

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **042690**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.03.15

(21) Номер заявки
201991202

(22) Дата подачи заявки
2017.11.15

(51) Int. Cl. **H05H 1/14** (2006.01)
G21B 1/11 (2006.01)
H05H 1/16 (2006.01)
H05H 1/12 (2006.01)
G21D 7/00 (2006.01)
G21B 1/05 (2006.01)
G21B 1/00 (2006.01)

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

(31) **62/422,525**

(32) **2016.11.15**

(33) **US**

(43) **2019.10.31**

(86) **PCT/US2017/061860**

(87) **WO 2018/093941 2018.05.24**

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

(72) Изобретатель:
Ян Сяокан (US)

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

(56) **US-A1-20160276044**

LIU et al., "Profiles of fast ions that are accelerated by high harmonic fast waves in the National Spherical Torus Experiment", Plasma Phys. Control. Fusion 52 (2010) 025006 (17pp) 29 January 2010 (29.01.2010), abstract; pg. 2-4; Fig. 1 [online] URL= <<https://cloudfront.escholarship.org/dist/prd/content/qt43f6b8dr/qt43f6b8dr.pdf?t=p165rd>>

WO-A1-2017/083796

US-A1-20150187443

STIX, "FAST-WAVE HEATING OF A TWO-COMPONENT PLASMA", Plasma Physics Laboratory, Princeton University, February 1975 (02.1975), entire document [online] URL=<<https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/4153946>>

US-A-4065351

(57) В изобретении предложены системы и способы, которые облегчают формирование и поддержание высокоэффективных FRC, придавая им превосходную устойчивость, а также превосходное удержание частиц, энергии и потока, и более конкретно предложены системы и способы, которые облегчают формирование и поддержание FRC с повышенными энергиями и улучшенным поддержанием с использованием инжекции нейтральных пучков и нагрева электронов посредством высших гармоник быстрых волн.

B1**042690****042690 B1**

Область изобретения

Варианты осуществления, описанные здесь, относятся 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 нагрев электронов посредством высших гармоник быстрых волн в FRC.

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 θ -пинча с обращенным полем, дающей горячие высокоплотные плазмы (см. A.L. Hoffman and 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, and S. Goto, Phys. Plasmas 2, 191 (1995)). Как только этот плазмодид 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, and L.C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett. 92, 245001 (2004)). За последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в развитии других способов формирования FRC: посредством слияния сфермаков с противоположно направленными спиральностями (см., например, Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama, and 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 лармовскими 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 $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$ ($a \sim r_c/4$ где r_c - центральный радиус сепаратрисы), а $D_{\perp}$ - характеристический коэффициент диффузии, такой, как $D_{\perp} \sim 12,5\rho_{ie}$, причем ρ_{ie} представляет собой гиро-радиус ионов, оцениваемый в прикладываемом извне магнитном поле. В экспериментах с FRC, разрабо-

танных в прошлом, время $\tau_{||}$ 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 $\delta \sim (D \perp \tau_{||})^{1/2}$. Временные масштабы удержания частиц в FRC составляют $((\tau_{||} \tau_{\perp})^{1/2})$ 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 является отсутствие эффективных режимов нагрева электронов помимо инжекции нейтральных пучков, что демонстрирует тенденцию к наличию неудовлетворительного КПД нагрева электронов из-за механизма затухания мощности на электронах посредством ионно-электронного столкновения.

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, и - конкретнее - на разработку систем и способов, которые облегчают формирование и поддержание FRC с повышенными энергиями системы, а более конкретно - систем и способов, которые облегчают нагрев электронов посредством высших гармоник быстрых волн в FRC. В соответствии с вариантом осуществления настоящего изобретения предложен способ генерирования и поддержания магнитного поля с конфигурацией с обращенным полем (FRC), включающий в себя формирование FRC вокруг плазмы в камере удержания, инжекцию множества нейтральных пучков в плазму FRC под углом к средней плоскости камеры удержания и запуск высших гармоник быстрых волн в радиочастотных диапазонах в плазму FRC для нагрева электронов в активной зоне плазмы FRC.

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 электронов плазмы до значения, превышающего примерно 1,0 кэВ, путем запуска высших гармоник быстрых волн в радиочастотных диапазонах в плазму FRC под углом из средней секущей плоскости камеры удержания.

Нагрев электронов посредством высших гармоник быстрых волн в радиочастотных диапазонах с выгодой сокращает потери при обмене зарядами с быстрыми ионами и улучшает удержание плазмы, а также повышает КПД возбуждения тока в плазме, который увеличивается наряду с температурой электронов, T_e .

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно включает в себя 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 предложена 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 упомянутый 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 располагаются 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; 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 одну или более антенн, подключенных к камере удержания для запуска высших гармоник быстрых волн в радиочастотных диапазонах с целью нагрева электронов в активной зоне плазмы FRC в пределах камеры удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения система дополнительно содержит первый и второй инжекторы компактных тороидов (КТ), связанные с камерой

удержания, располагаясь 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. 3A 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. 3B 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. 3C 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 инъекции частиц к средней плоскости центральной емкости для удержания.

Фиг. 3B и 3E 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 геттерирования Ti и Li.

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 средней плоскости машины.

Фиг. 13A-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-13D.

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

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

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

Фиг. 18A-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-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 центральную емкость для удержания на виде сверху, демонстрируя нейтральные пучки, расположенные под углом, который меньше прямого, к главной оси симметрии в центральной емкости для удержания, и направленные для инъекции частиц к средней плоскости центральной емкости для удержания, и демонстрируя антенны, с которых распространяются высшие гармоники быстрых волн под углом, который меньше прямого, к главной оси симметрии в центральную емкость для удержания, и которые направлены для распространения из средней плоскости центральной емкости для удержания с целью нагрева электронов плазмы.

Фиг. 26A и 26B иллюстрируют полный радиальный профиль плотности и полный радиальный профиль температуры электронов плазмы FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 27A-27D иллюстрируют радиальные профили равновесия системы и характеристической частоты в средней плоскости ($Z=0$) настоящей системы FRC.

Фиг. 28A-28C иллюстрируют наблюдения поглощения мощности и преобразования мод в условиях нагрева электронов микроволной на частоте 8 ГГц в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 29A-29F иллюстрируют наблюдения поглощения мощности и преобразование мод в условиях нагрева электронов микроволной на частоте 50 ГГц в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 30A-30C иллюстрируют наблюдения поглощения мощности в условиях нагрева электронов свистовой волной на частоте 0,5 ГГц в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 31 иллюстрирует профиль плотности и распространение волн в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 32 иллюстрирует профиль полоидального потока и распространение волн в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 33 иллюстрирует примерный профиль плотности и траекторию распространения волн в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 34 иллюстрирует примерный профиль $\omega/\omega_{\text{сн}[D]}$ и траекторию распространения волн в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 35 иллюстрирует примерное затухание мощности с расстоянием распространения волн в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 36 иллюстрирует примерный профиль поглощения мощности в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 37A и 37B иллюстрируют примерные радиальные профили плотности мощности в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 38 иллюстрирует примерный двумерный профиль затухания плотности мощности в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 39 иллюстрирует примерный профиль затухания мощности в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 40 иллюстрирует примерный профиль конечного ларморовского радиуса в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 41 иллюстрирует примерный профиль поглощения мощности в плазме FRC настоящей системы FRC.

Фиг. 42 иллюстрирует примерный профиль плазмы FRC настоящей системы FRC.

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 и температурами системы и улучшенное поддержание с использованием инъекции нейтральных пучков и нагрева электронов посредством высших гармоник быстрых волн.

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 нагреву электронов посредством высших гармоник быстрых волн в плазмах FRC, обсудим системы и способы формирования и поддержания высокоэффективных FRC, придавая им превосходную устойчивость, а также превосходное удержание частиц, энергии и потока по сравнению с обычными FRC, а также обсудим системы и способы формирования и поддержания высокоэффективных FRC при постоянном значении или около него без спада. 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 существенного 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 новых отдельных компонентов 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 с 24-часовой последующими вакуумной сушкой при 250°C и очисткой тлеющим разрядом в водороде.

