

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **040251**

(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.05.13

(21) Номер заявки
201991063

(22) Дата подачи заявки
2017.10.30

(51) Int. Cl. **G21B 1/15** (2006.01)
G21B 1/00 (2006.01)
G21B 1/05 (2006.01)
G21B 1/11 (2006.01)
G21B 1/19 (2006.01)
H05H 1/10 (2006.01)
H05H 1/16 (2006.01)

(54) СИСТЕМА И СПОСОБ ДЛЯ ГЕНЕРИРОВАНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С КОНФИГУРАЦИЕЙ С ОБРАЩЕННЫМ ПОЛЕМ (FRC)

(31) 62/414,574

(32) 2016.10.28

(33) US

(43) 2019.09.30

(86) PCT/US2017/059067

(87) WO 2018/081724 2018.05.03

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ТАЭ ТЕКНОЛОДЖИЗ, ИНК. (US)

(72) Изобретатель:
**Дунаевский Александр, Путвински
Сергей, Смирнов Артём Н.,
Биндербауэр Михль В. (US)**

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

(56) US-A1-20150187443
Gota et al.: "Overview of C-2U Field-Reversed Configuration Experiments", 25 February 2016 [retrieved on 2017-12-20], retrieved from the internet: URL: http://www.iccworkshops.org/epr2016/uploads/455/epr2016_hgota_2_25_16.pdf, entire document

US-B2-6911649

US-A-4057462

US-H-H235

US-A1-20150294742

(57) Предложены системы и способы, которые облегчают формирование и поддержание FRC с превосходной устойчивостью, а также с превосходным удержанием частиц, энергии и потока, а конкретнее системы и способы, которые облегчают формирование и поддержание FRC с повышенными энергиями системы и улучшенное поддержание с использованием инжекторов нейтральных пучков, которые обладают возможностями настраиваемых энергий пучков.

B1

040251

040251

B1

Область техники изобретения

Объект изобретения, описанный здесь, относится в целом к системам магнитного удержания плазмы, имеющим конфигурацию с обращенным полем (FRC), и более конкретно к системам и способам, которые облегчают формирование и поддержание FRC с превосходной устойчивостью, а также с превосходным удержанием частиц, энергии и потока, а конкретнее к системам и способам, которые облегчают формирование и поддержание FRC с повышенными энергиями системы и улучшенное поддержание с использованием инжекторов нейтральных пучков и которые обладают возможностями настраиваемых энергий пучков.

Предпосылки изобретения

Конфигурация с обращенным полем (FRC) принадлежит классу топологий магнитного удержания плазмы, известных как компактные тороиды (КТ). Она демонстрирует преимущественно полоидальные магнитные поля и обладает нулевыми или малыми самогенерируемыми тороидальными полями (см. M. Tuszewski, Nucl. Fusion, 28, 2033 (1988)). Преимуществами такой конфигурации являются ее простая геометрия для удобства построения и обслуживания, естественный неограниченный дивертор для облегчения вывода энергии и золоудаления и очень высокое β (β - это отношение среднего давления плазмы к среднему давлению магнитного поля внутри FRC), т.е. высокая плотность энергии. Природа высокого β является преимущественной для экономичной работы и для использования передовых, анейтронных видов топлива, таких как D-He³ и p-B¹¹.

Традиционный способ формирования FRC предусматривает применение технологии 9-пинча с обращенным полем, дающей горячие высокоплотные плазмы (см. A.L. Hoffman, J.T. Slough, Nucl. Fusion, 33, 27 (1993)). Разновидностью этого является способ переноса и захвата, при осуществлении которого плазму, созданную в "источнике" тета-пинча, в большей или меньшей степени немедленно инжектируют из одного торца в камеру удержания. Затем осуществляют захват переносимого плазмоида между двумя прочными зеркалами на торцах камеры (см., например, H. Himura, S. Okada, S. Sugimoto, S. Goto, Phys. Plasmas, 2, 191 (1995)). Как только этот плазмоид оказывается в камере удержания, можно применять различные способы нагрева и возбуждения тока, такие как инжекция пучка (нейтрального или нейтрализованного), 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, они демонстрируют тенденцию допускать предпочтительное состояние плазмы (см., например, H.Y. Guo, A.L. Hoffman, K.E. Miller, L.C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett., 92, 245001 (2004)). За последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в развитии других способов формирования FRC: посредством слияния сфероматов с противоположно направленными спиральностями (см., например, Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama, T. Okazaki, Nucl. Fusion, 39, 2001 (1999)) и посредством возбуждения тока вращающимися магнитными полями (ВМП) (см., например, I.R. Jones, Phys. Plasmas, 6, 1950 (1999)), который также обеспечивает дополнительную устойчивость.

Недавно был существенно доработан метод столкновения и слияния, 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 сливаются, формируя составную FRC. При разработке и успешном проведении одного из наиболее крупномасштабных к настоящему времени экспериментов с FRC обычный способ столкновения и слияния показал, что дает устойчивые высокотемпературные FRC с большим временем жизни и большой плотностью потока частиц (см., например, M. Binderbauer, H.Y. Guo, M. Tuszewski et al., Phys. Rev. Lett., 105, 045003 (2010)).

FRC состоят из тора замкнутых силовых линий внутри сепаратрисы и кольцевого граничного слоя на незамкнутых силовых линиях только снаружи от сепаратрисы. Граничный слой сходится в струи за пределами длины FRC, обеспечивая естественный дивертор. Топология FRC совпадает с топологией плазмы зеркал с обращенным полем. Однако существенное различие заключается в том, что плазма FRC имеет β около 10. Собственное слабое внутреннее магнитное поле обеспечивает определенную местную популяцию частиц, обладающих определенной кинетической энергией, т.е. частиц с большими ларморовскими радиусами по сравнению с малым радиусом FRC. Очевидно, что именно эти сильные кинетические эффекты вносят по меньшей мере частичный вклад в общую устойчивость разработанных в прошлом и современных FRC, таких как получаемые в эксперименте по столкновению и объединению.

В экспериментах с типичными FRC, разработанными в прошлом, доминировали конвективные потери, при этом удержание энергии определялось в значительной степени переносом частиц. Частицы диффундируют из ограниченного сепаратрисой объема главным образом радиально, а потом происходят их аксиальные потери в граничном слое. Соответственно удержание FRC зависит от свойств областей как замкнутых, так и незамкнутых силовых линий поля. Время диффузии частиц наружу из объема, очерченного сепаратрисой, составляет $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$ ($a = r_c/4$, где r_c - центральный радиус сепаратрисы), где D_{\perp} - характеристический коэффициент диффузии, такой как $D_{\perp} \sim 12,5p_{ie}$, причем p_{ie} представляет собой

гирорадиус ионов, оцениваемый в прикладываемом извне магнитном поле. В экспериментах с FRC, разработанных в прошлом, время τ_{\parallel} удержания частиц граничного слоя по существу представляет собой время осевого пробега. В установившемся состоянии баланс между радиальными и осевыми потерями частиц дает длину градиента плотности у сепаратрисы, составляющую $\delta \sim (D \perp \tau_{\parallel})^{1/2}$. Временные масштабы удержания частиц в FRC составляют $(\tau \perp \tau_{\parallel})^{1/2}$ для FRC, разработанных в прошлом, которые имеют существенную плотность у сепаратрисы (см., например, M. TUSZEWSKI, "Field Reversed Configurations", Nucl. Fusion, 28, 2033 (1988)).

Другим недостатком известных конструкций систем FRC была потребность в использовании внешних мультиполей для управления неустойчивостями вращения, такими как быстрорастущие обменные неустойчивости при $n=2$. Таким образом, типичные прикладываемые извне квадрупольные поля обеспечивали требуемое магнитное, восстанавливающее давление для остановки нарастания этих неустойчивых режимов. Хотя этот метод подходит для управления устойчивостью термической основной плазмы, он создает серьезную проблему для FRC с большей кинетической энергией или усовершенствованных гибридных FRC, где заселение высококинетическими частицами с большой кинетической энергией и орбитами больших радиусов сочетается с обычной термической плазмой. В этих системах искажения осесимметричного магнитного поля из-за таких мультипольных полей приводит к исключительно большим потерям быстрых частиц за счет бесстолкновительной стохастической диффузии, являющейся следствием утраты сохранения канонического кинетического момента. Таким образом, новое решение, заключающееся в том, чтобы обеспечить управление устойчивостью без интенсификации диффузии любых частиц, является важным для получения преимуществ более высокого технического потенциала этих концепций усовершенствованных FRC, не исследованных ранее.

Поэтому в свете вышеизложенного желательно улучшить поддержание FRC, чтобы использовать FRC, работающие в установившемся состоянии, с помощью систем повышенной энергии как путь к активной зоне реактора для синтеза легких ядер с целью выработки энергии в будущем.

Сущность изобретения

Варианты осуществления настоящего изобретения, предложенные здесь, направлены на разработку систем и способов, которые облегчают формирование и поддержание FRC с превосходной устойчивостью, а также превосходным удержанием частиц, энергии и потока, а конкретнее на разработку систем и способов, которые облегчают формирование и поддержание FRC с повышенными энергиями системы и улучшенным поддержанием при использовании инжекторов нейтральных пучков и которые обладают возможностями настраиваемых энергий пучков. В соответствии с вариантом осуществления настоящего изобретения способ генерирования и поддержания магнитного поля с конфигурацией с обращенным полем (FRC) содержит формирование FRC вокруг плазмы в камере удержания и инжекцию множества нейтральных пучков в плазму FRC с настройкой при этом энергий пучков из упомянутого множества нейтральных пучков между первой энергией пучка и второй энергией пучка, причем вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения упомянутое множество нейтральных пучков переключают между первой и второй энергиями пучка на протяжении длительности выстрела при инжекции.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ предусматривает регулирование энергий пучков из упомянутого множества нейтральных пучков с целью регулирования радиального профиля энерговыделения пучка для регулирования значения градиента давления.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно включает в себя поддержание FRC при постоянном значении или около него без спада и повышение температуры плазмы до значения, превышающего примерно 1,0 кэВ, путем инжекции пучков быстрых нейтральных атомов из инжекторов нейтральных пучков в плазму FRC под углом к средней секущей плоскости камеры удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит инжекцию плазм компактных тороидов (КТ) из первого и второго инжекторов КТ в плазму FRC под углом к средней плоскости камеры удержания, при этом первый и второй инжекторы КТ диаметрально противоположны, находясь с противоположных сторон от средней плоскости камеры удержания.

В соответствии с вариантом осуществления настоящего изобретения система для генерирования и поддержания магнитного поля с конфигурацией с обращенным полем (FRC), содержащая камеру удержания;

первую и вторую диаметрально противоположные формирующие FRC секции, связанные с первыми и вторыми диаметрально противоположными внутренними диверторами;

первые и вторые диверторы, связанные с первой и второй формирующими секциями;

одну или более из множества плазменных пушек, один или более смешивающих электродов и первую и вторую зеркальные пробки,

при этом упомянутое множество плазменных пушек включает в себя первую и вторую осевые плазменные пушки, функционально связанные с первыми и вторыми диверторами, первой и второй формирующими секциями и камерой удержания,

при этом упомянутый один или более смещающих электродов расположены в пределах одной или более из камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первого и второго внешних диверторов, и

при этом первая и вторая зеркальные пробки расположены между первой и второй формирующими секциями и первыми и вторыми диверторами;

систему геттерирования, связанную с камерой удержания и первыми и вторыми диверторами;

множество инжекторов нейтральных пучков атомов, связанных с камерой удержания и наклоненных к средней плоскости камеры удержания,

при этом один или более из упомянутого множества инжекторов нейтральных пучков атомов являются настраиваемыми между первой энергией пучка и второй энергией пучка,

при этом вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка; и

магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, расположенных вокруг камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первых и вторых диверторов, и первый и второй наборы зеркальных катушек квазипостоянного тока, расположенных между первой и второй формирующими секциями и первыми и вторыми диверторами.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения система дополнительно содержит первый и второй инжекторы компактных тороидов (КТ), связанные с камерой удержания под углом к средней плоскости камеры удержания, при этом первый и второй инжекторы КТ диаметрально противоположны, находясь с противоположных сторон от средней плоскости камеры удержания.

Системы, способы, признаки и преимущества возможных вариантов осуществления будут или станут очевидными специалисту в данной области техники после изучения следующих чертежей и подробного описания. Предполагается, что все такие дополнительные способы, признаки и преимущества должны быть заключены в пределах этого описания и защищены прилагаемой формулой изобретения. Также предполагается, что формула изобретения не ограничивается требованием деталей возможных вариантов осуществления.

Краткое описание чертежей

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 примерных вариантов осуществления, приведенным ниже, служат для объяснения принципов настоящего изобретения и обучения им.

Фиг. 1 иллюстрирует удержание частиц в настоящей системе FRC в высокоэффективном режиме FRC (HFRC) по сравнению с обычным режимом FRC (CR) и по сравнению с другими обычными экспериментами FRC.

Фиг. 2 иллюстрирует компоненты настоящей системы FRC и магнитную топологию FRC, получаемую в настоящей системе FRC.

Фиг. 3А иллюстрирует базовую схему расположения настоящей системы FRC на виде сверху, включая предпочтительное расположение центральной емкости для удержания, формирующей секции, диверторов, нейтральных пучков, электродов, плазменных пушек, зеркальных пробок и инжектора таблеток.

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

Фиг. 3С иллюстрирует центральную емкость для удержания на виде сверху и показывает нейтральные пучки, расположенные под меньшим углом, чем прямой, к главной оси симметрии центральной емкости для удержания и направленные с возможностью инжекции частиц к средней плоскости центральной емкости для удержания.

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, нейтральных пучков, расположенных под меньшим углом, чем прямой, к главной оси симметрии центральной емкости для удержания, электродов, плазменных пушек, зеркальных пробок.

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

Фиг. 5 иллюстрирует изометрический вид отдельного формирующего модуля импульсного питания.

Фиг. 6 иллюстрирует изометрический вид узла формирующих труб.

Фиг. 7 иллюстрирует изометрический вид с частичным разрезом системы нейтральных пучков и ключевых компонентов.

Фиг. 8 иллюстрирует изометрический вид средств генерирования нейтральных пучков на камере удержания.

Фиг. 9 иллюстрирует изометрический вид с частичным разрезом предпочтительного расположения систем генерирования T_i и L_i .

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

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

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

Фиг. 13A, 13B, 13C и 13D иллюстрируют данные от неподдерживаемого разряда в типичном не высокоэффективном режиме в настоящей системе FRC. Показаны как функции времени:

фиг. 13A - радиус исключаемого потока на средней плоскости,

фиг. 13B - 6 хорд линейно-интегрированной плотности из находящегося в средней плоскости интерферометра для определения содержания CO_2 ,

фиг. 13C - радиальные профили плотности, инвертированные по Абелю, по данным интерферометра для определения содержания CO_2 , и

фиг. 13D - общая температура плазмы исходя из баланса давления.

Фиг. 14 иллюстрирует осевые профили исключаемого потока в выбранные моменты времени для одного и того же разряда из настоящей системы FRC, показанной на фиг. 13A, 13B, 13C и 13D.

Фиг. 15 иллюстрирует изометрический вид отклоняющих катушек, установленных снаружи камеры удержания.

Фиг. 16A, 16B, 16C и 16D иллюстрируют корреляции времени жизни FRC и длительности импульсов инжектируемых нейтральных пучков. Как показано, более длительные импульсы пучков создают более долгоживущие FRC.

Фиг. 17A, 17B, 17C и 17D иллюстрируют отдельные и совокупные эффекты различных компонентов системы FRC на рабочие характеристики FRC и достижение высокоэффективного режима.

Фиг. 18A, 18B, 18C и 18D иллюстрируют данные из типичного высокоэффективного режима неподдерживаемого разряда в настоящей системе FRC. Показаны как функции времени:

фиг. 18A - радиус исключаемого потока на средней плоскости,

фиг. 18B - 6 хорд линейно-интегрированной плотности из находящегося в средней плоскости интерферометра для определения содержания CO_2 ,

фиг. 18C - радиальные профили плотности, инвертированные по Абелю, по данным интерферометра для определения содержания CO_2 , и

фиг. 18D - общая температура плазмы из баланса давления.

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 высокоэффективном режиме.

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

Фиг. 21A, 21B, 21C, 21D и 21E иллюстрируют длительность импульса наклонного нейтрального пучка и время жизни параметров плазмы FRC от радиуса плазмы, плотности плазмы, температуры плазмы и магнитного потока, соответствующее длительности импульса наклонных инжектируемых нейтральных пучков.

Фиг. 22A и 22B иллюстрируют базовую схему расположения инжектора компактных тороидов (КТ).

Фиг. 23A и 23B иллюстрируют центральную емкость для удержания, демонстрируя установленный на нее инжектор КТ.

Фиг. 24A и 24B иллюстрируют базовую схему расположения согласно альтернативному варианту осуществления инжектора КТ, имеющего связанную с ним дрейфовую трубку.

Фиг. 25 иллюстрирует изометрический вид с частичным разрезом системы нейтральных пучков и ключевых компонентов для настраиваемого выхода энергии пучка.

На фиг. 26 представлена схема, иллюстрирующая систему нейтральных пучков с настраиваемым выходом энергии пучка.

На фиг. 27 представлена схема, иллюстрирующая механизм управления осевым позиционированием плазмы FRC в пределах емкости для удержания (EY).

На фиг. 28 представлена блок-схема общей схемы управления со скользящим режимом.

На фиг. 29 представлен составной график примеров моделирования управления осевым положением в скользящем режиме.

На фиг. 30 представлен составной график примеров моделирования управления осевым позиционированием в скользящем режиме.

Следует отметить, что чертежи не обязательно выполнены в масштабе и что элементы подобных структур или функций обычно представлены одинаковыми ссылочными позициями на всех чертежах в целях иллюстрации. Следует также отметить, что чертежи предназначены только для облегчения описания различных вариантов осуществления, описанных здесь. На чертежах не обязательно описывается каждый аспект предлагаемых здесь идей, и чертежи не ограничивают объем притязаний согласно формуле изобретения.

Подробное описание

Варианты осуществления настоящего изобретения, предложенные здесь, направлены на разработку систем и способов, которые облегчают формирование и поддержание FRC, придавая им превосходную устойчивость, а также превосходное удержание частиц, энергии и потока. Некоторые из вариантов осуществления настоящего изобретения направлены на разработку систем и способов, которые облегчают формирование и поддержание FRC с повышенными энергиями системы и улучшенное поддержание с использованием инжекторов нейтральных пучков и которые обладают возможностями настраиваемых энергий пучков. Некоторые из вариантов осуществления настоящего изобретения также направлены на разработку систем и способов, 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 независимо от свойств осевой устойчивости равновесия плазмы FRC.

