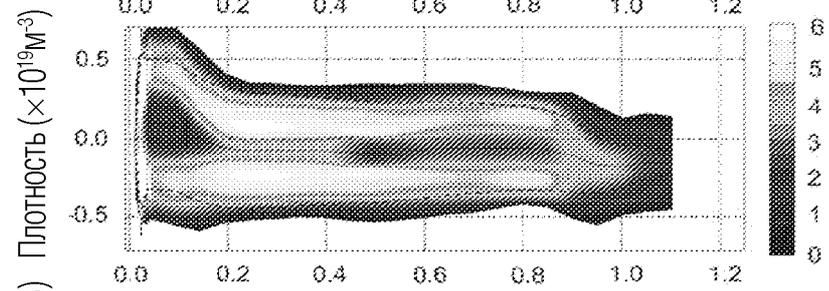
ФИГ. 13А



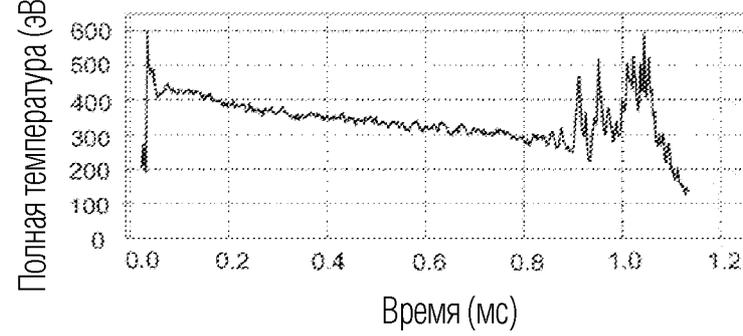
ФИГ. 13В

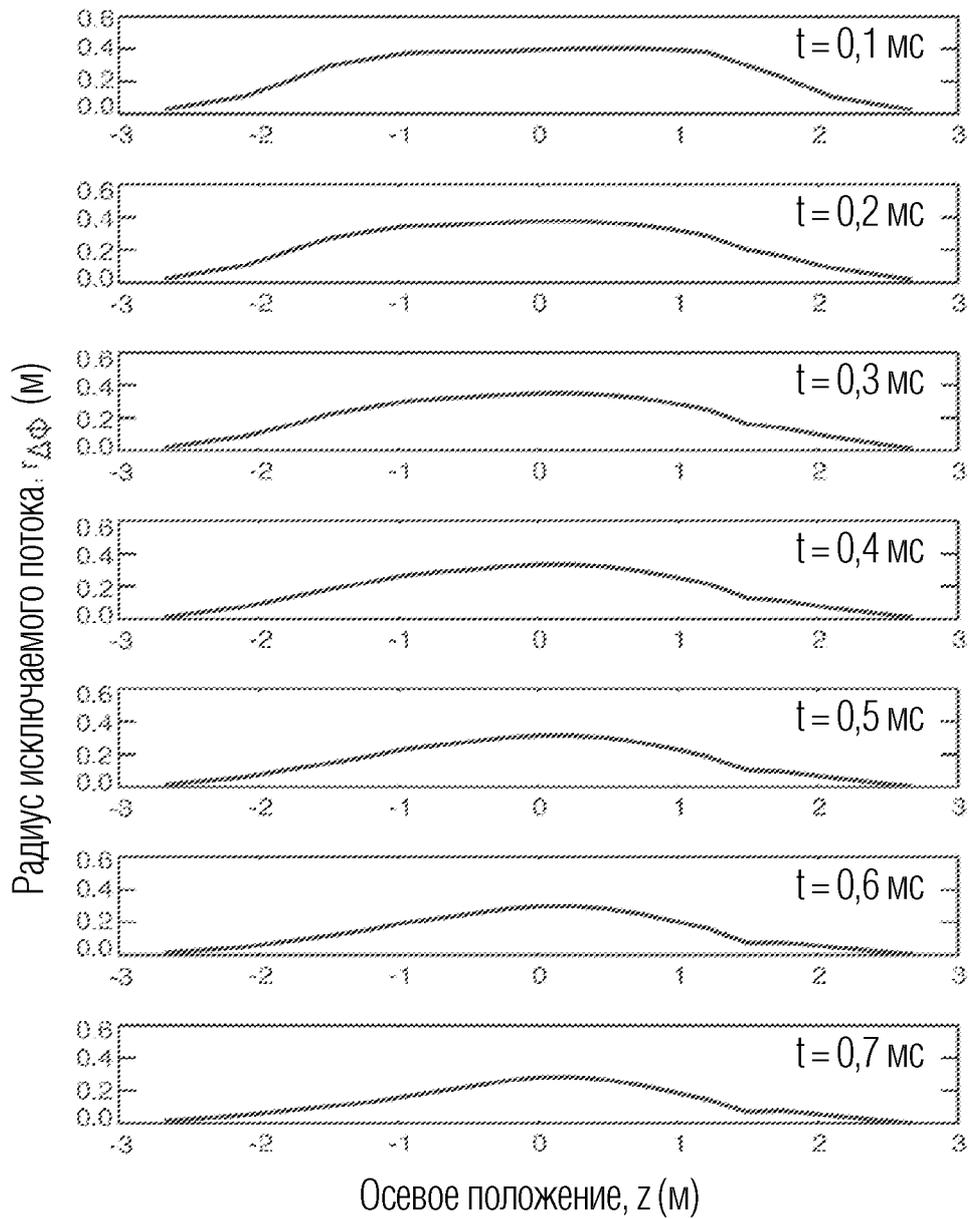


ФИГ. 13С

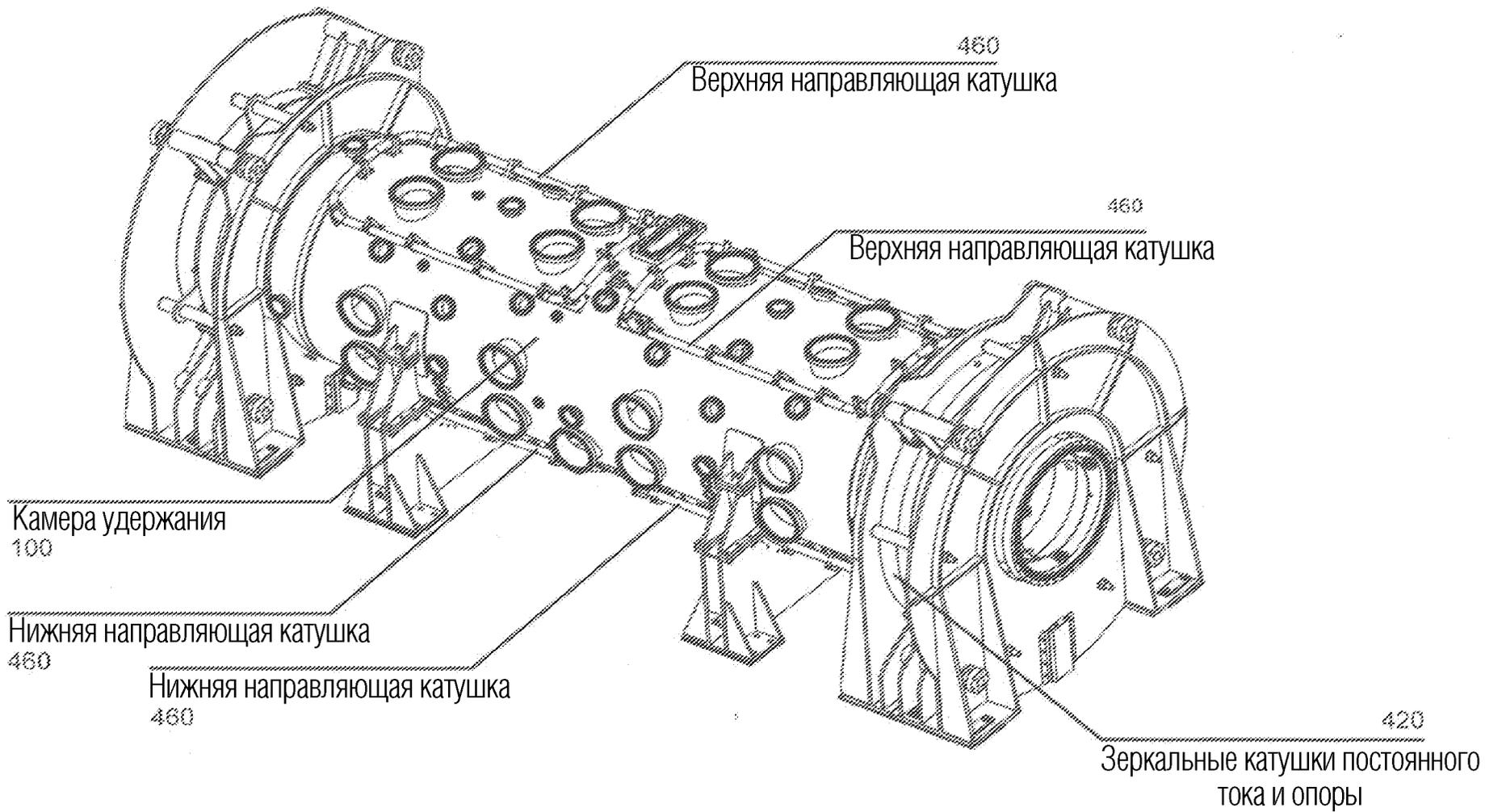


ФИГ. 13D



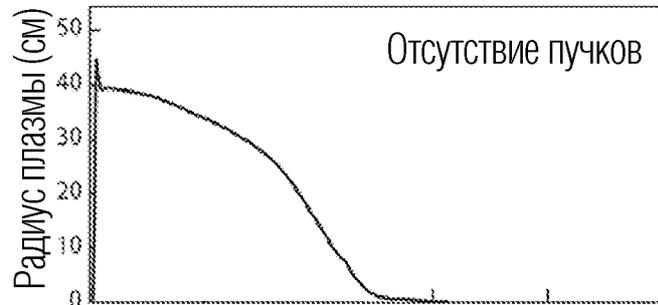


ФИГ. 14



ФИГ. 15

