

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(21) **202392810** (13) **A1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ**

(43) Дата публикации заявки  
**2023.12.07**

(51) Int. Cl. **H05H 1/00** (2006.01)

(22) Дата подачи заявки  
**2022.04.06**

(54) **СИСТЕМА И СПОСОБЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ  
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ FRC-ПЛАЗМЫ ЧЕРЕЗ  
ИНЖЕКЦИЮ ПУЧКА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ**

(31) **63/172,619**

(32) **2021.04.08**

(33) **US**

(86) **PCT/US2022/023686**

(87) **WO 2022/216833 2022.10.13**

(71) Заявитель:

**ТАЭ ТЕКНОЛОДЖИЗ, ИНК. (US)**

(72) Изобретатель:

**Биндербауэр Михл В., Путвински**

**Сергей, Смирнов Артём Н., Гота**

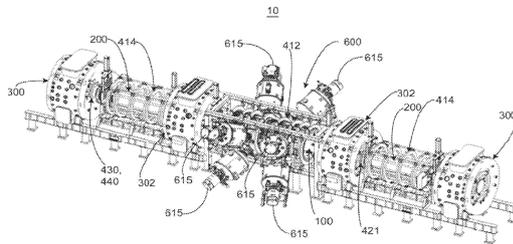
**Хирози, Рош Томас, Микинс Майкл**

**(US)**

(74) Представитель:

**Медведев В.Н. (RU)**

(57) Высокопроизводительная система обращенной магнитной конфигурации (FRC) включает в себя центральную удерживающую камеру, диверторы, соединенные с концами камеры, инжекторы пучка нейтральных частиц, позиционированные около камеры, и магнитную систему, содержащую катушки квазипостоянного тока, аксиально позиционированные вдоль компонентов FRC-системы.



**A1**

**202392810**

**202392810**

**A1**

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-579432EA/081

### **СИСТЕМА И СПОСОБЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ FRC-ПЛАЗМЫ ЧЕРЕЗ ИНЖЕКЦИЮ ПУЧКА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ**

Область техники, к которой относится изобретение

[0001] Варианты осуществления, описанные в данном документе, в общем, относятся к системам магнитного удержания плазмы, а более конкретно, к системам и способам, которые упрощают формирование и поддержание высокоэнергетической и высокотемпературной плазмы в обращенной магнитной конфигурации (плазмы FRC) с превосходной стабильностью, а также с удержанием частиц, энергии и потока.

Уровень техники

[0002] Обращенная магнитная конфигурация (FRC, Field Reversed Configuration) принадлежит к классу топологий с магнитным удержанием плазмы, известных как "компактные тороиды" (СТ, compact toroid). Она демонстрирует преимущественно полоидальные магнитные поля и обладает нулевыми или малыми самогенерируемыми тороидальными полями (см. работу автора M. Tuszewski "Nucl. Fusion 28", 2033 (1988 год)). Привлекательные характеристики такой конфигурации заключаются в ее простой геометрии для простоты конструирования и техобслуживания, в естественном неограниченном диверторе для упрощения вытягивания энергии и золоудаления и в очень высоком  $\beta$  ( $\beta$  является отношением среднего давления плазмы к среднему давлению магнитного поля в FRC), т.е. в высокой плотности мощности. Характер с высоким  $\beta$  является преимущественным для экономного режима работы и для использования усовершенствованных анейтронных топлив, таких как D-He3 и p-B11.

[0003] Традиционный способ образования FRC использует технологию  $\Theta$ -пинча с обращенным полем, формирующую горячие плазмы высокой плотности (см. работу авторов A. L. Hoffman и J. T. Slough "Nucl. Fusion 33", 27 (1993 год)). Варьирование означенного представляет собой способ улавливания с перемещением в пространстве, в котором плазма, созданная в "тета-пинч-источнике", в той или иной степени сразу выталкивается одним концом в удерживающую камеру. Перемещающийся в пространстве плазмодид затем улавливается между двумя сильными зеркалами на концах камеры (см., например, работу авторов H. Himura, S. Okada, S. Sugimoto и S. Goto "Phys. Plasmas 2", 191 (1995 год)). При нахождении в удерживающей камере, могут применяться различные способы нагрева и возбуждения током, такие как инжекция пучка (нейтральных или нейтрализованных частиц), вращающиеся магнитные поля, RF- или омический нагрев и т.д. Это разделение функций источника и удержания предлагает ключевые инженерно-технические преимущества для потенциальных будущих термоядерных реакторов. FRC оказались чрезвычайно надежными, устойчивыми к событиям динамического образования, перемещения в пространстве и насильственного захвата. Кроме того, они показывают тенденцию к тому, чтобы предполагать предпочтительное плазменное

состояние (см., например, работу авторов H. Y. Guo, A. L. Hoffman, K. E. Miller и L. C. Steinhauer "Phys. Rev. Lett. 92", 245001 (2004 год)). Значительный прогресс достигнут за последнее десятилетие в разработке других способов FRC-образования: слияние сфероматов с противоположно направленными спиральностями (см., например, работу авторов Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama и T. Okazaki "Nucl. Fusion 39", 2001 (1999 год)) и посредством возбуждения током с вращающимися магнитными полями (RMF, rotating magnetic field) (см., например, работу автора I. R. Jones "Phys. Plasmas 6", 1950 (1999)), что также предоставляет дополнительную стабильность.

[0004] Технология на основе принципа столкновения и слияния, предложенная давно (см., например, работа автора D. R. Well "Phys. Fluids 9", 1010 (1966 год)), подвергается значительной дополнительной разработке: два отдельных тета-пинча на противоположных концах удерживающей камеры одновременно формируют два плазмоида и ускоряют плазмоиды друг к другу на высокой скорости; они затем сталкиваются в центре удерживающей камеры и сливаются, чтобы образовывать составную FRC. При конструировании и успешной работе одного из наибольших FRC-экспериментов к настоящему времени, традиционный способ на основе принципа столкновения и слияния показан как формирующий стабильные высокотемпературные FRC с большим временем жизни с интенсивным потоком (см., например, работу авторов M. Binderbauer и др. "Phys. Rev. Lett. 105", 045003 (2010)). Совсем недавно, главный прогресс достигнут с использованием технологии на основе принципа столкновения и слияния в FRC-экспериментах с возбуждением пучка, которые формируют относительно высокотемпературные FRC в течение длительного времени (типичные плазменные параметры:  $T_e \sim 250$  эВ,  $T_i \sim 1$  кэВ,  $\langle n_e \rangle \sim 2-3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $B_e \sim 1$  кГс, время жизни плазмы  $\sim 30$  мс) с использованием инъекции (NBI, neutral-beam injection) пучка нейтральных частиц (NB, neutral-beam) с высоким уровнем мощности и подачи эффективного граничного смещения. (См., например, работу авторов Gota, H. и др. "Nucl. Fusion 57", 116021 (2017 год); работу авторов Gota, H. и другие "Nucl. Fusion 59", 112009 (2019 год); и работу авторов Gota, H. и другие "Bull. Am. Phys. Soc. 64", UP10.00123 (2019 год)). В таких экспериментах, целевая плазма для NBI формируется посредством столкновения и слияния двух FRC-плазм с использованием технологии динамического тета-пинч-образования с обращенным полем (FRTP, field-reversed theta-pinch) (работа автора Binderbauer "Phys. Rev. Lett. 105"), в которой улавливаемый магнитный поток объединенной FRC первоначально составляет  $\sim 5$  мВб на основе модели жесткого ротора с внешним магнитным полем в  $\sim 1$  кГс в удерживающей секции. Посредством инъекции NB с высоким уровнем мощности  $> 13$  МВт (увеличенным вплоть до  $\sim 21$  МВт посредством настройки энергии пучка во время выдачи дозы) в целевую плазму, инжектированные быстрые частицы улавливаются и проходят внутри и снаружи сепаратриссы с крупной орбитой, чтобы нагревать главным образом электроны, а также для возбуждения током, при котором быстрые ионы удерживаются почти классически. Эта NBI с высоким уровнем мощности не достигнута ни в одном другом СТ-эксперименте и представляет

собой очень важную демонстрацию достоверности FRC-концепции с возбуждением пучка и ее технической готовности (работа автора Gota "Nucl. Fusion 59"; работа автора Gota "Bull. Am. Phys. Soc. 64").

[0005] Усовершенствованные системы, устройства и способы для того, чтобы формировать целевую FRC-плазму с интенсивным потоком.

Сущность изобретения

[0006] Примерные варианты осуществления систем, устройств и способов предоставляются в данном документе для формирования и поддержания магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC). В примерных вариантах осуществления, способ для формирования и поддержания магнитно-удерживаемой плазмы, имеющей магнитное поле с обращенной магнитной конфигурацией (FRC), содержит формирование зеркальной плазмы в удерживающей камере, инжекцию пучков быстрых нейтральных атомов из множества инжекторов пучка нейтральных частиц в зеркальную плазму под углом к средней плоскости удерживающей камеры, чтобы осуществлять переход зеркальной плазмы в FRC-плазму, и поддержание FRC-плазмы равной или примерно равной постоянному значению без затухания посредством инжекции пучков быстрых нейтральных атомов из множества инжекторов пучка нейтральных частиц в FRC-плазму под углом к средней плоскости удерживающей камеры.

[0007] В примерных вариантах осуществления, инжекторы пучка нейтральных частиц являются регулируемыми от начального уровня мощности до увеличенного уровня мощности.

[0008] В примерных вариантах осуществления, система для формирования и поддержания магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC) содержит: удерживающую камеру; первый и второй диверторы (отклонители), соединенные с удерживающей камерой; множество инжекторов пучка нейтральных атомов, соединенных с удерживающей камерой и ориентированных таким образом, чтобы инжектировать пучки нейтральных атомов к средней плоскости удерживающей камеры под углом, меньшим нормального по отношению к продольной оси удерживающей камеры; магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, позиционированных вокруг удерживающей камеры и первого и второго диверторов; первый и второй набор зеркальных катушек квазипостоянного тока, позиционированных между удерживающей камерой и первым и вторым диверторами; систему геттерирования, соединенную с удерживающей камерой и первым и вторым диверторами; один или более смещающих электродов для электрического смещения незамкнутой поверхности потока сформированной FRC-плазмы, причем один или более смещающих электродов позиционируются в одном или более из удерживающей камеры и первого и второго диверторов; и две или более седловидных отклоняющих катушки, соединенных с удерживающей камерой.

[0009] Другие системы, способы, признаки и преимущества изобретения должны становиться очевидными специалистам в данной области техники после изучения

прилагаемых чертежей и подробного описания. Подразумевается, что все такие дополнительные системы, способы, признаки и преимущества включены в рамки этого описания, находятся в пределах объема предмета изобретения, описанного в данном документе, и защищаются посредством прилагаемой формулы изобретения. Никким образом признаки примерных вариантов осуществления не должны истолковываться в качестве ограничения прилагаемой формулы изобретения, при отсутствии специального перечисления этих признаков в формуле изобретения.

#### Краткое описание чертежей

[0010] Прилагаемые чертежи, которые включаются в качестве части настоящего описания изобретения, иллюстрируют текущие примерные варианты осуществления и, вместе с общим описанием, приведенным выше, и подробным описанием примерных вариантов осуществления, приведенным ниже, служат для того, чтобы пояснять и изучать принципы настоящего изобретения.

[0011] Фиг. 1 иллюстрирует удержание частиц в FRC-системе в высокопроизводительном FRC-режиме (HPF, high performance FRC regime) по сравнению с традиционным FRC-режимом (CR, conventional FRC regime) и по сравнению с другими традиционными FRC-экспериментами.

[0012] Фиг. 2 иллюстрирует компоненты примерной FRC-системы и магнитную топологию FRC, сформированной в настоящей FRC-системе.

[0013] Фиг. 3А иллюстрирует базовую компоновку примерной FRC-системы при просмотре сверху, включающей в себя центральный удерживающий сосуд, формирующие секции, диверторы, пучки нейтральных частиц, электроды, плазменные пушки, зеркальные пробки и инжектор таблеток.

[0014] Фиг. 3В иллюстрирует центральный удерживающий сосуд при просмотре сверху и показывает пучки нейтральных частиц, размещаемые под углом, нормальным по отношению к главной оси симметрии в центральном удерживающем сосуде.

[0015] Фиг. 3С иллюстрирует центральный удерживающий сосуд при просмотре сверху и показывает пучки нейтральных частиц, размещаемые под углом, меньшим нормального по отношению к главной оси симметрии в центральном удерживающем сосуде, и направленные таким образом, чтобы инжектировать частицы к средней плоскости центрального удерживающего сосуда.

[0016] Фиг. 3D и 3Е иллюстрируют виды сверху и в перспективе, соответственно, базовой компоновки примерного варианта осуществления настоящей FRC-системы, включающей в себя примерную компоновку из центрального удерживающего сосуда, формирующих секций, внутреннего и внешнего диверторов, пучков нейтральных частиц, размещаемых под углом, меньшим нормального по отношению к главной оси симметрии в центральном удерживающем сосуде, электродов, плазменных пушек и зеркальных пробок.