Характерные примеры вариантов осуществления, описываемых здесь, примеры которых используют многие из этих дополнительных признаков и принципов как по отдельности, так и в комбинации, будут теперь описаны подробно со ссылкой на прилагаемые чертежи. Это подробное описание предназначено лишь для того, чтобы объяснить специалисту в области техники дополнительные детали для осуществления на практике предпочтительных аспектов принципов настоящего изобретения и не предназначено для ограничения объема притязаний изобретения. Поэтому комбинации признаков и этапов, раскрываемые в нижеследующем подробном описании, могут и не потребоваться для практического осуществления изобретения в самом широком смысле, а вместо этого поясняются, чтобы детально описать типичные примеры настоящих принципов.

Более того, 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 настоящего изобретения. Кроме того, четко указано, 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.

Прежде чем обратиться к системам и способам, которые способствуют устойчивости плазмы FRC как в радиальном, так и в осевом направлениях и управлению осевым положением плазмы FRC вдоль оси симметрии камеры удержания плазмы FRC, обсудим системы и способы формирования и поддержания высокоэффективных FRC с превосходной устойчивостью, 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, ликвидации ядерных отходов, исследований материалов, нейтронной радиографии и томографии), компактные источники фотонов (для химического производства и обработки), системы разделения и обогащения изотопов, а также активные зоны реакторов для синтеза легких ядер с целью выработки энергии в будущем.

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, настоящие системы и способы сочетают множество новых идей и средств для существенно улучшения удержания посредством FRC, как иллюстрируется на фиг. 1, а также обеспечивают управление устойчивостью без негативных побочных эффектов. Как подробно рассматривается ниже, фиг. 1 иллюстрирует удержание частиц в системе 10 FRC, описываемой ниже (см. фиг. 2 и 3), работающей в соответствии с высокоэффективным режимом FRC (HPF) для формирования и поддержания FRC по сравнению с работой в соответствии с обычным режимом RC (CR) для формирования и поддержания FRC и по сравнению с удержанием частиц в соответствии с обычными режимами формирования и поддержания FRC, используемыми в других экспериментах. В настоящем раскрытии будут приведены общее и подробное описание новые отдельные компоненты системы 10 FRC и способы, а также их совокупные эффекты.

Система FRC.

Вакуумная система.

На фиг. 2 и 3 иллюстрируется схематическое изображение настоящей 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. Настоящая система 10 FRC была построена для обеспечения сверхвысокого вакуума и работает при типичных начальных давлениях $1,333 \times 10^{-6}$ Па (10^{-8} торр). Такие вакуумметрические давления требуют использовать стыковочные фланцы с двойной откачкой между стыкуемыми компонентами, металлические уплотнительные кольца, высокочистые внутренние стенки, а также тщательное начальное кондиционирование поверхностей всех деталей перед сборкой, такое как физическая и химическая очистка последующими вакуумной сушкой при 250°C и очисткой тлеющим разрядом в водороде в течение 24 ч.

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 2-миллиметровой 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, описанных ниже, и ограничивает быстрые магнитные переходные процессы. Вакуумы создаются и поддерживаются в пределах системы 10 FRC с помощью набора безмасляных спиральных форвакуумных насосов, турбомолекулярных насосов и крионасосов.

Магнитная система.

На фиг. 2 и 3 проиллюстрирована магнитная система 400. На фиг. 2 среди прочих признаков иллюстрируются профили магнитного потока и плотности FRC (как функции радиальных и осевых координат), свойственные FRC 450, производимой посредством системы 10 FRC. Эти профили получены с помощью двумерного численного холловского МГД-моделирования с использованием кода, разработанного для моделирования систем и способов, соответствующих системе 10 FRC, и хорошо согласуются с измеренными экспериментальными данными. Как видно на фиг. 2, FRC 450 состоит из тора замкнутых силовых линий во внутренней части 453 FRC 450 внутри сепаратрисы 451 и кольцевого граничного слоя 456 на незамкнутых силовых линиях 452 сразу же за пределами сепаратрисы 451. Граничный слой 456 сливается в струи 454 за пределами длины FRC, обеспечивая естественный дивертор.

Главная магнитная система 410 включает в себя ряд катушек 412, 414 и 416 квазипостоянного тока, которые расположены в конкретных осевых положениях вдоль компонентов, т.е. вдоль камеры 100 удержания, формирующих секций 200 и диверторов 300 системы 10 FRC. Катушки 412, 414 и 416 квазипостоянного тока питаются от импульсных источников питания квазипостоянного тока и создают базовые подмагничивающие поля величиной примерно 0,1 Тл в камере 100 удержания, формирующих секциях 200 и диверторах 300. В дополнение к катушкам 412, 414 и 416 квазипостоянного тока главная магнитная система 410 включает в себя зеркальные катушки 420 квазипостоянного тока (запитанные от импульсных источников) между каждым торцом камеры 100 удержания и соседними формирующими секциями 200. Зеркальные катушки 420 квазипостоянного тока обеспечивают коэффициенты отражения магнитного зеркала вплоть до 5 и могут быть независимо возбуждены для контроля формы равновесия. Кроме того, зеркальные пробки 440 расположены между каждой из формирующих секций 200 и диверторами 300. Зеркальные пробки 440 содержат компактные зеркальные катушки 430 квазипостоянного тока и катушки 444 зеркальной пробки. Зеркальные катушки 430 квазипостоянного тока включают в себя три катушки 432, 434 и 436 (запитанные от импульсных источников), которые создают дополнительные направляющие поля для фокусировки поверхностей 455 магнитного потока к каналу 442 малого диаметра, проходящему через катушки 444 зеркальной пробки. Катушки 444 зеркальной пробки, которые намотаны вокруг канала 442 малого диаметра и питаются от LC-схемы импульсного питания, создают сильные поля магнитного зеркала вплоть до 4 Тл. Цель всей этой схемы расположения катушек состоит в том, чтобы плотно связывать и направлять поверхности 455 магнитного потока и текущие к торцу струи 454 плазмы в отдаленные камеры 310 диверторов 300. Наконец, набор "антенн" 460 отклоняющих катушек (см. фиг. 15) расположен снаружи камеры 100 удержания, по две с каждой стороны средней плоскости, и запитан от источников питания постоянного тока. Антенны 460 отклоняющих катушек могут быть выполнены так, чтобы обеспечить квазистатическое магнитное дипольное или квадрупольное поле величиной примерно 0,01 Тл для управления вращательными неустойчивостями и/или управлением током электронов. Антенны 460 отклоняющих катушек могут гибко обеспечивать магнитные поля, которые либо симметричны, либо антисимметричны относительно средней плоскости машины в зависимости от направления подаваемых токов.

Формирующие системы импульсного питания.

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 силовых переключателей 225 и связанных с ними панелей 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 нейтральных пучков.

Нейтральные пучки 600 атомов развертывают в системе 10 FRC для обеспечения нагрева и возбуждения тока, а также для развития давления быстрых частиц. Как показано на фиг. 3А, 3В и 8, отдельные линии пучков, содержащие системы 610 и 640 инжекторов нейтральных пучков атомов, расположены вокруг центральной камеры 100 удержания и инжектируют быстрые частицы тангенциально в плазму FRC (и перпендикулярно или под углом, перпендикулярным к главной оси симметрии в центральной емкости 100 для удержания) с прицельным параметром, чтобы целевая зона захвата лежала хорошо в пределах сепаратрисы 451 (см. фиг. 2). Каждая система 610 и 640 инжекторов способна инжектировать нейтральные пучки мощностью вплоть до 1 МВт в плазму FRC с энергиями частиц от 20 до 40 кэВ. Системы 610 и 640 основаны на многоапертурных источниках выделения положительных ионов и используют геометрическую фокусировку, инерционное охлаждение сеток выделения ионов и дифференциальную накачку. Помимо использования различных источников плазмы системы 610 и 640 в первую очередь различаются по своей физической конструкции, чтобы соответствовать своим соответствующим местам установки, обеспечивая возможности боковой и верхней инжекции. Типичные компоненты этих инжекторов нейтральных пучков показаны, в частности, на фиг. 7 для систем 610 боковых инжекторов. Как показано на фиг. 7, каждая отдельная система 610 нейтральных пучков включает в себя источник 612 ВЧ-плазмы на входном торце (он заменяется дуговым источником в системах 640) с магнитным экраном 614, закрывающим этот торец. Оптический источник ионов и ускоряющие сетки 616 связаны с источником 612 плазмы, а запорный клапан 620 расположен между оптическим источником ионов и ускоряющими сетками 616 и нейтрализатором 622. Отклоняющий магнит 624 и средство сброса 628 ионов расположены между нейтрализатором 622 и нацеливающим устройством 630 на выходном торце. Система охлаждения содержит две криогенные холодильные машины 634, две криопанели 636 и кожух 638 LN₂. Эта гибкая конструкция позволяет работать в широком диапазоне параметров FRC.

Альтернативная конфигурация для инжекторов 600 нейтральных пучков атомов состоит в инжекции быстрых частиц тангенциально в плазму FRC, но с углом A , меньшим 90° , относительно главной оси симметрии в центральной емкости 100 для удержания. Эти типы ориентации инжекторов 615 пучков показаны на фиг. 3С. Кроме того, инжекторы 615 пучков могут быть ориентированы так, чтобы инжекторы 615 пучков на любой стороне средней плоскости центральной емкости 100 для удержания инжектировали свои частицы к средней плоскости. Наконец, осевое положение этих систем 600 пучков может быть выбрано ближе к средней плоскости. Эти альтернативные варианты осуществления инжекции облегчают более центрированный вариант пополнения, который обеспечивает лучшую связь пучков и более высокую эффективность захвата инжектируемых быстрых частиц. Кроме того, в зависимости от угла и осевого положения это расположение инжекторов 615 пучков позволяет осуществлять более прямое и независимое управление осевым удлинением и другими характеристиками FRC 450. Например, инжекция пучков под небольшим углом A относительно главной оси симметрии емкости создаст плазму FRC с более длинной осевой протяженностью и более низкой температурой, в то время как выбор более перпендикулярного угла A приведет к аксиально более короткой, но более горячей плазме. Таким образом, угол A инжекции и местоположение инжекторов 615 пучков могут быть оптимизированы для разных целей. Кроме того, такое регулирование угла и расположение инжекторов 615 пучков может позволить пучкам повышенной энергии (что в целом более выгодно для выведения большей мощности с меньшей расходимостью пучка) быть инжектируемыми в более слабые магнитные поля, чем в противном случае было бы необходимо для захвата таких пучков. Это связано с тем фактом, что именно азимутальная составляющая энергии определяет масштаб орбит быстрых ионов (который постепенно уменьшается, поскольку угол инжекции относительно главной оси симметрии емкости уменьшается при постоянной энергии пучка). Кроме того, наклонная инжекция к средней плоскости с осевыми положениями пучков вблизи средней плоскости улучшает связь пучок-плазма, даже когда плазма FRC сжимается или иным образом сужается в осевом направлении во время периода инжекции.

Как показано на фиг. 3D и 3E, другая 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.

Чтобы обеспечить средство для инъекции новых частиц и лучшего контроля запаса частиц FRC, в системе 10 FRC используется 12-ствольный инжектор 700 таблеток (см., например, I. Vinyar et al., "Pellet Injectors 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 запасом частиц FRC.

Системы геттерирования.

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 применениям плазмы, включая синтез через дополнительный нагрев пучка.

Кондиционирование поверхностей является средством, с помощью которого отрицательное воздействие нейтрального газа и примесей можно контролировать или уменьшить в системе для удержания. С этой целью система 10 FRC, представленная здесь, использует системы 810 и 820 осаждения титана и лития, которые покрывают обращенные к плазме поверхности камеры (или емкости) для удержания диверторов 300 и 302 пленками (толщиной в десятки микрометров) из Ti и/или Li. Эти покрытия получают методами осаждения из паровой фазы. Твердые Li и/или Ti испаряют и/или сублимируют и напыляются на близлежащие поверхности для формирования покрытий. Источниками являются атомные печи с направляющими соплами 822 (в случае Li) или нагретые сферы из твердого вещества с направляющим бандажом 812 (в случае Ti). Системы для испарения Li, как правило, работают в непрерывном режиме, в то время как сублиматоры Ti в большинстве случаев работают периодически между работой с плазмой. Рабочие температуры этих систем превышают 600°C для получения больших скоростей осаждения. Для обеспечения хорошего покрытия стенок необходимо множество стратегически расположенных систем выпаривания/сублимации. На фиг. 9 подробно иллюстрируется предпочтительное расположение систем 810 и 820 геттерирования и осаждения в системе 10 FRC. Покрытия действуют как геттерирующие поверхности и эффективно откачивают атомные и молекулярные водородные виды (H и D). Эти покрытия также уменьшают другие типичные примеси, такие как углерод и кислород, до незначительных уровней.

Зеркальные пробки.

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 осевому расположению FRC 450 во время слияния и обеспечивает управление формой равновесия во время поддержания. Первый набор 420 зеркальных катушек создает номинально более сильные магнитные поля (примерно 0,4-0,5 Тл), чем центральное поле удержания, создаваемое центральными удерживающими катушками 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 канал с низкой газопроводностью с очень сильными магнитными полями (от 2 до 4 Тл при временах нарастания примерно 10-20 мс). Наиболее компактные импульсные зеркальные катушки 444 имеют компактные радиальные размеры, внутренний диаметр 20 см и аналогичную длину по сравнению с внутренним диаметром порядка метра и плоской конструкцией удерживающих катушек 412, 414 и 416. Назначение зеркальных пробок 440 многозначно.

(1) Катушки 432, 434, 436 и 444 плотно увязывают и направляют поверхности 452 магнитного потока и текущие к концу струи 454 плазмы в отдаленные диверторные камеры 300. Это гарантирует, что выходящие частицы достигают диверторов 300 надлежащим образом и что существуют поверхности 455 непрерывного потока, которые прослеживаются от области 452 незамкнутых силовых линий центральной FRC 450 на всем пути до диверторов 300.

(2) Физические сужения 442 в системе 10 FRC, через которые катушки 432, 434, 436 и 444 обеспечивают прохождение поверхностей 452 магнитного потока и струй 454 плазмы, создают препятствие для потока нейтрального газа из плазменных пушек 350, которые находятся в диверторах 300. Аналогичным образом сужения 442 предотвращают обратное течение газа от формирующих секций 200 к диверторам 300, тем самым уменьшая количество нейтральных частиц, которые необходимо вводить во всю систему 10 FRC, когда начинается запуск FRC.

(3) Строго осевые зеркала, создаваемые катушками 432, 434, 436 и 444, уменьшают осевые потери частиц и тем самым уменьшают параллельную диффузию частиц на незамкнутых силовых линиях.

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.

Потоки плазмы из пушек 350, установленных в камерах 310 диверторов 300, предназначены для улучшения рабочих характеристик устойчивости и нейтральных пучков. Пушки 350 установлены по оси внутри камер 310 диверторов 300, как проиллюстрировано на фиг. 3 и 10, и создают плазму, текущую вдоль незамкнутых линий 452 потока в диверторе 300 и по направлению к центру камеры 100 удержания. Пушки 350 работают при высокоплотном газовом разряде в канале из пакета шайб и предназначены для генерации нескольких килоампер полностью ионизированной плазмы в течение 5-10 мс. Пушки 350 включают в себя импульсную магнитную катушку, которая согласует выходной поток плазмы с требуемым размером плазмы в камере 100 удержания. Технические параметры пушек 350 характеризуются каналом, имеющим внешний диаметр от 5 до 13 см и внутренний диаметр вплоть до примерно 10 см, и обеспечивают ток разряда 10-15 кА при 400-600 В с внутренним магнитным полем пушки от 0,5 до 2,3 Тл.

Потоки плазмы пушек могут проникать в магнитные поля зеркальных пробок 440 и втекать в формирующую секцию 200 и камеру 100 удержания. Эффективность переноса плазмы через зеркальную пробку 440 увеличивается с уменьшением расстояния между пушкой 350 и пробкой 440 и за счет уширения и укорочения пробки 440. В приемлемых условиях каждая пушка 350 может доставлять приблизительно 10^{22} протонов в секунду через зеркальные пробки 440 от 2 до 4 Тл с высокими температурами ионов и электронов примерно от 150 до 300 эВ и примерно от 40 до 50 эВ соответственно. Пушки 350 обеспечивают значительное пополнение граничного слоя 456 FRC и улучшенное общее удержание частиц FRC.

Чтобы дополнительно увеличить плотность плазмы, можно было бы использовать газосепаратор, чтобы вдуть дополнительный газ в поток плазмы из пушек 350. Этот метод позволяет в несколько раз увеличить плотность инжектируемой плазмы. В системе 10 FRC газосепаратор, установленный в системе 10 КОП на обращенной к диверторам 300 стороне зеркальных пробок 440, улучшает пополнение граничного слоя 456 FRC, формирование FRC 450 и линейное связывание плазмы.

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.

Электрическое смещение незамкнутых поверхностей потока может обеспечить радиальные потенциалы, которые приводят к азимутальному движению $E \times B$, которое обеспечивает механизм управления, аналогичный повороту ручки, для управления вращением плазмы с незамкнутыми силовыми линиями, а также фактической активной зоны 450 FRC через сдвиг скорости. Для выполнения этого управления система 10 FRC использует различные электроды, стратегически размещенные в различных частях машины. Фиг. 3 изображает смещающие электроды, расположенные в предпочтительных местах в пределах системы 10 FRC.

В принципе, существует 4 класса электродов:

(1) точечные электроды 905 в камере 100 удержания, которые контактируют с отдельными незамкнутыми силовыми линиями 452 на границе FRC 450 для обеспечения локальной зарядки;

(2) кольцевые электроды 900 между камерой 100 удержания и формирующими секциями 200 для зарядки дальних граничных слоев 456 по азимутально-симметричной схеме;

(3) пакеты концентрических электродов 910 в диверторах 300 для зарядки многочисленных концентрических слоев 455 потока (вследствие чего выбор слоев управляем посредством регулировки катушек 416 для регулировки магнитного поля диверторов, чтобы завершать требуемые слои 456 потока на соответствующих электродах 910); и наконец

(4) аноды 920 (см. фиг. 10) самих плазменных пушек 350 (которые перехватывают внутренние незамкнутые поверхности 455 потока вблизи сепаратрисы FRC 450).

Фиг. 10 и 11 показывают некоторые типичные конструкции для некоторых из них.

Во всех случаях эти электроды возбуждаются импульсными источниками питания или источниками питания постоянного тока при напряжениях вплоть до примерно 800 В. В зависимости от размера электрода и того, какие поверхности потока пересекаются, токи могут потребляться в килоамперном диапазоне.

Неподдерживаемая работа системы FRC - обычный режим.