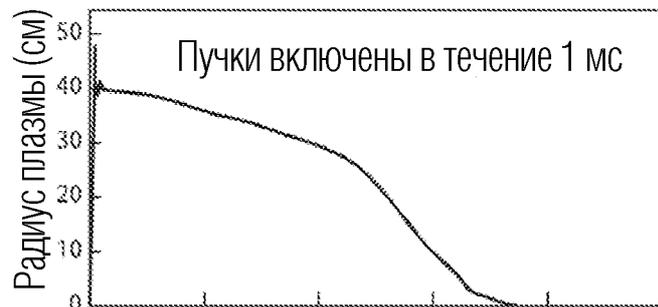
ФИГ. 16А



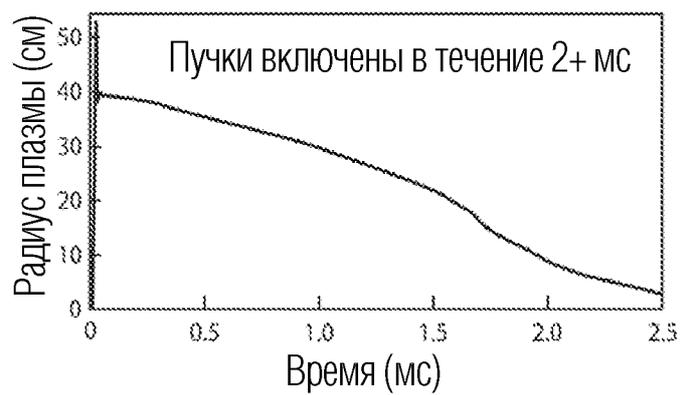
ФИГ. 16В



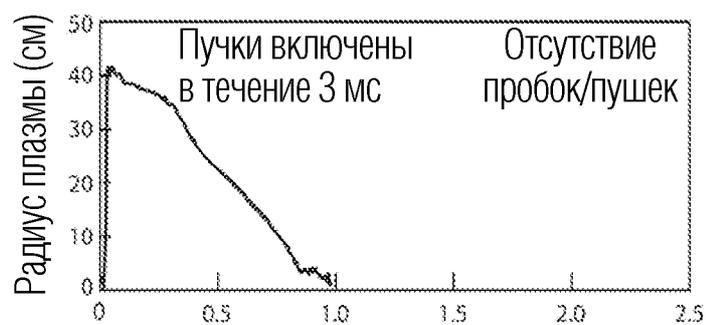
ФИГ. 16С



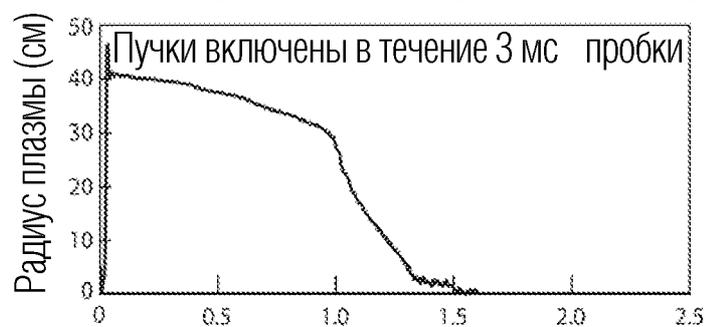
ФИГ. 16D



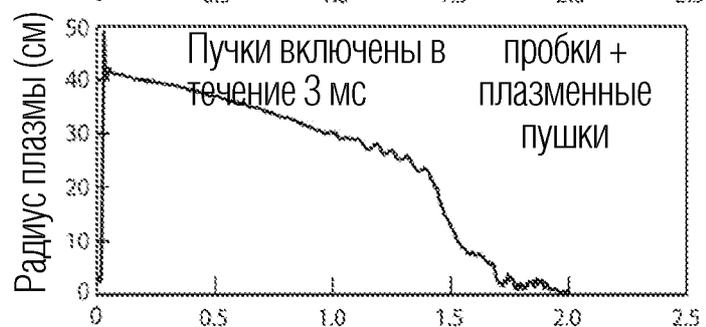
ФИГ. 17А



ФИГ. 17В