[0017] Фиг. 3F иллюстрирует вид в перспективе базовой компоновки альтернативного примерного варианта осуществления настоящей FRC-системы,

включающей в себя примерную компоновку из центрального удерживающего сосуда, первого и второго диверторов, пучков нейтральных частиц, размещаемых под углом, меньшим нормального по отношению к главной оси симметрии в центральном удерживающем сосуде, электродов, плазменных пушек и зеркальных пробок.

[0018] Фиг. 4 иллюстрирует схематический вид компонентов системы подачи импульсной мощности для формирующих секций.

[0019] Фиг. 5 иллюстрирует изометрический вид отдельных формирующих полозьев с подачей импульсной мощности.

[0020] Фиг. 6 иллюстрирует изометрический вид узла формирующих труб.

[0021] Фиг. 7 иллюстрирует частичный изометрический вид в сечении системы формирования пучка нейтральных частиц.

[0022] Фиг. 8 иллюстрирует изометрический вид компоновки систем формирования пучка нейтральных частиц на центральном удерживающем сосуде.

[0023] Фиг. 9 иллюстрирует частичный изометрический вид в сечении компоновки систем Ti- и Li-геттерирования на центральном удерживающем сосуде и диверторах.

[0024] Фиг. 10 иллюстрирует частичный изометрический вид в сечении дивертора и ассоциированной магнитной зеркальной пробки, показывающий плазменную пушку и отклоняющий электродный узел, установленные в диверторной камере.

[0025] Фиг. 11 иллюстрирует примерную компоновку кольцевого смещающего электрода в осевом конце удерживающей камеры.

[0026] Фиг. 12 иллюстрирует эволюцию исключаемого радиуса потока в FRC-системе, полученную из последовательности внешних диамагнитных контуров в двух формирующих секциях тета-пинчей с обращенным полем и магнитных зондов, встроенных внутри центральной металлической удерживающей камеры. Время измеряется с момента синхронизируемого обращения поля в формирующих источниках, и расстояние  $z$  задается относительно осевой средней плоскости машины.

[0027] Фиг. 13A, 13B, 13C и 13D иллюстрируют данные из репрезентативного неустойчивого не-NPF-разряда в настоящей FRC-системе. В качестве функций от времени показаны (фиг. 13A) исключенный радиус потока в средней плоскости, (фиг. 13B) 6 хорд линейно-интегрированной плотности из интерферометра на основе  $\text{CO}_2$  в средней плоскости, (фиг. 13C) радиальные профили плотности после инверсии по Абелю из данных интерферометра на основе  $\text{CO}_2$ , и (фиг. 13D) полная температура плазмы из баланса давлений.

[0028] Фиг. 14 иллюстрирует исключенные осевые профили потока в выбранные времена для идентичного разряда настоящей FRC-системы, показанной на фиг. 13A, 13B, 13C и 13D.

[0029] Фиг. 15 иллюстрирует изометрический вид седловидных отклоняющих катушек, смонтированных за пределами центрального удерживающего сосуда.

[0030] Фиг. 16A, 16B, 16C и 16D иллюстрируют корреляции времени жизни FRC и длины импульса инжектированных пучков нейтральных частиц. Как показано, более

длинные импульсы пучка формируют FRC с большим временем жизни.

[0031] Фиг. 17А, 17В, 17С и 17D показывают отдельные и комбинированные эффекты различных компонентов FRC-системы на FRC-производительность и достижение HPF-режима.

[0032] Фиг. 18А, 18В, 18С и 18D иллюстрируют данные из репрезентативного неустойчивого HPF-разряда в настоящей FRC-системе. В качестве функций от времени показаны (фиг. 18А) исключенный радиус потока в средней плоскости, (фиг. 18В) б хорд линейно-интегрированной плотности из интерферометра на основе CO<sub>2</sub> в средней плоскости, (фиг. 18С) радиальные профили плотности после инверсии по Абелю из данных интерферометра на основе CO<sub>2</sub>, и (фиг. 18D) полная температура плазмы из баланса давлений.

[0033] Фиг. 19 иллюстрирует удержание потока в качестве функции от температуры электронов ( $T_e$ ). Она содержит графическое представление нового установленного превосходного режима масштабирования для HPF-разрядов.

[0034] Фиг. 20 иллюстрирует время жизни FRC, соответствующее длине импульса инжектированных не под углом и под углом пучков нейтральных частиц.

[0035] Фиг. 21А, 21В, 21С, 21D и 21Е иллюстрируют длину импульса инжектированного под углом пучка нейтральных частиц и время жизни плазменных FRC-параметров в форме радиуса плазмы, плотности плазмы, температуры плазмы и магнитного потока, соответствующего длине импульса инжектированных под углом пучков нейтральных частиц.

[0036] Фиг. 22А и 22В иллюстрируют базовую компоновку инжектора с компактными тороидами (СТ).

[0037] Фиг. 23А и 23В иллюстрируют центральный удерживающий сосуд, показывающий СТ-инжектор, смонтированный в нем.

[0038] Фиг. 24А и 24В иллюстрируют базовую компоновку примерного варианта осуществления СТ-инжектора, имеющего дрейфовую трубку, соединенную с ним.

[0039] Фиг. 25 иллюстрирует изометрический вид в сечении системы формирования пучка нейтральных частиц с компонентами для подстраиваемой выходной энергии пучка.

[0040] Фиг. 26 является схематическим видом, иллюстрирующим систему формирования пучка нейтральных частиц с подстраиваемой выходной энергией пучка.

[0041] Фиг. 27 является схематическим видом, иллюстрирующим механизм управления осевой позицией FRC-плазмы в удерживающем сосуде (CV, confinement vessel).

[0042] Фиг. 28 является блок-схемой последовательности операций способа для общей схемы управления в скользящем режиме.

[0043] Фиг. 29 является составным графиком примеров моделирования управления осевой позицией в скользящем режиме.

[0044] Фиг. 30 является составным графиком примеров моделирования управления

осевой позицией в скользящем режиме.

[0045] Фиг. 31 является упрощенной схемой магнитной топологии и контура плотности для FRC-систем, показанных на фиг. 3D и 3E.

[0046] Фиг. 32 является упрощенной схемой магнитной топологии и контура плотности для FRC-системы, показанной на фиг. 3F.

[0047] Фиг. 33 является схематическим видом, иллюстрирующим концентрические электроды, расположенные в диверторах.

[0048] Фиг. 34 является графическим представлением установки для подачи напряжения смещения на электроды.

[0049] Фиг. 35A, 35B, 35C, 35D и 35E иллюстрируют время жизни плазменных FRC-параметров в форме радиуса плазмы, плотности плазмы и температур плазмы для FRC-плазм, сформированных посредством FRTP и технологий со сформированным пучком.

[0050] Фиг. 36A, 36B, 36C, 36D и 36E иллюстрируют время жизни плазменных FRC-параметров в форме радиуса плазмы, плотности плазмы и температур плазмы для FRC-плазмы со сформированным пучком.

[0051] Фиг. 37A, 37B, 37C и 37D иллюстрируют время жизни плазменных FRC-параметров в форме радиуса плазмы, плотности плазмы, температуры плазмы и магнитного потока, соответствующего FRC-плазмам со сформированным пучком в FRC-системах, показанных на фиг. 3D, 3E и 31, по сравнению с фиг. 3F и 32.

[0052] Фиг. 38 иллюстрирует сравнение пиковых температур, т.е. температуры электронов,  $T_e$ , и полной температуры,  $T_{tot}$ , в FRTP FRC и FRC со сформированным пучком.

[0053] Следует отметить, что чертежи необязательно нарисованы в масштабе, и что элементы аналогичных структур или функций, в общем, представляются посредством аналогичных ссылок с номерами в качестве иллюстрации на всех чертежах. Также следует отметить, что чертежи предназначены только для того, чтобы упрощать описание различных вариантов осуществления, поясненных в данном документе. Чертежи не обязательно описывают каждый аспект идей, раскрытых в данном документе, и не ограничивают объем формулы изобретения.

#### Подробное описание изобретения

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

[0055] Далее подробнее описаны характерные примеры вариантов осуществления, описанных в данном документе, причем эти примеры используют многие из этих

дополнительных признаков и идей как отдельно, так и в комбинации, со ссылкой на прилагаемые чертежи. Это подробное описание предназначено только для того, чтобы обучать специалистов в области техники дополнительным подробностям для использования на практике предпочтительных аспектов идей настоящего изобретения, и не предназначено для того, чтобы ограничивать объем изобретения. Следовательно, комбинации признаков и этапов, раскрытых в последующем подробном описании, могут быть необязательными для того, чтобы использовать изобретение на практике в самом широком смысле, а вместо этого изучаются просто для того, чтобы конкретно описывать типичные примеры настоящих идей.

[0056] Более того, различные признаки характерных примеров и зависимые пункты формулы изобретения могут комбинироваться способами, которые не перечислены конкретно и явно, чтобы предоставлять дополнительные полезные варианты осуществления настоящих идей. Помимо этого, следует явно отметить, что все признаки, раскрытые в описании и/или в формуле изобретения, имеют намерение раскрытия отдельно и независимо друг от друга для целей исходного раскрытия сущности, а также для целей ограничения заявленного предмета изобретения, независимо от компоновок признаков в вариантах осуществления и/или в формуле изобретения. Также следует явно отметить, что все диапазоны значений или индикаторы относительно групп объектов раскрывают каждое возможное промежуточное значение или промежуточный объект для целей исходного раскрытия сущности, а также для целей ограничения заявленного предмета изобретения.

[0057] Примерные варианты осуществления, предусмотренные в данном документе, направлены на системы и способы, которые упрощают образование и поддержание FRC-плазм с превосходной стабильностью, а также с удержанием частиц, энергии и потока. Некоторые примерные варианты осуществления направлены на системы и способы, которые упрощают образование и поддержание FRC-плазм с повышенными системными энергиями и с повышенной устойчивостью с использованием инжекторов пучка нейтральных частиц с подстраиваемыми характеристиками энергии пучка. Некоторые примерные варианты осуществления также направлены на системы и способы, которые способствуют стабильности FRC-плазмы в радиальном и осевом направлениях и управлению осевой позицией FRC-плазмы вдоль оси симметрии удерживающей камеры для FRC-плазмы независимо от свойств осевой стабильности равновесия FRC-плазмы.

[0058] Перед обращением к системам и способам, которые упрощают формирование и поддержание целевой FRC-плазмы с интенсивным потоком, предоставляется пояснение систем и способов для формирования и поддержания плазм высокопроизводительной FRC с превосходной стабильностью, а также с превосходным с удержанием частиц, энергии и потока по сравнению с традиционными FRC. Такие высокопроизводительные FRC-плазмы предоставляют вариант развития для обширного множества вариантов применения, включающих в себя компактные нейтронные

источники (для формирования медицинских изотопов, ликвидации ядерных отходов, исследований в области материаловедения, нейтронной радиографии и томографии), компактные фотонные источники (для формирования и обработки химических продуктов), системы разделения и обогащения по массовым линиям и ядра реактора для синтеза легких ядер для будущего поколения энергии.

[0059] Различные вспомогательные системы и рабочие режимы исследованы, с тем чтобы оценивать то, имеется или нет превосходный режим удержания в FRC-плазмах. Эти усилия приводят к прорывным открытиям и развитию парадигмы высокопроизводительной FRC, описанной в данном документе. В соответствии с этой новой парадигмой, примерные системы и способы комбинируют огромное количество новых идей и средств для того, чтобы резко улучшать FRC-удержание, как проиллюстрировано на фиг. 1, а также предоставлять управление стабильностью без отрицательных побочных эффектов. Как подробнее поясняется ниже, фиг. 1 иллюстрирует удержание частиц в FRC-системе 10, описанной ниже (см. фиг. 2 и 3), работающей в соответствии с высокопроизводительным FRC-режимом (HPF) для образования и поддержания FRC-плазмы по сравнению с работой в соответствии с традиционным режимом (CR) для образования и поддержания FRC-плазмы и по сравнению с удержанием частиц в соответствии с традиционными режимами для образования и поддержания FRC-плазм, используемого в других экспериментах. Настоящее раскрытие сущности приводит в общих чертах и детализует инновационные отдельные компоненты FRC-системы 10 и способов, а также их совместные эффекты.

#### *FRC-система*

##### *Вакуумная система*

[0060] Фиг. 2 и 3А иллюстрируют схематический вид примерной FRC-системы 10. FRC-система 10 включает в себя центральный удерживающий сосуд 100, окруженный посредством двух диаметрально противоположных формирующих секций 200 тета-пинчей с обращенным полем, и за рамками формирующих секций 200, две диверторные (отклоняющие) камеры 300 для того, чтобы управлять плотностью нейтральных частиц и загрязнением в силу примесей. FRC-система 10 сконструирована с возможностью приспособлять сверхвысокий вакуум и работает при типичных базовых давлениях в  $10^{-8}$  мм.рт.ст. Такие вакуумметрические давления требуют использования сопрягающихся фланцев с двойной накачкой между сопрягающимися компонентами, металлических уплотнительных колец, внутренних стенок с высокой степенью чистоты, а также тщательного начального приведения в требуемое состояние поверхности всех частей до сборки, к примеру, физической и химической очистки, после чего выполняется вакуумное спекание при  $250^{\circ}\text{C}$  в течение 24 часов и очистка в тлеющем разряде в водороде.