Формирующие секции 200 тета-пинчей с обращенным полем представляют собой стандартные тета-пинчи с обращенным полем (FTRP), хотя и с усовершенствованной формирующей системой импульсного питания, подробно обсуждаемой ниже (см. фиг. 4-6). Каждая формирующая секция 200 выполнена из стандартных непрозрачных кварцевых труб промышленного класса, которые отличаются двухмиллиметровой внутренней футеровкой из сверхчистого кварца. Камера 100 удержания выполнена из нержавеющей стали для обеспечения множества радиальных и тангенциальных отверстий; она также служит в качестве консерватора потока во временном масштабе экспериментов, 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 пучков нейтральных 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 пучков нейтральных 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 пучки 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 3Е, другая альтернативная конфигурация системы 10 FRC включает в се-

ба 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 to 10/01 (2010)). Фиг. 3 иллюстрирует схему расположения инжектора 700 таблеток в системе 10 FRC. Цилиндрические таблетки (D~1 мм, L~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 и диверторов 300 и 302 пленками (толщиной в десятки микрон) 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 направля-

ют поверхности 455 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 455 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. 3В и 3Е, 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 генерирования 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 килогерц) 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 $v_z \sim 250$ км/с и сталкиваются вблизи средней плоскости при $z=0$. Во время столкновения плазмоиды 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-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 интерфе-

рометра 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. 13(D) 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 перезамыканием с переходом от двух к одной FRC. Действительно, грубые оценки позволяют предполагать, что в этот конкретный момент примерно 10% магнитных потоков двух первоначальных FRC перезамыкаются 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 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 нагрева 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 натяжки 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 очередь, 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 (НКПП), 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 сферомека 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: (1) контроль и регулируемость общего 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 $\sim 5 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$, температура электронов $\sim 30\text{-}50$ эВ и запас частиц $\sim 0,5\text{-}1,0 \times 10^{19}$. 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 $\sim 10\text{-}20\%$ 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 $F_{\theta} = -\sigma V$, $\theta < |B_r|^2$. 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 инъекцией нейтральных пучков и осевой инъекцией 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 ге-

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

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

Значительное улучшение $\tau_{\parallel}$ также требует того, чтобы граничный слой 456 оставался по большому счету устойчивым (т.е. чтобы при $n=1$ не было желобковой, рукавной или другой 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 T_c , 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 миллисекундном диапазоне. В самом деле, рассмотрим плазму из пушек, имеющую плотность $n_s \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и температуру ионов примерно 200 эВ, удерживаемую между торцовыми зеркальными пробками 440. Длина L захвата и коэффициент R отражения зеркала составляют примерно 15 м и 20 соответственно. Средняя длина свободного пробега ионов 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 $\tau_{\text{сет}} \sim RL/2V_s \sim 2 \text{ мс}$, где V_s - 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 $\tau_{\perp} > \tau_{\text{сет}} \sim 2 \text{ мс}$. 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 микросекунд, что позволяет использовать их при запуске, поступательном перемещении и слиянии FRC в камеру 100 удержания. Если включить примерно в $t=0$ (иницирование 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, нагревания плазмы и длительного поддержания. Если включить при t в диапазоне от -1 до 0 мс, плазма пушек может заполнить кварцевые трубы 210 плазмой или ионизировать газ, вдутый в кварцевые трубы, что позволяет сформировать FRC с уменьшенным или даже, возможно, нулевым 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-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-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 (T_i в этом случае) вдобавок к пушке 350 и пробкам 440 дает наилучшие результаты - в получаемой FRC нет неустойчивостей, и она демонстрирует самое продолжительное время жизни. Из этой экспериментальной демонстрации ясно, что вся совокупность компонентов дает наилучший эффект и обеспечивает пучки с наилучшими 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 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, и 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/ρ_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 тем правилам масштабирования, как показано 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-18D показаны данные из типичного разряда высокоэффективного режима в системе 10 FRC как функции времени. Фиг. 18(A) изображает радиус исключаемого потока на средней плоскости. Для этих более длительных временных масштабов проводящая стальная стенка больше не является хорошим консерватором потока, и магнитные зонды, внутренние по отношению к стенке, дополняются зондами снаружи стенки, чтобы должным образом учитывать диффузию магнитного потока через сталь. По сравнению с типичными характеристиками в обычном режиме, как показано на фиг. 13A-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-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-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_c). 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 тополо-

гии 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. 16А-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. 3В, 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 моделирований, выполненных с использованием длительности 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 относительно оси устройства составлял примерно 20°, а целевой радиус - 0,19 м. Угол инжекции можно изменять в пределах диапазона 15-25°. 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.

Моделирования, при которых 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. 21В-21Е, 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 аккумулированных энергий в связанных с этим источниках питания многих критических систем, таких как инжекторы НП, а также в других компонентах систем.

Нагрев электронов на высоких гармониках быстрых волн.

Как отмечалось выше в связи с фиг. 3А-3Е и 8, в системе 10 FRC развертывают пучки 600 нейтральных атомов, чтобы обеспечить нагрев и возбуждение тока, а также развить давление быстрых частиц. Вокруг центральной камеры 100 удержания расположены отдельные линии пучков, содержащие системы 600 инъекции пучков нейтральных атомов, и, как показано на фиг. 3С-3Е - предпочтительно наклоненные для инъекции нейтральных частиц к средней плоскости камеры 100 удержания. Чтобы улучшить поддержание FRC и продемонстрировать разгон FRC до высоких температур плазмы и повышенных энергий системы, предлагаемая система 10 FRC 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.

Однако инъекция нейтральных пучков демонстрирует тенденцию к наличию неудовлетворительно-го КПД нагрева электронов из-за механизма затухания мощности на электронах посредством ионно-электронного столкновения. Уникальные характеристики плазмы FRC настоящей системы 10 FRC, например, плазма, являющаяся необычайно сверхплотной ($\omega_{pe} > 30 \omega_{ce}$ внутри сепаратрисы), и магнитное поле, быстро спадающее до нуля в активной зоне плазмы, делают исключительно сложным нагрев электронов в активной зоне плазм FRC. Обычные сценарии нагрева электронов, такие, как нагрев на частоте (либо ее второй или третьей гармониках) электронного циклотронного резонанса, широко применяемый в токамаках, стеллараторах и термоядерных установках с магнитными зеркалами, не удастся адаптировать для плазм FRC из-за проблемы неудовлетворительной доступности активной зоны плазмы для волн. Другие сценарии нагрева электронов, такие, как электронные бернштейновские волны, верхнегибридные резонансные волны и свистовые волны, сталкиваются с аналогичными проблемами или имеют низкий КПД нагрева, когда применяются для плазм FRC.

В возможном варианте осуществления предлагаемая система 10 FRC включает в себя нагрев электронов посредством высших гармоник быстрых волн для подъема температуры электронов плазмы и тем самым - дальнейшего улучшения поддержания FRC. Как показано на фиг. 25, предлагаемая система 10 FRC включает в себя одну или более антенн 650, например, таких как фазированная антенная решетка с четырьмя (4) накладками, разворачиваемая в системе 10 FRC и выполненная с возможностью распространения высших гармоник быстрых волн в радиочастотных диапазонах в плазму FRC в емкости 100 для удержания, чтобы обеспечить нагрев электронов в активной зоне плазмы FRC от примерно 150 эВ до превышающей примерно 1 кэВ. В возможном варианте осуществления антенны 650 будут содержать 2-мегаваттную ВЧ-систему, работающую на частоте примерно 15-25 МГц. Нагрев электронов посредством высших гармоник быстрых волн в радиочастотных диапазонах с выгодой снижает потери при обмене зарядами с быстрыми ионами и улучшает удержание плазмы, а также повышает КПД возбуждения тока в плазме, который увеличивается наряду с температурой T_e электронов.

Моделирование нагрева электронов в высокоэффективных плазмах FRC, таких как плазма FRC настоящей системы 10 FRC, проводили по следующим сценариям: (1) верхнегибридная резонансная частота (50 ГГц); (2) частота (28 ГГц) электронного циклотронного резонанса (ЭЦР); (3) электронные бернштейновские волны (ЭБВ) на частоте 2,45, 5, 8 и 18 ГГц; (4) свистовые волны на частоте 0,5 ГГц; (5) высшая гармоника быстрой волны (ВГБВ) на частоте 15 МГц. Результаты моделирования недвусмысленно показали, что режим ВГБВ не только имеет исключительно интенсивное однопроходное затухание мощности (~100%), но и также придает активной зоне плазм FRC очень хорошую доступность для волн. Эти моделирования показали, что конфликт между хорошей доступностью для волн и эффективным затуханием мощности на электронах разрешается путем использования этого нагрева посредством высших гармоник быстрых волн (ВГБВ), который успешно адаптирован для обладающих высоким бета, сверхплотных плазм сферических токамаков (СТ), таких как Национальный сферический токамак (NSTX, США) для экспериментов с нагревом электронов в активной зоне реактора и внеосевого возбуждения тока.