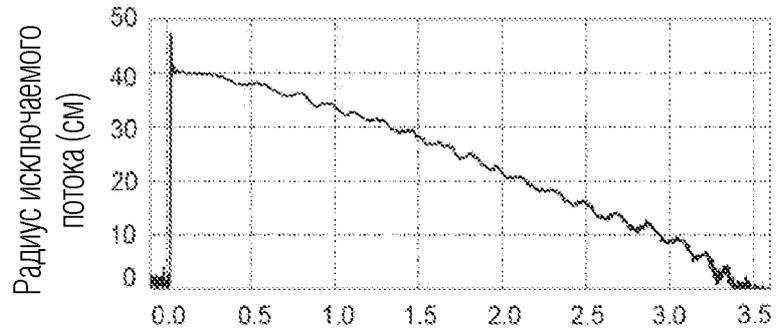
ФИГ. 17С



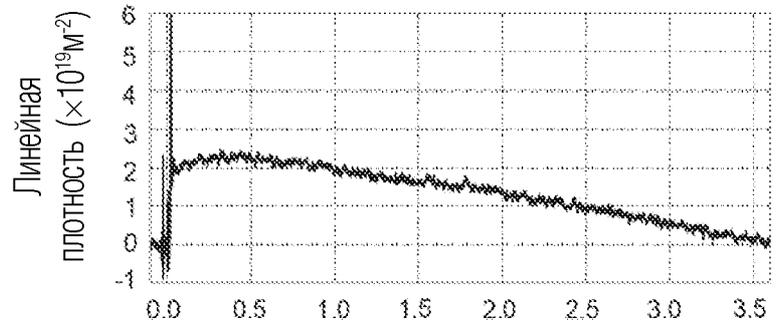
ФИГ. 17D



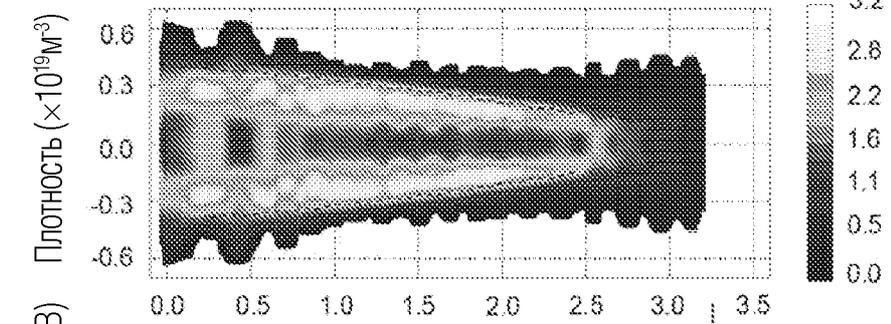
ФИГ. 18А



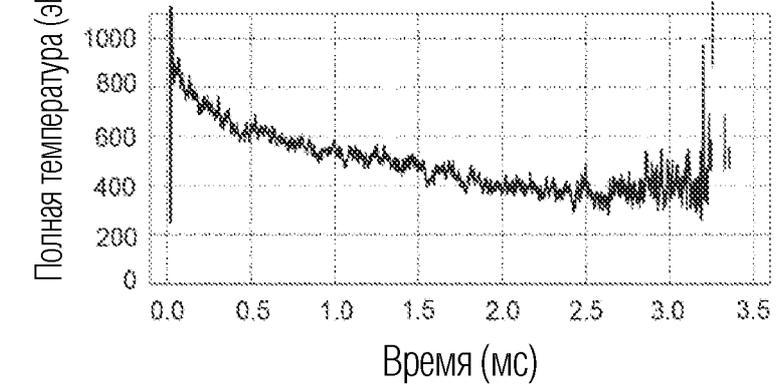
ФИГ. 18В

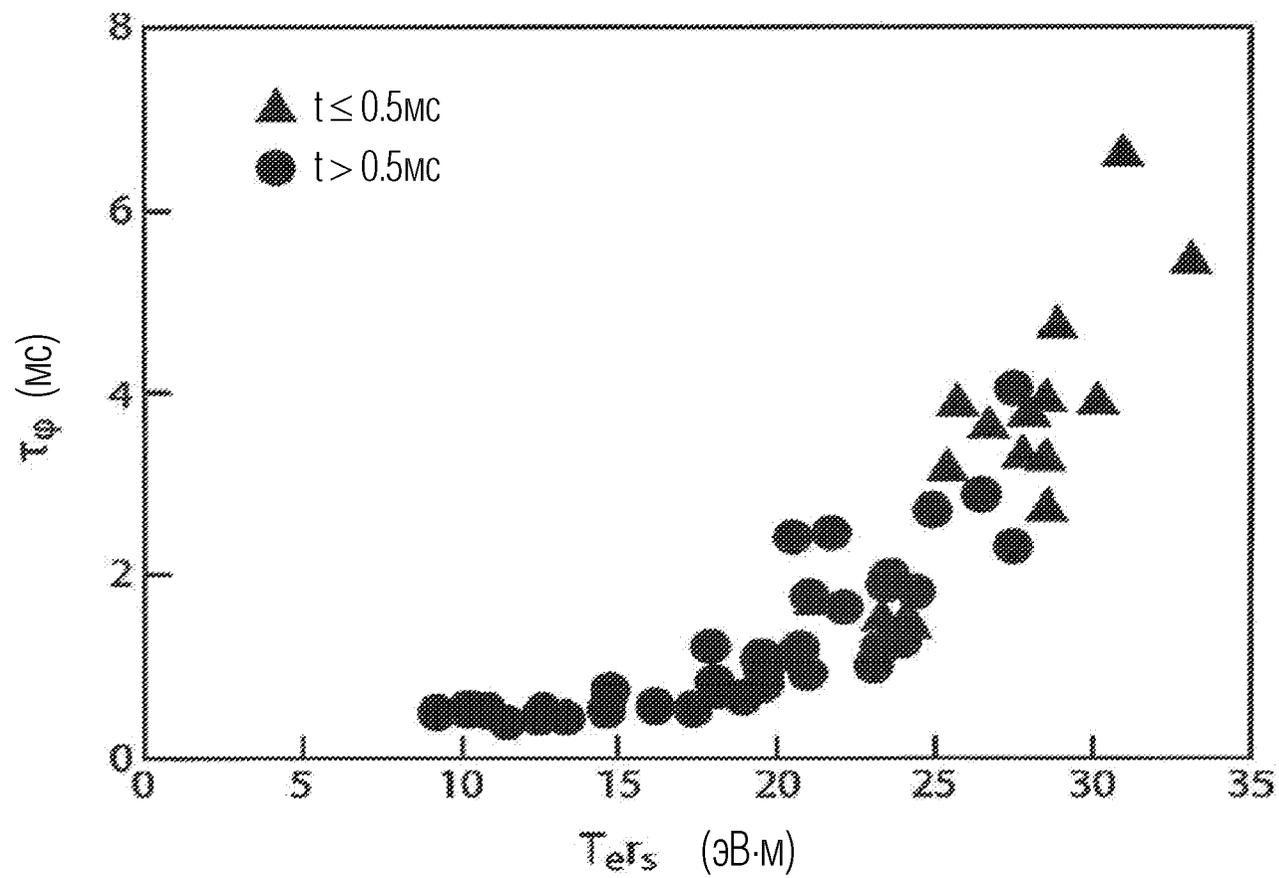


ФИГ. 18С