[0061] Формирующие секции 200 тета-пинчей с обращенным полем представляют собой стандартные тета-пинч-разряды с обращенным полем (F RTP), хотя и с усовершенствованной формирующей системой с подачей импульсной мощности, подробно поясненной ниже (см. фиг. 4-6). Каждая формирующая секция 200 изготовлена

из стандартных непрозрачных промышленных кварцевых трубок, которые содержат 2-миллиметровую внутреннюю подкладку из ультрачистого кварца. Удерживающая камера 100 изготовлена из нержавеющей стали, чтобы обеспечивать возможность множества радиальных и тангенциальных портов; она также служит в качестве закрепителя потока на временной шкале экспериментов, описанных ниже, и ограничивает быстрые магнитные переходные процессы. Вакуум создается и поддерживается в FRC-системе 10 с помощью набора сухих спиральных насосов предварительного разрежения, турбомолекулярных насосов и крионасосов.

#### *Магнитная система*

[0062] Магнитная система 400 проиллюстрирована на фиг. 2 и 3А. Фиг. 2, в числе других признаков, иллюстрирует магнитный FRC-поток и контуры плотности (в качестве функций от радиальных и осевых координат), связанные с FRC-плазмой 450, сформированной посредством FRC-системы 10. Эти контуры получаются посредством двумерного резистивного численного MHD-моделирования Холла с помощью кода, разработанного для того, чтобы моделировать системы и способы, соответствующие FRC-системе 10, и хорошо согласуются с измеренными экспериментальными данными. Как видно на фиг. 2, FRC-плазма 450 состоит из тороуса закрытых силовых линий поля во внутренней части 453 FRC-плазмы 450 в сепаратриссе 451 и кольцевого граничного слоя 456 на незамкнутых силовых линиях 452 поля недалеко от сепаратриссы 451. Граничный слой 456 коалесцирует в струи 454 за рамками FRC-длины, что обеспечивает естественный дивертор.

[0063] Основная магнитная система 410 включает в себя последовательность катушек 412, 414 и 416 квазипостоянного тока, которые располагаются в конкретных осевых позициях вдоль компонентов, т.е. вдоль удерживающей камеры 100, формирующих секций 200 и диверторов 300 FRC-системы 10. Катушки 412, 414 и 416 квазипостоянного тока питаются посредством переключаемых источников мощности квазипостоянного тока и формируют базовые магнитные поля напряжения смещения приблизительно в 0,1 Тл в удерживающей камере 100, формирующих секциях 200 и диверторах 300. В дополнение к катушкам 412, 414 и 416 квазипостоянного тока, основная магнитная система 410 включает в себя зеркальные катушки 420 квазипостоянного тока (питаемые посредством переключаемых источников) между любым концом удерживающей камеры 100 и смежными формирующими секциями 200. Зеркальные катушки 420 квазипостоянного тока предоставляют магнитные зеркальные отношения вплоть до 5 и могут независимо снабжаться питанием для управления приданием равновесию формы. Помимо этого, зеркальные пробки 440 позиционируются между каждой из формирующих секций 200 и диверторами 300. Зеркальные пробки 440 содержат компактные зеркальные катушки 430 квазипостоянного тока и катушки 444 зеркальных пробок. Зеркальные катушки 430 квазипостоянного тока включают в себя три катушки 432, 434 и 436 (питаемые посредством переключаемых источников), которые формируют дополнительные направляющие поля, чтобы фокусировать поверхности 455

магнитного потока к проходу 442 небольшого диаметра, проходящему через катушки 444 зеркальных пробок. Катушки 444 зеркальных пробок, которые оборачиваются вокруг прохода 442 небольшого диаметра и питаются посредством LC-схемы подачи импульсной мощности, формируют сильные магнитные зеркальные поля вплоть до 4 Тл. Цель этой всей компоновки катушек состоит в том, чтобы плотно увязывать и направлять поверхности 455 магнитного потока и протекающие на конце плазменные струи 454 в удаленные камеры 310 диверторов 300. В завершение, набор седловидных рамочных "антенн" 460 (см. фиг. 15) расположен за пределами удерживающей камеры 100, по две на каждой стороне средней плоскости, и питается посредством источников мощности постоянного тока. Седловидные рамочные антенны 460 могут быть выполнены с возможностью предоставлять квазистатическое дипольное или квадрупольное магнитное поле приблизительно в 0,01 Тл для управления нестабильностями вращения и/или управления электронным током. Седловидные рамочные антенны 460 могут гибко предоставлять магнитные поля, которые являются симметричными или антисимметричными относительно средней плоскости машины, в зависимости от направления приложенных токов.

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

[0064] Фиг. 4-6 иллюстрируют основные компоновочные блоки и компоновку формирующих систем 210. Формирующие системы 210 с подачей импульсной мощности работают согласно модифицированному тета-пинч-принципу. Предусмотрено две системы, каждая из которых снабжает мощностью одну из формирующих секций 200.

[0065] Формирующая система 210 состоит из модульной компоновки подачи импульсной мощности, которая состоит из отдельных блоков 220 (=модулей), каждый из которых подает питание в поднабор катушек 232 узла 230 подвески (=подвесок), которые оборачиваются вокруг формирующих кварцевых трубок 240. Каждый модуль 220 состоит из конденсаторов 221, индукторов 223, быстрых переключателей 225 высокого тока и ассоциированной триггерной 222 и поглощающей схемы 224. Всего, каждая формирующая система 210 сохраняет между 350-400 кДж емкостной энергии, что предоставляет вплоть до 35 ГВт мощности для того, чтобы образовывать и ускорять FRC. Координированная работа этих компонентов достигается через триггерную и управляющую систему 222 и 224 предшествующего уровня техники, которая обеспечивает возможность согласования по времени между формирующими системами 210 в каждой формирующей секции 200 и минимизирует дрожание фазы при переключении до десятков наносекунд. Преимущество этой модульной конструкции заключается в ее гибкой работе: FRC могут образовываться на месте и затем ускоряться и инжектироваться (= статическое образование) либо образовываться и ускоряться одновременно (= динамическое образование).

#### *Инжекторы пучка нейтральных частиц*

[0066] Инжекторы 600 пучка нейтральных атомов развертываются в FRC-системе 10 для того, чтобы предоставлять нагрев и возбуждение током, а также развивать

давление быстрых частиц. Как показано на фиг. 3А, 3В и 8, отдельные линии движения пучка, содержащие инжекторные системы 610 и 640 пучка нейтральных атомов, расположены вокруг центральной удерживающей камеры 100 и инжектируют быстрые частицы тангенциально в FRC-плазму (и перпендикулярно либо под углом, нормальным по отношению к главной оси симметрии в центральном удерживающем сосуде 100) с параметром ударного воздействия таким образом, что целевая зона улавливания находится сильно внутри сепаратриссы 451 (см. фиг. 2). Каждая инжекторная система 610 и 640 допускает инжекцию вплоть до 1 МВт мощности пучка нейтральных частиц в FRC-плазму с энергиями частиц между 20 и 40 кэВ. Системы 610 и 640 основаны на многоапертурных источниках вытягивания положительных ионов и используют геометрическую фокусировку, инерционное охлаждение сеток для вытягивания ионов и дифференциальную накачку. Помимо использования различных плазменных источников, системы 610 и 640 главным образом различаются посредством их физической конструкции, чтобы удовлетворять соответствующим монтажным местоположениям, в результате обеспечивая возможности боковой и вертикальной инжекции. Типичные компоненты этих инжекторов пучка нейтральных частиц показаны на фиг. 7 для боковых инжекторных систем 610. Как показано на фиг. 7, каждая отдельная система 610 формирования пучка нейтральных частиц включает в себя плазменный RF-источник 612 на входном конце (он заменяется на дуговой источник в системах 640) с магнитным экраном 614, покрывающим конец. Оптический источник ионов и ускоряющие сетки 616 соединяются с плазменным источником 612, и запорный клапан 620 позиционируется между оптическим источником ионов и ускоряющими сетками 616 и нейтрализатором 622. Отклоняющий магнит 624 и поглотитель 628 ионов расположены между нейтрализатором 622 и прицельным устройством 630 на выходном конце. Система охлаждения содержит два криогенных холодильных машины 634, две криопанели 636 и защитный LN<sub>2</sub>-кожух 638. Эта гибкая конструкция предоставляет возможность работы в широком диапазоне FRC-параметров.

[0067] Альтернативная конфигурация для инжекторов 600 пучка нейтральных атомов представляет собой конфигурацию инжекции быстрых частиц тангенциально в FRC-плазму, но с углом  $A$ , меньшим  $90^\circ$  относительно главной оси симметрии в центральном удерживающем сосуде 100. Эти типы ориентации инжекторов 615 пучка показаны на фиг 3С, 3D, 3Е и 3F. Помимо этого, инжекторы 615 пучка нейтральных атомов могут ориентироваться таким образом, что инжекторы 615 пучка по обе стороны от средней плоскости центрального удерживающего сосуда 100 инжектируют свои частицы к средней плоскости. В завершение, осевая позиция этих систем 600 формирования пучка может выбираться ближе к средней плоскости. Эти альтернативные варианты осуществления на основе инжекции упрощают вариант более централизованной заправки топливом, который предоставляет лучшее связывание пучков и более высокую эффективность улавливания инжектированных быстрых частиц. Кроме того, в зависимости от угловой и осевой позиции, эта компоновка инжекторов 615 пучка

обеспечивает более прямое и независимое управление осевым удлинением и другими характеристиками FRC-плазмы 450. Например, инъекция пучков под малым углом  $A$  относительно главной оси симметрии сосуда должна создавать FRC-плазму с большим осевым протягиванием и более низкой температурой, тогда как выбор более перпендикулярного угла  $A$  должен приводить к аксиально более короткой, но более горячей плазме. Таким образом, угол  $A$  инъекции и местоположение инжекторов 615 пучка могут оптимизироваться для различных целей. Помимо этого, такое размещение под углом и позиционирование инжекторов 615 пучка позволяет обеспечивать возможность инъекции пучков более высокой энергии (которые, в общем, являются более предпочтительными для выделения большей величины мощности с меньшей расходимостью пучка) в более низкие магнитные поля, чем в иных случаях требуется для того, чтобы улавливать такие пучки. Это обусловлено тем фактом, что именно азимутальный компонент энергии определяет масштаб орбиты быстрых ионов (который становится постепенно меньшим по мере того, как угол инъекции относительно главной оси симметрии сосуда уменьшается при постоянной энергии пучка). Кроме того, инъекция под углом к средней плоскости и с осевыми позициями пучка, близкими к средней плоскости, улучшает связывание пучка и плазмы, даже по мере того, как FRC-плазма усаживается или иным образом аксиально сжимается в течение периода инъекции.

[0068] Обращаясь к фиг. 3D и 3E, в другой альтернативной конфигурации, FRC-система 10 показывается как включающая в себя внутренние диверторы 302, в дополнение к инжекторам 615 наклонных пучков. Внутренние диверторы 302 позиционируются между формирующими секциями 200 и удерживающей камерой 100 и конфигурируются и работают практически аналогично внешним диверторам 300. Внутренние диверторы 302, которые включают в себя быстро переключающиеся магнитные катушки, фактически являются неактивными во время процесса образования, чтобы позволять формирующим FRC проходить через внутренние диверторы 302 по мере того, как формирующие FRC перемещаются в пространстве к средней плоскости удерживающей камеры 100. После того как формирующие FRC проходят через внутренние диверторы 302 в удерживающую камеру 100, внутренние диверторы активируются, чтобы работать практически аналогично внешним диверторам и развязывать удерживающую камеру 100 от формирующих секций 200.

[0069] Обращаясь к фиг. 3F, в другой альтернативной конфигурации с удаленными формирующими секциями, FRC-система 10 показывается как включающая в себя первый и второй диверторы 302 и инжекторы 615 наклонных пучков, соединенные с удерживающей камерой 100. Первый и второй диверторы 302 позиционируются на противоположных концах удерживающей камеры 100 и сконфигурированы и работают практически аналогично диверторам 300, показанным на фиг. 3C, и внешним диверторам 300, показанным на фиг. 3D и 3E.

#### *Инжектор таблеток*

[0070] Чтобы предоставлять средство для того, чтобы инжектировать новые

частицы и лучше управлять общего количеством FRC-частиц, 12-ствольный инжектор 700 таблеток (см., например, работу авторов I. Vinyar и др. "Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE and HL-2A", Proceedings of the 26th Fusion Science and Technology Symposium, 27.09-01-10 (2010 год)) используется в FRC-системе 10. Фиг. 3 иллюстрирует компоновку инжектора 700 таблеток в FRC-системе 10. Цилиндрические таблетки ( $D \sim 1$  мм,  $L \sim 1-2$  мм) инжектируются в FRC со скоростью в диапазоне 150-250 км/с. Каждая отдельная таблетка содержит примерно  $5 \times 10^{19}$  атомов водорода, что является сравнимым с общим количеством FRC-частиц.