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 RFTP-цепи импульсного питания формирующих систем 210 импульсного питания возбуждают катушки 232 импульсного питания быстро переключаемого магнитного поля для создания временного обращенного смещения величиной примерно $-0,05$ Тл в формирующих секциях 200. В этот момент заданное количество нейтрального газа при 9-20 psi (фунт/кв. дюйм) инжектируется в два формирующих объема, определяемых камерами 240 кварцевых труб (северной и южной) формирующих секций 200 через набор азимутально ориентированных продувочных клапанов на фланцах, расположенных на внешних торцах формирующих секций 200. Затем небольшое количество (~сотни килограмм) ВЧ-поля генерируется от набора антенн на поверхности кварцевых труб 240 для создания предварительной ионизации в форме локальных областей ионизации затравок в пределах столбов нейтрального газа. За этим следует применение тета-кольцевой модуляции на токе, возбуждающем катушки 232 импульсного питания быстро переключаемого магнитного поля, что приводит к более глобальной предварительной ионизации столбов газа. Наконец, основные банки импульсного питания формирующих систем 210 импульсного питания зажигаются для возбуждения катушек 232 импульсного быстро переключаемого магнитного поля для создания прямосмещенного поля величиной вплоть до $0,4$ Тл. Этот этап может быть секвенирован по времени так, чтобы прямосмещенное поле генерировалось равномерно по всей длине формирующих труб 240 (статическое формирование), или так, чтобы последовательная перистальтическая модуляция поля достигалась вдоль оси формирующих труб 240 (динамическое формирование).

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

Как только северная и южная формирующие FRC прибывают в окрестность средней плоскости камеры 100 удержания, эти FRC сталкиваются. Во время столкновения осевые кинетические энергии северной и южной формирующих FRC большей частью термализуются, поскольку FRC в конечном итоге сливаются в одну FRC 450. Большой набор средств диагностики плазмы доступен в камере 100 удержания для изучения равновесий FRC 450. Типичные рабочие условия в системе 10 FRC создают составные FRC с радиусами сепаратрисы примерно $0,4$ м и осевой протяженностью примерно 3 м.

Дополнительными характеристиками являются внешние магнитные поля величиной примерно $0,1$ Тл, плотности плазмы примерно $5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и общая температура плазмы вплоть до 1 кэВ. Без какого-либо поддержания, т.е. без нагрева и/или возбуждения тока посредством инъекции нейтральных пучков или других вспомогательных средств, время жизни этих FRC ограничивается примерно 1 мс, собственным характерным временем спада конфигурации.

Экспериментальные данные неподдерживаемой работы - обычный режим.

Фиг. 12 показывает типичную временную эволюцию радиуса исключаемого потока, $r_{\Delta\phi}$, который аппроксимирует радиус сепаратрисы r_s , чтобы проиллюстрировать динамику процесса слияния тета-пинчей FRC 450. Два (северный и южный) отдельных плазмоида создаются одновременно и затем ускоряются из соответствующих формирующих секций 200 со сверхзвуковой скоростью, $vz \sim 250$ км/с, и сталкиваются вблизи средней плоскости при $z=0$. Во время столкновения плазмойды сжимаются аксиально с последующим быстрым радиальным и осевым расширением перед окончательным слиянием с образованием FRC 450. Как радиальная, так и осевая динамика слияния FRC 450 подтверждается подробными измерениями профиля плотности и томографией на основе болометра.

Данные из характерного неподдерживаемого разряда системы 10 FRC показаны как функции времени на фиг. 13A, 13B, 13C и 13D. FRC инициируется в момент $t=0$. Радиус исключаемого потока в средней вдоль оси плоскости машины показан на фиг. 13A. Эти данные получены из массива магнитных зондов, расположенных непосредственно внутри стенки камеры удержания из нержавеющей стали, которые измеряют осевое магнитное поле. Стальная стенка является хорошим консерватором потока на

временных масштабах этого разряда.

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

На фиг. 13D показана общая температура плазмы, которая выведена исходя из баланса давления и полностью согласуется с томсоновским рассеянием и спектроскопическими измерениями.

Анализ всего массива исключаемого потока указывает на то, что форма сепаратрисы FRC (приближенная 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 к одной FRC. Действительно грубые оценки позволяют предполагать, что в этот конкретный момент примерно 10% магнитных потоков двух первоначальных FRC переключаются во время столкновения.

Длина FRC непрерывно сокращается от 3 до примерно 1 м в течение времени жизни FRC. Это сокращение, видимое на фиг. 14, позволяет предполагать, что при удержании FRC доминируют главным образом конвективные потери энергии. Поскольку давление плазмы внутри сепаратрисы уменьшается быстрее, чем внешнее магнитное давление, натяжение силовых линий магнитного поля в торцевых областях сжимает FRC аксиально, восстанавливая осевое и радиальное равновесие. Для разряда, рассмотренного на фиг. 13 и 14, магнитный поток, запас частиц и тепловая энергия (примерно 10 МВт, 7×10^{19} частиц и 7 кДж соответственно) FRC уменьшаются примерно на порядок по величине в первую миллисекунду, когда выявляется исчезновение равновесия FRC.

Поддерживаемая работа - высокоэффективный режим.

На фиг. 12-14 приведены примеры, характеризующие разрушение FRC без какого-либо поддержания. Вместе с тем в системе 10 FRC применяются несколько методов для дальнейшего улучшения удержания FRC (внутренней активной зоны и граничного слоя) для достижения высокоэффективного режима и поддержания конфигурации.

Нейтральные пучки.

Сначала быстрые (H) нейтралы инжектируются перпендикулярно B_z в пучках из восьми инжекторов 600 нейтральных пучков. Пучки быстрых нейтралов инжектируются с момента, когда северная и южная формирующие FRC сливаются в камере 100 удержания в одну FRC 450. Быстрые ионы, создаваемые в основном перезарядкой, имеют бетатронные орбиты (с первичными радиусами на масштабе топологии FRC или по меньшей мере намного большими, чем масштаб характерной длины градиента магнитного поля), которые увеличивают азимутальный ток FRC 450. После некоторой доли разряда (после 0,5 до 0,8 мс на снимке) достаточно большая популяция быстрых ионов значительно улучшает свойства стабильности и удержания внутренних FRC (см., например, M.W. Binderbauer and N. Rostoker, *Plasma Phys.*, 56, part 3, 451 (1996)). Кроме того, с точки зрения поддержания пучки от инжекторов 600 нейтральных пучков также являются основным средством для возбуждения тока и нагревания плазмы FRC.

В режиме плазмы системы 10 FRC быстрые ионы замедляются в основном на электронах плазмы. В течение ранней части разряда типичные усредненные по орбите времена замедления быстрых ионов составляют 0,3-0,5 мс, что приводит к значительному нагреву FRC прежде всего электронами. Быстрые ионы совершают большие радиальные экскурсы наружу от сепаратрисы, поскольку внутреннее магнитное поле FRC по своей природе является слабым (примерно 0,03 Тл в среднем для внешнего осевого поля в 0,1 Тл). Быстрые ионы были бы уязвимы к потерям перезарядки, если бы плотность нейтрального газа была слишком высокой снаружи от сепаратрисы. Таким образом, геттерирование стенок и другие методы (такие как плазменная пушка 350 и зеркальные пробки 440, которые вносят вклад, помимо прочего, в управление газом), развернутые в системе 10 FRC, как правило, минимизируют граничные нейтралы и обеспечивают требуемое нарастание тока быстрых ионов.

Инжекция таблеток.

Когда значительная популяция быстрых ионов вырастает внутри FRC 450 с более высокими температурами электронов и более длительными временами жизни FRC, замороженные таблетки H или D инжектируются в FRC 450 из инжектора 700 таблеток для поддержания запаса частиц FRC в FRC 450. Ожидаемые временные рамки абляции являются достаточно короткими, чтобы обеспечить значительный источник частиц FRC. Эта скорость также может быть увеличена за счет увеличения площади поверхности инжектируемой части путем разбиения отдельной таблетки на более мелкие фрагменты во время нахождения в цилиндрах или инжекционных трубах инжектора 700 таблеток и перед входом в камеру 100 удержания (этап, который может быть осуществлен путем увеличения трения между таблеткой и стенками инжекционной трубы посредством затяжки радиуса изгиба последнего сегмента инжекционной трубы прямо перед входом в камеру 100 удержания). За счет изменения последовательности и скорости зажигания 12 цилиндров (инжекционных труб), а также фрагментации можно настроить систему 700 инъекции таблеток для обеспечения как раз требуемого уровня поддержания запаса частиц. В свою оче-

редь, это помогает поддерживать внутреннее кинетическое давление в FRC 450 и самоподдерживающийся режим и время жизни FRC 450.

Как только подвергнутые абляции атомы сталкиваются со значительной плазмой в FRC 450, они становятся полностью ионизированными. Получающийся в результате компонент холодной плазмы затем столкновительно нагревается собственной плазмой FRC. Энергия, необходимая для поддержания требуемой температуры FRC, в конечном итоге поставляется инжекторами 600 пучков. В этом смысле инжекторы 700 таблеток вместе с инжекторами 600 нейтральных пучков образуют систему, которая поддерживает установившееся состояние и поддерживает FRC 450.

Инжектор КТ.

В качестве альтернативы инжектору таблеток предлагается инжектор компактного тороида (КТ), в основном для пополнения плазмы конфигураций с обращенным полем (FRC). Инжектор 720 СТ содержит намагниченную коаксиальную плазменную пушку (НКГП), 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 КТ. 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 КТ 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 КТ направлен к средней плоскости емкости 100 для удержания под углом к продольной оси емкости 100 для удержания аналогично инжекторам 615 нейтральных пучков.

В альтернативном варианте осуществления инжектор 720 КТ, как показано на фиг. 24А и 24В, включает в себя дрейфовую трубу 740, содержащую вытянутую цилиндрическую трубу, связанную с выпускным концом инжектора 720 КТ. 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.

Преимущества инжектора 720 КТ следующие:

- (1) контроль и регулируемость запаса частиц на инжектируемый КТ;
- (2) осаждается теплая плазма (вместо криогенных таблеток);
- (3) система может работать в режиме частоты повторения, чтобы обеспечить непрерывное пополнение;
- (4) система также может восстанавливать некоторый магнитный поток, поскольку инжектируемые КТ несут встроенное магнитное поле.

В варианте осуществления для экспериментального использования внутренний диаметр внешнего электрода составляет 83,1 мм, а внешний диаметр внутреннего электрода составляет 54,0 мм. Поверхность внутреннего электрода 722 предпочтительно покрыта вольфрамом, чтобы уменьшить примеси, выходящие из электрода 722. Как показано, катушка 726 смещения установлена внутри внутреннего электрода 722.

В недавних экспериментах была достигнута сверхзвуковая скорость поступательного перемещения КТ вплоть до ~ 100 км/с. Другими типичными параметрами плазмы являются следующие: плотность электронов $\sim 5 \times 10^{21}$ м⁻³, температура электронов ~ 30 -50 эВ и запас частиц $\sim 0,5$ - $1,0 \times 10^{19}$. Высокое кинетическое давление КТ позволяет инжектируемой плазме проникать глубоко в FRC и осаждают частицы внутри сепаратрисы. В недавних экспериментах пополнение частиц FRC дало такой результат, что ~ 10 -20% запаса частиц FRC, обеспечиваемого инжекторами КТ, успешно демонстрирующими пополнение, могут быть легко проведены без нарушения плазмы FRC.

Отклоняющие катушки.

Для достижения возбуждения тока в установившемся состоянии и поддержания 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

$$F_{\theta} = -\sigma V_{\theta} \langle |B_r|^2 \rangle$$

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 нейтральных пучков и осевой инжекцией плазмы отклоняющие катушки 460 обеспечивают дополнительный уровень контроля в отношении поддержания тока и устойчивости.

Зеркальные пробки.

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. Для формирования магнитных полей, типичных для предлагаемой эксплуатации системы 10 FRC, все силовые линии 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.

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 (такой малой, как 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 нейтралов, а следовательно и эффективный газовый барьер. В результате большинство нейтралов, рециркулированных в диверторах 300 из граничного слоя 456 FRC, не возвращается в камеру 100 удержания. Кроме того, нейтралы, связанные с работой плазменных пушек 350 (как обсуждается ниже), будут в основном удерживаться в диверторах 300.

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 $\tau_{||}$ удержания частиц граничного слоя увеличивается на порядок величины. Улучшение $\tau_{||}$ легко увеличивает удержание частиц FRC.

Предполагая, что обуславливаемые радиальной диффузией (D) потери частиц из ограничиваемого сепаратрисой объема 453 уравновешены осевыми потерями ($\tau_{||}$) из граничного слоя 456, получаем

$$(2\pi r_c L_c)(Dn_c/\delta) = (2\pi r_c L_c \delta)(n_c/\tau_{||}),$$

откуда следует, что длину градиента плотности у сепаратрисы можно переписать в виде

$$\delta = (D\tau_{||})^{1/2}$$

Здесь r_c , L_c и n_c - это радиус сепаратрисы, длина сепаратрисы и плотность у сепаратрисы соответственно.

Время удержания частиц в FRC составляет

$$\tau_N = [\pi r_c^2 L_c \langle n \rangle] / [(2\pi r_c L_c)(Dn_c/\delta)] = (\langle n \rangle / n_c)(\tau_{\perp} \tau_{||})^{1/2},$$

где $\tau_{\perp} = a^2/D$, при этом $a = r_c/4$.

Физически увеличение $\tau_{||}$ 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 $\tau_{||}$.

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

Плазменные пушки.

Плазменные пушки 350 улучшают устойчивость выходящих струй 454 FRC посредством линейного связывания. Плазмы пушек, выпускаемые 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.

Как упоминалось в рассмотренном выше разделе "Зеркальные пробки", если бы можно было значительно увеличить $\tau_{||}$, то подаваемая из пушек плазма была бы сопоставимой со скоростью ($\sim 10^{22}/c$) потерь частиц в граничном слое. Время жизни получаемой из пушек плазмы в системе 10 FRC находится в мил-

лисекундном диапазоне. В самом деле, рассмотрим плазму из пушек, имеющую плотность $n_3 \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и температуру ионов примерно 200 эВ, удерживаемую между торцевыми зеркальными пробками 440. Длина L захвата и коэффициент R отражения зеркала составляют примерно 15 и 20 м соответственно. Средняя длина свободного пробега ионов из-за кулоновских столкновений составляет $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3 \text{ см}$, а поскольку

$$\lambda_{ii} \ln R / R < L,$$

ионы удерживаются в газодинамическом режиме. Время удержания плазмы в этом режиме составляет

$$\tau_{\text{сст}} \sim RL / 2V_c \sim 2 \text{ мс},$$

где V_c - скорость ионного звука.

Для сравнения, классическое время удержания ионов для этих параметров плазмы составляло бы

$$\tau_c \sim 0,5 \tau_{ii} (\ln R + (\ln R)^{0,5}) \sim 0,7 \text{ мс}$$

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

$$\tau_{\perp} > \tau_{\text{сст}} \sim 2 \text{ мс}$$

Следовательно, пушки обеспечили бы значительное пополнение граничного слоя 456 FRC С и улучшенное общее удержание частиц FRC.

Кроме того, потоки плазмы пушек могут быть включены примерно на 150-200 мкс, что позволяет использовать их при запуске, поступательном перемещении и слиянии 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 запасы частиц из формирующих FRC и из пушек удовлетворительны для захвата нейтральных пучков, нагрева 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 вдутым 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 нейтральных пучков 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.

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 и вращением незамкнутых силовых линий, 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 разное характерное влияние на рабочие характеристики плазмы.

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 применения концепции высокоэффективного режима.

Экспериментальные данные - работа в высокоэффективном режиме.

Инжекция быстрых частиц посредством пучков из пушек 600 нейтральных пучков играет важную роль в обеспечении высокоэффективного режима. Фиг. 16A, 16B, 16C 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 выстрелам и поэтому отображают типичное поведение. Совершенно очевидно, что увеличенная длительность пучков создает более долгоживущие FRC. Рассматривая эти данные, а также другие диагностические данные в ходе этого исследования, можно видеть, что пучки повышают стабильность и уменьшают потери. Корреляция между длиной импульсов пучков и временем жизни FRC не является совершенной, поскольку захват пучков становится неэффективным ниже определенного размера плазмы, т.е., по мере того как FRC 450 сжимается в физическом размере, не все инжектированные пучки перехватываются и захватываются. Сокращение FRC происходит главным образом ввиду того факта, что чистые потери энергии (~4 МВт примерно на полпути через разряд) из плазмы FRC во время разряда несколько превышают общую мощность, подаваемую в FRC через нейтральные пучки (~2,5 МВт) для конкретного экспериментального запуска. Расположение пучков в месте, находящемся ближе к средней плоскости емкости 100, привело бы к уменьшению этих потерь и продлению времени жизни FRC.

Фиг. 17A, 17B, 17C и 17D иллюстрируют воздействия разных компонентов на достижение высокоэффективного режима. Здесь показано семейство типичных кривых, отображающих время жизни FRC 450 как функцию времени. Во всех случаях постоянная небольшая величина мощности пучков (примерно 2,5 МВт) инжектируется на протяжении всей длительности каждого разряда. Каждая кривая представляет разную комбинацию 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 вращательной неустойчивости 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 (Ti 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 целевыми условиями.

Как показано на фиг. 1, недавно открытый высокоэффективный режим демонстрирует значительно улучшенное поведение при переносе. Фиг. 1 иллюстрирует изменение времени удержания частиц в системе 10 FRC между обычным режимом и высокоэффективным режимом. Как видно, в высокоэффективном режиме оно улучшилось в более чем 5 раз. Кроме того, фиг. 1 детализирует время удержания частиц в системе 10 FRC относительно времени удержания частиц в обычных экспериментах FRC уровня техники. Что касается этих других машин, высокоэффективный режим системы 10 FRC улучшает удержание от 5 до почти 20 раз. Наконец, что наиболее важно, характер масштабирования удержания системы 10 FRC в высокоэффективном режиме резко отличается от всех измерений уровня техники. До установления высокоэффективного режима в системе 10 FRC различные эмпирические законы масштабирования получали из данных для прогнозирования времен удержания в экспериментах FRC уровня техники. Все эти правила масштабирования зависят в основном от отношения

$$R^2\rho_i,$$

где R - радиус нуля магнитного поля (нестрогая мера физического масштаба машины), а ρ_i - ларморовский радиус иона, вычисленный в прикладываемом извне поле (нестрогая мера прикладываемого магнитного поля).

Из фиг. 1 ясно, что длительное удержание в обычных FRC возможно лишь при большом размере машины и/или сильном магнитном поле. Работа системы 10 FRC в обычном режиме FRC имеет тенденцию следовать правилам масштабирования, показанным на фиг. 1. Однако высокоэффективный режим является значительно превосходящим и показывает, что гораздо лучшее удержание может быть достигнуто без большого размера машины или сильных магнитных полей. Что еще более важно, из фиг. 1 также ясно, что высокоэффективный режим приводит к улучшению времени удержания с уменьшенным размером плазмы по сравнению с обычным режимом. Аналогичные тенденции также видны для времен удержания потока и энергии, как описано ниже, которые также увеличились более чем в 3-8 раз в системе 10 FRC. Таким образом, прорыв высокоэффективного режима позволяет использовать небольшую мощность пучков, более слабые магнитные поля и меньший размер для поддержания и удержания равновесий FRC в системе 10 FRC и будущих машинах более высоких энергий. Этим улучшениям сопутствует меньшая стоимость эксплуатации и строительства, а также уменьшенная инженерная сложность.