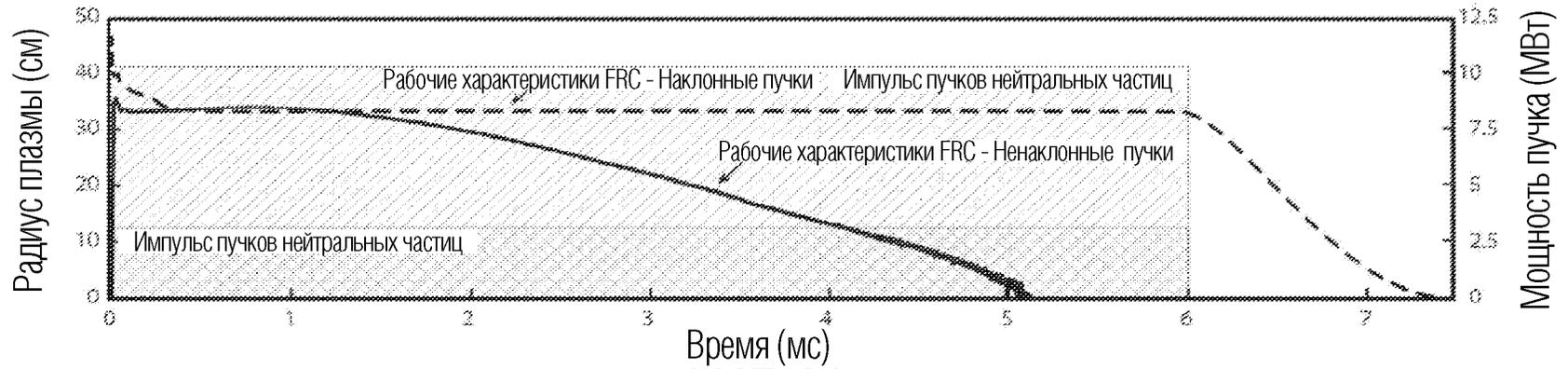


ФИГ. 18D

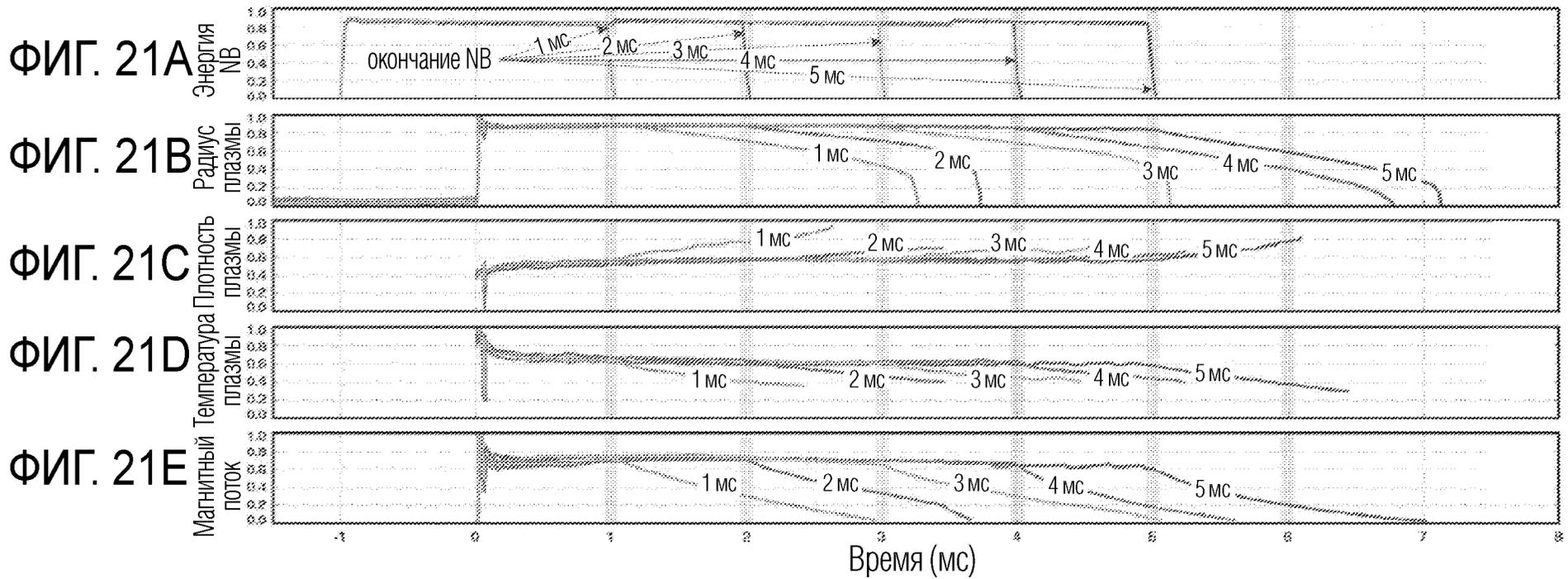


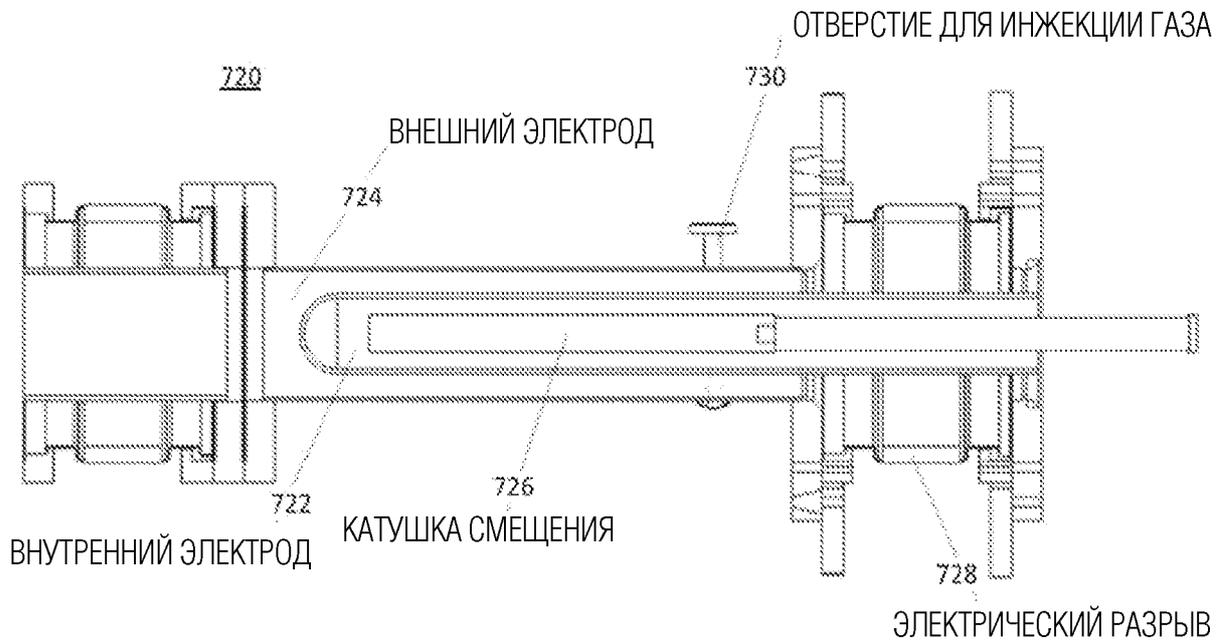


ФИГ. 19

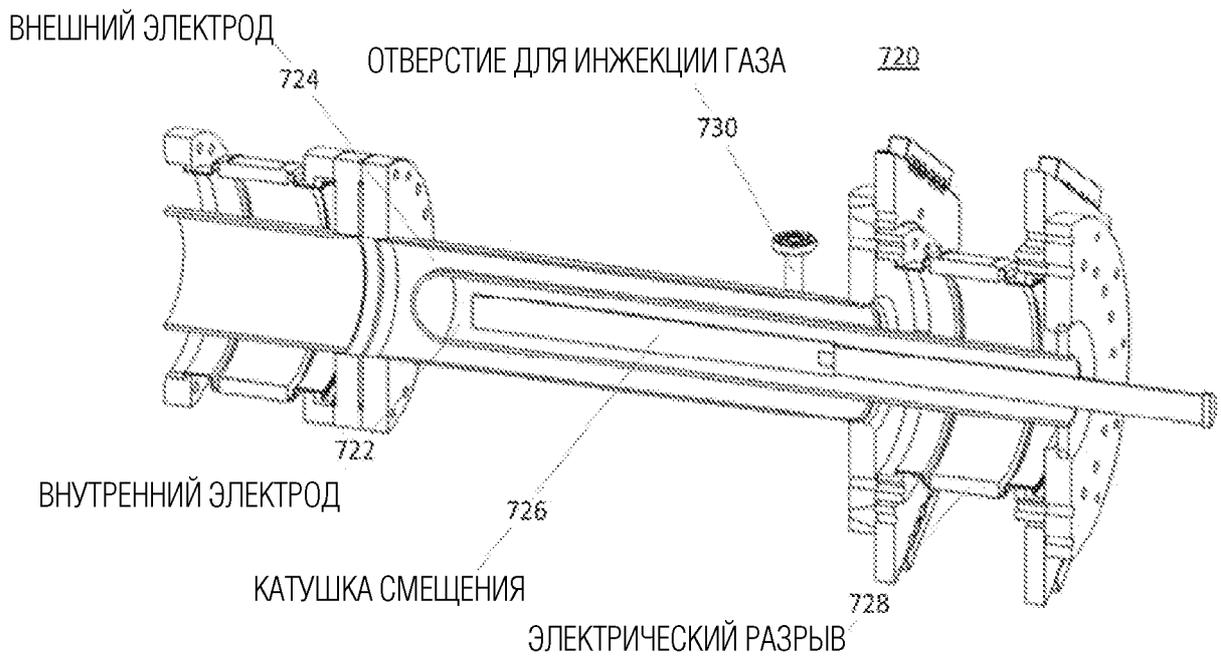


ФИГ. 20

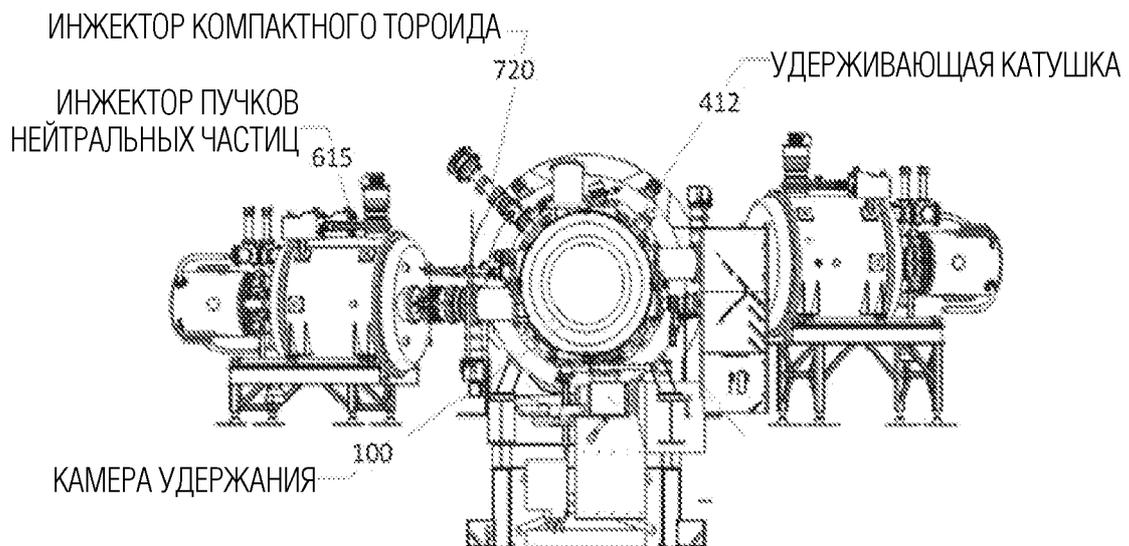
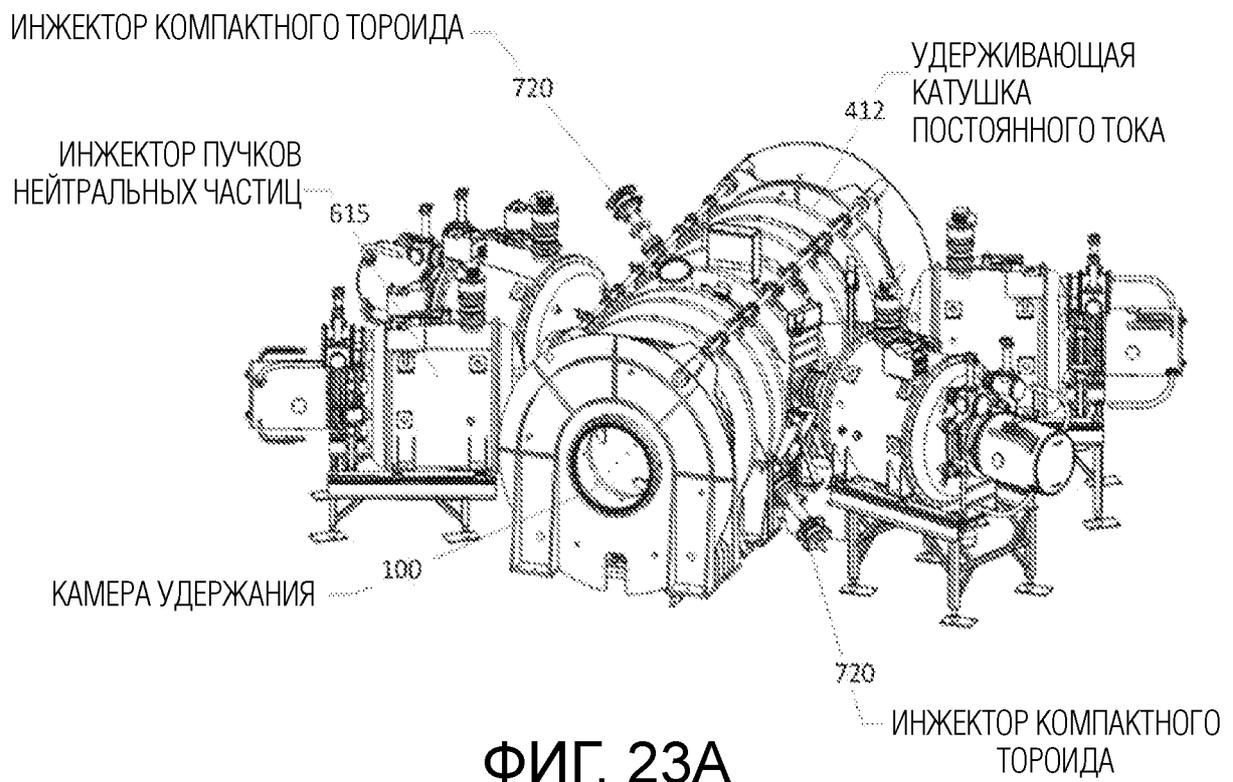