#### *Системы геттерирования*

[0071] Известно, что нейтральный галоидный газ представляет собой серьезную проблему во всех удерживающих системах. Процессы обмена и рециркуляции зарядов (высвобождения холодного примесного материала из стенки) могут иметь разрушительный эффект на энергию и удержание частиц. Помимо этого, любая значительная плотность нейтрального газа на или около края должна приводить к быстрым потерям или, по меньшей мере, серьезно сокращать время жизни инжектированных крупноорбитальных (высокоэнергетических) частиц ("крупноорбитальный" означает частицы, имеющие орбиты в масштабе FRC-топологии или, по меньшей мере, радиусы орбиты, гораздо большие характерного масштаба длин градиента магнитного поля), т.е. к факту, который оказывает негативное влияние на все варианты применения высокоэнергетичной плазмы, включающие в себя синтез через вспомогательный нагрев пучка.

[0072] Приведение поверхности в требуемое состояние представляет собой средство, посредством которого негативные эффекты нейтрального газа и примесей могут управляться или уменьшаться в удерживающей системе. С этой целью, FRC-система 10, предусмотренная в данном документе, использует системы 810 и 820 осаждения титана и лития, которые покрывают обращенные поверхности плазмы удерживающей камеры 100 (или сосуда) и диверторов 300 и 302 пленками (с толщиной в десятки микрометров) из Ti и/или Li. Покрытия достигаются через технологии осаждения из паровой фазы. Твердый Li и/или Ti испаряется и/или сублимируется и распыляется на близлежащие поверхности, чтобы образовывать покрытия. Источники представляют собой атомные печи с направляющими соплами 822 (в случае Li) или нагретыми сферами твердого тела с направляющим защитным кожухом 812 (в случае Ti). Испаряющие Li-системы типично работают в непрерывном режиме, тогда как Ti-сублиматоры работают главным образом прерывисто между работой в плазменном режиме. Рабочие температуры этих систем выше  $600^\circ\text{C}$ , чтобы получать высокие скорости осаждения. Чтобы достигать хорошего покрытия стенок, требуются несколько стратегически расположенных испаряющих/сублимирующих систем. Фиг. 9 детализирует примерную компоновку систем 810 и 820 осаждения с геттерированием в FRC-системе 10. Покрытия выступают в качестве поверхностей геттерирования и эффективно накачивают атомные и молекулярные водородные сорта (H и D). Покрытия также уменьшают другие типичные

примеси, такие как углерод и кислород, до незначительных уровней.

### *Зеркальные пробки*

[0073] Как указано выше, FRC-система 10 использует наборы зеркальных катушек 420, 430 и 444, как показано на фиг. 2 и 3. Первый набор зеркальных катушек 420 расположен в двух осевых концах удерживающей камеры 100 и независимо снабжается питанием из удерживающих, формирующих и отклоняющих катушек 412, 414 и 416 постоянного тока основной магнитной системы 410. Первый набор зеркальных катушек 420 главным образом помогает управлять и аксиально содержать FRC-плазму 450 во время слияния и предоставляет управление приданием равновесию формы во время устойчивости. Первый набор 420 зеркальных катушек формирует номинально более высокие магнитные поля (приблизительно в 0,4-0,5 Тл), чем центральное удерживающее поле, сформированное посредством центральных удерживающих катушек 412. Второй набор 430 зеркальных катушек, который включает в себя три компактных зеркальных катушки 432, 434 и 436 квазипостоянного тока, расположен между формирующими секциями 200 и диверторами 300 и возбуждается посредством общего переключаемого источника мощности. Зеркальные катушки 432, 434 и 436, вместе с более компактными импульсными катушками 444 зеркальных пробок (питаемыми посредством емкостного источника мощности) и физическим стягиванием 442, формируют зеркальные пробки 440, которые предоставляют узкий тракт с низкой газовой проводимостью с очень сильными магнитными полями (между 2-4 Тл с временами повышения приблизительно в 10-20 мс). Большинство компактных импульсных зеркальных катушек 444 имеют компактные радиальные размеры, высверленное отверстие в 20 см и аналогичную длину, по сравнению с высверленным отверстием масштаба порядка метров или более и с расплющенной конструкцией удерживающих катушек 412, 414 и 416. Назначение зеркальных пробок 440 является множественным: (1) Катушки 432, 434, 436 и 444 плотно увязывают и направляют поверхности 452 магнитного потока и протекающие на конце плазменные струи 454 в удаленные диверторные камеры 300. Это гарантирует то, что частицы выходящих продуктов сгорания достигают диверторов 300 надлежащим образом, и то, что предусмотрены непрерывные поверхности 455 потока, которые образуют след из области незамкнутых силовых линий 452 поля центральной FRC-плазмы 450 полностью в диверторы 300. (2) Физические стягивания 442 в FRC-системе 10, через которые катушки 432, 434, 436 обеспечивают прохождение поверхностей 452 магнитного потока и плазменных струй 454 и 444, предоставляют препятствие для потока нейтрального газа из плазменных пушек 350, которые сидят в диверторах 300. Аналогичным образом, стягивания 442 предотвращают обратное протекание газа из формирующих секций 200 в диверторы 300, за счет этого уменьшая число нейтральных частиц, которые должны вводиться во всю FRC-систему 10 при начале запуска FRC. (3) Сильные осевые зеркала, сформированные посредством катушек 432, 434, 436 и 444, уменьшают осевые потери частиц и за счет этого уменьшают коэффициент параллельной диффузии частиц на незамкнутых силовых линиях поля.

[0074] В альтернативной конфигурации, показанной на фиг. 3D и 3E, набор низкопрофильных поперечно сужающихся катушек 421 представляет собой позиции между внутренними диверторами 302 и формирующими секциями 200. В альтернативной конфигурации, показанной на фиг. 3F, набор зеркальных катушек 420 расположен в двух осевых концах удерживающей камеры 100.

#### *Осевые плазменные пушки*

[0075] Плазменные потоки из пушек 350, смонтированных в диверторных камерах 310 диверторов 300 (и диверторов 302 альтернативной конфигурации, показанной на фиг. 3F), имеют намерение повышать стабильность и производительность пучка нейтральных частиц. Пушки 350 монтируются на оси в камере 310 диверторов 300, как проиллюстрировано на фиг. 3 и 10, и формируют плазму, протекающую вдоль незамкнутых силовых линий 452 потока в диверторе 300 и к центру удерживающей камеры 100. Пушки 350 работают при газовом разряде высокой плотности в промывочном пакетированном канале и конструируются с возможностью формировать несколько килоампер полностью ионизированной плазмы в течение 5-10 мс. Пушки 350 включают в себя импульсную магнитную катушку, которая сопоставляет выходной плазменный поток с требуемым размером плазмы в удерживающей камере 100. Технические параметры пушек 350 характеризуются посредством канала, имеющего внешний диаметр в 5-13 см и внутренний диаметр вплоть до приблизительно 10 см, и предоставляют разрядный ток в 10-15 кА при 400-600 В с внутренним магнитным полем пушки в 0,5-2,3 Тл.

[0076] Пушечные плазменные потоки могут проникать через магнитные поля зеркальных пробок 440 и протекать в формирующую секцию 200 и удерживающую камеру 100. Эффективность переноса плазмы через зеркальную пробку 440 увеличивается с уменьшением расстояния между пушкой 350 и пробкой 440 и посредством задания пробки 440 более широкой и короткой. При обоснованных условиях, пушки 350 могут доставлять приблизительно  $10^{22}$  протонов/с через зеркальные пробки 440 в 2-4 Тл с высокими температурами ионов и электронов приблизительно в 150-300 эВ и приблизительно в 40-50 эВ, соответственно. Пушки 350 предоставляют значительное пополнение граничного FRC-слоя 456 и улучшенное полное удержание FRC-частиц.

[0077] Чтобы дополнительно увеличивать плотность плазмы, газосепаратор может использоваться для того, чтобы напускать дополнительный газ в плазменный поток из пушек 350. Эта технология обеспечивает возможность кратного увеличения плотности инжектированной плазмы. В FRC-системе 10, газосепаратор, установленный на стороне дивертора 300 зеркальных пробок 440, улучшает пополнение граничного FRC-слоя 456, образование FRC-плазмы 450 и привязывание к плазменной линии.

[0078] Учитывая все параметры регулирования, поясненные выше, а также с учетом того, что работа только с одной или с обеими пушками является возможной, совершенно очевидно, что широкий спектр рабочих режимов является доступным.

#### *Смещающие электрод*

[0079] Электрическое смещение незамкнутых поверхностей потока может

предоставлять радиальные потенциалы, которые обуславливают азимутальное движение  $E \times B$ , которое предоставляет управляющий механизм, аналогичный повороту ручки регулировки, чтобы управлять вращением плазмы в незамкнутой силовой линии поля, а также фактического FRC-ядра 450 через сдвиг скоростей. Чтобы выполнять это управление, FRC-система 10 использует различные электроды, стратегически размещенные в различных частях машины. Фиг. 3 иллюстрирует смещающие электроды, позиционированные в примерных местоположениях в FRC-системе 10.

[0080] В принципе, предусмотрено 4 класса электродов: (1) точечные электроды 905 в удерживающей камере 100, которые вступают в контакт с конкретными незамкнутыми силовыми линиями 452 поля на краю FRC-плазмы 450 для того, чтобы предоставлять локальный заряд, (2) кольцевые электроды 900 между удерживающей камерой 100 и формирующими секциями 200 для того, чтобы заряжать слои 456 потока на дальнем краю азимутально симметричным способом, (3) батареи концентрических электродов 910 в диверторах 300 (и в диверторах 302 альтернативной конфигурации, показанной на фиг. 3F) для того, чтобы заряжать несколько концентрических слоев 455 потока (за счет чего выбор слоев является управляемым посредством регулирования катушек 416, чтобы регулировать магнитное поле дивертора, с тем чтобы завершать требуемые слои 456 потока на соответствующих электродах 910) и наконец (4) аноды 920 (см. фиг. 10) самих плазменных пушек 350 (которые перехватывают внутренние незамкнутые поверхности 455 потока около сепаратрисы FRC-плазмы 450). Фиг. 10 и 11 показывают некоторые типичные конструкции для некоторых из них.

[0081] Во всех случаях, эти электроды возбуждаются посредством источника импульсной мощности или источника мощности постоянного тока при напряжениях вплоть до приблизительно 800 В. В зависимости от размера электрода и того, какие поверхности потока пересекаются, токи могут потребляться в диапазоне килоампер.

#### *Неустойчивый режим работы FRC-системы - традиционный режим*

[0082] Стандартное образование плазмы в FRC-системе 10 придерживается развитой технологии тета-пинчей с обращенным полем. Типичный процесс для запуска FRC начинается посредством возбуждения катушек 412, 414, 416, 420, 432, 434 и 436 квазипостоянного тока для работы в установившемся состоянии. RFTP-схемы подачи импульсной мощности формирующих систем 210 с подачей импульсной мощности затем возбуждают катушки 232 с импульсным быстрым обращенным магнитным полем, чтобы создавать временное обратное напряжение смещения приблизительно в  $-0,05$  Тл в формирующих секциях 200. В этой точке предварительно определенное количество нейтрального газа в 9-20 фунтов на квадратный дюйм инжектируется в два формирующих объема, заданные посредством кварцевых трубчатых камер 240 (северной и южной) формирующих секций 200, через набор азимутально ориентированных напускающих канавок во фланцах, расположенных на наружных концах формирующих секций 200. Затем небольшое RF-поле (~в сотни килогерц) формируется из набора антенн на поверхности кварцевых трубок 240 для того, чтобы создавать предварительную

ионизацию в форме локальных областей посевной ионизации в столбах нейтрального газа. После этого тета-кольцевая модуляция применяется к возбуждению током катушек 232 с импульсным быстрым обращенным магнитным полем, которая приводит к более глобальной предварительной ионизации столбов газа. В завершение, основные банки импульсной мощности формирующих систем 210 с подачей импульсной мощности запускаются, чтобы возбуждать катушки 232 с импульсным быстрым обращенным магнитным полем, чтобы создавать поле с подачей прямого напряжения смещения вплоть до 0,4 Тл. Этот этап может упорядочиваться во времени таким образом, что поле с подачей прямого напряжения смещения формируется равномерно по всей длине формирующих трубок 240 (статическое образование), либо таким образом, что последовательная перистальтическая модуляция полем достигается вдоль оси формирующих трубок 240 (динамическое образование).