Для дальнейшего сравнения на фиг. 18A, 18B, 18C и 18D показаны данные из типичного разряда высокоэффективного режима в системе 10 FRC как функции времени. Фиг. 18(A) изображает радиус включаемого 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 характеристиками в обычном режиме, как показано на фиг. 13A, 13B, 13C и 13D, режим работы, соответствующий высокоэффективному режиму, демонстрирует увеличенное более чем на 400% время жизни.

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, как показано на фиг. 13A, 13B, 13C и 13D, плазма является более статичной на протяжении всего импульса, что свидетельствует об очень устойчивой работе. Пиковая плотность также немного ниже при выстрелах высокоэффективного режима - это следствие более высокой общей температуры плазмы (вплоть до 2 раз), как показано на фиг. 18D.

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

Фиг. 19 суммирует все преимущества высокоэффективного режима в виде недавно установленного экспериментального масштабирования удержания потока высокоэффективного режима. Как можно видеть на фиг. 19, на основе измерений, проведенных до и после $t=0,5$ мс, т.е. $t \leq 0,5$ мс и $t > 0,5$ мс, удержание потока (и аналогичным образом удержание частиц и удержание энергии) масштабируется примерно с квадратом температуры электронов (T_e) для заданного радиуса сепаратрисы (r_s). Это сильное масштабирование с положительной степенью T_e (а не с отрицательной степенью) полностью противоположно тому, которое проявляется обычными токамаками, где удержание, как правило, обратно пропорционально некоторой степени температуры электронов. Проявление этого масштабирования является прямым следствием состояния высокоэффективного режима и большой орбиты (т.е. орбит на масштабе топологии FRC и/или по меньшей мере характерном масштабе длины градиента магнитного поля). По сути это новое масштабирование существенно благоприятствует высоким рабочим температурам и обеспечивает относительно небольшие по размеру реакторы.

Благодаря наличию преимуществ высокоэффективного режима достижимо поддержание FRC или установившееся состояние, возбуждаемое нейтральными пучками, что означает, что глобальные параметры плазмы, такие как тепловая энергия плазмы, общие количества частиц, радиус и длина плазмы, а также магнитный поток являются поддерживаемыми на приемлемых уровнях без существенного спада. Для сравнения фиг. 20 показывает данные на графике А, полученные в результате разряда в типичном высокоэффективном режиме в системе 10 FRC как функция времени, а на графике В для спроектированного разряда типичного высокоэффективного режима в системе 10 FRC как функция времени, где FRC 450 поддерживается без спада на протяжении длительности импульса нейтральных пучков. Для графика А нейтральные пучки с общей мощностью в диапазоне примерно 2,5-2,9 МВт были инжектированы в FRC 450 для длительности импульсов активных пучков в примерно 6 мс. Диамагнитное время жизни плазмы, изображенное на графике А, составляло примерно 5,2 мс. Более поздние данные показывают, что диамагнитное время жизни плазмы примерно 7,2 мс достижимо с длительностью импульсов активных пучков примерно 7 мс.

Как отмечалось выше в связи с фиг. 16A, 16B, 16C и 16D, корреляция между длиной импульсов пучков и временем жизни FRC не является совершенной, поскольку захват пучков становится неэффективным ниже определенного размера плазмы, т.е., по мере того как FRC 450 сжимается в физическом размере, не все инжектированные пучки перехватываются и захватываются. Сокращение или спад FRC происходит главным образом ввиду того факта, что чистые потери энергии (-4 МВт примерно на полпути через разряд) из плазмы FRC во время разряда несколько превышают общую мощность, подаваемую в FRC через нейтральные пучки (-2,5 МВт) для конкретного экспериментального запуска. Как отмечено в отношении фиг. 3B, наклонная инжекция пучков из пушек 600 нейтральных пучков к средней плоскости улучшает связь пучков с плазмой, даже когда плазма FRC сжимается или иным образом аксиально сужается во время периода инжекции. Кроме того, надлежащая подпитка таблетками будет поддерживать необходимую плотность плазмы.

График В является результатом моделирования, выполненных с использованием длительностью импульсов активных пучков примерно 6 мс и общей мощности пучков из пушек 600 нейтральных пучков чуть более примерно 10 МВт, при этом нейтральные пучки должны инжектировать нейтралы Н (или D) с энергией частиц примерно 15 кэВ. Эквивалентный ток, инжектируемый каждым из пучков, составляет примерно 110 А. Для графика В угол инжекции пучков к оси устройства составлял примерно 20° , радиус мишени - 0,19 м. Угол инжекции может быть изменен в пределах $15-25^\circ$. Пучки должны инжектироваться в параллельном направлении азимутально. Чистая боковая сила, а также чистая осевая сила от инжекции импульсов нейтральных пучков должны быть минимизированы. Как и в случае графика А, быстрые (Н) нейтралы инжектируются из инжекторов 600 нейтральных пучков с момента, когда северная и южная формирующие FRC сливаются в камере 100 удержания в одну FRC 450.

При моделировании основа для графика В использует многомерные холловские МГД-решатели

для фоновой плазмы и равновесия, полностью кинетические решатели на основе метода Монте-Карло для энергетических компонентов пучков и всех процессов рассеяния, а также множество связанных уравнений переноса для всех видов плазмы для моделирования процессов интерактивных потерь. Компоненты переноса эмпирически откалиброваны и тщательно сравниваются с экспериментальной базой данных.

Как показано на графике В, диамагнитное время жизни установившегося состояния FRC 450 будет длительностью импульса пучков. Однако важно отметить, что ключевой корреляционный график В показывает, что когда пучки выключены, плазма, или FRC, начинает спадать в это время, но не раньше. Спад будет аналогичным тому, который наблюдается в разрядах, которые не ассистируются пучками, - вероятно, на порядок 1 мс после времени выключения пучков - и просто является отражением характерного времени затухания плазмы, вызванного процессами собственных потерь.

Обращаясь к фиг. 21B, 21C, 21D и 21E, отмечаем, что результаты экспериментов, проиллюстрированные на этих чертежах, показывают поддержание FRC или установившееся состояние, возбуждаемое от наклонных нейтральных пучков, 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 нейтральных пучков (НП). 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 НП, при этом диамагнетизм сохраняется даже в течение нескольких миллисекунд после окончания НП благодаря накапливаемым быстрым ионам. Как изображено, рабочие характеристики плазмы ограничиваются лишь теми ограничениями по длительности импульсов, возникающими из-за конечных аккумулярованных энергий в связанных с этим источниках питания многих критических систем, таких как инжекторы НП, а также в других компонентах систем.

Настраиваемые энергии пучков, получаемые из нейтральных пучков.

Как отмечалось выше в связи с фиг. 3A, 3B, 3C, 3D, 3E и 8, в системе 10 FRC развертывают нейтральные пучки 600 атомов, чтобы обеспечить нагрев и возбуждение тока, а также развить давление быстрых частиц. Вокруг центральной камеры 100 удержания расположены отдельные линии пучков, содержащие системы 600 инжекции нейтральных пучков атомов и, как показано на фиг. 3C, 3D и 3E, предпочтительно наклоненные для инжекции нейтральных частиц к средней плоскости камеры 100 удержания.

Чтобы дополнительно улучшить поддержание 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 нейтральных пучков (ИНП), например, возможно, лишь в целях подвода мощности около 20+ МВт с длительностью импульсов вплоть до 30 мс. Система 600 ИНП включает в себя множество инжекторов 615 на основе положительных ионов (см. фиг. 3D и 3E), обладающих универсальной модульной конструкцией с поднабором ИНП 615, например с четырьмя (4) из восьми (8) ИНП 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 при постоянном токе пучка. Эта способность ИНП 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-кратному; и
- (iii) рост теплопроизводительности вплоть до 2-кратного.

Кроме того, непрерывно изменяющаяся энергия пучка, производимая ИНП 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 ИНП 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.

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 ИНП 615 в любой заданный момент времени. Следовательно, всегда желательна повышенная мощность основного нейтрального пучка.

Более того, эффективная скорость нагрева благодаря ИНП 615 является результатом сложного взаимодействия между характеристиками инжектируемого пучка и последующими устойчивыми мгновен-

ными 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 инжекции. Настраиваемость пучков обеспечивает средство наиболее оптимальной адаптации к этим изменяющимся условиям.

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 инжекция 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).

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, 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.

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.

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 другими сценариями эксплуатации.

Фиг. 25 иллюстрирует изображение ИНП 615 предлагаемой системы FRC 10. ИНП 615 показан в возможном варианте осуществления, включающем в себя

возбудитель 650 дуги;
 плазмоотделитель 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 T_i , крионасос 656, имеющий поверхностные структуры, например такие, как ребристые поверхностные структуры, выполненные для интенсифицированной циркуляции криогенной жидкости, и отклоняющий магнит для удаления не нейтрализованных ионов; и
 коллимирующую апертуру 658, в которую заключен вставляемый калориметр 659 для определения характеристик, диагностики и повторной калибровки пульсирующих пучков.

Говоря конкретнее и обращаясь к фиг. 26, отмечаем, что показанное здесь исполнение настраиваемой системы пучков предпочтительно основано на ионооптической системе 660 триодного типа (ионооптической системе (ИОС)). Замысел заключается в алгоритме ускорения-замедления. Как изображено на фиг. 26, на первой сетке C1 установлено напряжение V1, тогда как на второй сетке C2 установлено напряжение V2, а на заключительной сетке C3 установлено напряжение V3. Выводимые ионы сначала ускоряют до энергии

$$E1=e \times (V1-V2)$$

в процессе пересечения промежутка между C1 и C2 ("e" здесь обозначает электрический заряд иона). Потом их замедляют в промежутках C2 и C3 таким образом, что

$$E2=E1+e \times (V2-V3)$$

Напряжения в типичных случаях регулируют так, что $V_1 > V_2 > V_3$. На основе надлежащих отдельных источников питания ИП1, ИП2, ИП3 напряжениям сеток можно регулируемо придавать приращения в течение импульса, чтобы изменить выход б62 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 ИОС с энергией of 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. После испускания из ИОС б60 пучки б62 ионов проходят нейтрализатор б64, где быстрые ионы преобразуются в нейтральные ионы посредством обмена зарядами с электронами холодного нейтрального газа, присутствующего в нейтрализаторе б64. Надлежащая циркуляция криогенной жидкости предотвращает вытекание нейтрального газа из расположенного ниже по течению от отверстия нейтрализатора б64. На торце нейтрализатора также имеется надлежащий поворотный магнит б66, который обеспечивает отвод не нейтрализованных быстрых ионов б63, и связанный с ним поглотитель б68 ионов, предназначенный для поглощения быстрых ионов и их энергии. Испускаемый пучок б70 атомов затем пропускают через подходящую апертуру б72, чтобы уменьшить расходимость пучка и обеспечить хорошо коллимированный поток нейтральных атомов по направлению к активной зоне реактора.

В альтернативном варианте ИОС выполнен на основе тетродной конструкции. В этом случае ИОС состоит из четырех сеток, которые имеют одинаковый основной блок ускорения-замедления, как пояснялось 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.

Варианты осуществления, представленные здесь, были описаны в предварительной заявке на патент США № 62/414574, которая включена в настоящий документ посредством ссылки.

Стабилизация плазмы и управление ее осевым положением.

Обычные решения проблем неустойчивостей FRC в типичных случаях обеспечивают устойчивость в осевом направлении за счет неустойчивости в радиальном направлении или устойчивости в радиальном направлении за счет осевой неустойчивости, но не устойчивости 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 направлениях, 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.

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 направлениях. 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.

Комбинация форм колебаний в токах катушек, пополнения и мощности нейтрального пучка, которая приводит к аксиально неустойчивой плазме, определяет сценарий управления плазмой, который устанавливает плазму в аксиально неустойчивую ситуацию. Сценарий может быть предварительно запрограммирован с использованием знаний уровня техники об этапах моделирования или экспериментах или управляться с обратной связью для поддержания 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 управ-

лять, имеет время роста, сравнимое со скин-временем емкости.

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 компонентами симметричных токов, такими как, например, катушки 412 квазипостоянного тока (см. фиг. 2, 3А, 3D и 3Е). 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.

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, 3А, 3D и 3Е) 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.

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 камеры удержания. 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. Процессор может быть выполнен с обеспечением вычислений и анализов, описанных в данной заявке, и может включать в себя или быть соединен с возможностью связи с одним или более запоминающими устройствами, включая невременный машиночитаемый носитель. Он может включать в себя систему на основе процессора или микропроцессора, включая системы, использующие микроконтроллеры, компьютеры с сокращенным набором команд (КсСНК), специализированные интегральные схемы (ИСПО), 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".

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.

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 (ОЗУ) и постоянное запоминающее устройство (ПЗУ). Компьютер или процессор также может включать в себя устройство хранения данных, которое может быть жестким диском или съемным носителем, 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.

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.

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. Скользящая поверхность 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.

Конфигурация схемы 500 управления показана на фиг. 28. Фильтр нижних частот ограничивает частоты переключения в пределах требуемой ширины полосы управления. Предполагается наличие цифрового контура управления, требующего дискретизации и передачи сигнала с одной задержкой дискретизации. 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.

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.

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 шагом 800 В.

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 шагом 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 самой внешней 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.

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.

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 в 32 кГц. Чтобы вернуть плазму к средней плоскости в течение 1,3 мс, требуется скорость разгона катушки в 2 МА/с. Пико-

вый ток, требуемый во всей паре катушек, составляет менее 1,5 кА. Фактическая требуемая частота переключения (примерно 2 кГц) значительно ниже ширины полосы системы управления.

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 метастабильной ситуации и может медленно дрейфовать вдоль своей оси. Затем 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.

Еще одним устройством удержания плазмы, в котором используются аналогичные системы управления, является токамак. Для поддержания 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 слабее, чтобы коэффициент безопасности q был выше $q=2$. Это достигается за счет удлинения плазмы вдоль направления оси машины, что позволяет налаживать большой ток плазмы (а следовательно, обеспечивать высокую плотность плазмы) без увеличения граничного магнитного поля больше его пределов 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.

В соответствии с вариантом осуществления настоящего изобретения способ генерирования и поддержания магнитного поля с конфигурацией с обращенным полем (FRC) содержит формирование FRC вокруг плазмы в камере удержания и инжекцию множества нейтральных пучков в плазму FRC с настройкой при этом энергии пучков из упомянутого множества нейтральных пучков между первой энергией пучка и второй энергией пучка, причем вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения вторая энергия пучка больше, чем первая энергия пучка.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения упомянутое множество нейтральных пучков переключают между первой и второй энергиями пучков на протяжении длительности выстрела при инжекции.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения первая и вторая энергии пучка находятся в диапазоне примерно от 15 до 40 кэВ.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит управление энергиями пучков из упомянутого множества нейтральных пучков посредством сигнала обратной связи, принимаемого из системы управления плазмой с активной обратной связью.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит управление энергиями пучков из упомянутого множества нейтральных пучков посредством сигнала обратной связи, принимаемого из системы управления плазмой с активной обратной связью.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения управление энергиями пучков из упомянутого множества нейтральных пучков включает в себя регулирование энергий пучков из упомянутого множества нейтральных пучков с целью регулирования радиального профиля поглощения мощности пучка для регулирования значения градиента давления.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно включает в себя поддержание FRC при постоянном значении или около него без спада и повышение температуры плазмы до значения, превышающего примерно 1,0 кэВ, путем инжекции пучков быстрых нейтральных атомов из инжекторов нейтральных пучков в плазму FRC под углом к средней секущей плоскости камеры удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения повышение температуры плазмы включает в себя повышение температуры от примерно 1,0 кэВ до примерно 3,0 кэВ.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения повышение температуры плазмы включает в себя повышение температуры от примерно 1,0 кэВ до примерно 3,0 кэВ.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит генерирование магнитного поля в пределах камеры удержания с помощью кату-

шек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг камеры удержания, и зеркального магнитного поля в пределах противоположных торцов камеры удержания с помощью зеркальных катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг противоположных концов торцов удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит генерирование магнитного поля в пределах камеры удержания с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг камеры удержания, и зеркального магнитного поля в пределах противоположных концов камеры удержания с помощью зеркальных катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг противоположных торцов камеры удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения формирование FRC включает в себя формирование FRC в противоположных первой и второй формирующих секциях, связанных с камерой удержания, и ускорение формирующей FRC из первой и второй формирующих секций к средней секущей плоскости камеры удержания, где обе формирующие FRC сливаются с образованием FRC.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения формирование FRC включает в себя одно из формирования формирующей FRC при ускорении формирующей FRC к средней секущей плоскости камеры удержания и формирования формирующей FRC с последующим ускорением формирующей FRC к средней секущей плоскости камеры удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения ускорение формирующей FRC из первой и второй формирующих секций к средней секущей плоскости камеры удержания включает в себя пропускание формирующей FRC из первой и второй формирующих секций через первый и второй внутренние диверторы, связанные с противоположными торцами камеры удержания, находящиеся между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения пропускание формирующей FRC из первой и второй формирующих секций через первый и второй внутренние диверторы включает в себя деактивацию первого и второго внутренних диверторов, когда формирующая FRC из первой и второй формирующих секций проходит через первый и второй внутренние диверторы.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит направление поверхностей магнитного потока FRC в первый и второй внутренние диверторы.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит направление поверхностей магнитного потока FRC в первый и второй внешние диверторы, связанные с торцами формирующих секций.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит генерирование магнитного поля в пределах формирующих секций и первого и второго внешних диверторов с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг формирующих секций и диверторов.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит генерирование магнитного поля в пределах формирующих секций и первого и второго внутренних диверторов с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг формирующих секций и диверторов.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит генерирование зеркального магнитного поля между первой и второй формирующими секциями и первым и вторым внешними диверторами с помощью зеркальных катушек квазипостоянного тока.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит генерирование магнитного поля зеркальных пробок в пределах сужения между первой и второй формирующими секциями и первым и вторым внешними диверторами с помощью зеркальных пробочных катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг сужения между формирующими секциями и диверторами.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит генерирование зеркального магнитного поля между камерой удержания и первым и вторым внутренними диверторами с помощью зеркальных катушек квазипостоянного тока и генерирование сужающегося магнитного поля между первой и второй формирующими секциями и первым и вторым внутренними диверторами с помощью низкопрофильных обжимных катушек постоянного тока.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит генерирование одного из магнитного дипольного поля и магнитного квадрупольного поля в пределах камеры с помощью отклоняющих катушек, связанных с камерой.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит кондиционирование внутренних поверхностей камеры и внутренних поверхностей первой и второй формирующих секций, причем первые и вторые диверторы находятся между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями и первый и второй внешние диверторы связаны с первой и второй формирующими секциями с помощью системы геттерирования.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения система геттерирования включает в себя одну из системы осаждения титана и системы осаждения лития.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит осевую инжекцию плазмы в FRC из аксиально установленных плазменных пушек.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит управление радиальным профилем электрического поля в граничном слое FRC.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего 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.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит стабилизацию плазмы FRC в радиальном направлении, перпендикулярном продольной оси камеры удержания, для осесимметричного позиционирования плазмы FRC вокруг продольной оси и в осевом направлении вдоль продольной оси для осесимметричного позиционирования плазмы FRC относительно средней плоскости камеры удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит генерирование прикладываемого магнитного поля в пределах камеры с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг камеры.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит стабилизацию плазмы FRC в радиальном направлении, что включает в себя настройку прикладываемого магнитного поля для внесения радиальной устойчивости и осевой неустойчивости в плазму FRC.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения осевая стабилизация плазмы FRC включает в себя создание первого и второго радиальных магнитных полей, при этом первое и второе радиальные магнитные поля взаимодействуют с FRC для осевого перемещения плазмы FRC с целью осесимметричного позиционирования плазмы FRC относительно средней плоскости.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно содержит инжекцию плазм компактных тороидов (КТ) из первого и второго инжекторов КТ в плазму FRC под углом к средней плоскости камеры удержания, при этом первый и второй инжекторы КТ диаметрально противоположны, находясь с противоположных сторон от средней плоскости камеры удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения предложена система для генерирования и поддержания магнитного поля с конфигурацией обращенного поля (FRC), содержащая