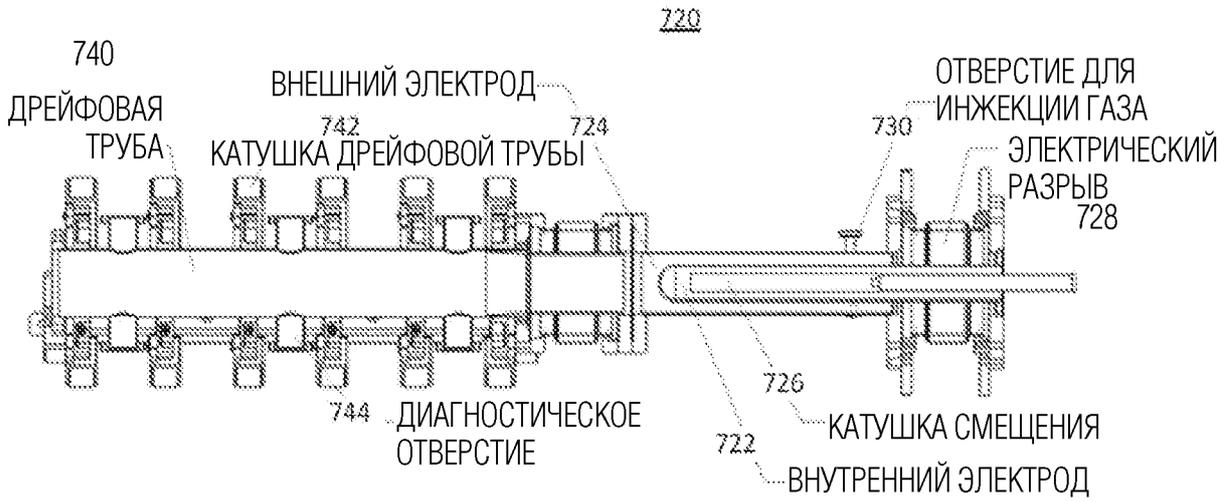


ФИГ. 22А

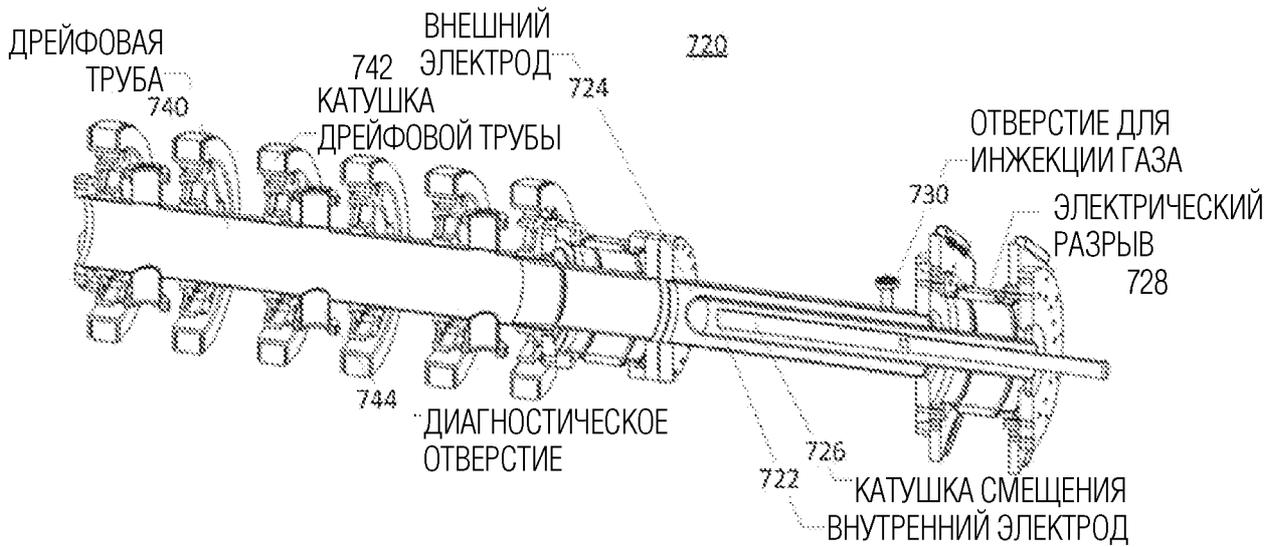


ФИГ. 22В

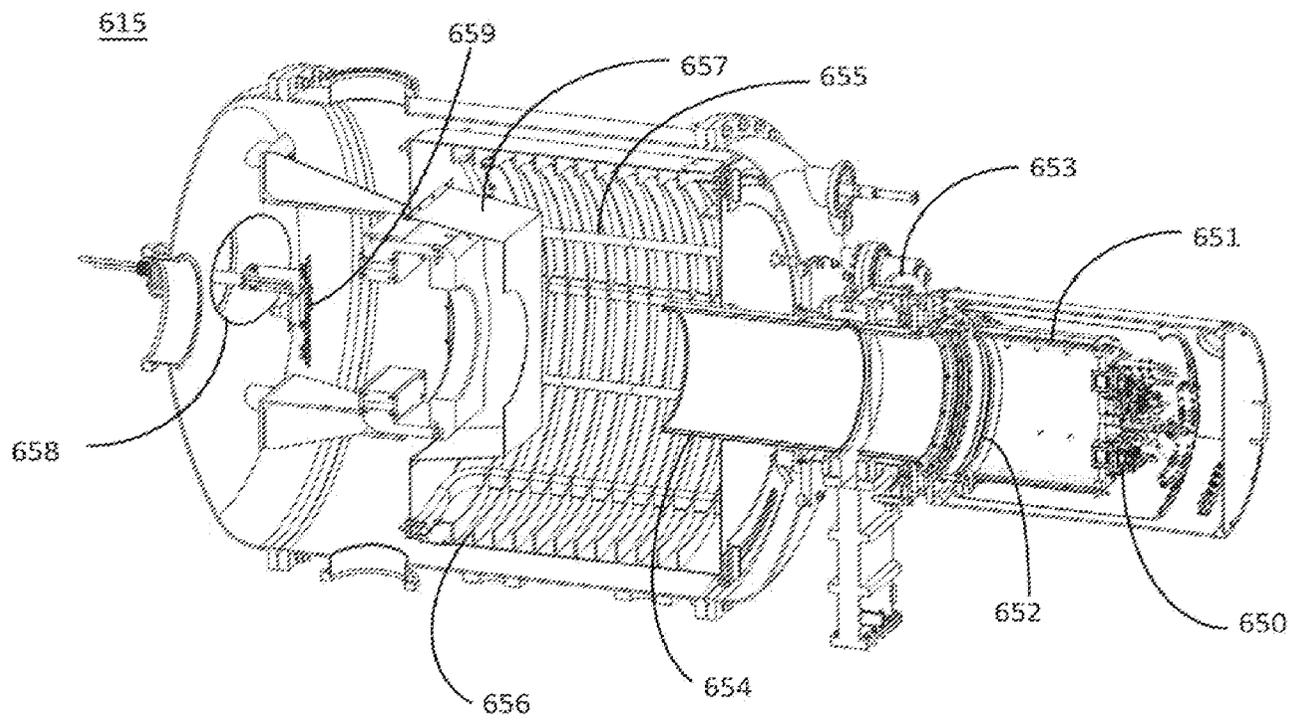




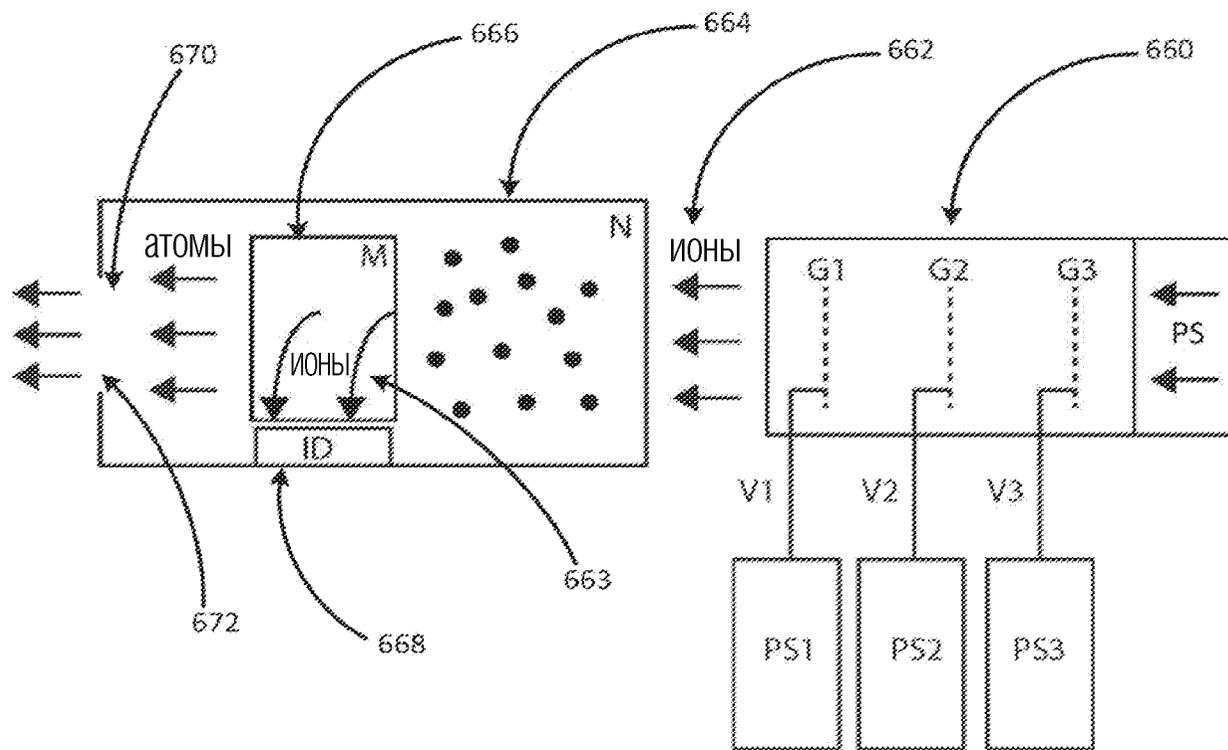
ФИГ. 24А