[0083] В этом всем процессе образования, фактическое обращение поля в плазме возникает быстро, приблизительно в течение 5 мкс. Импульсная мощность в несколько гигаватт, доставляемая в формирующую плазму, легко формирует горячие FRC, которые затем выталкиваются из формирующих секций 200 через применение либо упорядоченной во времени модуляции прямого магнитного поля (магнитной перистальтики), либо временно увеличенных токов в последних катушках из наборов 232 катушек около наружных осевых концов формирующих трубок 210 (формирующих градиент осевого магнитного поля, который указывает аксиально на удерживающую камеру 100). Две (северная и южная) формирующие FRC, образованные и ускоренные таким способом, затем расширяются в удерживающую камеру 100 большего диаметра, в которой катушки 412 квазипостоянного тока формируют поле с подачей прямого напряжения смещения для того, чтобы управлять радиальным расширением и предоставлять равновесный внешний магнитный поток.

[0084] После того как северная и южная формирующие FRC поступают в место около средней плоскости удерживающей камеры 100, FRC сталкиваются. Во время столкновения, осевые кинетические энергии северной и южной формирующих FRC существенно термализуются по мере того, как FRC сливаются в конечном счете в одну FRC-плазму 450. Большой набор диагностических средств плазмы доступен в удерживающей камере 100 для того, чтобы изучать равновесия FRC-плазмы 450. Типичные рабочие условия в FRC-системе 10 формируют составные FRC с радиусами сепаратриссы приблизительно в 0,4 м и осевой протяженностью приблизительно в 3 м. Дополнительные характеристики представляют собой внешние магнитные поля приблизительно в 0,1 Тл, плотности плазмы приблизительно в  $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и полную температуру плазмы вплоть до 1 кэВ. Вообще без устойчивости, т.е. без нагрева и/или возбуждения током через инъекцию пучка нейтральных частиц либо другое вспомогательное средство, время жизни этих FRC ограничено приблизительно 1 мс, местным временем затухания в характерной конфигурации.

*Экспериментальные данные неустойчивого режима работы - традиционный*

*режим*

[0085] Фиг. 12 показывает типичную временную эволюцию исключенного радиуса потока,  $r_{\Delta\phi}$ , который аппроксимирует радиус сепаратриссы,  $r_s$ , чтобы иллюстрировать динамику процесса слияния тета-пинчей FRC-плазмы 450. Два (северный и южный) отдельных плазоида формируются одновременно и затем ускоряются из соответствующих формирующих секций 200 на сверхзвуковой скорости,  $v_z \sim 250$  км/с, и сталкиваются около средней плоскости в  $z=0$ . Во время столкновения, плазоиды сжимаются аксиально, после чего выполняется быстрое радиальное и осевое расширение, перед слиянием в конечном счете для того, чтобы образовывать FRC-плазму 450. Радиальная и осевая динамика сливающейся FRC-плазмы 450 свидетельствуется посредством подробных измерений профиля плотности и болометрической томографии.

[0086] Данные из репрезентативного неустойчивого разряда FRC-системы 10 показаны в качестве функций от времени на фиг. 13A, 13B, 13C и 13D. FRC инициируется в  $t=0$ . Исключенный радиус потока в осевой средней плоскости машины показан на фиг. 13A. Эти данные получаются из матрицы магнитных зондов, расположенных только внутри стенки из нержавеющей стали удерживающей камеры, которые измеряют осевое магнитное поле. Стальная стенка представляет собой хороший закрепитель потока на временных шкалах этого разряда.

[0087] Линейно-интегрированные плотности показаны на фиг. 13B из 6-хордового интерферометра на основе  $\text{CO}_2/\text{He-Ne}$ , расположенного в  $z=0$ . С учетом вертикального ( $y$ ) FRC-смещения, измеренного посредством болометрической томографии, инверсия по Абелю дает в результате контуры плотности по фиг. 13C. После некоторого осевого и радиального плескания в течение первых 0,1 мс, FRC успокаивается с полым профилем плотности. Этот профиль является довольно плоским, с существенной плотностью на оси, что требуется посредством типичных двумерных FRC-равновесий.

[0088] Полная температура плазмы показывается на фиг. 13D, извлекается из баланса давлений и является полностью совместимой с измерениями на основе спектроскопии и томсоновского рассеяния.

[0089] Анализ из всей исключенной матрицы потока указывает то, что форма FRC-сепаратриссы (аппроксимированной посредством исключенных осевых профилей потока) постепенно эволюционирует от беговой дорожки в эллиптическую. Эта эволюция, показанная на фиг. 14, является согласованной с постепенным магнитным пересоединением из двух в одну FRC. Фактически, приблизительные оценки предлагают то, что в этот конкретный момент, приблизительно 10% двух начальных магнитных FRC-потоков пересоединяются в ходе столкновения.

[0090] FRC-длина усаживается устойчиво с 3 вниз приблизительно до 1 м в течение времени жизни FRC. Эта усадка, видимая на фиг. 14, обеспечивает то, что главным образом, конвективные потери энергии доминируют над FRC-удержанием. Поскольку давление плазмы внутри сепаратриссы снижается быстрее, чем внешнее магнитное давление, линейное натяжение магнитного поля в концевых областях сжимает FRC

аксиально, восстанавливая осевое и радиальное равновесие. Для разряда, поясненного на фиг. 13 и 14, магнитный FRC-поток, общее количество частиц и тепловая энергия (приблизительно в 10 МВб,  $7 \cdot 10^{19}$  частиц и 7 кДж, соответственно) снижаются приблизительно на порядок величины в первую миллисекунду, когда очевидно, что FRC-равновесие нарушается.

#### *Устойчивый режим работы - HPF-режим*

[0091] Примеры на фиг. 12-14 представляют собой характеристику затухающих FRC вообще без устойчивости. Тем не менее, несколько технологий развертываются в FRC-системе 10 для того, чтобы дополнительно улучшать FRC-удержание (внутреннее ядро и граничный слой) до HPF-режима и обеспечивать устойчивость конфигурации.

#### *Пучки нейтральных частиц*

[0092] Во-первых, быстрые нейтральные (Н-)частицы инжектируются перпендикулярно  $B_z$  в пучках из восьми инжекторов 600 пучка нейтральных частиц. Пучки быстрых нейтральных частиц инжектируются с момента, когда северная и южная формирующие FRC сливаются в удерживающей камере 100 в одну FRC-плазму 450. Быстрые ионы, созданные главным образом посредством обмена зарядами, имеют бетатронные орбиты (с первичными радиусами в масштабе FRC-топологии или, по меньшей мере, гораздо большими, чем характерный масштаб длин градиента магнитного поля), которые способствуют увеличению азимутального тока FRC-плазмы 450. После некоторой части разряда (после 0,5-0,8 мс на импульс), достаточно большая популяция быстрых ионов значительно улучшает внутренние свойства FRC-стабильности и удержания (см., например, работу авторов M.W. Binderbauer и N. Rostoker "Plasma Phys. 56", часть 3, 451 (1996 год)). Кроме того, с точки зрения устойчивости, пучки из инжекторов 600 пучка нейтральных частиц также представляют собой первичные средства для того, чтобы возбуждать ток и нагревать FRC-плазму.

[0093] В плазменном режиме FRC-системы 10, быстрые ионы замедляются главным образом на электронах плазмы. В течение ранней части разряда, типичные усредненные по орбитам времена замедления быстрых ионов составляют 0,3-0,5 мс, что приводит к значительному FRC-нагреву, главным образом электронов. Быстрые ионы выполняют большие радиальные отходы за пределы сепаратриссы, поскольку внутреннее магнитное FRC-поле является по своей природе низким (приблизительно в 0,03 Тл в среднем для внешнего осевого поля в 0,1 Тл). Быстрые ионы должны быть уязвимыми для потерь на обмен зарядами, если плотность нейтрального газа является слишком высокой за пределами сепаратриссы. Следовательно, геттерирование за счет стенок и другие технологии (такие как плазменная пушка 350 и зеркальные пробки 440, которые способствуют, в числе прочего, управлению расходом газа), развернутые в FRC-системе 10, имеют тенденцию минимизировать граничные нейтральные частицы и обеспечивать требуемое нарастание быстрого ионного тока.

#### *Инжекция таблеток*

[0094] Когда значительная популяция быстрых ионов нарастает в FRC-плазме 450 с

более высокими температурами электронов и большими временами жизни FRC, замороженные H- или D-таблетки инжестируются в FRC-плазму 450 из инжектора 700 таблеток для того, чтобы обеспечивать устойчивость общего количества FRC-частиц FRC-плазмы 450. Ожидаемые временные шкалы абляции являются достаточно короткими для того, чтобы предоставлять значительный источник FRC-частиц. Этот темп также может увеличиваться за счет увеличения площади поверхности инжектированного куска посредством разбиения отдельной таблетки на меньшие фрагменты при нахождении в стволах или инъекционных трубках инжектора 700 таблеток и, перед входом в удерживающую камеру 100, за счет этапа, который может достигаться в силу увеличения трения между таблеткой и стенками инъекционной трубки посредством стягивания радиуса изгиба последнего сегмента инъекционной трубки прямо перед входом в удерживающую камеру 100. На основе варьирования последовательности и темпа запуска 12 стволов (инъекционных трубок), а также фрагментации, можно подстраивать систему 700 инъекции таблеток для того, чтобы предоставлять только требуемый уровень устойчивости общего количества частиц. В свою очередь, это помогает поддерживать внутреннее кинетическое давление в FRC-плазме 450 и устойчивый режим работы и время жизни FRC-плазме 450.

[0095] После того как аблированные атомы сталкиваются со значительной плазмой в FRC-плазме 450, они становятся полностью ионизированными. Результирующий холодный компонент плазмы затем нагревается при столкновении посредством местной FRC-плазмы. Энергия, необходимая для того, чтобы поддерживать требуемую температуру FRC, в конечном счете подается посредством инжекторов 600 пучка. В этом смысле, инжекторы 700 таблеток вместе с инжекторами 600 пучка нейтральных частиц формируют систему, которая поддерживает установившееся состояние и обеспечивает устойчивость FRC-плазмы 450.

#### *СТ-инжектор*

[0096] В качестве альтернативы инжектору таблеток, предоставляется инжектор с компактными тороидами (СТ), главным образом для пополнения плазм с обращенной магнитной конфигурацией (FRC). СТ-инжектор 720 содержит намагниченную коаксиальную плазменную пушку (MCPG), которая, как показано на фиг. 22А и 22В, включает в себя коаксиальные цилиндрические внутренний и внешний электроды 722 и 724, смещающую катушку 726, позиционированную внутренне по отношению к внутреннему электроду, и электрический прерыватель 728 на конце, противоположном разряду СТ-инжектора 720. Газ инжектируется через порт 730 для инъекции газа в пространство между внутренним и внешним электродами 722 и 724, и плазма типа сферомака формируется из него посредством разряда и выталкивается из пушки посредством лоренцовой силы. Как показано на фиг. 23А и 23В, пара СТ-инжекторов 720 соединяется с удерживающим сосудом 100 рядом и на противоположных сторонах средней плоскости сосуда 100 для того, чтобы инжектировать СТ в центральную FRC-плазму в удерживающем сосуде 100. Конец разряда СТ-инжекторов 720 направлен к

средней плоскости удерживающего сосуда 100 под углом к продольной оси удерживающего сосуда 100, аналогично инжекторам 615 пучка нейтральных частиц.

[0097] В альтернативном варианте осуществления, СТ-инжектор 720, как показано на фиг. 24А и 24В, включает в себя дрейфовую трубку 740, содержащую удлиненную цилиндрическую трубку, соединенную с концом разряда СТ-инжектора 720. Как проиллюстрировано, дрейфовая трубка 740 включает в себя катушки 742 дрейфовой трубки, позиционированные над и с осевым разнесением вдоль трубки. Множество диагностических портов 744 проиллюстрированы по длине трубки.

[0098] Преимущества СТ-инжектора 720 являются следующими: (1) управление и регулируемость общего количества частиц в расчете на инжектированный СТ; (2) теплая плазма осаждается (вместо криогенных таблеток); (3) система может работать в режиме стабилизации по темпу за счет повторений, с тем чтобы предоставлять возможность непрерывной заправки топливом; (4) система также может восстанавливать некоторый магнитный поток, поскольку инжектированные СТ переносят встроенное магнитное поле. В варианте осуществления для экспериментального использования, внутренний диаметр внешнего электрода составляет 83,1 мм, и внешний диаметр внутреннего электрода составляет 54,0 мм. Поверхность внутреннего электрода 722 предпочтительно покрывается вольфрамом, чтобы уменьшать примеси, поступающие из электрода 722. Как проиллюстрировано, смещающая катушка 726 монтируется во внутреннем электроде 722.

[0099] В последних экспериментах, сверхзвуковая скорость СТ-перемещения в пространстве вплоть до  $\sim 100$  км/с достигнута. Другие типичные плазменные параметры являются следующими: плотность электронов  $\sim 5 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$ , температура электронов  $\sim 30\text{-}50$  эВ, и общее количество частиц  $\sim 0,5\text{-}1,0 \times 10^{19}$ . Высокое кинетическое давление СТ обеспечивает возможность инжектированной плазме проникать глубоко в FRC и осаждать частицы в сепаратриссе. В последних экспериментах, пополнение FRC-частиц приводит к тому, что  $\sim 10\text{-}20\%$  общего количества FRC-частиц, предоставляемых посредством СТ-инжекторов, успешно демонстрируют то, что пополнение может легко выполняться без разрушения FRC-плазмы.