камеру удержания;

первую и вторую диаметрально противоположные формирующие FRC секции, связанные с первым и вторым диаметрально противоположными внутренними диверторами;

первые и вторые диверторы, связанные с первой и второй формирующими секциями;

одну или более из множества плазменных пушек, один или более смещающих электродов и первую и вторую зеркальные пробки,

при этом упомянутое множество плазменных пушек включает в себя первую и вторую осевые плазменные пушки, функционально связанные с первыми и вторыми диверторами, первой и второй формирующими секциями и камерой удержания,

при этом упомянутый один или более смещающих электродов расположены в пределах одной или более из камер удержания, первой и второй формирующих секций и первого и второго внешних диверторов, и

при этом первая и вторая зеркальные пробки расположены между первой и второй формирующими секциями и первыми и вторыми диверторами;

систему геттерирования, связанную с камерой удержания и первыми и вторыми диверторами;

множество инжекторов нейтральных пучков, связанных с камерой удержания и наклоненных к средней плоскости камеры удержания,

при этом один или более из упомянутого множества инжекторов нейтральных пучков являются настраиваемыми между первой энергией пучка и второй энергией пучка,

при этом вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка; и

магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, расположенных вокруг камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первых и вторых диверторов, и первый и второй наборы зеркальных катушек квазипостоянного тока, расположенных между первой и второй формирующими секциями и первыми и вторыми диверторами.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения вторая энергия пучка больше, чем первая энергия пучка.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения множество нейтральных пучков выполнено с возможностью переключения между первой и второй энергиями пучка на протяжении длительности выстрела при инжекции.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения первая и вторая энергии пучка находятся в диапазоне примерно от 15 до 40 кэВ.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения предлагаемая система дополнительно содержит систему управления с активной обратной связью, выполненную с возможностью управления энергиями пучков из упомянутого множества нейтральных пучков.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения система выполнена с возможностью генерирования FRC и поддержания FRC без спада при инжекции нейтральных пучков в плазму и повышения температуры плазмы примерно от 1,0 до 3,0 кэВ.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения первые и вторые диверторы содержат первый и второй внутренние диверторы, заключенные между первой и второй формирующими секциями и камерой удержания, и дополнительно содержат первый и второй внешние диверторы, связанные с первой и второй формирующими секциями, при этом первая и вторая формирующие секции заключены между первым и вторым внутренними диверторами и первым и вторым внешними диверторами.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения система дополнительно содержит первую и вторую осевые плазменные пушки, функционально связанные с первыми и вторыми внутренними и внешними диверторами, первой и второй формирующими секциями и камерой удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения система дополнительно содержит две или более отклоняющих катушек, связанных с камерой удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения формирующая секция содержит построенные из модулей формирующие системы для генерирования FRC и поступательного перемещения ее к средней плоскости камеры удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения смещающие электроды включают в себя один или более из

одного или более точечных электродов, расположенных в пределах камеры удержания, для контакта с незамкнутыми силовыми линиями;

набора кольцевых электродов между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями для зарядки дальних граничных слоев по азимутально симметричной схеме;

множества электродов, концентрично уложенных в стопу, расположенных в первых и вторых диверторах для зарядки нескольких концентрических слоев потока; и

анодов плазменных пушек для перехвата незамкнутого потока.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения система дополнительно содержит систему управления, функционально связанную с катушками квазипостоянного тока и первой и второй радиальными катушками магнитного поля, причем система управления включает в себя процессор, связанный с невременной памятью, содержащей множество команд, которые, будучи исполняемыми процессором, заставляют процессор настраивать магнитное поле, генерируемое упомянутым множеством катушек квазипостоянного тока и первой и второй катушками радиального поля, для стабилизации плазмы FRC в радиальном направлении, перпендикулярном продольной оси камеры, для осесимметричного позиционирования плазмы FRC вокруг продольной оси и в осевом направлении вдоль продольной оси для осесимметричного позиционирования плазмы FRC относительно средней плоскости.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения система выполнена с возможностью генерирования FRC и поддержания FRC при постоянном или почти постоянном значении без спада, когда нейтральные пучки атомов инжектируются в FRC.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения первое и второе радиальные магнитные поля антисимметричны относительно средней плоскости.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения система дополнительно содержит первый и второй инжекторы компактных тороидов (КТ), связанные с камерой удержания под углом к средней плоскости камеры удержания, при этом первый и второй инжекторы КТ диаметрально противоположны, находясь с противоположных сторон от средней плоскости камеры удержания.

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

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 antecedentной 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.

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.

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. Система для генерирования и поддержания магнитного поля с конфигурацией с обращенным полем (FRC), содержащая камеру удержания;
 первую и вторую диаметрально противоположные формирующие FRC секции, связанные с камерой удержания;
 первые и вторые диверторы, связанные с первой и второй формирующими секциями;
 одно или более из множества плазменных пушек, одного или более смещающих электродов и первой и второй зеркальных пробок,
 при этом упомянутое множество плазменных пушек включает в себя первую и вторую осевые плазменные пушки, функционально связанные с первыми и вторыми диверторами, первой и второй формирующими секциями и камерой удержания,
 при этом упомянутые один или более смещающих электродов расположены в пределах одной или более из камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первых и вторых диверторов, и
 при этом первая и вторая зеркальные пробки расположены между первой и второй формирующими секциями и первыми и вторыми диверторами;
 систему геттерирования, связанную с камерой удержания и первыми и вторыми диверторами;
 множество инжекторов пучков нейтральных атомов, связанных с камерой удержания и наклоненных к средней плоскости камеры удержания,
 при этом один или более из множества инжекторов пучков нейтральных атомов являются переключаемыми между первой энергией пучка и второй энергией пучка,
 при этом вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка;
 магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, расположенных вокруг камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первых и вторых диверторов, и первый и второй наборы зеркальных катушек квазипостоянного тока, расположенных между первой и второй формирующими секциями и первыми и вторыми диверторами; и
 систему управления, функционально связанную с одной или более из множества плазменных пушек, одним или более смещающих электродов и первой и второй зеркальными пробками, множеством инжекторов пучков нейтральных атомов и магнитной системой,
 причем система управления включает в себя процессор, связанный с невременной памятью, содержащей множество команд, которые, будучи исполняемыми, вызывают повышение температуры плазмы и магнитного поля путем переключения энергии пучка упомянутого одного или более из множества инжекторов пучков нейтральных атомов между первой и второй энергиями пучка при инъекции пучков нейтральных атомов из упомянутого одного или более из множества инжекторов пучков нейтральных атомов в плазму FRC и при регулировании напряженности магнитного поля, профиля магнитного поля, профилей давления, электрического смещения и пополнения топливом плазменных пушек для установ-

ления и поддержания плазмы с давлением быстрых частиц.

2. Система по п.1, причем вторая энергия пучка больше, чем первая энергия пучка.

3. Система по п.1, причем упомянутые один или более из множества пучков нейтральных атомов выполнены с возможностью переключения между первой и второй энергиями пучка на протяжении длительности инъекции пучка нейтральных атомов.

4. Система по любому из пп.1-3, причем первая и вторая энергии пучка находятся в диапазоне примерно от 15 до 40 кэВ.

5. Система по любому из пп.1-3, причем система управления представляет собой систему управления плазмой с активной обратной связью, выполненную с возможностью управления энергиями пучков из упомянутого множества пучков нейтральных атомов.

6. Система по п.1, причем система выполнена с возможностью генерирования FRC и поддержания FRC без спада при инъекции пучков нейтральных атомов в плазму и повышения температуры плазмы примерно от 1,0 до 3,0 кэВ.

7. Система по п.1, причем первые и вторые диверторы содержат первый и второй внутренние диверторы, установленные между первой и второй формирующими секциями и камерой удержания, и дополнительно содержат первый и второй внешние диверторы, связанные с первой и второй формирующими секциями, при этом первая и вторая формирующие секции установлены между первым и вторым внутренними диверторами и первым и вторым внешними диверторами соответственно.

8. Система по п.7, причем первая и вторая осевые плазменные пушки функционально связаны с первым и вторым внутренними диверторами, первым и вторым внешними диверторами, первой и второй формирующими секциями и камерой удержания.

9. Система по п.8, дополнительно содержащая две или более отклоняющих катушек, связанных с камерой удержания.

10. Система по п.1, причем формирующая секция содержит построенные из модулей формирующие системы для генерирования FRC и ее поступательного перемещения к средней плоскости камеры удержания.

11. Система по п.1, причем смещающие электроды включают в себя одно или более из одного или более точечных электродов, расположенных в пределах камеры удержания, для контакта с незамкнутыми силовыми линиями;

набора кольцевых электродов между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями для зарядки дальних граничных слоев по азимутально симметричной схеме;

множества электродов, концентрично уложенных в стопу, расположенных в первых и вторых диверторах для зарядки множества концентрических слоев потока; и анодов плазменных пушек для перехвата незамкнутого потока.

12. Система по п.1,

причем система управления функционально связана с катушками квазипостоянного тока и первой и второй радиальными катушками магнитного поля, и

причем процессор дополнительно содержит множество команд, которые, будучи исполняемыми, заставляют процессор настраивать магнитное поле, генерируемое упомянутым множеством катушек квазипостоянного тока и первой и второй катушками радиального поля, для стабилизации плазмы FRC в радиальном направлении, перпендикулярном продольной оси камеры удержания, для осесимметричного позиционирования плазмы FRC вокруг продольной оси и в осевом направлении вдоль продольной оси для осесимметричного позиционирования плазмы FRC относительно средней плоскости.

13. Система по п.12, причем система выполнена с возможностью генерирования FRC и поддержания FRC при постоянном или почти постоянном значении без спада, когда пучки нейтральных атомов инжектируются в FRC.

14. Система по п.12, причем первое и второе радиальные магнитные поля антисимметричны относительно средней плоскости.

15. Система по любому из пп.1-3 и 6-14, дополнительно содержащая первый и второй инжекторы компактных тороидов (КТ), связанные с камерой удержания под углом к средней плоскости камеры удержания, при этом первый и второй инжекторы КТ диаметрально противоположны, находясь с противоположных сторон от средней плоскости камеры удержания.

16. Система по п.4, дополнительно содержащая первый и второй инжекторы компактных тороидов (КТ), связанные с камерой удержания под углом к средней плоскости камеры удержания, при этом первый и второй инжекторы КТ диаметрально противоположны, находясь с противоположных сторон от средней плоскости камеры удержания.

17. Система по п.5, дополнительно содержащая первый и второй инжекторы компактных тороидов (КТ), связанные с камерой удержания под углом к средней плоскости камеры удержания, при этом первый и второй инжекторы КТ диаметрально противоположны, находясь с противоположных сторон от средней плоскости камеры удержания.

18. Способ генерирования и поддержания магнитного поля с конфигурацией с обращенным полем (FRC) с использованием системы по любому из пп.1-17, включающий в себя этапы

формирования плазмы FRC в камере удержания путем формирования магнитного поля FRC вокруг плазмы в камере удержания;

инъекции множества пучков нейтральных атомов в плазму FRC из множества инжекторов пучков нейтральных атомов, связанных с камерой удержания; и

переключения энергии пучка из одного или более из множества инжекторов пучков нейтральных атомов между первой и второй энергиями пучка при инъекции упомянутого множества пучков нейтральных атомов в плазму FRC из упомянутого одного или более из множества инжекторов пучков нейтральных атомов.

19. Способ по п.18, причем вторая энергия пучка больше, чем первая энергия пучка.

20. Способ по п.18, причем упомянутый один или более из множества пучков нейтральных атомов переключают между первой и второй энергиями пучков на протяжении длительности инъекции пучка нейтральных атомов.

21. Способ по любому из пп.18-20, причем первая и вторая энергии пучка находятся в диапазоне примерно от 15 до 40 кэВ.

22. Способ по любому из пп.18-20, причем этап переключения энергии пучка упомянутого одного или более из множества инжекторов пучков нейтральных атомов включает в себя управление энергиями пучков из упомянутого одного или более из множества пучков нейтральных атомов посредством сигнала обратной связи, принимаемого из системы управления.

23. Способ по п.21, причем этап переключения энергии пучка упомянутого одного или более из множества инжекторов пучков нейтральных атомов включает в себя управление энергиями пучков из упомянутого множества пучков нейтральных атомов посредством сигнала обратной связи, принимаемого из системы управления плазмой с активной обратной связью.

24. Способ по п.22, причем этап управления энергиями пучков из упомянутого множества пучков нейтральных атомов включает в себя регулирование энергий пучков из упомянутого множества пучков нейтральных атомов с целью регулирования радиального профиля поглощения мощности пучка для регулирования значения градиента давления.

25. Способ по п.23, причем этап управления энергиями пучков из упомянутого множества пучков нейтральных атомов включает в себя регулирование энергий пучков из упомянутого множества пучков нейтральных атомов с целью регулирования радиального профиля поглощения мощности пучка для регулирования значения градиента давления.

26. Способ по любому из пп.18-20 и 23-25, дополнительно включающий в себя поддержание FRC на постоянном значении или около него без спада и повышение температуры плазмы до значения, превышающего примерно 1,0 кэВ, путем инъекции пучков быстрых нейтральных атомов из инжекторов пучков нейтральных атомов в плазму FRC под углом к средней секущей плоскости камеры удержания.

27. Способ по п.21, дополнительно включающий в себя поддержание FRC на постоянном значении или около него без спада и повышение температуры плазмы до значения, превышающего примерно 1,0 кэВ, путем инъекции пучков быстрых нейтральных атомов из инжекторов пучков нейтральных атомов в плазму FRC под углом к средней секущей плоскости камеры удержания.

28. Способ по п.22, дополнительно включающий в себя поддержание FRC на постоянном значении или около него без спада и повышение температуры плазмы до значения, превышающего примерно 1,0 кэВ, путем инъекции пучков быстрых нейтральных атомов из инжекторов пучков нейтральных атомов в плазму FRC под углом к средней секущей плоскости камеры удержания.

29. Способ по п.26, причем этап повышения температуры плазмы включает в себя повышение температуры от примерно 1,0 кэВ до примерно 3,0 кэВ.

30. Способ по любому из пп.27 и 28, причем этап повышения температуры плазмы включает в себя повышение температуры от примерно 1,0 кэВ до примерно 3,0 кэВ.

31. Способ по п.26, дополнительно включающий в себя этап генерирования магнитного поля в пределах камеры удержания с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг камеры удержания, и зеркального магнитного поля в пределах противоположных торцов камеры удержания с помощью зеркальных катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг противоположных торцов камеры удержания.

32. Способ по любому из пп.27 и 28, дополнительно включающий в себя этап генерирования магнитного поля в пределах камеры удержания с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг камеры удержания, и зеркального магнитного поля в пределах противоположных торцов камеры удержания с помощью зеркальных катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг противоположных торцов камеры удержания.

33. Способ по п.31, причем этап формирования FRC включает в себя формирование формирующей FRC в противоположных первой и второй формирующих секциях, связанных с камерой удержания; и

ускорение формирующей FRC из первой и второй формирующих секций к средней секущей плоскости камеры удержания, где обе формирующие FRC сливаются с образованием FRC.

34. Способ по п.32, причем этап формирования FRC включает в себя

формирование формирующей FRC в противоположных первой и второй формирующих секциях, связанных с камерой удержания; и

ускорение формирующей FRC из первой и второй формирующих секций к средней секущей плоскости камеры удержания, где обе формирующие FRC сливаются с образованием FRC.

35. Способ по любому из пп.33 и 34, причем этап формирования FRC включает в себя одно из формирования формирующей FRC при ускорении формирующей FRC к средней секущей плоскости камеры удержания и формирования формирующей FRC с последующим ускорением формирующей FRC к средней секущей плоскости камеры удержания.

36. Способ по любому из пп.33 и 34, причем этап ускорения формирующей FRC из первой и второй формирующих секций к средней секущей плоскости камеры удержания включает в себя пропускание формирующей FRC из первой и второй формирующих секций через первый и второй внутренние диверторы, связанные с противоположными торцами камеры удержания, установленные между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями.

37. Способ по п.36, причем этап пропускания формирующей FRC из первой и второй формирующих секций через первый и второй внутренние диверторы включает в себя деактивацию первого и второго внутренних диверторов, когда формирующая FRC из первой и второй формирующих секций проходит через первый и второй внутренние диверторы.

38. Способ по п.36, дополнительно включающий в себя этап направления поверхностей магнитного потока FRC в первый и второй внутренние диверторы.

39. Способ по п.35, дополнительно включающий в себя этап направления поверхностей магнитного потока FRC в первый и второй внешние диверторы, связанные с торцами формирующих секций.

40. Способ по п.39, дополнительно включающий в себя этап генерирования магнитного поля в пределах формирующих секций и первого и второго внешних диверторов с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг формирующих секций и диверторов.

41. Способ по п.38, дополнительно включающий в себя этап генерирования магнитного поля в пределах формирующих секций и первого и второго внутренних диверторов с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг формирующих секций и диверторов.

42. Способ по п.40, дополнительно включающий в себя этап генерирования зеркального магнитного поля между первой и второй формирующими секциями и первым и вторым внешними диверторами с помощью зеркальных катушек квазипостоянного тока.

43. Способ по п.40, дополнительно включающий в себя этап генерирования магнитного поля зеркальных пробок в пределах сужения между первой и второй формирующими секциями и первым и вторым внешними диверторами с помощью зеркальных пробочных катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг сужения между формирующими секциями и диверторами.

44. Способ по п.41, дополнительно включающий в себя этапы генерирования зеркального магнитного поля между камерой удержания и первым и вторым внутренними диверторами с помощью зеркальных катушек квазипостоянного тока; и генерирования сужающегося магнитного поля между первой и второй формирующими секциями и первым и вторым внутренними диверторами с помощью низкопрофильных обжимных катушек постоянного тока.