Механизм нагрева посредством ВГБВ включает в себя как затухание по Ландау (ЗЛ) на электронах (где сила, действующая на электроны составляет $F_{ЗЛ} = eE_{||}$), так и магнитную накачку на пролетном времени (МНПВ или МН) (при которой сила составляет $F_{МН} = -\nabla_{||} (\mu B_{||})$). Здесь e и μ - это заряд и магнитный момент электрона, а $E_{||}$ и $B_{||}$ - это параллельные составляющие электромагнитного поля быстрых волн соответственно. Обычный нагрев электроном посредством быстрых волн в плазмах токамаков требует, чтобы фазовая скорость параллельных составляющих волн была примерно равна тепловой скорости электронов, т.е. $V_{фаз||} = \omega/k_{||} \sim V_{T_e}$ при любой значительного поглощения посредством доминирующего ЗЛ; МН не вносит значительный вклад в затухание на электронах, и зачастую ей можно пренебречь. Помимо этого, поглощение быстрой волны в плазмах токамаков является слабым, и поэтому обычно требуется наличие интенсивного предварительного нагрева электронов микроволнами на частоте электронного циклотронного резонанса, чтобы повысить многопроходное поглощение мощности. Вместе с тем, в NSTX, обладающем высоким бета обнаружено, что МН значительно увеличивает поглощение мощности на электроны по сравнению с осуществлением только ЗЛ на электронах, и поглощение оказывается существенно большим в повышенном диапазоне фазовой скорости, $\omega/k_{||} \leq 2,5 V_{T_e}$. Сочетание МН и ЗЛ может привести к 100-процентному однопроходному поглощению.

В режимах с высокими бета, таких как высокоэффективная плазма FRC предлагаемой системы 10 FRC (которая имеет значение β_e примерно 90% в плазме активной зоны), магнитная накачка доминирует над затуханием, что можно масштабировать как $\text{Im } k_{\perp} \propto n_e T_e / B^2 \propto \beta_e$, и магнитная накачка становится значительной, когда $\omega/k_{\perp} \leq 2,5 V_{Te}$. На этапах моделирования предлагаемой системы 10 FRC, $T_e = 150$ эВ, $T_i = 800$ эВ, $n_e = n_i = 3,2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, магнитное поле $B = 0,1$ Тл (1000 Гс), ВГБВ имеет выходную мощность 1 МВт, а ее частота выбрана имеющей значение $f = 15$ МГц; таким образом, $\omega = 2\pi f = 10 \omega_{ce}$, $[H] = 20$, $\omega_{ce} [D] \ll \omega_{LH}$, и было достигнуто однопроходное поглощение, составившее более 99%, а также было показано, что мощность ВГБВ, затухавшая на электронах, составила целых 90%. Мощность ВГБВ, затухавшая на ионах или затухавшая за счет столкновения, может составлять менее 5% соответственно. Более того, радиальные профили поглощения мощности на электронах, ионах и за счет столкновения показали, что более 60% мощности ВГБВ затухало внутри слоя сепаратрисы плазм FRC.

Фиг. 26А и 26В иллюстрируют полный радиальный профиль плотности и полный радиальный профиль температуры электронов плазмы FRC предлагаемой системы 10 FRC. Предлагаемой системе FRC, соответствующей вариантам осуществления настоящего изобретения, придавалась конфигурация, соответствующая парам параметров и значений, показанным в табл. 1.

Таблица 1

Параметры для предлагаемой системы FRC

Параметр	Значение
$B_{\text{вых}}, \text{ кГ}$	~ 1
$r_c, \text{ см}$	~ 36
$L, \text{ м}$	$2-3$
$N_e, \text{ см}^{-3}$	$\sim 3 \times 10^{13}$
$T_e, \text{ эВ}$	$500-800$
$T_i, \text{ эВ}$	$100-150$

Фиг. 27А-27D иллюстрируют радиальные профили равновесия C-2U и характеристическую частоту в средней плоскости ($Z=0$) настоящей системы 10 FRC. Наблюдавшиеся проблемы заключаются в том, что внутри слоя сепаратрисы плазма является сверхплотной ($\omega_{pe} > 30 \omega_{ce}$), а В быстро падает до 0 в пределах радиального расстояния 11 см. Все резонансные слои, где гармоники имеют ЭЦР, "утрамбованы" в очень узкой области, поэтому микроволны могут распространяться радиально лишь на очень короткое расстояние.

Упоминаемые ниже моделирования проводили с помощью кода трассировки лучей, GENRAY-C, для сценариев на следующих частотах:

ЭБВ (2,45, 5, 8, 18 и 28 ГГц);
 верхнегибридная резонансная частота (50, 55 ГГц);
 частота свистовых волн (0,5-1,0 ГГц).

К сожалению, эти сценарии не дают возможность разрешить конфликт между проникновением волн в активную зону плазмы и эффективным затуханием мощности на электронах.

Фиг. 28А-28С иллюстрируют наблюдения поглощения мощности и преобразования мод в условиях нагрева электронов электронными бернштейновскими волнами (ЭБВ) на частоте 8 ГГц в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC. На фиг. 28А-28С, где показаны шесть лучей, запущенных под разными углами, наблюдается явно различимое преобразование $O \rightarrow X \rightarrow V$. Электроны в слое ЭЦР на 4-й гармонике (снаружи сепаратрисы) могут поглотить более 90% мощности микроволн, что приводит к весьма локализованному поглощению. Посредством режима ЭЦР можно нагреть электроны лишь на границе плазмы; в активную зону плазмы этот режим проникнуть не может.

Фиг. 29А-29F иллюстрируют наблюдения поглощения мощности и преобразование мод в условиях нагрева электронов микроволной на частоте 50 ГГц в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC. На фиг. 29А-29F наблюдается, что лучи прекращают распространяться после преобразование $O \rightarrow X \rightarrow V$, и что поглощаются 30% мощности микроволны.

Фиг. 30А-30С иллюстрируют наблюдения поглощения мощности в условиях нагрева электронов свистовой волной на частоте 0,5 ГГц в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC. На фиг. 30А-30С наблюдается, что свистовая волна на частоте 0,5 ГГц ($\sim 1/4 f_{ce}$) имеет большое поглощение мощности, но неудовлетворительную доступность для волн. Волну запускают с большим $N_{\parallel}$ (начиная с 16-и) и волна разворачивается, когда кривизна магнитного поля велика.

В отличие от этих режимов нагрева, нагрев посредством высших гармоник быстрых волн обеспечивает, как продемонстрировано результатами моделирования, следующее для плазмы FRC с высоким средним β_e ($\sim 90\%$), такой, как плазма FRC предлагаемой системы 10 FRC: 1) сильную однопроходную абсорбцию ($\sim 100\%$); 2) приемлемую доступность в активную зону плазмы; 3) эффективное поглощение мощности электронами активной зоны - вплоть до 60%; 4) над затуханием мощности на электронах доминирует магнитная накачка (МНПВ), которую можно масштабировать как $\text{Im } k_{\perp} \propto n_e T_e / B^2 \propto \beta_e$.

Фиг. 31 иллюстрирует профиль плотности и распространение волн в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC. На фиг. 10 $T_z = 150$ эВ, тогда как T_z (сепаратриса) = 100 эВ. $T_{ii} = 800$ эВ, тогда как T_{ii} (сепаратриса) = 200 эВ. Тепловые ионы имеют такие же плотность и профиль, как электроны. Информация о быстрых ионах не включена в фиг. 31. Фиг. 32 иллюстрирует профиль полоидального потока и распространение волн в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC.

Фиг. 33 иллюстрирует примерный профиль плотности и траекторию распространения волн в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC. На фиг. 33 $T_z = 150$ эВ, тогда как T_z (сепаратриса) = 100 эВ. $T_{ii} = 800$ эВ, тогда как T_{ii} (сепаратриса) = 200 эВ. На фиг. 33 $f = 6$ МГц (начальное значение $\omega/\omega_{ci}[D] \sim 9$) при общей мощности 1 МВт. Запускали пять лучей в средней плоскости при начальном значении $n_{||}$ между 4 и 6.

Фиг. 34 иллюстрирует примерный профиль $\omega/\omega_{ci}[D]$ и траекторию распространения волн в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC. На фиг. 34 уровни $\omega/\omega_{ci}[D] > 28$ не показаны для ясности изображения. Линии из точек в промежутке представляют собой контур магнитного потока.