#### *Седловидные отклоняющие катушки*

[00100] Чтобы достигать возбуждения током в установившемся состоянии и поддерживать требуемый ионный ток, желательно предотвращать или значительно уменьшать раскрутку электронов вследствие электронно-ионной силы трения (возникающей в результате переноса момента количества движения при ионно-электронном столкновении). FRC-система 10 использует инновационную технологию, чтобы предоставлять разрыв электронов через внешне прикладываемое статическое дипольное или квадрупольное магнитное поле. Это осуществляется через внешние седловидные отклоняющие катушки 460, проиллюстрированные на фиг. 15. Поперечное прикладываемое радиальное магнитное поле из седловидных отклоняющих катушек 460 индуцирует осевое электрическое поле во вращающейся FRC-плазме. Результирующий осевой электронный ток взаимодействует с радиальным магнитным полем, чтобы

формировать азимутальную разрывную силу на электронах,  $F_{\theta} = -\sigma V_{e0} \langle (|B_r|^2) \rangle$ . Для типичных условий в FRC-системе 10, требуемое прикладываемое дипольное (или квадрупольное) магнитное поле внутри плазмы должно составлять только порядка 0,001 Тл, с тем чтобы предоставлять надлежащий разрыв электронов. Соответствующее внешнее поле приблизительно в 0,015 Тл является достаточно небольшим, с тем чтобы не вызывать заметные потери быстрых частиц либо не оказывать иное отрицательное влияние на удержание. Фактически, прикладываемое дипольное (или квадрупольное) магнитное поле способствует подавлению нестабильностей. В комбинации с тангенциальной инжекцией пучка нейтральных частиц и осевой инжекцией плазмы, седловидные отклоняющие катушки 460 предоставляют дополнительный уровень управления относительно поддержания и стабильности тока.

### *Зеркальные пробки*

[00101] Конструкция импульсных катушек 444 в зеркальных пробках 440 обеспечивает локальное формирование сильных магнитных полей (2-4 Тл) с умеренной емкостной энергией (приблизительно в 100 кДж). Для образования магнитных полей, типичных для текущей работы FRC-системы 10, все силовые линии поля в формирующем объеме проходят через стягивания 442 в зеркальных пробках 440, как предложено посредством силовых линий магнитного поля на фиг. 2, и контакт плазмы со стенками не возникает. Кроме того, зеркальные пробки 440 совместно с магнитами 416 дивертора квазипостоянного тока могут регулироваться таким образом, чтобы направлять силовые линии поля на отклоняющие электроды 910 либо раздвигать силовые линии поля в конфигурации с заострением на конце (не показана). Второе повышает стабильность и подавляет параллельную электронную теплопроводимость.

[00102] Зеркальные пробки 440 непосредственно также способствуют управлению нейтральным газом. Зеркальные пробки 440 обеспечивают лучшее использование дейтериевого газа, напускаемого в кварцевые трубки во время FRC-образования, поскольку обратное протекание газа в диверторы 300 значительно уменьшается в силу небольшой газовой проводимости пробок (скромные 500 л/с). Большая часть остаточного напускаемого газа в формирующих трубках 210 быстро ионизируется. Помимо этого, плазма высокой плотности, протекающая через зеркальные пробки 440, предоставляет эффективную нейтральную ионизацию, в силу чего эффективный газовый барьер. Как результат, большинство нейтральных частиц, рециркулирующих в диверторах 300 из граничного FRC-слоя 456, не возвращается в удерживающую камеру 100. Помимо этого, нейтральные частицы, ассоциированные с работой плазменных пушек 350 (как пояснено ниже), должны удерживаться главным образом в диверторах 300.

[00103] В завершение, зеркальные пробки 440 имеют тенденцию улучшать удержание граничного FRC-слоя. При зеркальных отношениях (магнитные поля пробки/удерживающие магнитные поля) в диапазоне 20-40 и длине в 15 м между северной и южной зеркальными пробками 440, время удержания частиц граничного слоя  $\tau_{\parallel}$  увеличивается на вплоть до порядка величины. Улучшение  $\tau_{\parallel}$  легко увеличивает

удержание FRC-частиц.

[00104] При условии потерь частиц на радиальную диффузию ( $D$ ) из объема 453 сепаратриссы, сбалансированных посредством осевых потерь ( $\tau_{\parallel}$ ) из граничного слоя 456, получается  $(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s/\tau_{\parallel})$ , из чего длина градиента плотности сепаратриссы может перезаписываться как  $\delta = (D\tau_{\parallel})^{1/2}$ . Здесь  $r_s$ ,  $L_s$  и  $n_s$  являются радиусом сепаратриссы, длиной сепаратриссы и плотностью сепаратриссы, соответственно. Время удержания FRC-частиц составляет  $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$ , где  $\tau_{\perp} = a^2/D$ , при  $a = r_s/4$ . Физически, улучшение  $\tau_{\parallel}$  приводит к увеличенному  $\delta$  (уменьшенному градиенту плотности сепаратриссы и параметру дрейфа) и в силу этого к уменьшенным потерям FRC-частиц. Полное улучшение удержания FRC-частиц, в общем, в определенной степени меньше квадратичного, поскольку  $n_s$  увеличивается с  $\tau_{\parallel}$ .

[00105] Существенное улучшение в  $\tau_{\parallel}$  также требует, чтобы граничный слой 456 оставался чрезвычайно стабильным (т.е. чтобы при  $n=1$  не было желобковой, рукавной или другой MHD-неустойчивости, характерной для незамкнутых систем). Использование плазменных пушек 350 предоставляет эту предпочтительную стабильность края. В этом смысле, зеркальные пробки 440 и плазменная пушка 350 формируют эффективную систему управления краем.

#### *Плазменные пушки*

[00106] Плазменные пушки 350 повышают стабильность FRC-струй 454 выходящих продуктов сгорания посредством привязывания к линии. Пушечные плазмы из плазменных пушек 350 формируются без азимутального углового момента количества движения, что оказывается полезным в управлении нестабильностями вращения FRC. По сути, пушки 350 представляют собой эффективное средство для того, чтобы управлять FRC-стабильностью, без необходимости устаревшей технологии квадрупольной стабилизации. Как результат, плазменные пушки 350 позволяют использовать преимущество благоприятных эффектов быстрых частиц или доступа к усовершенствованному гибриднему кинетическому FRC-режиму, как указано в этом раскрытии сущности. Следовательно, плазменные пушки 350 обеспечивают возможность FRC-системе 10 работать с токами в седловидных отклоняющих катушках, подходящими только для разрыва электронов, но ниже порогового значения, что должно вызывать FRC-нестабильности и/или приводить к заметной диффузии быстрых частиц.

[00107] Как упомянуто в вышеприведенном пояснении зеркальных пробок, если  $\tau_{\parallel}$  может значительно улучшаться, подаваемая пушечная плазма должна быть сравнимой с частотой потерь частиц граничного слоя ( $\sim 10^{22}/c$ ). Время жизни сформированной из пушки плазмы в FRC-системе 10 составляет в диапазоне миллисекунд. Фактически, рассматривается пушечная плазма с плотностью  $n_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и температурой ионов приблизительно в 200 эВ, удерживаемых между концевыми зеркальными пробками 440. Длина  $L$  ловушки и зеркальное отношение  $R$  составляют приблизительно 15 м и 20, соответственно. Средний свободный пробег ионов вследствие кулоновских столкновений составляет  $\lambda_{ii} \sim 6 \cdot 10^3 \text{ см}$ , и, поскольку  $\lambda_{ii} \ln R / R < L$ , ионы удерживаются в газодинамическом

режиме. Время удержания плазмы в этом режиме составляет  $\tau_{gd} \sim RL/2V_s \sim 2$  мс, где  $V_s$  является скоростью ионного звука. Для сравнения, классическое время удержания ионов для этих плазменных параметров должно составлять  $\tau_c \sim 0,5\tau_{ii}(\ln R + (\ln R)^{0,5}) \sim 0,7$  мс. Аномальная поперечная диффузия, в принципе, позволяет сокращать время удержания плазмы. Тем не менее, в FRC-системе 10, если предполагается скорость диффузии Бема, оцененное время поперечного удержания для пушечной плазмы составляет  $\tau_{\perp} > \tau_{gd} \sim 2$  мс. Следовательно, пушки должны предоставлять значительную дозаправку топливом граничного FRC-слоя 456 и улучшенное полное удержание FRC-частиц.

[00108] Кроме того, пушечные плазменные потоки могут включаться приблизительно через 150-200 микросекунд, что обеспечивает использование при FRC-запуске, перемещении в пространстве и слиянии в удерживающей камере 100. Если включаются около  $t \sim 0$  (иницирование основного FRC-банка), пушечные плазмы помогают обеспечивать устойчивость настоящей динамически сформированной и слившейся FRC-плазмы 450. Комбинированные общие количества частиц из формирующих FRC и из пушек являются достаточными для захвата пучка нейтральных частиц, плазменного нагрева и длительной устойчивости. Если включаются в  $t$  в диапазоне от -1 до 0 мс, пушечные плазмы могут заполнять кварцевые трубки 210 плазмой или ионизировать газ, напускаемый в кварцевые трубки, за счет этого обеспечивая FRC-образование с уменьшенным или, даже возможно, с нулевым напускаемым газом. Второе может требовать достаточно холодной формирующей плазмы для того, чтобы обеспечивать быструю диффузию обращенного магнитного поля напряжения смещения. Если включаются в  $t < -2$  мс, плазменные потоки могут заполнять объем силовой линии поля приблизительно в 1-3 м<sup>3</sup> областей образования и удержания формирующих секций 200 и удерживающей камеры 100 с целевой плотностью плазмы в несколько  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>, достаточной для того, чтобы обеспечивать возможность нарастания пучка нейтральных частиц до FRC-наступления. Формирующие FRC затем могут образовываться и перемещаться в пространстве в результирующую плазму в удерживающем сосуде. Таким образом, плазменные пушки 350 предоставляют широкий спектр рабочих условий и параметрических режимов.

#### *Электрическое смещение*

[00109] Управление радиальным профилем электрического поля в граничном слое 456 является преимущественным в различных способах для FRC-стабильности и удержания. На основе инновационных смещающих компонентов, развернутых в FRC-системе 10, можно прикладывать множество преднамеренных распределений электрических потенциалов к группе незамкнутых поверхностей потока во всей машине из областей сильно за пределами центральной области удержания в удерживающей камере 100. Таким образом, радиальные электрические поля могут формироваться в граничном слое 456 только за пределами FRC-плазмы 450. Эти радиальные электрические поля затем модифицируют азимутальное вращение граничного слоя 456 и осуществляют его удержание через сдвиг скоростей  $E \times B$ . Любое дифференциальное вращение между

граничным слоем 456 и FRC-ядром 453 затем может передаваться во внутреннюю часть FRC-плазмы посредством сдвига. Как результат, управление граничным слоем 456 непосредственно оказывает влияние на FRC-ядро 453. Кроме того, поскольку свободная энергия во вращении плазмы также может отвечать за нестабильности, эта технология предоставляет прямое средство для того, чтобы управлять началом и ростом нестабильностей. В FRC-системе 10, соответствующее граничное смещение предоставляет эффективное управление транспортировкой и вращением незамкнутой силовой линии поля, а также вращением FRC-ядра. Местоположение и форма различных предоставленных электродов 900, 905, 910 и 920 обеспечивает возможность управления различными группами поверхностей 455 потока и при различных и независимых потенциалах. Таким образом, может реализовываться огромное количество различных конфигураций и напряженностей электрического поля, каждая из которых имеет различное характерное влияние на производительность плазмы.

[00110] Ключевое преимущество всех этих инновационных технологий подачи напряжения смещения представляет собой тот факт, что поведение плазмы ядра и граничной плазмы может затрагиваться из места сильно за пределами FRC-плазмы, т.е. нет необходимости в том, чтобы приводить любые физические компоненты в соприкосновение с центральной горячей плазмой (что должно иметь серьезные последствия для энергии, потока и потерь частиц). Это имеет огромное положительное влияние на производительность и все потенциальные варианты применения HPF-концепции.