45. Способ по п.26, дополнительно включающий в себя этап генерирования одного из магнитного дипольного поля и магнитного квадрупольного поля в пределах камеры удержания с помощью отклоняющих катушек, связанных с камерой удержания.

46. Способ по любому из пп.27 и 28, дополнительно включающий в себя этап генерирования одного из магнитного дипольного поля и магнитного квадрупольного поля в пределах камеры удержания с помощью отклоняющих катушек, связанных с камерой удержания.

47. Способ по п.26, дополнительно включающий в себя этап кондиционирования внутренних поверхностей камеры удержания и внутренних поверхностей первой и второй формирующих секций, первого и второго внутренних диверторов, установленных между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями, и первого и второго внешних диверторов, связанных с первой и второй формирующими секциями, с помощью системы геттерирования.

48. Способ по п.47, причем система геттерирования включает в себя одну из системы осаждения титана и системы осаждения лития.

49. Способ по п.26, дополнительно включающий в себя этап осевой инъекции плазмы в FRC из аксиально установленных плазменных пушек.

50. Способ по п.26, дополнительно включающий в себя этап управления радиальным профилем электрического поля в граничном слое FRC.

51. Способ по п.50, причем 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.

52. Способ по п.18, дополнительно включающий в себя этап стабилизации плазмы FRC в радиальном направлении, перпендикулярном продольной оси камеры удержания, для осесимметричного пози-

ционирования плазмы FRC вокруг продольной оси и в осевом направлении вдоль продольной оси для осесимметричного позиционирования плазмы FRC относительно средней плоскости камеры удержания.

53. Способ по п.52, дополнительно включающий в себя этап генерирования прикладываемого магнитного поля в пределах камеры удержания с помощью катушек квазипостоянного тока, простирающихся вокруг камеры удержания.

54. Способ по п.52, причем этап стабилизации плазмы FRC в радиальном направлении включает в себя настройку прикладываемого магнитного поля для внесения радиальной устойчивости и осевой неустойчивости в плазму FRC.

55. Способ по любому из пп.52-54, причем этап осевой стабилизации плазмы FRC включает в себя создание первого и второго радиальных магнитных полей, при этом первое и второе радиальные магнитные поля взаимодействуют с FRC для осевого перемещения плазмы FRC с целью осесимметричного позиционирования плазмы FRC относительно средней плоскости.

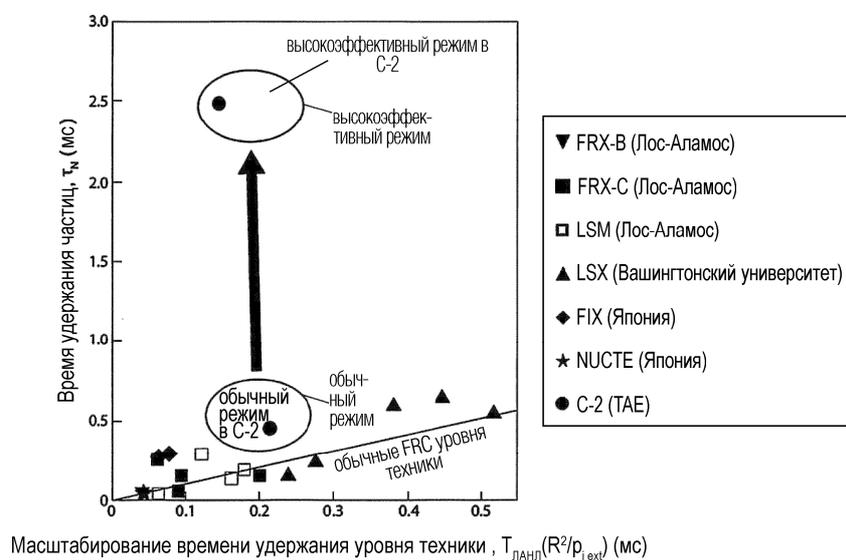
56. Способ по любому из пп.18-20 и 23-25, дополнительно включающий в себя инъекцию плазм компактных тороидов (КТ) из первого и второго инжекторов КТ в плазму FRC под углом к средней плоскости камеры удержания, при этом первый и второй инжекторы КТ диаметрально противоположны, находясь с противоположных сторон от средней плоскости камеры удержания.

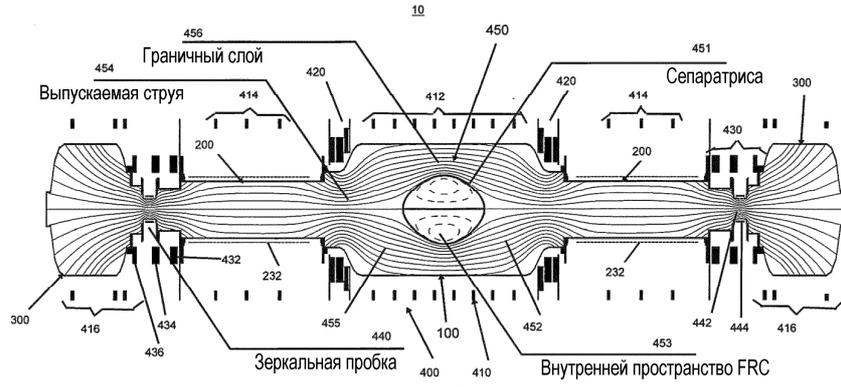
57. Способ по п.21, дополнительно включающий в себя инъекцию плазм компактных тороидов (КТ) из первого и второго инжекторов КТ в плазму FRC под углом к средней плоскости камеры удержания, при этом первый и второй инжекторы КТ диаметрально противоположны, находясь с противоположных сторон от средней плоскости камеры удержания.

58. Способ по п.22, дополнительно включающий в себя инъекцию плазм компактных тороидов (КТ) из первого и второго инжекторов КТ в плазму FRC под углом к средней плоскости камеры удержания, при этом первый и второй инжекторы КТ диаметрально противоположны, находясь с противоположных сторон от средней плоскости камеры удержания.

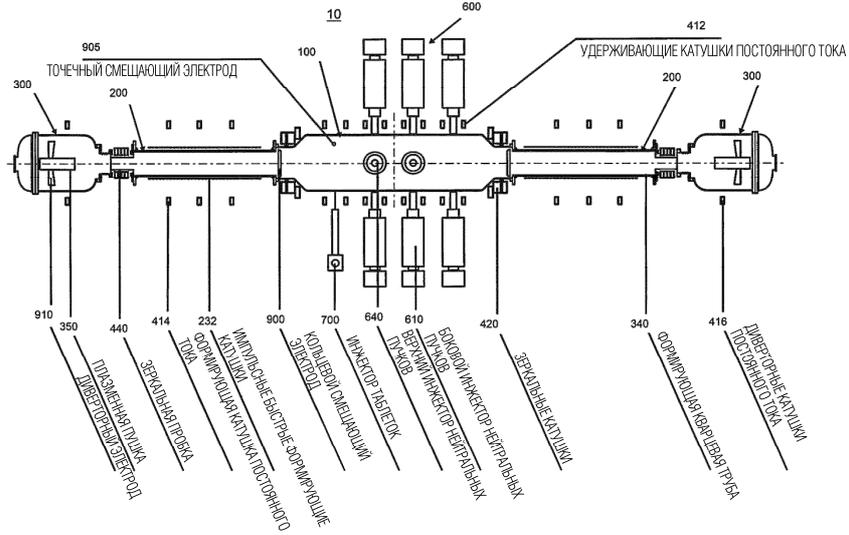
59. Способ по п.26, дополнительно включающий в себя инъекцию плазм компактных тороидов (КТ) из первого и второго инжекторов КТ в плазму FRC под углом к средней плоскости камеры удержания, при этом первый и второй инжекторы КТ диаметрально противоположны, находясь с противоположных сторон от средней плоскости камеры удержания.

60. Способ по любому из пп.27 и 28, дополнительно включающий в себя инъекцию плазм компактных тороидов (КТ) из первого и второго инжекторов КТ в плазму FRC под углом к средней плоскости камеры удержания, при этом первый и второй инжекторы КТ диаметрально противоположны, находясь с противоположных сторон от средней плоскости камеры удержания.