Фиг. 35 иллюстрирует возможное затухание мощности с расстоянием распространения волн в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC. На фиг. 35 предусмотрены пять лучей с разными $n_{||}$ между 4 и 6. Каждый луч имеет мощность 200 кВт в точке запуска. Область значительной мощности находится между 30 и 50 см.

Фиг. 36 иллюстрирует возможный профиль поглощения мощности в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC. На фиг. 36 наблюдается значительное поглощение мощности на ионах и электронах, когда ВГБВ проникают сквозь слой сепаратрисы.

Фиг. 37А и 37В иллюстрируют примерные радиальные профили плотности мощности в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC. Радиальные профили плотности мощности представлены для: (а) полного поглощения, (б) затухания на электронах, (с) затухания на ионах и (д) столкновительного затухания. На фиг. 37А, $P_{\text{полн}}=1000$ кВт, $P_z=448$ кВт, $P_{ii}=486$ кВт, и $P_{\text{столкн}}=66$ кВт. На фиг. 37В, $P_{\text{полн}}=999$ кВт, $P_z=720$ кВт, $P_{ii}=194$ кВт и $P_{\text{столкн}}=85$ кВт. Во время нагрева посредством ВГБВ в активной зоне плазмы наблюдалось однопроходное поглощение 100%.

Фиг. 38 иллюстрирует примерный двумерный профиль затухания плотности мощности в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC.

Фиг. 39 иллюстрирует примерный профиль затухания мощности в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC. На фиг. 39 наблюдается, что затухание мощности на электронах увеличивается до максимума, когда $|B|$ приближается к минимуму. Наблюдается очень малое значение $|E_{||}/E|$, а значит - и меньшее влияние затухания по Ландау на поглощение мощности.

Фиг. 40 иллюстрирует примерный профиль конечного ларморовского радиуса в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC. На фиг. 40 наблюдаются значительные эффекты конечного ларморовского радиуса даже тогда, когда у ионов температура $T_{ii} < 1$ кэВ. Внутри сепаратрисы $K_{\perp} \times \rho_{\text{Лармора}} \gg 1$. Эта величина уходит в бесконечность в нуле поля в средней плоскости ($z=0$). Это может привести к взаимодействию тепловых ионов с ВГБВ и, тем самым, к затуханию мощности на тепловых ионах.

Фиг. 41 иллюстрирует примерный профиль поглощения мощности в плазме FRC предлагаемой системы 10 FRC. На фиг. 41 наблюдается значительное поглощение мощности тепловыми ионами. Наблюдается ионное циклотронное резонансное поглощение с числом гармоник $n = (11-20)$. Условия для значительного затухания мощности на ионах имеют вид: $K_{\perp} \times \rho_{\text{Лармора}} \gg 1$ и $\omega/K_{\perp} < 2V_{Ti}$.

Фиг. 42 иллюстрирует примерный профиль в плазме FRC настоящей системы 10 FRC. На фиг. 42 показаны наблюдавшиеся вдоль распространения волн изменения с расстоянием: (а) локального значения $|B(r, z)|$; (б) мнимой части волнового числа K_{ii} перпендикулярной волны; (с) отношение $|E_{||}/E|$ и (д) показателя $n_{||}$ преломления параллельной волны.

Этапы моделирования нагрева, осуществляемого посредством ВГБВ, плазмы FRC предлагаемой системы 10 FRC недвусмысленно продемонстрировали, что нагрев посредством ВГБВ приводит к: 1) однопроходному поглощению мощности, составляющему 100%; 2) доминированию механизма поглощения мощности над МНПВ при нагреве электронов активной зоны; 3) возникновению максимального затухания мощности на электронах, происходящему, когда $V_{\text{фаз}} = \omega/k_{||} \sim V_{Tz}$; и 4) значительному поглощению мощности тепловыми ионами, склонному происходить при соблюдении условий $K_{\perp} \times \rho_{\text{Лармора}} \gg 1$ и $\omega/k_{\perp} < 2V_{Ti}$.

В соответствии с вариантом осуществления настоящего изобретения предложен способ генерирования и поддержания магнитного поля с конфигурацией с обращенным полем (FRC) включающий в себя формирование FRC вокруг плазмы в камере удержания, инжекцию множества нейтральных пучков в плазму FRC под углом к средней плоскости камеры удержания и нагрев электронов плазмы FRC посредством высших гармоник быстрых волн, распространяемых в плазму FRC.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения нагрев электронов включает в себя запуск множества высших гармоник быстрых волн с одной или более антенн в плазму FRC в камере удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения нагрев элек-

тронов включает в себя запуск множества высших гармоник быстрых волн с одной или более антенн в плазму FRC в камере удержания под некоторым углом запуска от средней плоскости камеры удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения угол запуска находится в диапазоне от примерно 15 до примерно 25° от средней плоскости камеры удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения угол запуска близок к прямому к продольной оси камеры удержания, но меньше него.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения одна или более антенн представляют собой фазированную антенную решетку с множеством накладок.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения быстрые высшие гармоники представляют собой быстрые волны в радиочастотных диапазонах.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения нагрев электронов включает в себя нагрев электронов от примерно 150 эВ до значения, превышающего примерно 1 кэВ.

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 электронов плазмы до значения, превышающего примерно 1,0 кэВ.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно включает в себя генерирование 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.

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 торцов 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 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 формируемые 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 включает в себя направление поверхностей магнитного потока FRC в первый и второй внутренние диверторы.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно включает в себя 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 включает в себя 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 включает в себя 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 включает в себя 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 включает в себя 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 включает в себя 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 включает в себя 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 включает в себя кондиционирование внутренних поверхностей камеры и внутренних поверхностей первой и второй формирующих секций, причем первый и второй 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 включает в себя осевую инжекцию плазмы в FRC из аксиально установленных плазменных пушек.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения способ дополнительно включает в себя 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 включает в себя 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 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 упомянутый 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 располагаются 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; 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 антенн, расположенную вокруг камеры удержания, причем систем антенн выполнена с возможностью запуска высших гармоник быстрых волн в плазму FRC для нагрева электронов в плазме.

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 электронов плазмы до значения, превышающего примерно 1,0 кэВ.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения система антенн включает в себя одну или более антенн, расположенных с возможностью запуска высших гармоник

быстрых волн под некоторым углом запуска от средней плоскости камеры удержания в плазму FRC.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения угол запуска находится в диапазоне от примерно 15 до примерно 25° от средней плоскости камеры удержания.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения угол запуска близок к прямому к продольной оси камеры удержания, но меньше него.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения система антенн включает в себя фазированные антенные решетки с множеством накладок.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения быстрые высшие гармоники представляют собой быстрые волны в радиочастотных диапазонах.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения система выполнена с возможностью нагрева электронов плазмы FRC от примерно 150 эВ до значения, превышающего примерно 1 кэВ.

В соответствии с дополнительным вариантом осуществления настоящего изобретения первые и вторые диверторы содержат первый и второй внутренние диверторы, находящиеся между первой и второй формирующими секциями и камерой удержания, и дополнительно содержат первый и второй внешние диверторы, связанные с первой и второй формирующими секциями, причем первая и вторая формирующие секции находятся 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 системы формирования для генерирования FRC и ее 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 нескольких 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, concentрично уложенных в стопу, расположенных в первых и вторых диверторах для зарядки concentрических слоев потока; и анодов плазменных пушек для перехвата незамкнутого потока.

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 упомянутый один или более смещающих электродов расположены в пределах одной или более из камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первых и вторых диверторов, при этом первая и вторая зеркальные пробки располагаются 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;

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 антенн, включающую одну или более антенн, расположенную вокруг камеры удержания рядом со средней плоскостью камеры удержания, причем система антенн выполнена с возможностью запуска высших гармоник быстрых волн в плазму FRC под углом запуска в диапазоне от примерно 15 до примерно 25° от средней плоскости камеры удержания, причем высшие гармоники быстрых волн представляют собой быстрые волны в радиочастотных диапазонах.

2. Система по п.1, причем система антенн включает в себя фазированные антенные решетки с множеством накладок.

3. Система по п.1, причем высшие гармоники быстрых волн представляют собой быстрые волны в радиочастотных диапазонах.

4. Система по п.1, причем система выполнена с возможностью нагрева электронов плазмы FRC от примерно 150 эВ до значения, превышающего 1 кэВ.