*Экспериментальные данные - работа в HPF-режиме*

[00111] Инжекция быстрых частиц через пучки из пушек 600 для формирования пучка нейтральных частиц играет важную роль в активации HPF-режима. Фиг. 16А, 16В, 16С и 16D иллюстрируют этот факт. Проиллюстрирован набор кривых, показывающих то, как время жизни FRC коррелируется с длиной импульсов пучка. Все другие рабочие условия поддерживаются постоянными для всех разрядов, содержащих это исследование. Данные усредняются по множеству доз и в силу этого представляют типичное поведение. Абсолютно очевидно, что большая длительность пучка формирует FRC с большим временем жизни. Если изучать это доказательство, а также другие диагностические средства во время этого исследования, демонстрируется то, что пучки увеличивают стабильность и уменьшают потери. Корреляция между длиной импульса пучка и временем жизни FRC не является идеальной, поскольку улавливание пучка становится неэффективным ниже определенного размера плазмы, т.е. поскольку FRC-плазма 450 усаживается по физическому размеру, не все инжектированные пучки перехватываются и улавливаются. Усадка FRC обусловлена главным образом тем фактом, что чистые потери энергии (~4 МВт приблизительно в середине разряда) из FRC-плазмы во время разряда в определенной степени больше полной мощности, подаваемой в FRC через пучки нейтральных частиц (~2,5 МВт) для конкретной экспериментальной установки. Расположение пучков в местоположении ближе к средней плоскости сосуда

100 должно иметь тенденцию уменьшать эти потери и продлевать время жизни FRC.

[00112] Фиг. 17А, 17В, 17С и 17D иллюстрируют эффекты различных компонентов, чтобы достигать HPF-режима. Они показывают семейство типичных кривых, иллюстрирующих время жизни FRC-плазмы 450 в качестве функции от времени. Во всех случаях, постоянная, умеренная величина мощности пучка (приблизительно в 2,5 МВт) инжектируется в течение полной длительности каждого разряда. Каждая кривая представляет различную комбинацию компонентов. Например, управление FRC-системой 10 вообще без зеркальных пробок 440, плазменных пушек 350 или геттерирования из систем 800 геттерирования приводит к быстрому началу нестабильности вращения и потерям FRC-топологии. Добавление только зеркальных пробок 440 задерживает начало нестабильностей и увеличивает удержание. Использование комбинации зеркальных пробок 440 и плазменной пушки 350 дополнительно уменьшает нестабильностей и увеличивает время жизни FRC. Конечное добавление геттерирования ( $T_i$  в этом случае) вдобавок к пушкам 350 и пробкам 440 обеспечивает наилучшие результаты - результирующая FRC не содержит нестабильностей и демонстрирует наибольшее время жизни. Из этой экспериментальной демонстрации очевидно, что полная комбинация компонентов формирует наилучший эффект и предоставляет пучки с наилучшими целевыми условиями.

[00113] Как показано на фиг. 1, HPF-режим демонстрирует резко улучшенное поведение при транспортировке. Фиг. 1 иллюстрирует изменение времени удержания частиц в FRC-системе 10 между традиционным режимом и HPF-режимом. Как можно видеть, оно улучшено гораздо больше, чем на коэффициент в 5 в HPF-режиме. Помимо этого, фиг. 1 детализирует время удержания частиц в FRC-системе 10 относительно времени удержания частиц в предшествующих традиционных FRC-экспериментах. Относительно этих других машин, HPF-режим FRC-системы 10 имеет улучшенное удержание на коэффициент между 5 и близко к 20. В завершение, наиболее важно, что природа масштабирования удержания FRC-системы 10 в HPF-режиме резко отличается от всех предшествующих измерений. Перед установлением HPF-режима в FRC-системе 10, различные эмпирические масштабные законы извлекаются из данных, чтобы прогнозировать времена удержания в предшествующих FRC-экспериментах. Все эти правила масштабирования зависят главным образом от отношения  $R^2/\rho_i$ , где  $R$  является радиусом нуля магнитного поля (нестрогим показателем физического масштаба машины), и  $\rho_i$  является ларморовским радиусом ионов, оцененным во внешне прикладываемом поле (нестрогим показателем прикладываемого магнитного поля). Из фиг. 1 очевидно, что длительное удержание в традиционных FRC является возможным только при большом размере машины и/или сильном магнитном поле. Управление FRC-системой 10 в традиционном FRC-режиме (CR) имеет тенденцию придерживаться этих правил масштабирования, как указано на фиг. 1. Тем не менее, HPF-режим является в высшей степени превосходным и показывает то, что гораздо лучшее удержание достижимо без большого размера машины или сильных магнитных полей. Что еще более важно, из фиг. 1

также очевидно, что HPF-режим приводит к улучшенному времени удержания с уменьшенным размером плазмы по сравнению с CR-режимом. Аналогичные тренды также наблюдаются для времен удержания потока и энергии, как описано ниже, которые также увеличены более чем на коэффициент в 3-8 в FRC-системе 10. Прорыв HPF-режима в силу этого обеспечивает использование умеренной мощности пучка, более низких магнитных полей и меньшего размера, с тем чтобы обеспечивать устойчивость и поддерживать FRC-равновесия в FRC-системе 10 и в будущих более высокоэнергетических машинах. Рука об руку с этими улучшениями идут более низкие эксплуатационные и конструктивные затраты, а также уменьшенная инженерно-техническая сложность.

[00114] Для дополнительного сравнения, фиг. 18A, 18B, 18C и 18D показывают данные из репрезентативного разряда в HPF-режиме в FRC-системе 10 в качестве функции от времени. Фиг. 18A иллюстрирует исключенный радиус потока в средней плоскости. Для этих более длинных временных шкал, проводящая стальная стенка более не является не хуже закрепителя потока, и магнитные зонды, внутренние по отношению к стенке, дополняются зондами за пределами стенки, чтобы надлежащим образом учитывать диффузию магнитного потока через сталь. По сравнению с типичной производительностью в традиционном режиме (CR), как показано на фиг. 13A, 13B, 13C и 13D, рабочий HPF-режим демонстрирует более чем на 400% большее время жизни.

[00115] Репрезентативная хорда следа линейно-интегрированной плотности показана на фиг. 18B, с дополнением после инверсии по Абелю, контурами плотности, на фиг. 18C. По сравнению с традиционным FRC-режимом (CR), как показано на фиг. 13A, 13B, 13C и 13D, плазма является более покоящейся во всем импульсе, что указывает очень стабильную работу. Пиковая плотность также является немного более низкой в HPF-импульсах (это представляет собой следствие более высокой полной температуры плазмы (вплоть до коэффициента 2)), как показано на фиг. 18D.

[00116] Для соответствующего разряда, проиллюстрированного на фиг. 18A, 18B, 18C и 18D, времена удержания энергии, частиц и потока составляют 0,5 мс, 1 мс и 1 мс, соответственно. В опорное время в 1 мс для разряда, накопленная энергия плазмы составляет 2 кДж, тогда как потери составляют приблизительно 4 МВт, что приводит к тому, что эта цель является очень подходящей для устойчивости пучка нейтральных частиц.

[00117] Фиг. 19 обобщает все преимущества HPF-режима в форме нового установленного экспериментального масштабирования удержания HPF-потока. Как можно видеть на фиг. 19, на основе измерений, проведенных до и после  $t=0,5$  мс, т.е.  $t<0,5$  мс и  $t>0,5$  мс, удержание потока (и аналогично, удержание частиц и удержание энергии) масштабируется приблизительно с квадратом температуры электронов ( $T_e$ ) для данного радиуса сепаратриссы ( $r_s$ ). Это строгое масштабирование с положительной степенью  $T_e$  (а не с отрицательной степенью) является полностью противоположным по отношению к масштабированию, демонстрируемому посредством традиционных токамаков, при котором удержание типично является обратно пропорциональным некоторой степени

температуры электронов. Проявление этого масштабирования является прямым следствием HPF-состояния и крупноорбитальной (т.е. с орбитами в масштабе FRC-топологии и/или, по меньшей мере, в характерном масштабе длин градиента магнитного поля) популяции ионов. Фундаментально, это новое масштабирование в значительной степени предпочитает высокие рабочие температуры и предоставляет реакторы относительно умеренного размера.

[00118] За счет преимуществ, которые обеспечивает HPF-режим, FRC-устойчивость или установившееся состояние, обусловленное посредством пучков нейтральных частиц, является достижимым, что означает то, глобальные плазменные параметры, такие как тепловая энергия плазмы, общие числа частиц, радиус и длина плазмы, а также магнитный поток, являются устойчивыми на обоснованных уровнях без существенного затухания. Для сравнения, фиг. 20 показывает данные на графике А из репрезентативного разряда в HPF-режиме в FRC-системе 10 в качестве функции от времени и на графике В для запланированного репрезентативного разряда в HPF-режиме в FRC-системе 10 в качестве функции от времени, в которой FRC-плазма 450 является устойчивой без затухания за длительность импульса пучка нейтральных частиц. Для графика А, пучки нейтральных частиц с полной мощностью в диапазоне приблизительно 2,5-2,9 МВт инжесктурированы в FRC-плазму 450 в течение длины активного импульса пучка приблизительно в 6 мс. Время жизни диамагнетика плазмы, проиллюстрированное на графике А, составляет приблизительно 5,2 мс. Более недавние данные показывают то, что время жизни диамагнетика плазмы приблизительно в 7,2 мс является достижимым с длиной активного импульса пучка приблизительно в 7 мс.

[00119] Как отмечено выше относительно фиг. 16А, 16В, 16С и 16D, корреляция между длиной импульса пучка и временем жизни FRC не является идеальной, поскольку улавливание пучка становится неэффективным ниже определенного размера плазмы, т.е. поскольку FRC-плазма 450 усаживается по физическому размеру, не все инжесктурированные пучки перехватываются и улавливаются. Усадка или затухание FRC обусловлены главным образом тем фактом, что чистые потери энергии (-4 МВт приблизительно в середине через разряд) из FRC-плазмы во время разряда в определенной степени больше полной мощности, подаваемой в FRC через пучки нейтральных частиц (-2,5 МВт) для конкретной экспериментальной установки. Как отмечено относительно фиг. 3С, инжескция наклонных пучков из пушек 600 для формирования пучка нейтральных частиц к средней плоскости улучшает связывание пучка и плазмы, даже по мере того, как FRC-плазма усаживается или иным образом аксиально сжимается в течение периода инжескции. Помимо этого, соответствующая пополнение таблеток должно поддерживать требуемую плотность плазмы.

[00120] График В представляет собой результат моделирования, выполняемых с использованием длины активного импульса пучка приблизительно в 6 мс и полной мощности пучка из пушек 600 для формирования пучка нейтральных частиц, немного большей приблизительно 10 МВт, при этом пучки нейтральных частиц должны

инжектировать нейтральные Н-(или D-)частицы с энергией частицы приблизительно в 15 кэВ. Эквивалентный ток, инжектированный посредством каждого из пучков, составляет приблизительно 110 А. Для графика В, угол инжекции пучка к оси устройства составляет приблизительно  $20^\circ$ , целевой радиус составляет 0,19 м. Угол инжекции может изменяться в диапазоне  $15-25^\circ$ . Пучки должны инжектироваться в направлении прямого тока азимутально. Чистая боковая сила, а также чистая осевая сила из инжекции на основе момента количества движения пучка нейтральных частиц должны минимизироваться. Аналогично графику А, быстрые нейтральные (Н-)частицы инжектируются из инжекторов 600 пучка нейтральных частиц с момента, когда северная и южная формирующие FRC сливаются в удерживающей камере 100 в одну FRC-плазму 450.

[00121] Моделирования, которые составляют основу для графика В, используют многомерные MHD-решатели Холла для фоновой плазмы и равновесные полностью кинетические решатели на основе метода Монте-Карло для энергетических компонентов пучка и всех процессов рассеяния, а также огромное количество связанных транспортных уравнений для всех плазменных сортов, чтобы моделировать интерактивные процессы оценки потерь. Транспортные компоненты эмпирически калибруются и экстенсивно сравнительно тестируются относительно экспериментальной базы данных.

[00122] Как показано посредством графика В, время жизни диамагнетика в установившемся состоянии FRC-плазмы 450 представляет собой длину импульса пучка. Тем не менее, важно отметить, что ключевой корреляционный график В показывает то, что когда пучки выключаются, плазма или FRC начинает затухать в это время, но не до этого. Затухание должно быть аналогичным затуханию, которое наблюдается в разрядах, которые не применяют пучок (вероятно, порядка 1 мс за пределами времени выключения пучка), и представляет собой просто отражение характерного времени затухания плазмы, обусловленного посредством внутренних процессов оценки потерь.

[00123] Обращаясь к фиг. 21А, 21В, 21С, 21D и 21Е, результаты эксперимента, проиллюстрированные на чертежах, указывают достижение FRC-устойчивости или установившегося состояния, обусловленного посредством пучков нейтральных частиц под углом, т.е. глобальные плазменные параметры, такие как радиус плазмы, плотность плазмы, температура плазмы, а также магнитный поток, являются устойчивыми на постоянных уровнях без затухания в корреляции с длительностью NB-импульса. Например, такие плазменные параметры по существу поддерживаются постоянными в течение  $\sim 5+$  мс. Такая производительность плазмы, включающая в себя признак устойчивости, имеет сильно коррелирующуюся длительность NB-импульса, причем диамагнетизм сохраняется даже несколько миллисекунд после NB-завершения вследствие накопленных быстрых ионов. Как проиллюстрировано, производительность плазмы ограничивается только посредством ограничений по длине импульса, возникающих в результате конечных накопленных энергий в ассоциированных источниках мощности множества критических систем, таких как NB-инжекторы, а также другие системные компоненты.