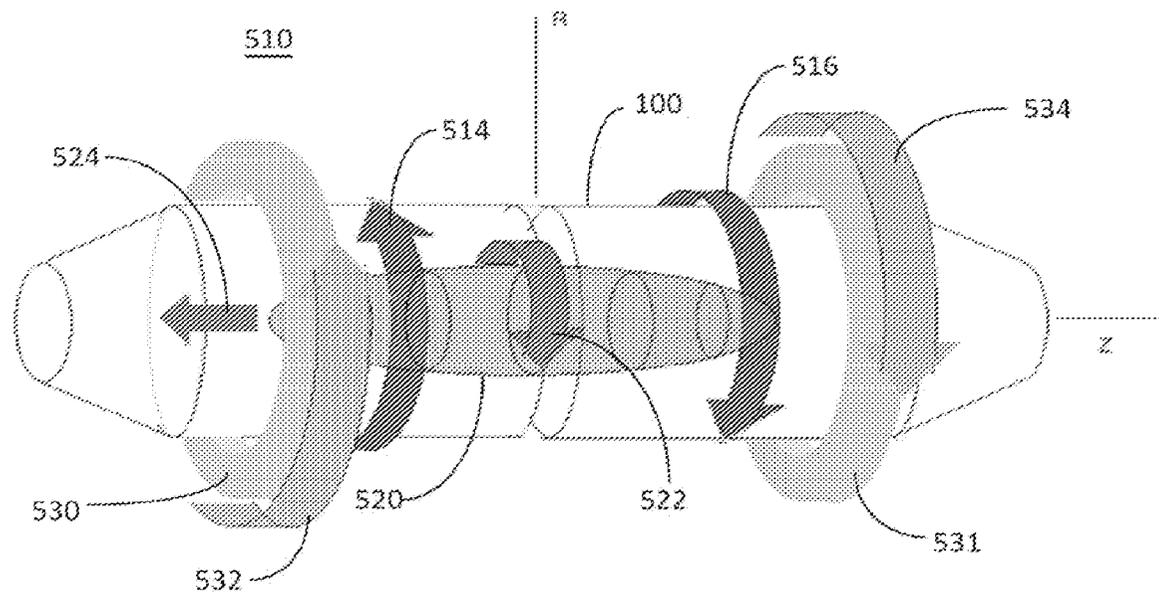
ФИГ. 24В



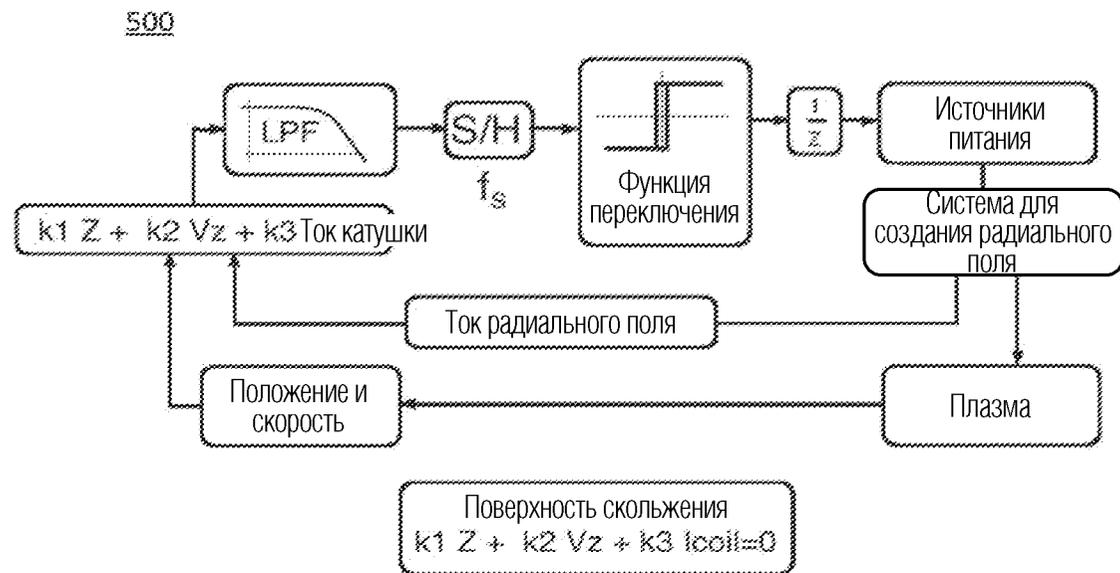
ФИГ. 25



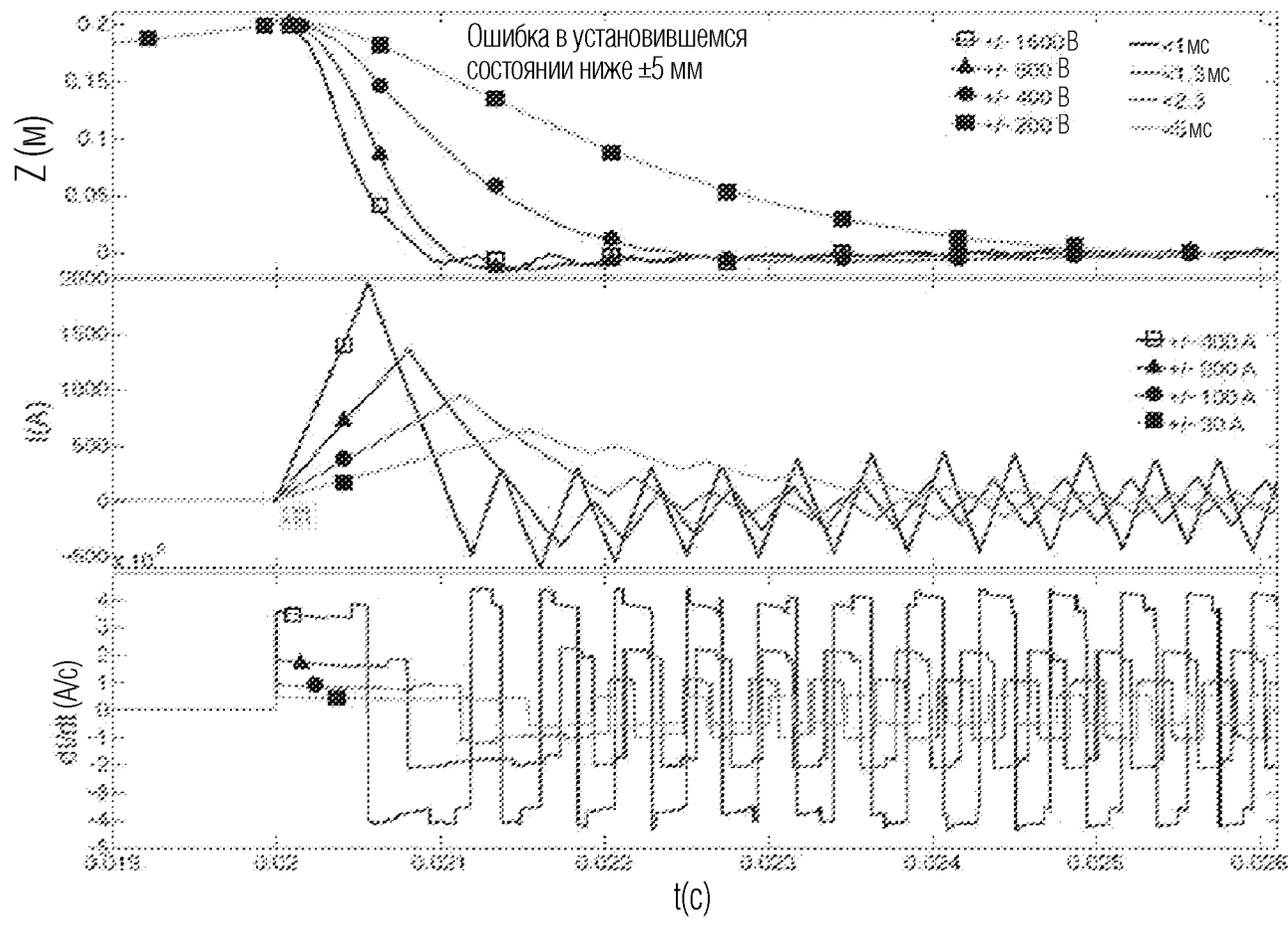
ФИГ. 26



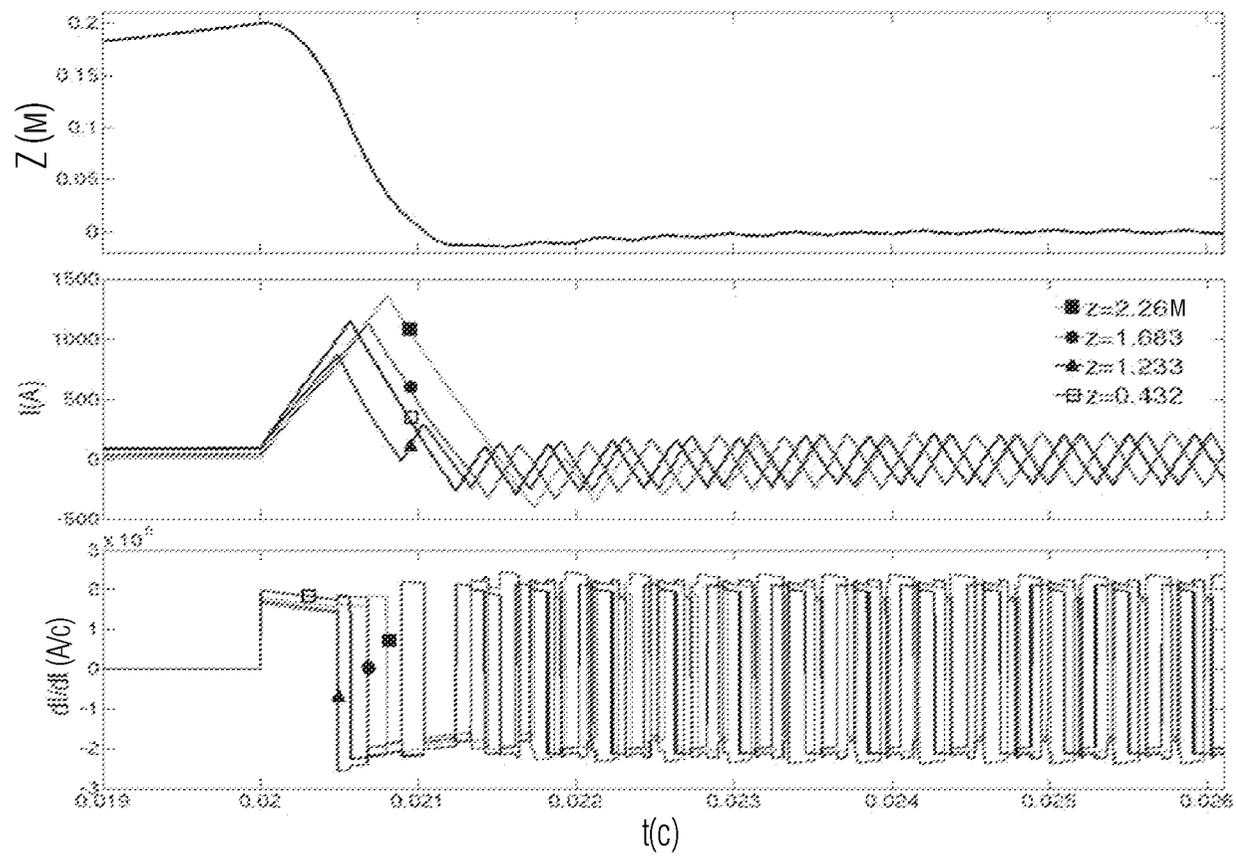