5. Система по п.1, причем система выполнена с возможностью генерирования FRC и поддержания FRC без спада при инжекции пучков нейтральных атомов в плазму.

6. Система по п.5, причем система выполнена с возможностью повышения температуры электронов плазмы FRC до значения, превышающего 1,0 кэВ.

7. Система по п.1, причем первые и вторые диверторы содержат первый и второй внутренние диверторы, находящиеся между первой и второй формирующими секциями и камерой удержания, и дополнительно содержат первый и второй внешние диверторы, связанные с первой и второй формирующими секциями, причем первая и вторая формирующие секции находятся между первым и вторым внутренними диверторами и первым и вторым внешними диверторами, дополнительно содержащая одно или более из первой и второй осевых плазменных пушек, функционально связанных с первыми и вторыми внутренними и внешними диверторами, первой и второй формирующими секциями и камерой удержания, и двух или более отклоняющих катушек, связанных с камерой удержания.

8. Способ генерирования и поддержания магнитного поля с конфигурацией с обращенным полем (FRC) с использованием системы по любому из пп.1-7, включающий в себя этапы

формирования FRC вокруг плазмы в камере удержания;

инъекции множества пучков нейтральных атомов в плазму FRC под углом к средней плоскости камеры удержания и

нагрева электронов плазмы FRC посредством высших гармоник быстрых волн, распространяющихся в плазму FRC, путем запуска множества высших гармоник быстрых волн с одной или более антенн в

плазму FRC в камере удержания под углом запуска в диапазоне от примерно 15 до примерно 25° от средней плоскости камеры удержания, причем высшие гармоники быстрых волн представляют собой быстрые волны в радиочастотных диапазонах.

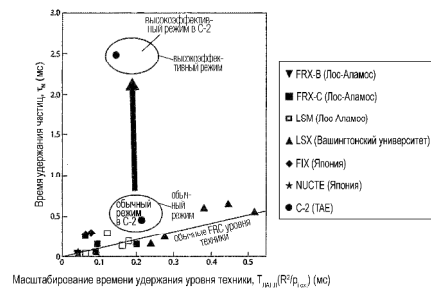
9. Способ по п.8, причем упомянутая одна или более антенн представляют собой фазированную антенную решетку с множеством накладок.

10. Способ по п.8, причем этап нагрева электронов включает в себя нагрев электронов от примерно 150 эВ до значения, превышающего 1 кэВ.

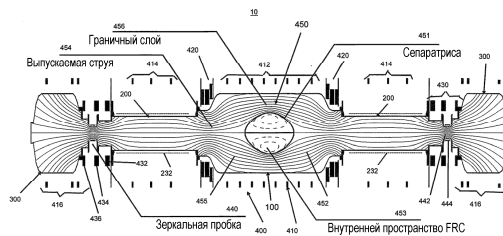
11. Способ по п.8, дополнительно включающий в себя поддержание FRC при постоянном значении или около него без спада при инъекции пучков быстрых нейтральных атомов в плазму FRC в камере удержания и повышение температуры электронов плазмы до значения, превышающего 1,0 кэВ.

12. Способ по п.8, 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.

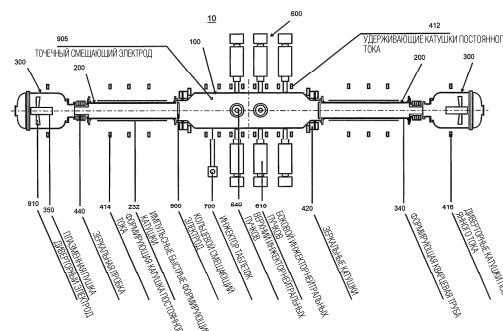
13. Способ по п.8, причем этап формирования FRC включает в себя формирование формирующей FRC в противоположных первой и второй формирующих секциях, связанных с камерой удержания, и ускорение формирующей FRC из первой и второй формирующих секций к средней секущей плоскости камеры удержания, где обе формирующие FRC сливаются с образованием FRC.