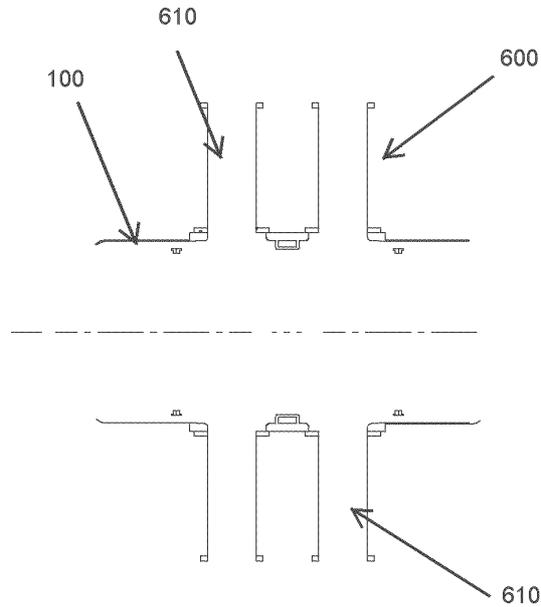




Фиг. 2

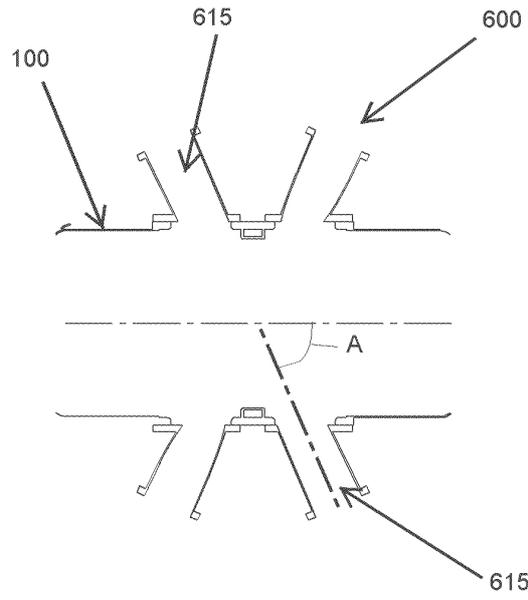


Фиг. 3А

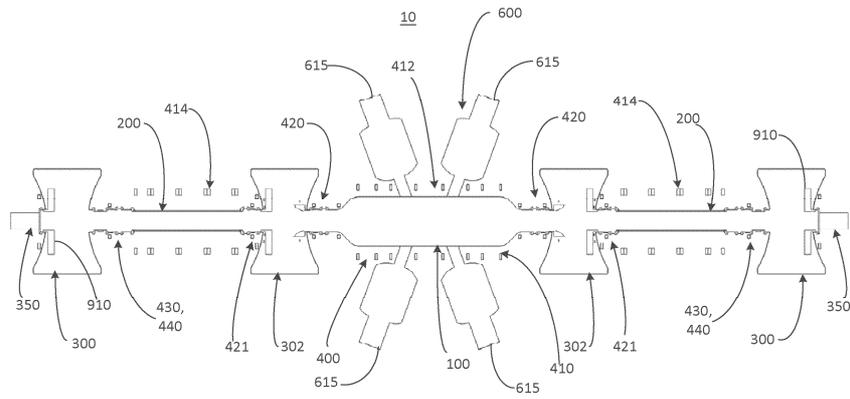


Фиг. 3В

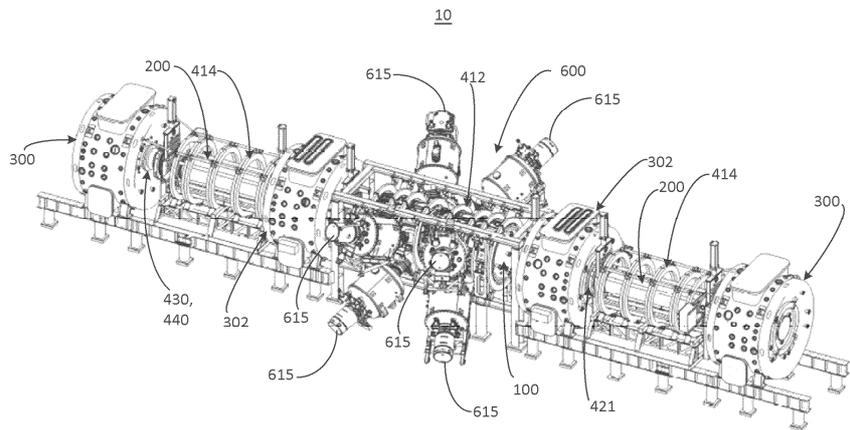
040251



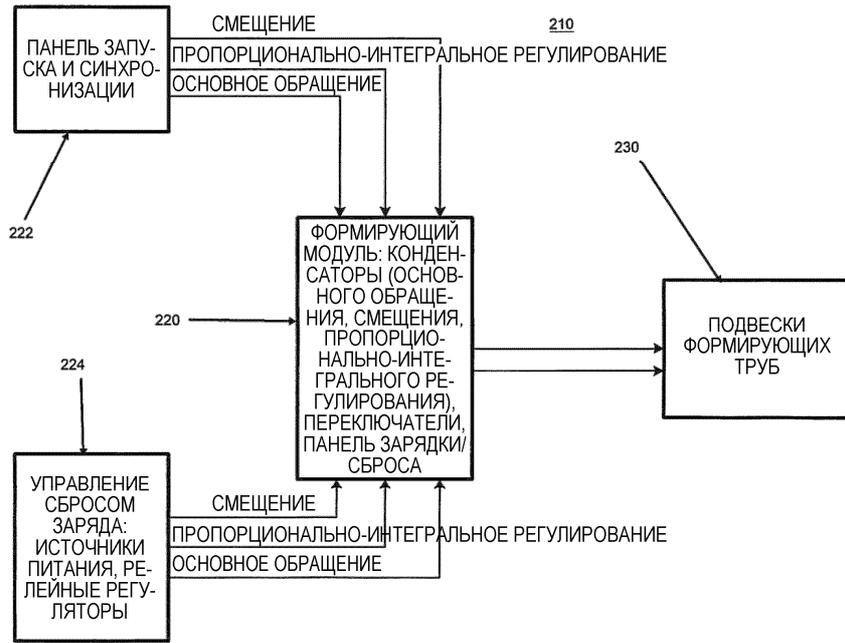
Фиг. 3С



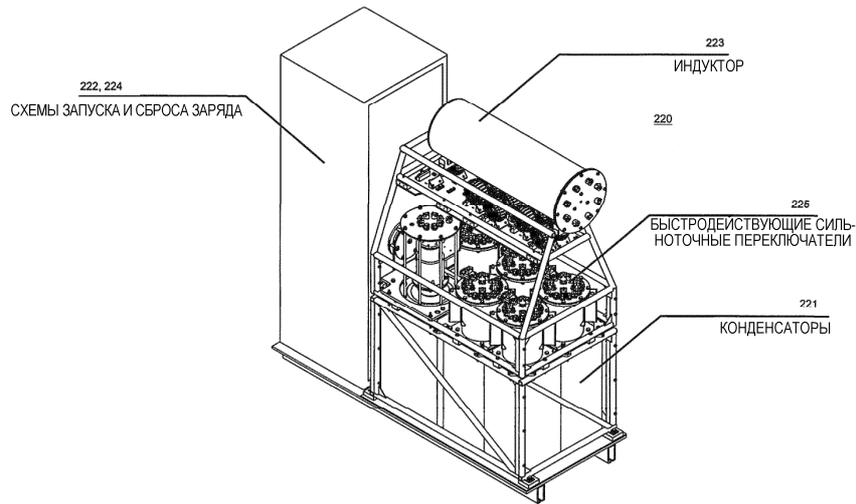
Фиг. 3D



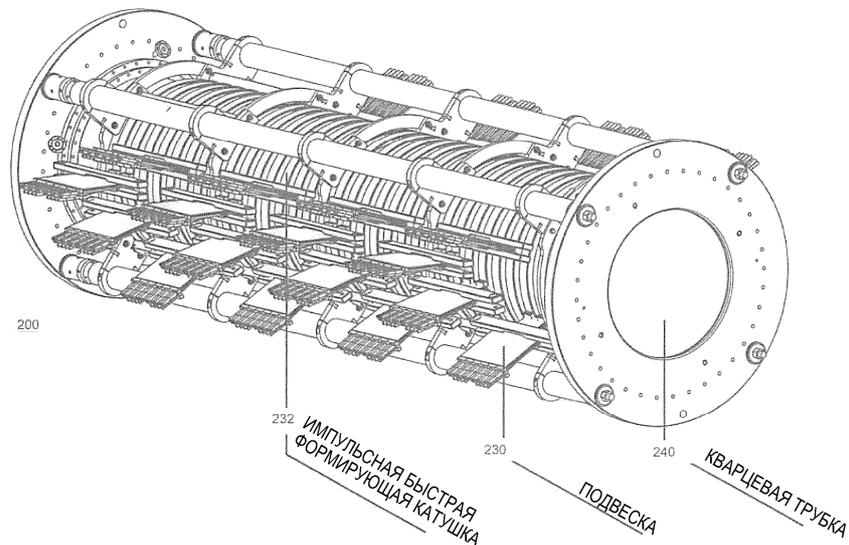
Фиг. 3Е



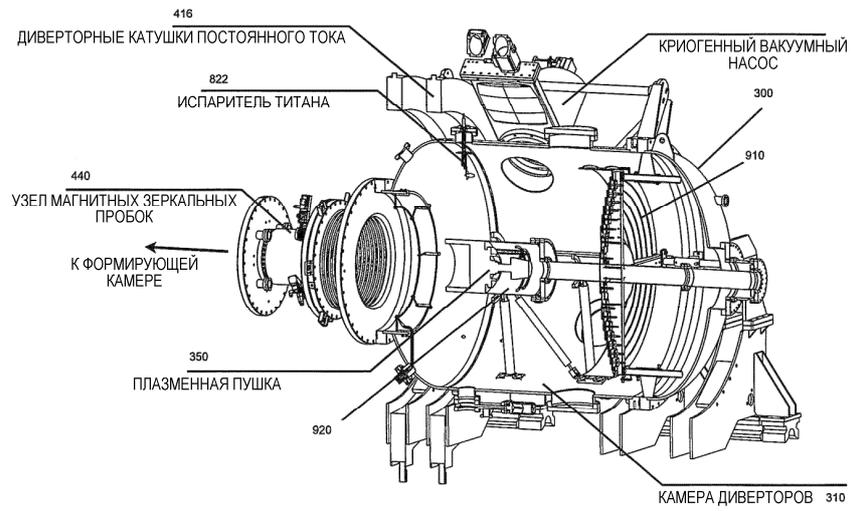
Фиг. 4



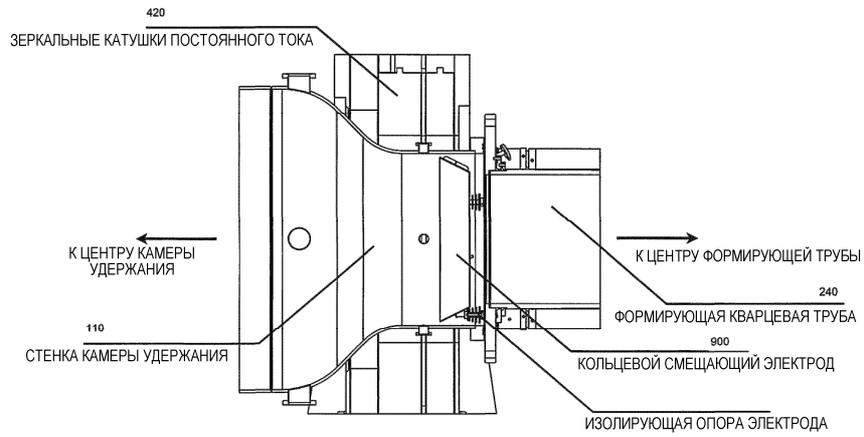
Фиг. 5



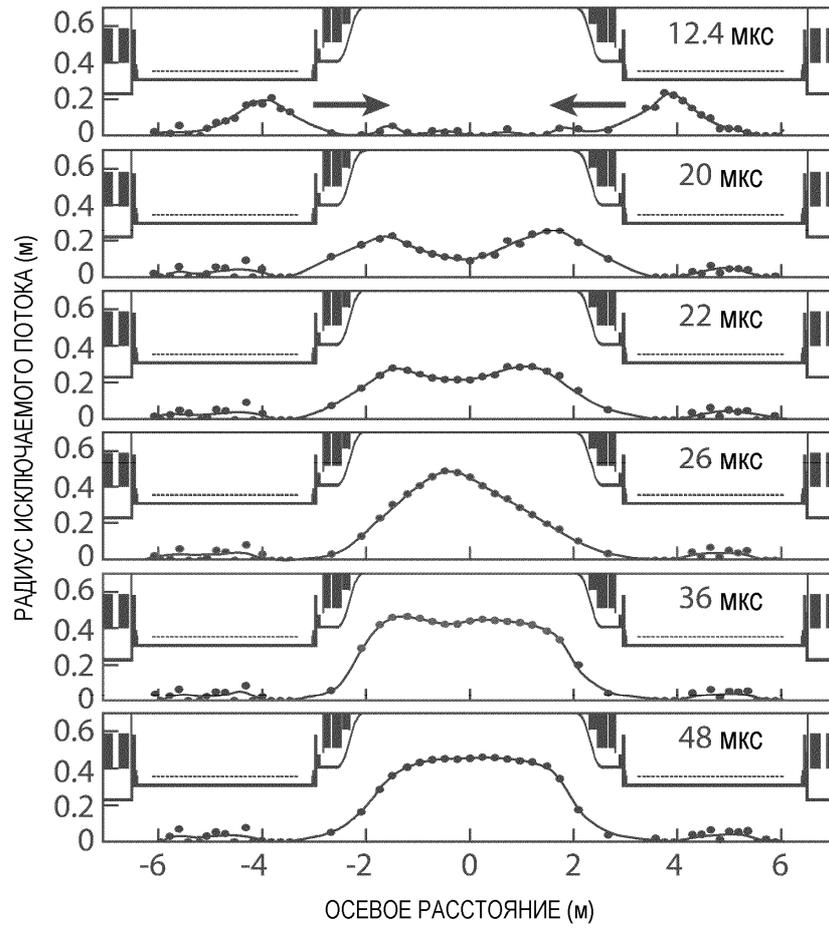
Фиг. 6



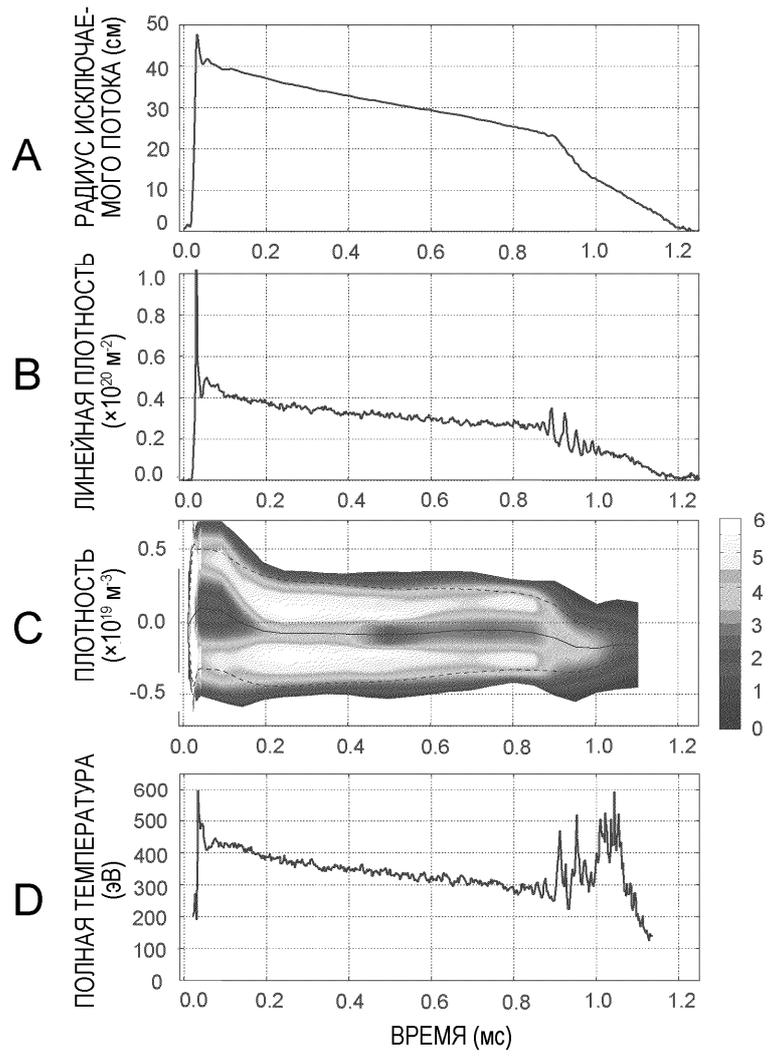
Фиг. 10

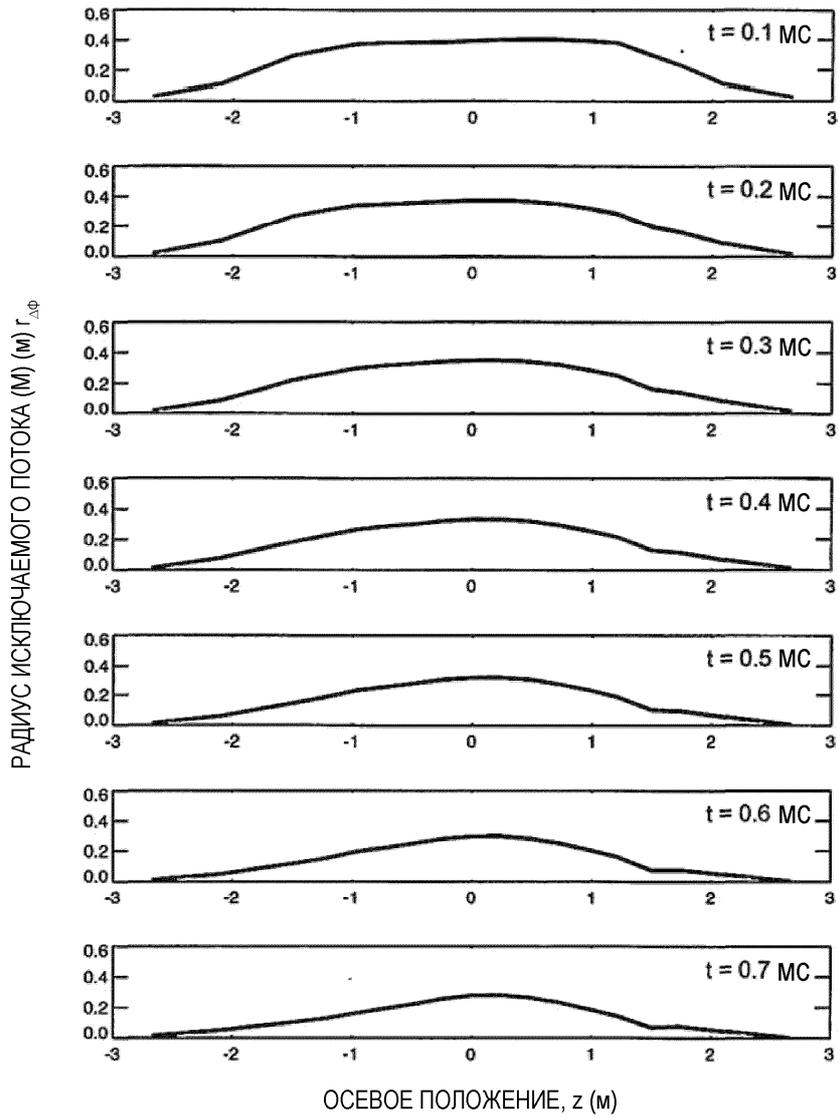


Фиг. 11

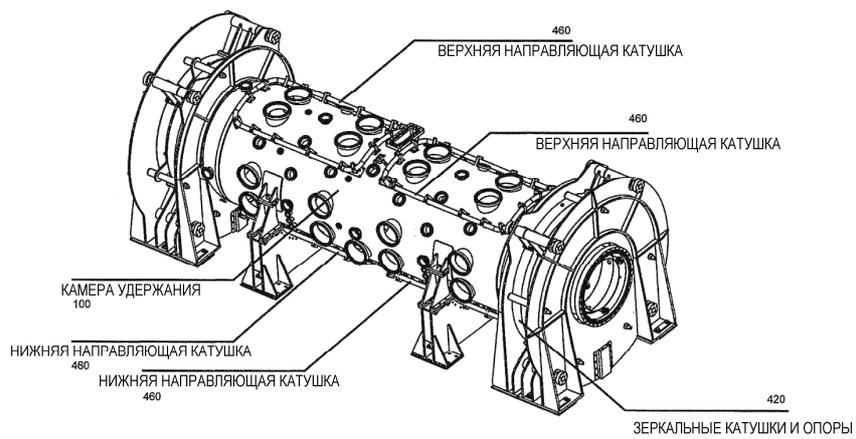


Фиг. 12

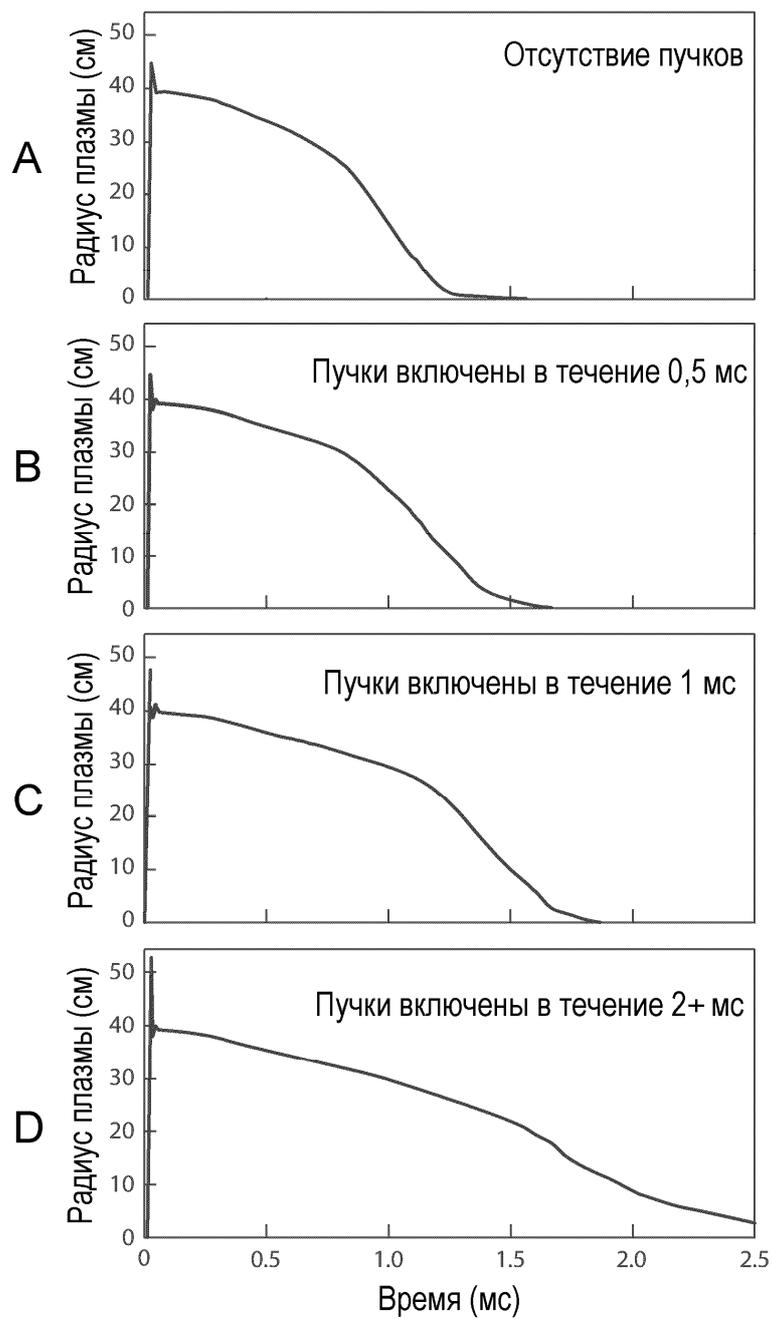




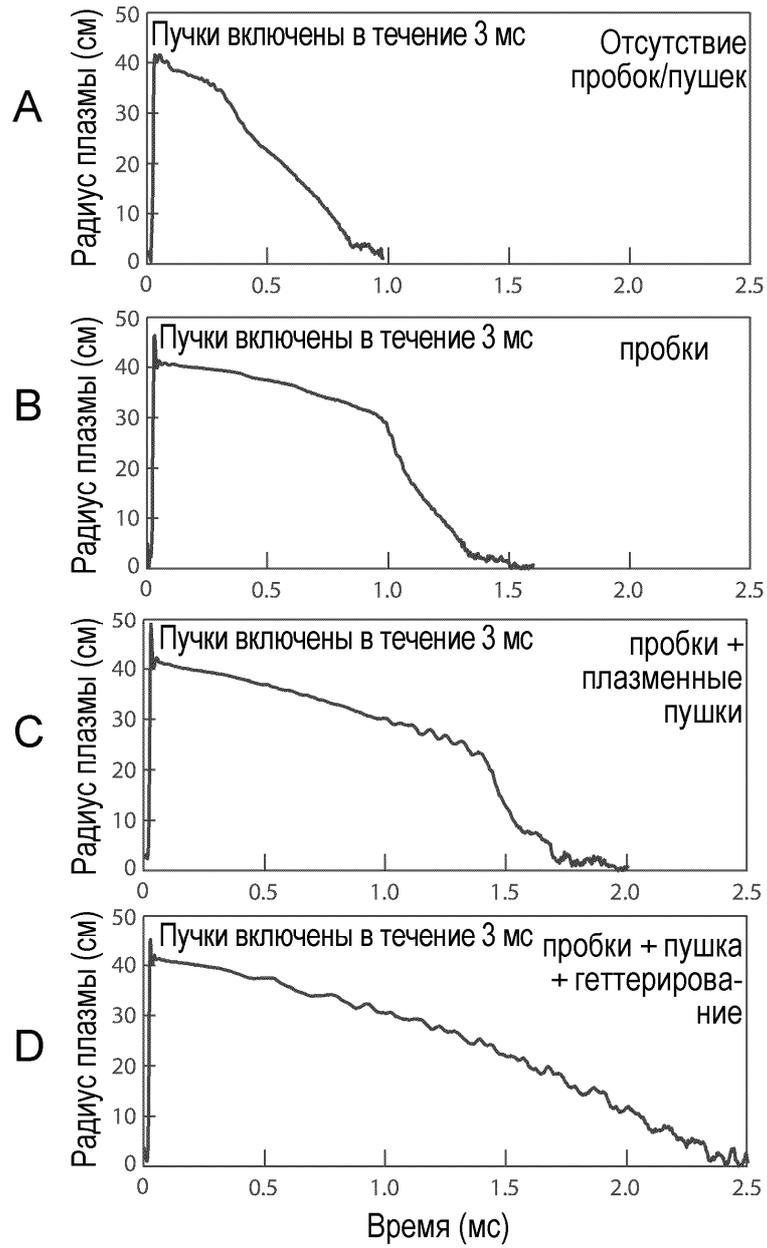
Фиг. 14



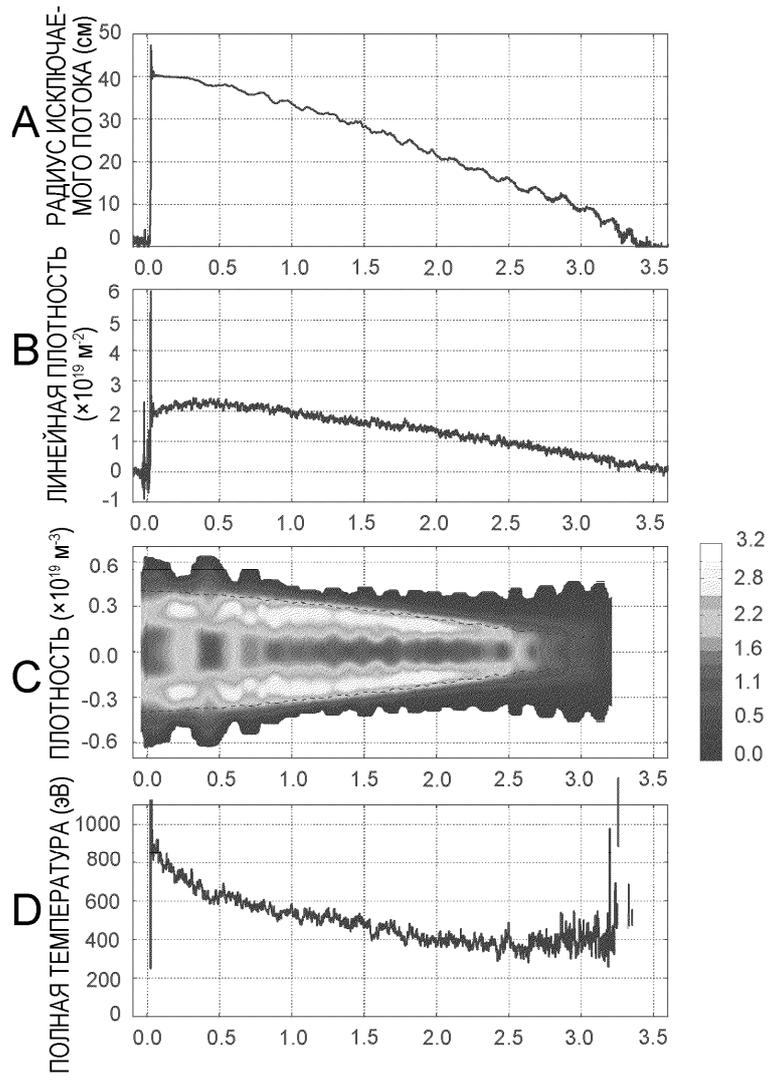
Фиг. 15