ФИГ. 27



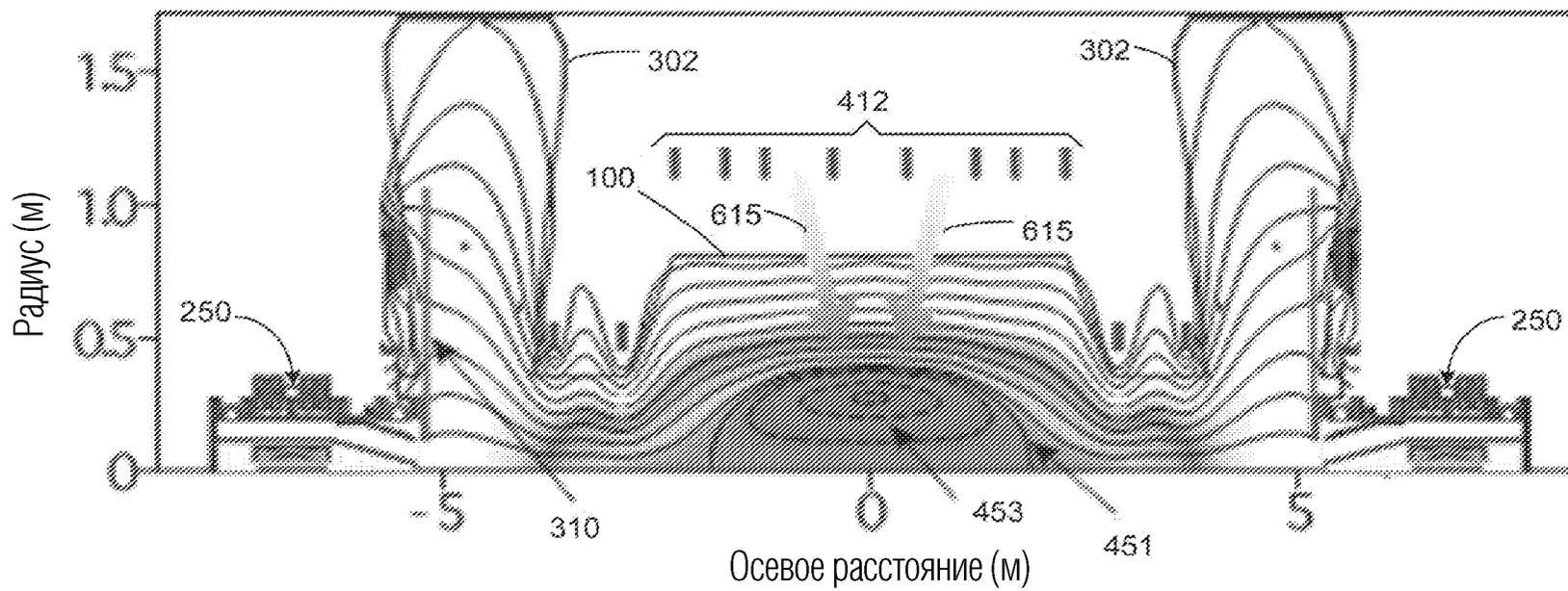
ФИГ. 28



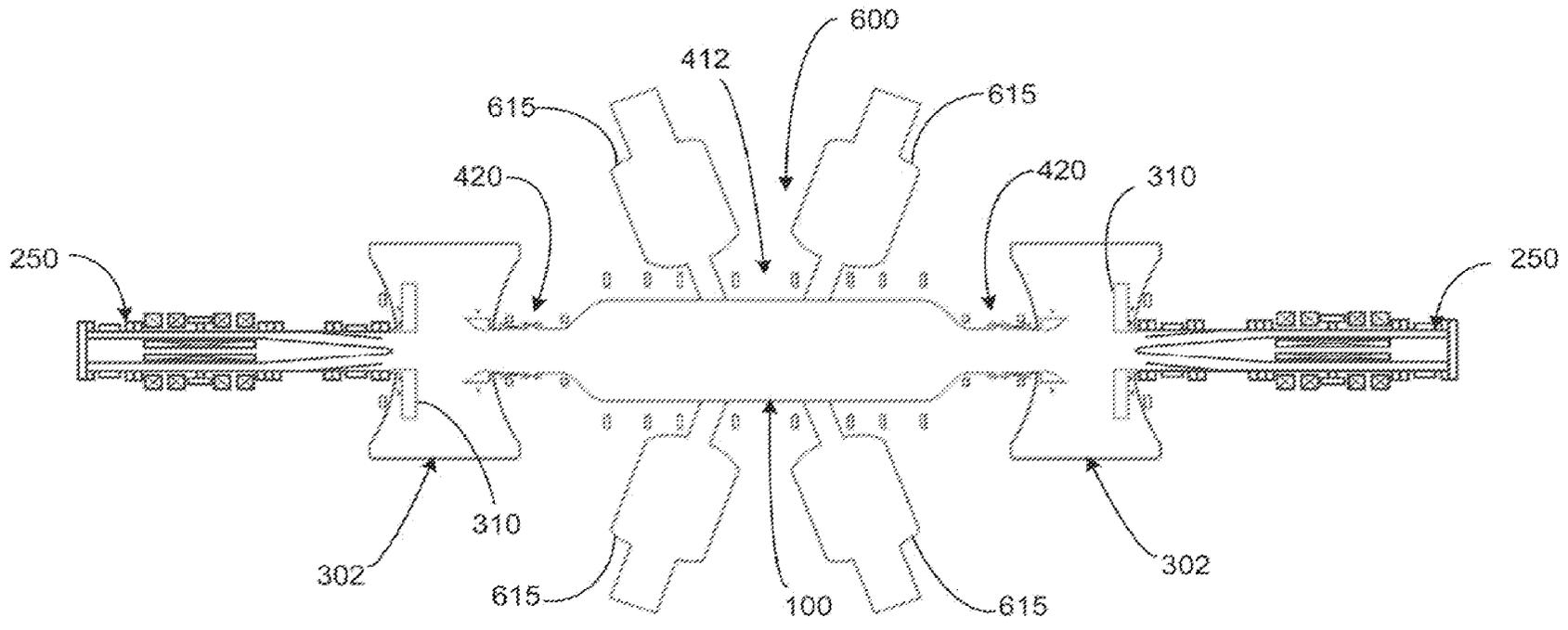
ФИГ. 29



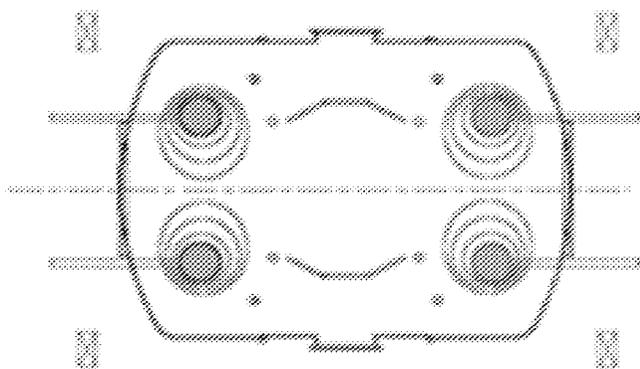
ФИГ. 30



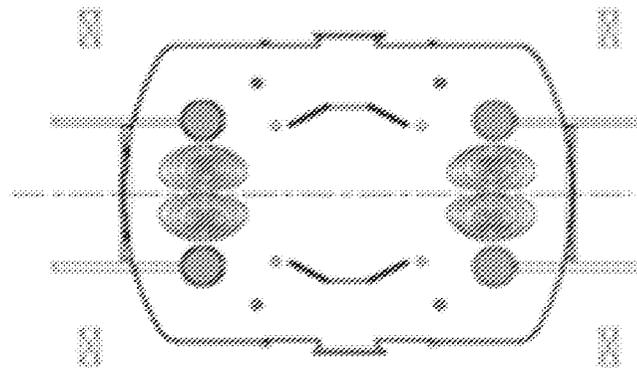