Фиг. 1

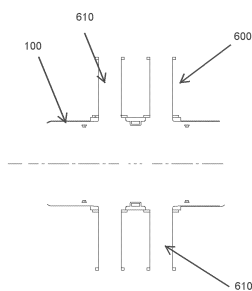


Фиг. 2

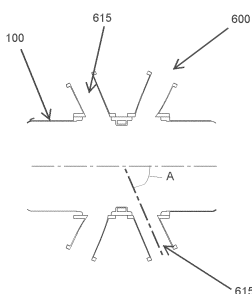


Фиг. 3А

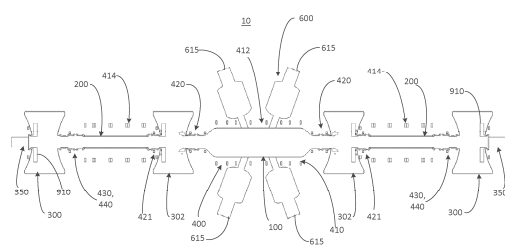
042690



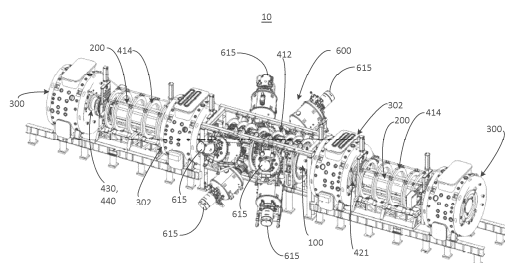
Фиг. 3В



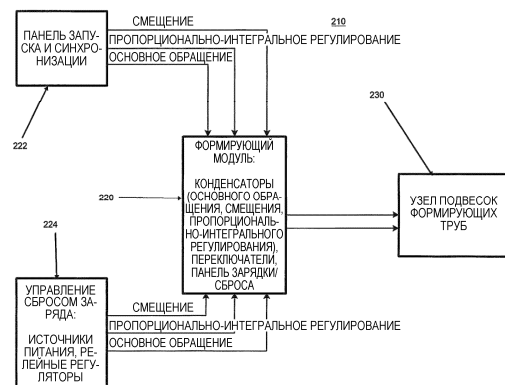
Фиг. 3С



Фиг. 3D

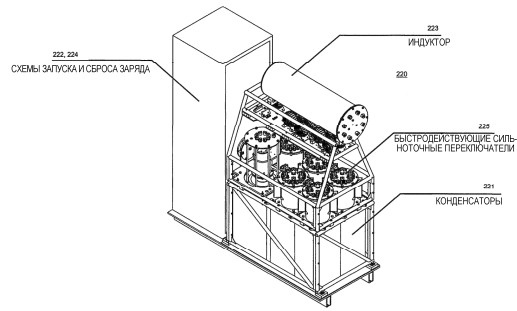


Фиг. 3Е

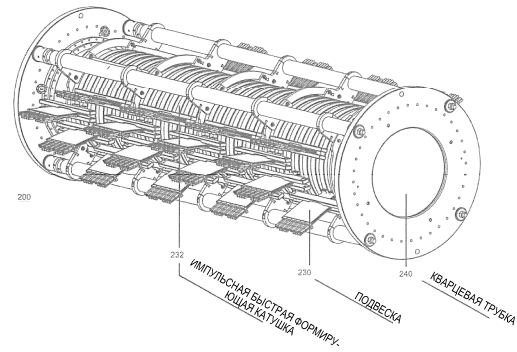


Фиг. 4

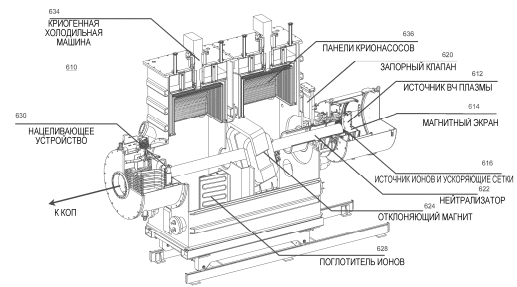
042690



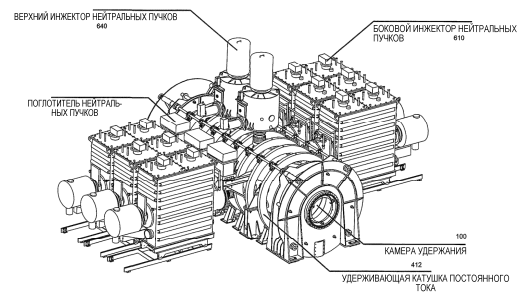
ФИГ. 5



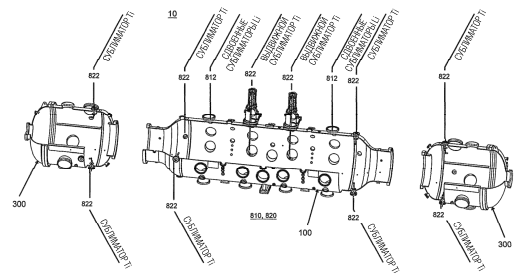
ФИГ. 6



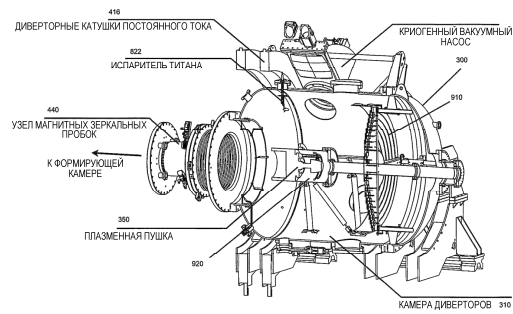
ФИГ. 7



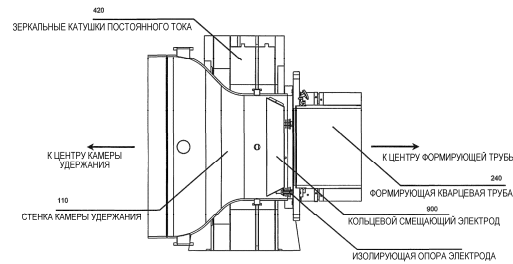
ФИГ. 8



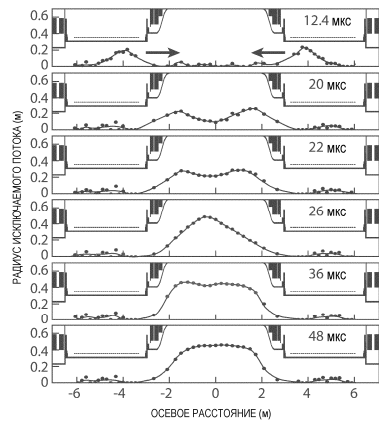
ФИГ. 9



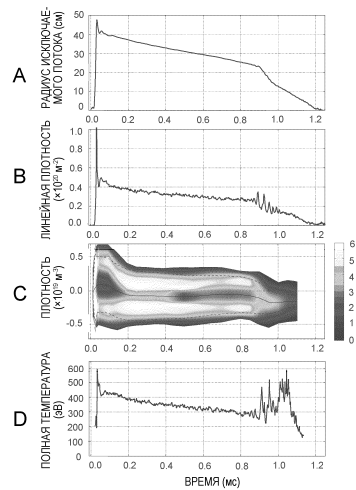
Фиг. 10



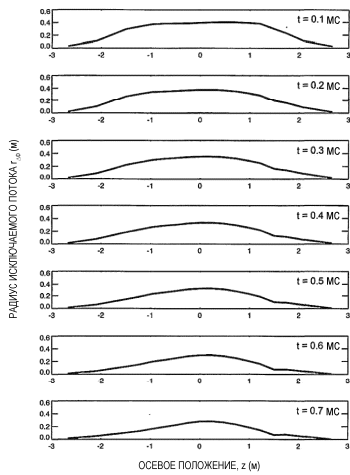
Фиг. 11



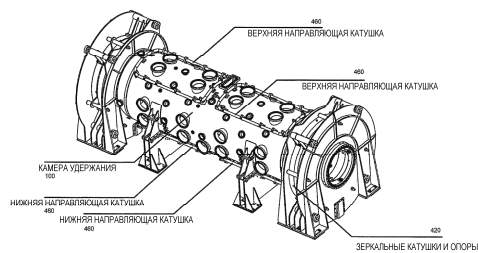
Фиг. 12



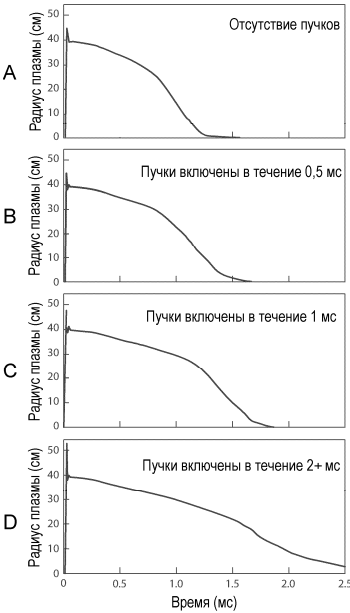
Фиг. 13



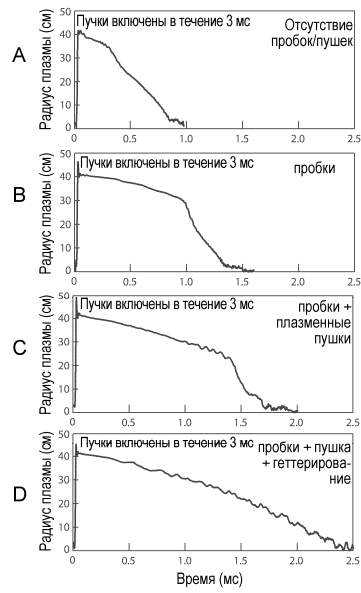
Фиг. 14



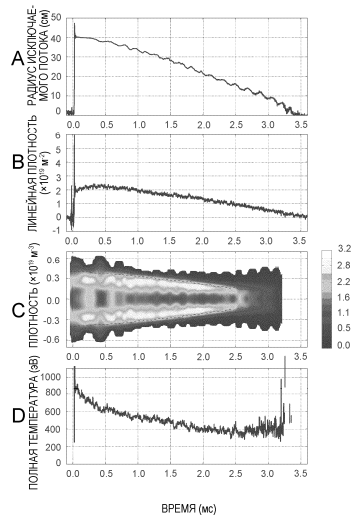
Фиг. 15



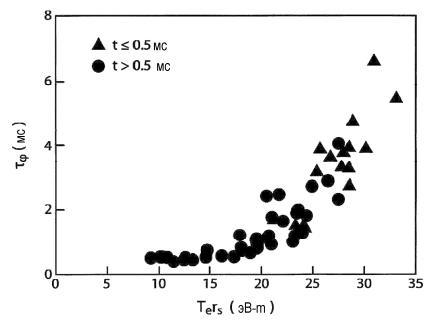
Фиг. 16



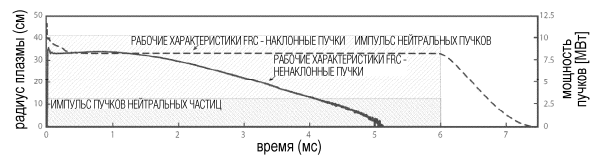
Фиг. 17



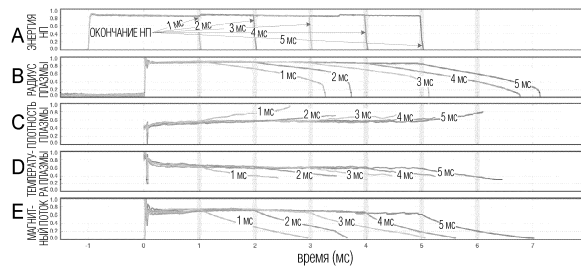
Фиг. 18



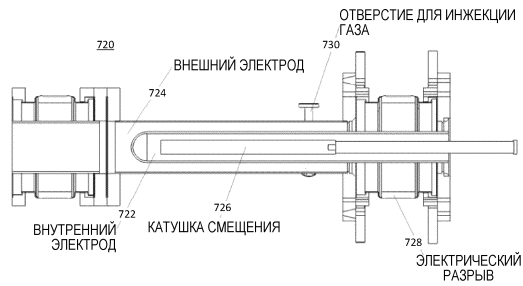
Фиг. 19



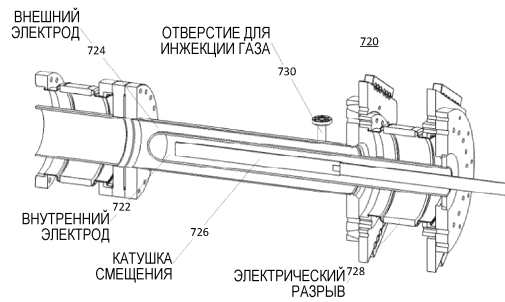