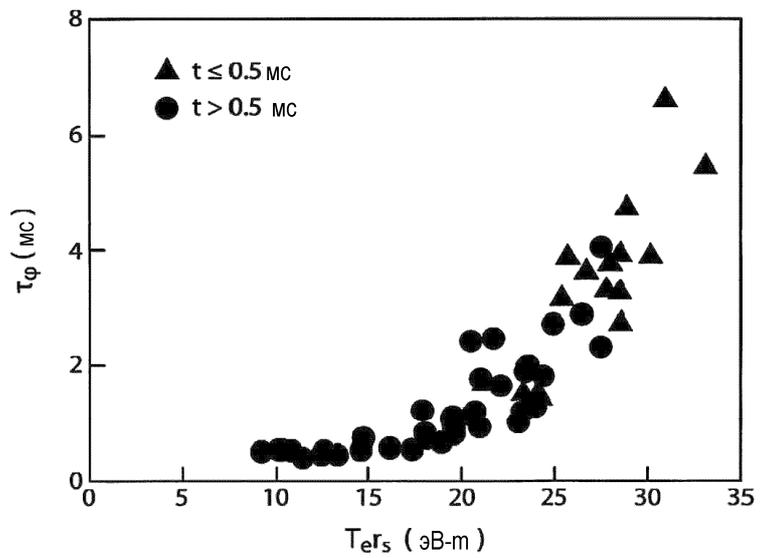
Фиг. 16А-16D



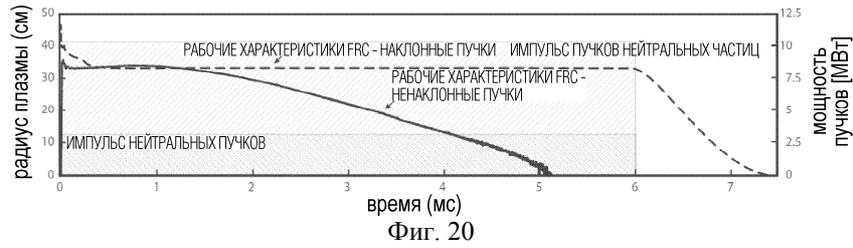
Фиг. 17А-17D



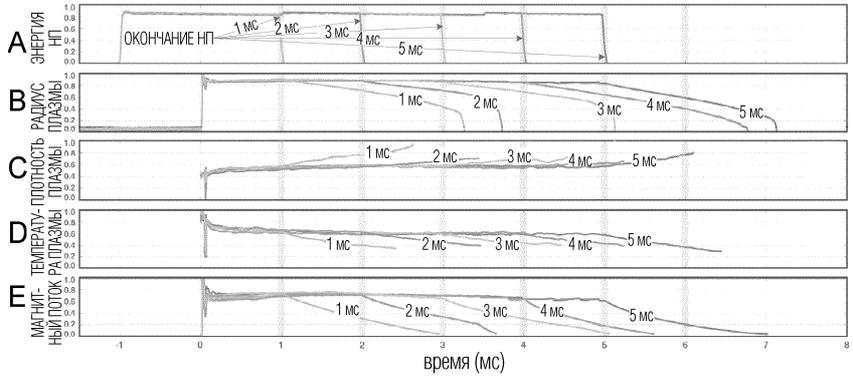
Фиг. 18А-18D



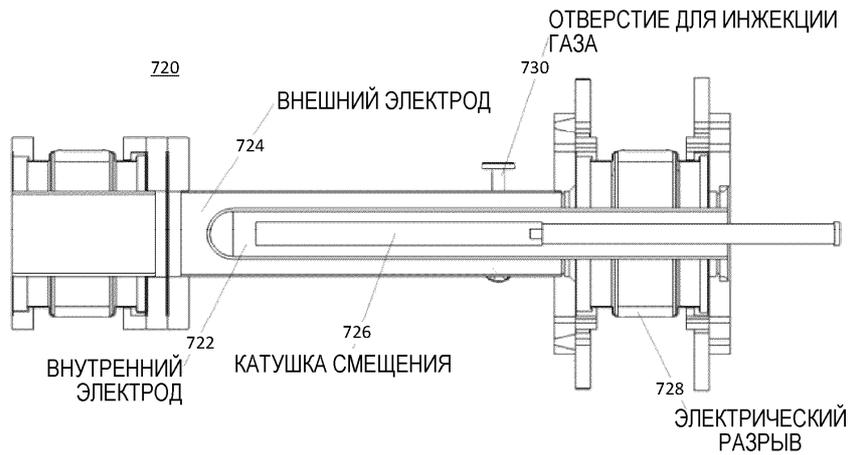
Фиг. 19



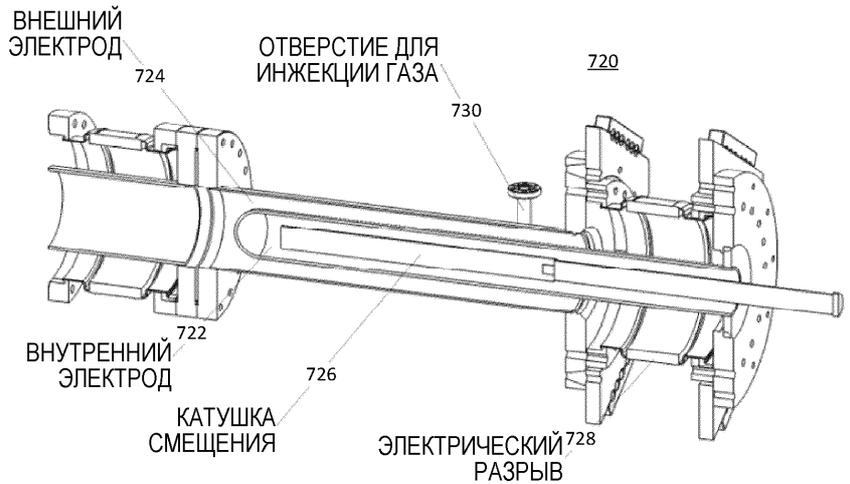
Фиг. 20



Фиг. 21А-21Е

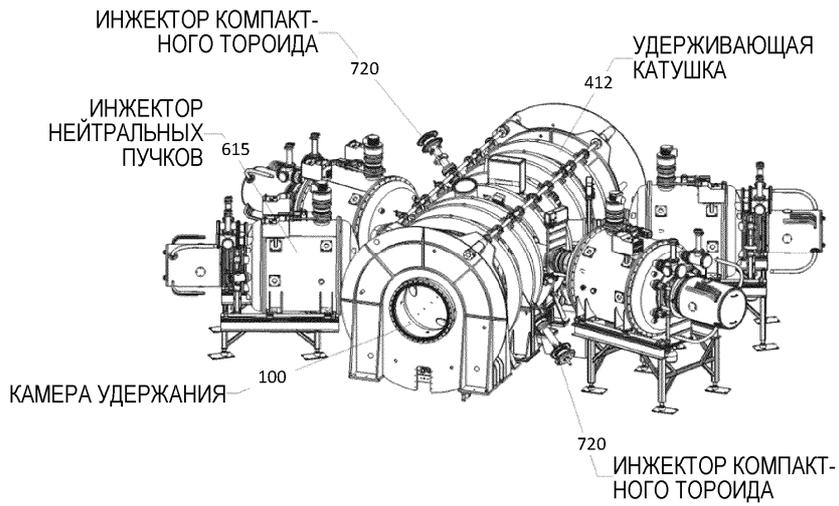


Фиг. 22А

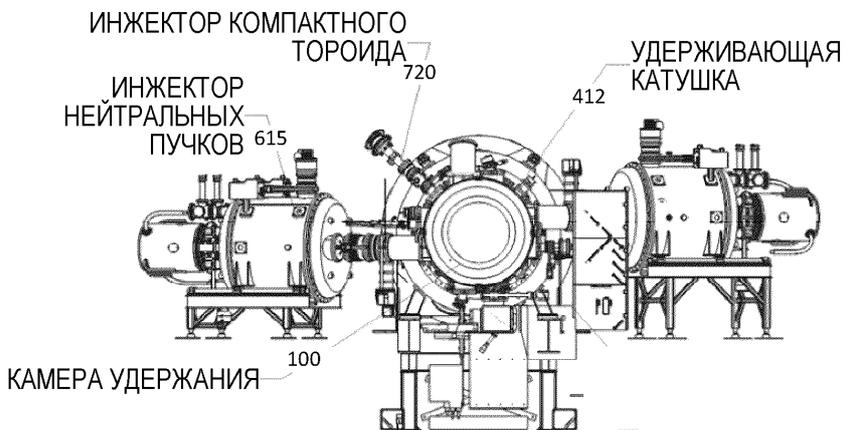


Фиг. 22В

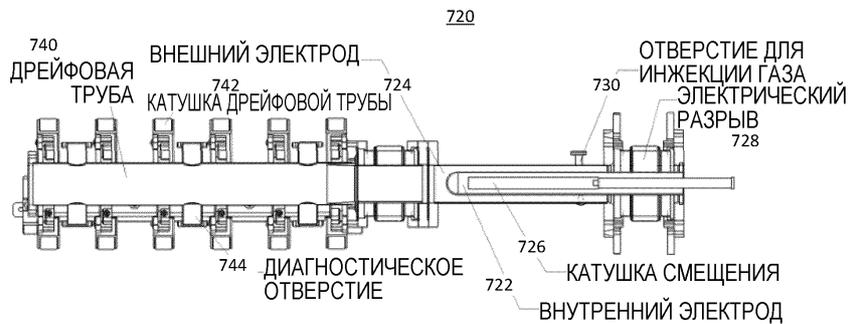
040251



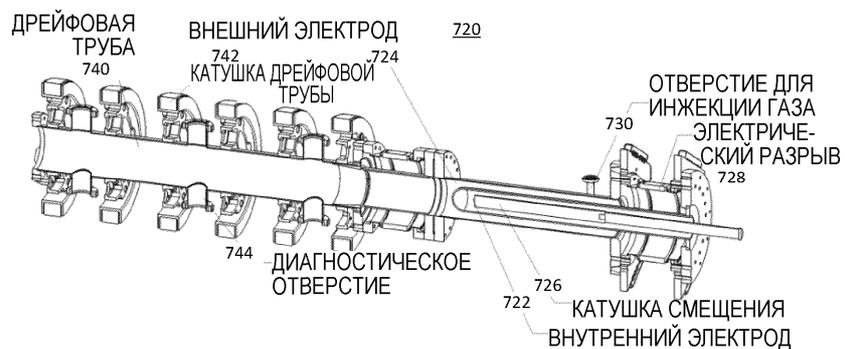
Фиг. 23А



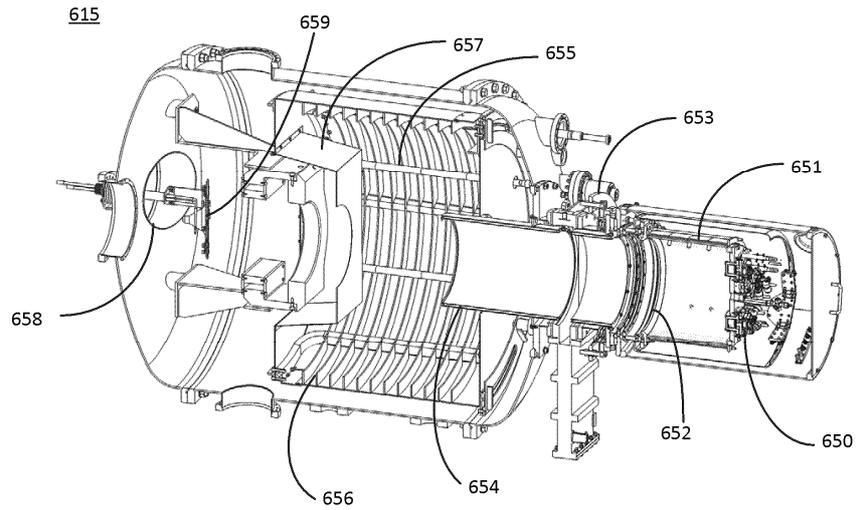
Фиг. 23В



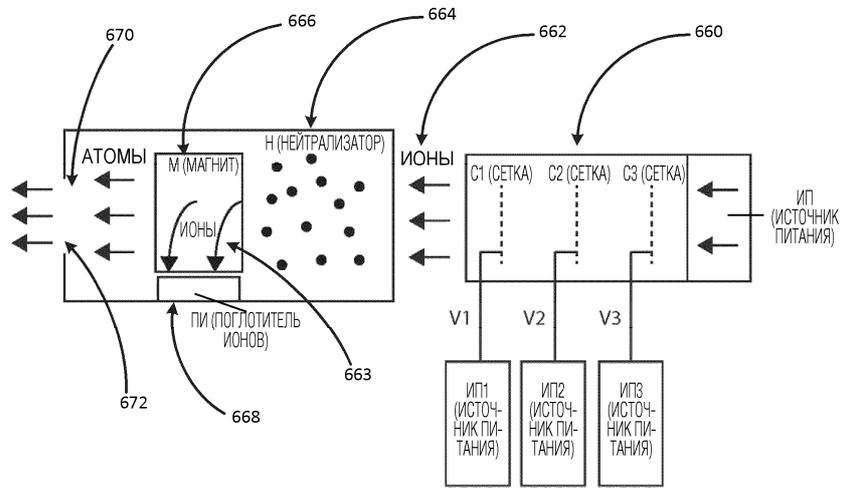
Фиг. 24А



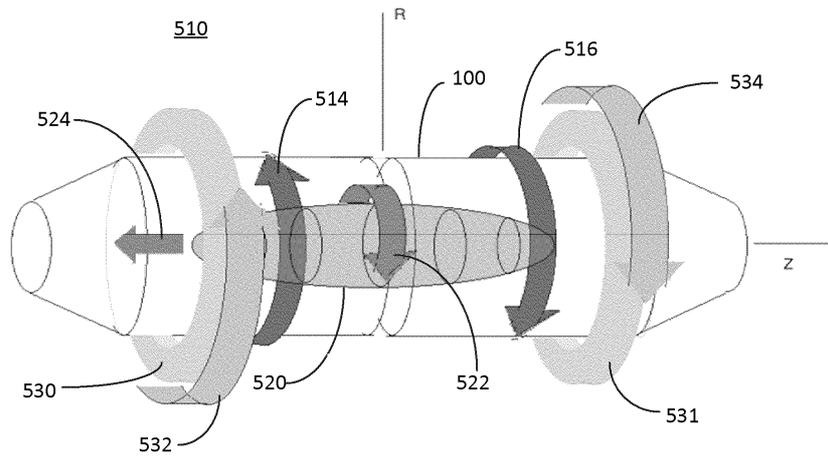
Фиг. 24В



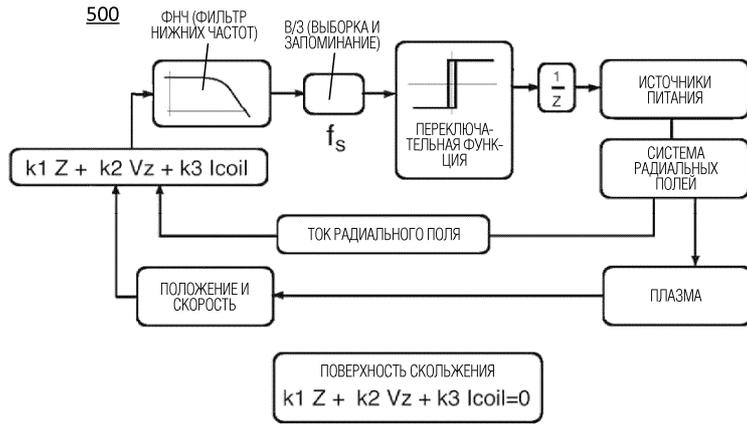
Фиг. 25



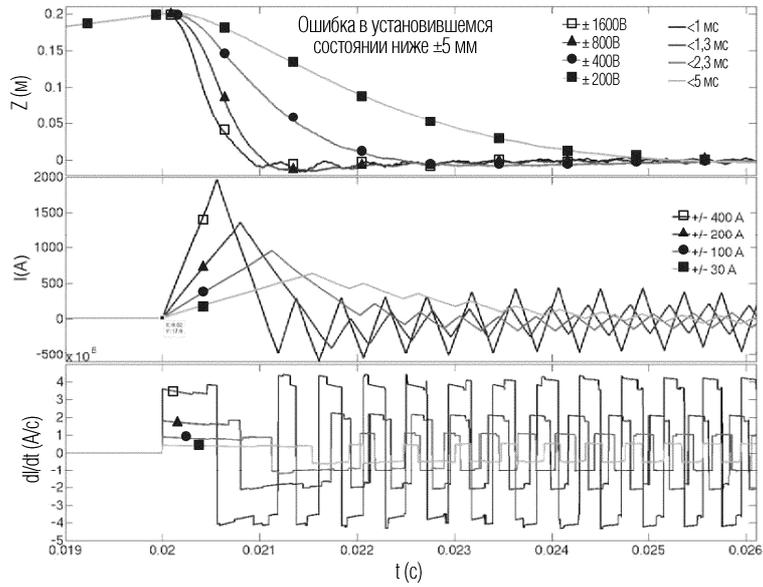
Фиг. 26



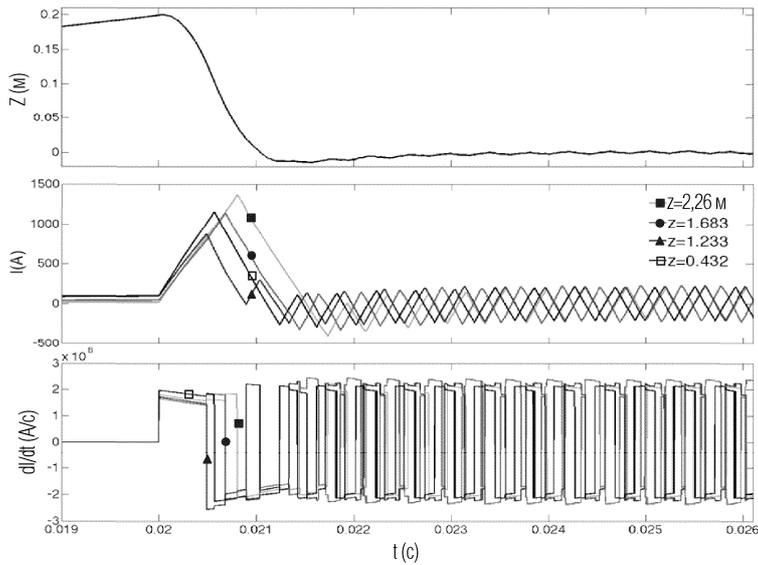
Фиг. 27



Фиг. 28



Фиг. 29



Фиг. 30