ФИГ. 31А



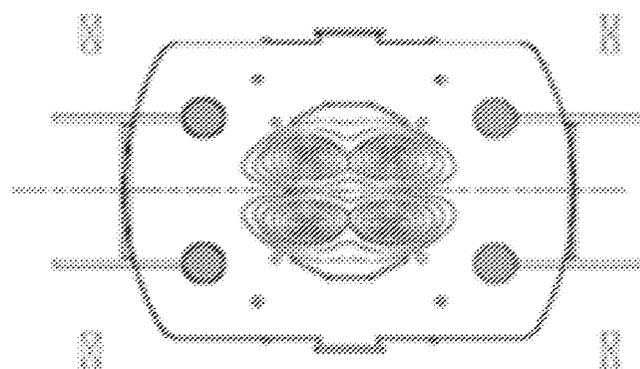
ФИГ. 31В



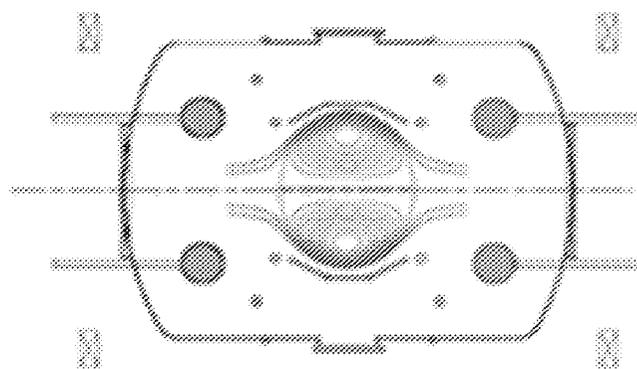
ФИГ. 32А



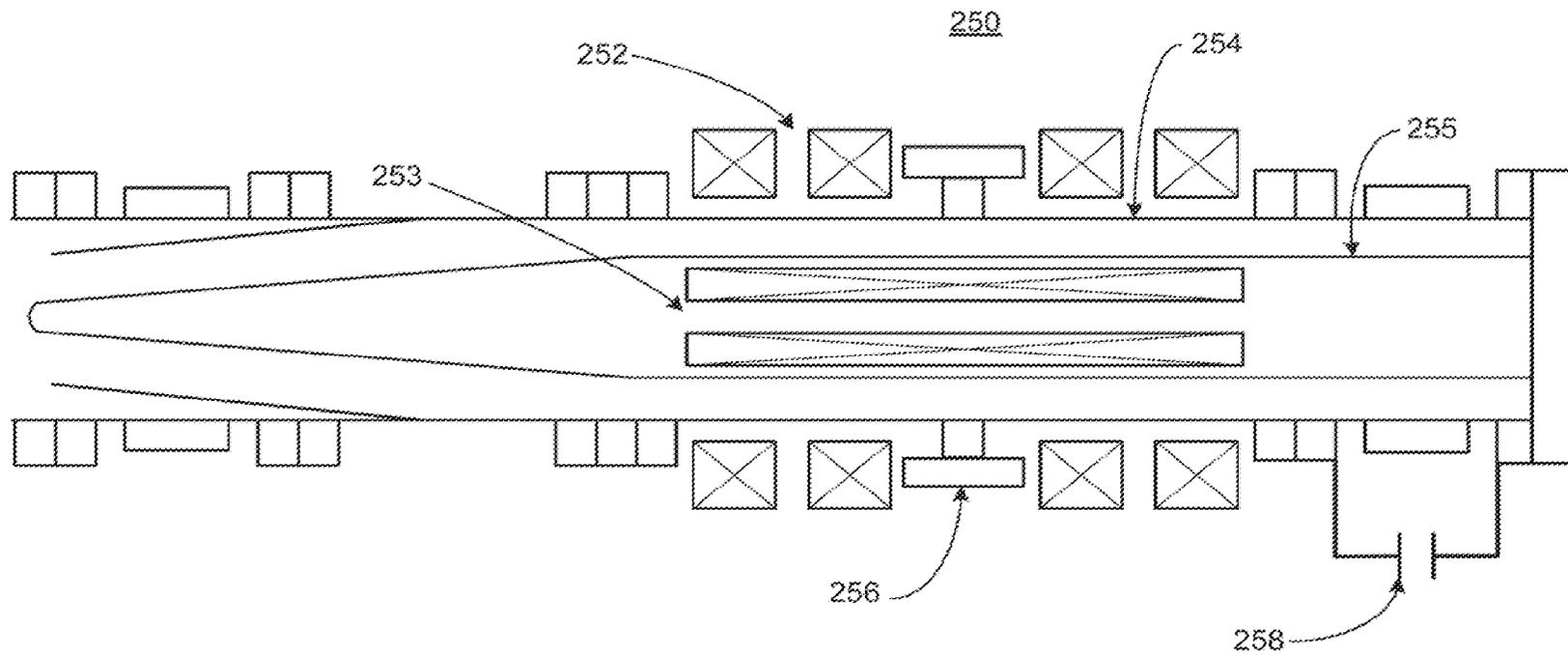
ФИГ. 32В



ФИГ. 32С



ФИГ. 32D



ФИГ. 33