Фиг. 20



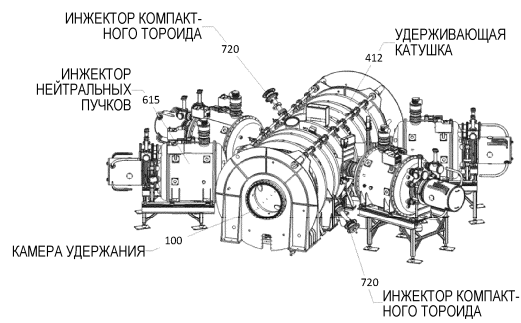
Фиг. 21



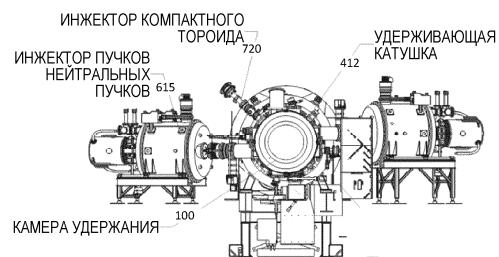
Фиг. 22А



Фиг. 22В

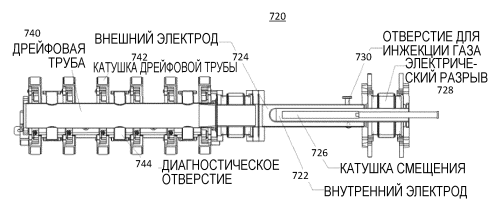


Фиг. 23А

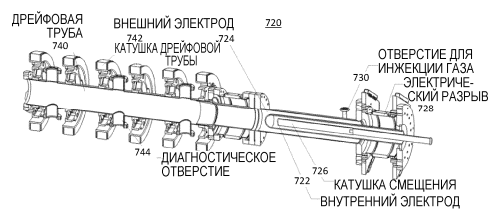


Фиг. 23В

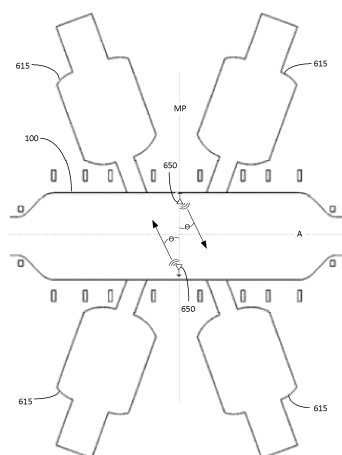
042690



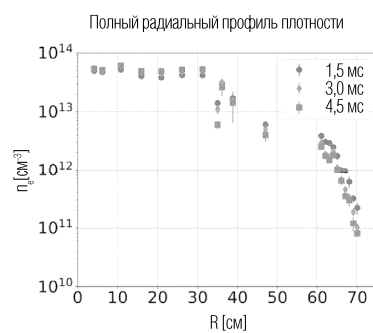
Фиг. 24А



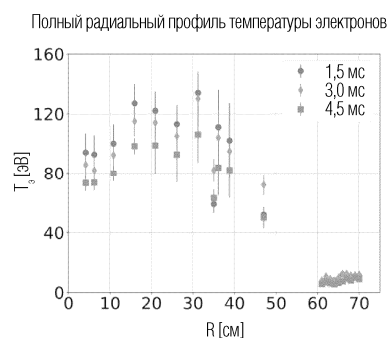
Фиг. 24В



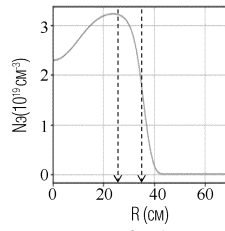
Фиг. 25



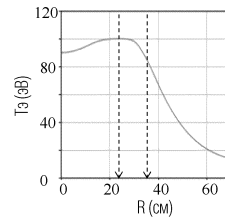
Фиг. 26А



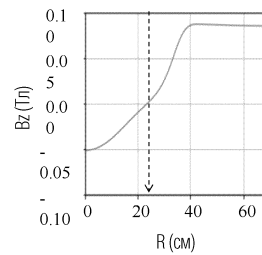
Фиг. 26В



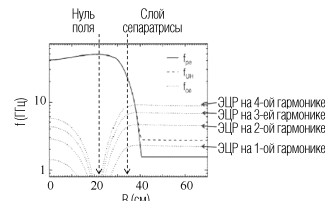
Фиг. 27А



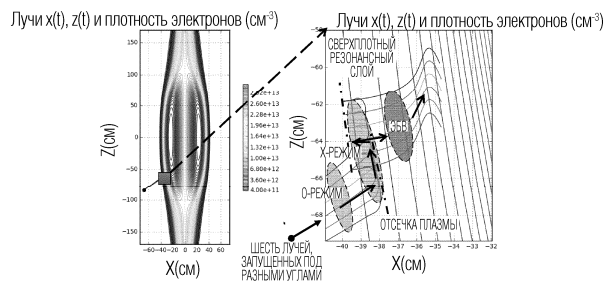
Фиг. 27В



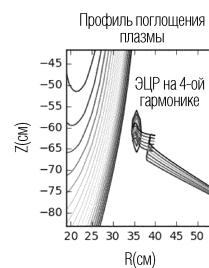
Фиг. 27С



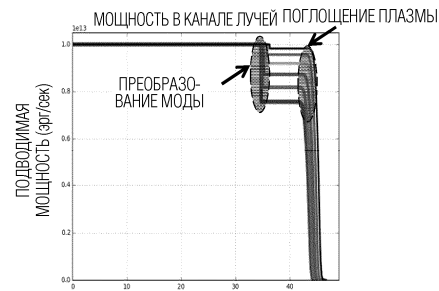
Фиг. 27D



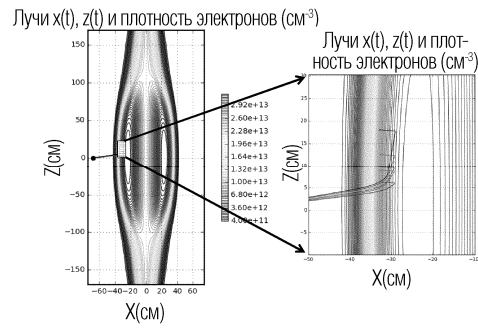
Фиг. 28А



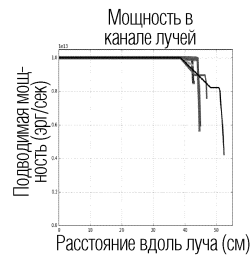
Фиг. 28В



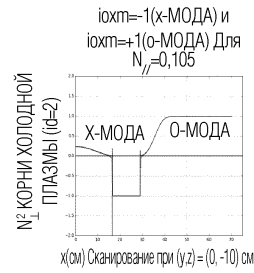
Фиг. 28С



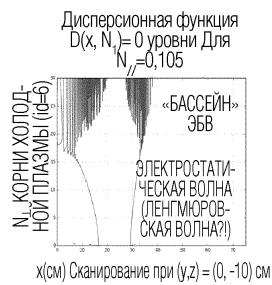
Фиг. 29А



Фиг. 29В

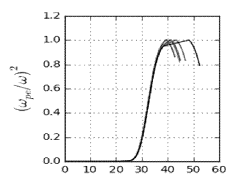


Фиг. 29С



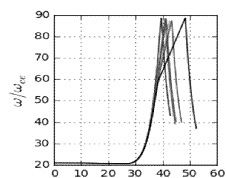
Фиг. 29D

042690



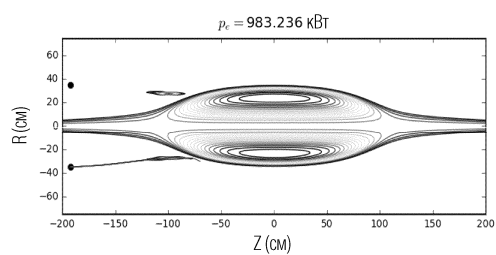
Расстояние вдоль луча (см)

Фиг. 29Е

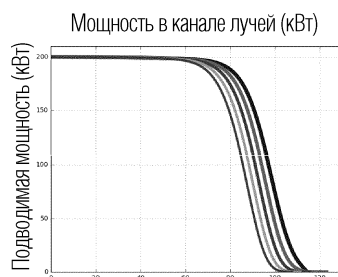


Расстояние вдоль луча (см)

Фиг. 29F

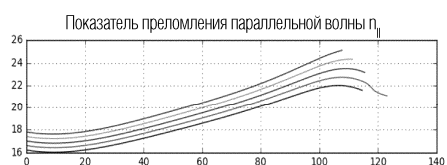


Фиг. 30А



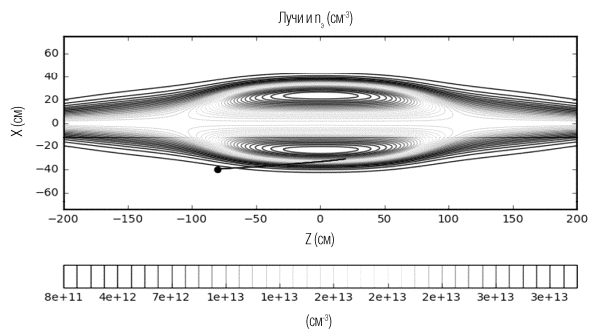
Расстояние вдоль луча (см)

Фиг. 30В

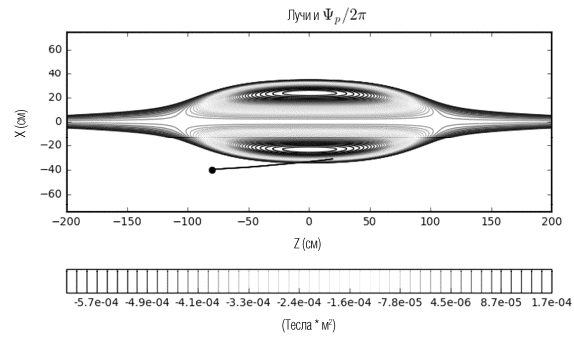


Расстояние вдоль луча (см)

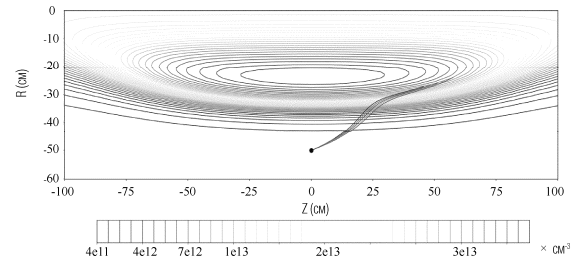
Фиг. 30С



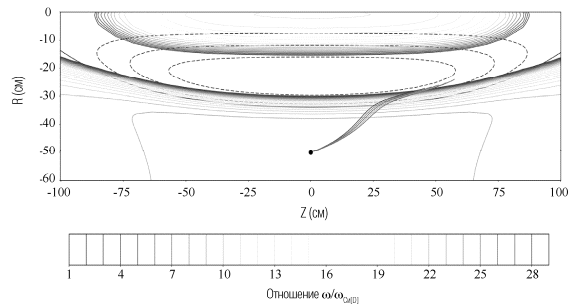
Фиг. 31



Фиг. 32

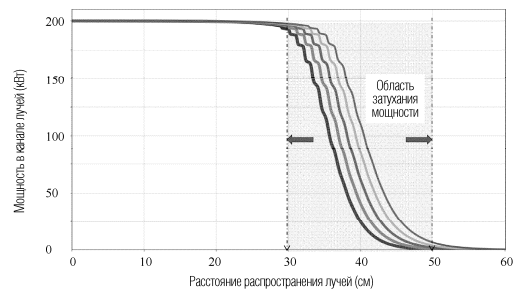


Фиг. 33

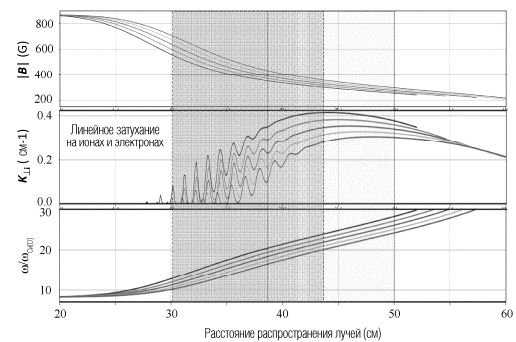


- Уровни $\omega/\omega_{\text{cen}} > 28$ не показаны для ясности изображения
- Линии из черных точек в промежутке представляют собой контур магнитного потока

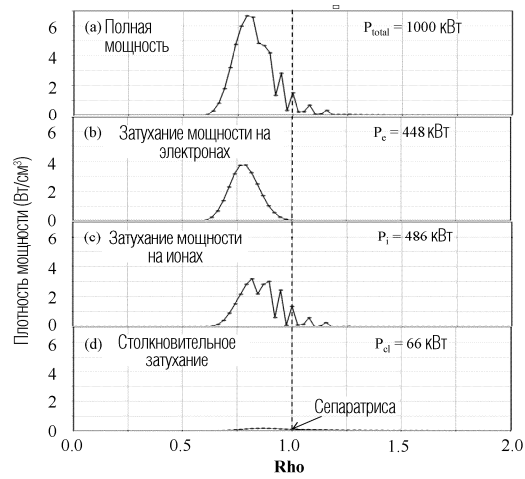
Фиг. 34



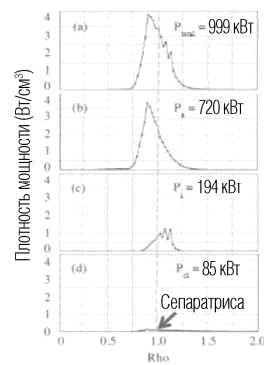
Фиг. 35



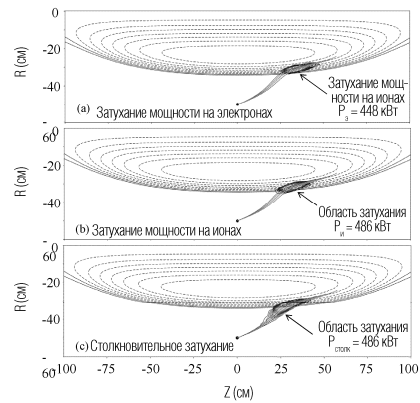
Фиг. 36



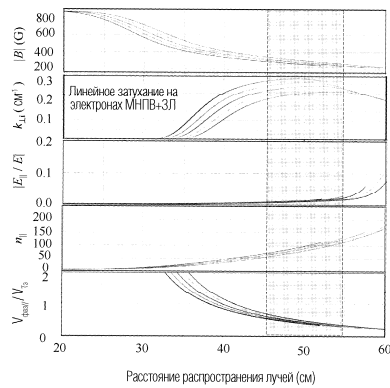
Фиг. 37А



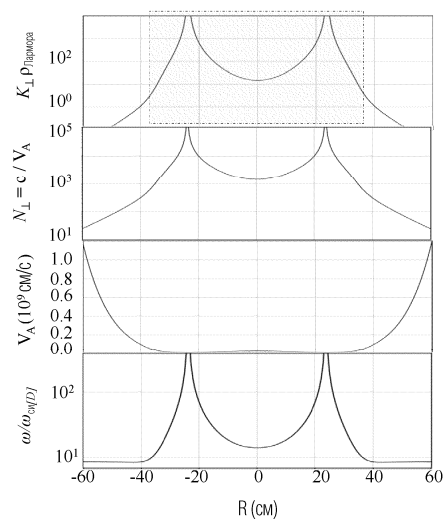
Фиг. 37В



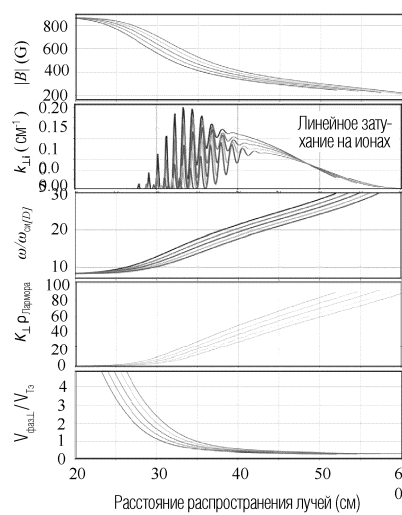
Фиг. 38



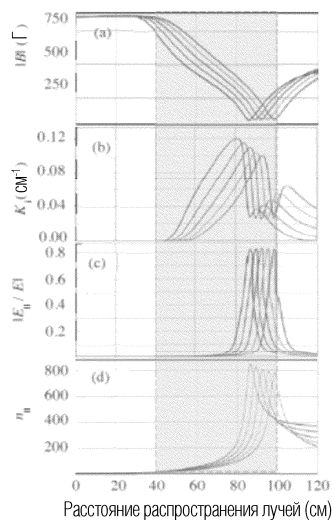
Фиг. 39



Фиг. 40



Фиг. 41



Фиг. 42