*Подстраиваемые энергии пучка для пучков нейтральных частиц*

[00124] Как отмечено выше относительно фиг. 3A, 3B, 3C, 3D, 3E, 3F и 8, пучки 600 нейтральных атомов развертываются в FRC-системе 10 для того, чтобы предоставлять нагрев и возбуждение током, а также развивать давление быстрых частиц. Отдельные линии движения пучка, содержащие инжекторные системы 600 пучка нейтральных атомов, расположены вокруг центральной удерживающей камеры 100 и, как показано на фиг. 3C, 3D, 3E и 3F, располагаются под углом, чтобы инжектировать нейтральные частицы к средней плоскости удерживающей камеры 100.

[00125] Чтобы дополнительно повышать FRC-устойчивость и демонстрировать линейное FRC-нарастание до высоких температур плазмы и повышенных системных энергий, примерная FRC-система 10 включает в себя инжекторную систему 600 пучка нейтральных частиц (NBI) с повышенной мощностью и увеличенной длиной импульса, например, только в примерных целях, с мощностью приблизительно в 20+ МВт при длине импульса вплоть до 30 мс. NBI-система 600 включает в себя множество инжекторов 615 на основе положительных ионов (см. фиг. 3D, 3E и 3F), обладающих гибкой модульной конструкцией, с поднабором NBI-инжекторов 615, например, с четырьмя (4) из восьми (8) NBI-инжекторов 615, имеющих возможность подстраивать энергию пучка во время выдачи дозы от начальной более низкой энергии пучка до повышенной энергии пучка, например, приблизительно от 15 кэВ приблизительно до 40 кэВ при постоянном неизменяющемся токе пучка. Эта возможность NBI-инжекторов 615 требуется для того, чтобы достигать более эффективного нагрева и результирующего создания повышенного давления в ядре 450 плазмы. В частности, эта возможность обеспечивает очень желательное повышение производительности на рабочем уровне с пиковой энергией по сравнению с низким энергетическим уровнем: например, (i) более высокая мощность нагрева на коэффициент вплоть до 2х; (ii) почти 5-кратное уменьшение потерь на обмен зарядами; и (iii) максимум двойная эффективность нагрева. Помимо этого, непрерывно переменная энергия пучка, сформированная посредством NBI-инжекторов 615, обеспечивает оптимальное согласование орбитальных параметров инжектированных и затем уловленных быстрых ионов относительно мгновенных профилей магнитного давления во время процесса линейного нарастания. В завершение, высокие темпы нарастания, обеспечивающие длительность линейного нарастания в 0,1-10 мс, вместе с быстрой (порядка 1 мс или менее) подстраиваемостью энергии и мощности пучка NBI-инжекторов 615 предоставляют дополнительные эффективные "ручки управления", т.е. управляемые признаки, для придания формы плазме и управления удержанием плазмы с активной обратной связью через модуляцию энергии и мощности пучка.

[00126] Достаточная мощность нагрева требуется для того, чтобы предоставлять нагрев и создание повышенного давления FRC-плазмы 450, как для устойчивости, так и для линейного нарастания до высоких температур плазмы и повышенных системных энергий. При условии достаточно низких частот потерь, темп линейного нарастания главным образом представляет собой функцию от того, сколько мощности может

выделяться в FRC-ядре 450 посредством NBI-инжекторов 615 в любой момент времени. Более высокая основная мощность пучка нейтральных частиц через порт для инъекции в силу этого всегда является желательной.

[00127] Кроме того, эффективный темп нагрева вследствие NBI-инжекторов 615 представляет собой сложное взаимодействие между характеристиками инжектированного пучка и тогдашними постоянными мгновенными профилями температур всех сортов, плотностями электронов и ионов, концентрацией нейтральных частиц, а также магнитным полем через FRC-ядро 450. Из них, профили магнитного поля преднамеренно изменяются на временных шкалах в доли миллисекунд в ходе линейного нарастания посредством системы управления, тогда как связанные с кинетическим давлением профили эволюционируют через внутренние изменения, производные от произвольно организуемых процессов и турбулентности в плазме, а также от энергии, выделяемой посредством процесса инъекции. Подстраиваемость пучков предоставляет средство для того, чтобы наиболее оптимально адаптироваться к этим варьирующимся условиям.

[00128] Например, поперечное сечение обмена зарядами, т.е. вероятность захвата электронов посредством быстрого иона, чтобы образовывать нейтральный атом, представляет собой строгую функцию от энергии пучка. Для диапазона в 15-40 кэВ, основной темп обмена зарядами резко снижается в качестве функции от энергии пучка. Следовательно, при любом данном уровне поля, сохранение энергии в плазме является наибольшим при инъекции частиц при наибольшей энергии, совместимой для такого уровня поля (в числе прочего, это требует, чтобы энергия инжектированных частиц приводила к радиусу орбиты уловленных ионов, который вписывается внутрь внутренней стенки удерживающей системы).

[00129] Другой пример эффектов профиля на полную эффективность нагрева имеет отношение к тому, когда мощность выделяется. Более высокая энергия пучка типично должна приводить к относительно более высокому энерговыделению в FRC-периферии по сравнению с ядром. Повышение магнитного поля, но поддержание энергии пучка неизменной, должно приводить к более плотным орбитам уловленных ионов и соразмерно более сильному связыванию за счет мощности с плазмой FRC-ядра. Эти факты также затем оказывают сильное влияние на сохранение энергии, например, периферийно выделяемая энергия гораздо проще транспортируется из системы вдоль структуры незамкнутой силовой линии поля, в то время как выделяемая мощность ядра теряется сравнительно более медленно вследствие меньших времен транспортировки в поперечном поле. Таким образом, требуется тесная координация нарастания магнитного поля и соответствующих увеличений энергии пучка.

[00130] Система 600 формирования пучка конструируется с возможностью быстрого нарастания напряжения в диапазоне 0,1-10 мс. Это предоставляет потенциал для того, чтобы увеличивать температуры ионов и электронов на коэффициенты в 2 и 10, соответственно, и достигать означенного на временных шкалах, меньших типичных макроскопических времен роста нестабильности. Следовательно, стабильность плазмы

фундаментально увеличивается, как и рабочая надежность и воспроизводимость.

[00131] Переменные времена повышения напряжения в 0,05-1 мс предоставляют достаточно малые времена отклика, так что пучки могут использоваться в качестве части системы с активной обратной связью. Таким образом, модуляция пучка может использоваться для того, чтобы управлять макро- и микростабильностью. Например, при моментальном сдвиге радиального профиля выделения мощности посредством изменения энергии пучка (и сдвига за счет этого радиального рисунка энерговыделения), можно затрагивать градиенты давления, которые могут уравнивать начало нестабильных плазменных мод. FRC-система 10, показанная на фиг. 3D и 3E, использует эту возможность вместе с быстрой магнитной обратной связью для того, чтобы управлять внутренним наклоном, темпами вращения, развитием дрейфовых волн и другими рабочими сценариями.

[00132] Фиг. 25 иллюстрирует иллюстрацию NBI-инжектора 615 примерной FRC-системы 10. NBI-инжектор 615 показывается, в примерном варианте осуществления, как включающий в себя: возбудитель 650 дуги; плазменный ящик 651; ионно-оптическую систему 652, содержащую триодную или тетродную группировку вытягивающих и ускоряющих сеток; прицельный карданный подвес 653; нейтрализатор 654, содержащий дуговые испарители 655, такие как, например, дуговые Ti-испарители, крионасос 656, имеющий поверхностные структуры, такие как, например, ребристые поверхностные структуры, выполненные с возможностью увеличенной крионакачки, и отклоняющий магнит 656 для удаления ненейтрализованных ионов; и коллимирующую апертуру 658, включающую в себя вставляемый калориметр 659 для прерывистой характеристики, диагностики и перекалибровки пучка.

[00133] Более конкретно и ссылаясь на фиг. 26, реализация подстраиваемой системы формирования пучка, как показано, предпочтительно основана на триодной ионно-оптической системе (= IOS) 660. Идея заключается в ускоряюще-замедляющей схеме. Как проиллюстрировано на чертеже 26, первая сетка G1 задается равной напряжению V1, в то время как вторая сетка G2 задается равной напряжению V2, и конечная сетка G3 задается равной напряжению V3. Вытягиваемые ионы сначала ускоряются до энергии  $E1=e*(V1-V2)$  при прохождении через промежуток между G1 и G2 ( $e$  здесь означает электрический заряд иона). Они затем замедляются в промежутке между G2 и G3 таким образом, что  $E2=E1+e*(V2-V3)$ . Напряжения типично регулируются таким образом, что  $V1>V2<V3$ . На основе соответствующих отдельных источников PS1, PS2, PS3 мощности, напряжения на сетке могут инкрементно регулироваться во время импульса, с тем чтобы изменять вывод эмитированных ионов 662. Например, чтобы начинать импульс пучка атомов водорода, рабочие напряжения могут регулироваться до  $V1=15$  кВ,  $V2=-25$  кВ и  $V3=0$  В. Ионы начального пучка затем должны ускоряться сначала до 40 кэВ и затем появляться из IOS с энергией в 15 кэВ. Позднее в импульсе, источники мощности могут переключаться для того, чтобы предоставлять  $V1=40$  кВ,  $V2=-1$  кВ,  $V3=0$  В. Замедление пучка во втором промежутке в таком случае на практике должно

отсутствовать, давая в результате выходную энергию пучка приблизительно в 40 кэВ. Источники мощности могут отдельно управляться и предоставляют соответствующую модуляцию напряжением. Ионы начального пучка вытаскиваются из множества стандартных дуговых или плазменных RF-источников (PS). После появления из IOS 660, ионы 662 пучка проходят по нейтрализатору 664, в котором быстрые ионы преобразуются в нейтральные ионы через обмен зарядами электронов вне холодного нейтрального газа, присутствующего в нейтрализаторе 664. Надлежащая крионакачка предотвращает истекание нейтрального газа из нижерасположенного диафрагменного отверстия нейтрализатора 664. На конце нейтрализатора, также предусмотрен надлежащий отклоняющий магнит 666, который предоставляет удаление ненейтрализованных быстрых ионов 663, и ассоциированный поглотитель 668 ионов для того, чтобы поглощать быстрые ионы и их энергию. Появляющийся атомный пучок 670 затем проходит через соответствующую апертуру 6720 для того, чтобы уменьшать расходимость пучка и предоставлять хорошо коллимированный поток нейтральных атомов к ядру реактора.

[00134] В альтернативной версии, IOS основана на тетродной конструкции. В этом случае, IOS состоит из четырех сеток, которые имеют идентичный ускоряюще-замедляющий принцип, как пояснено для триодного случая. Специалисты в данной области техники должны легко признавать подобие между системными компонентами и принципами работы. Введение четвертой сетки предоставляет дополнительные возможности подстройки и большую общую гибкость в работе.

[00135] Примерные варианты осуществления, предусмотренные в данном документе, описываются в заявке на патент (США) номер 11195627, причем эта заявка содержится в данном документе по ссылке.

#### *Управление стабильностью и осевой позицией плазмы*

[00136] Традиционные решения для FRC-нестабильностей типично предоставляют стабильность в осевом направлении за счет неустойчивости в радиальном направлении либо стабильность в радиальном направлении за счет аксиальной неустойчивости, но не стабильность в обоих направлениях одновременно. В первом приближении, равновесие, при котором позиция плазмы является поперечно или радиально стабильной, имеет требуемое свойство осесимметричности, за счет аксиальной неустойчивости. В связи с вышеизложенным, варианты осуществления, предусмотренные в данном документе, направлены на системы и способы, которые способствуют стабильности FRC-плазмы в радиальном и осевом направлениях и управлению осевой позицией FRC-плазмы вдоль оси симметрии удерживающей камеры для FRC-плазмы независимо от свойств осевой стабильности равновесия FRC-плазмы. Тем не менее, неустойчивость осевой позиции активно управляется с использованием набора внешних осесимметричных катушек, которые управляют осевой позицией FRC-плазмы. Системы и способы предоставляют управление с обратной связью осевой позицией FRC-плазмы независимо от свойств стабильности плазменного равновесия посредством действия с напряжениями, прикладываемыми к набору внешних катушек, концентрических с плазмой, и с

использованием технологии нелинейного управления.

[00137] Варианты осуществления, представленные в данном документе, используют аксиально нестабильные равновесия FRC для того, чтобы принудительно активировать радиальную стабильность при стабилизации или управлении осевой нестабильностью. Таким образом, может получаться стабильность в осевом и радиальном направлениях. Технология управления проектируется с возможностью изменять внешнее или равновесное магнитное поле для того, чтобы задавать FRC-плазму радиально или поперечно стабильной за счет осевой нестабильности, и затем действовать на ток в радиальной полевой катушке для того, чтобы быстро восстанавливать позицию FRC-плазмы к средней плоскости при минимизации перерегулирования и/или колебаний вокруг средней плоскости удерживающей камеры. Преимущество этого решения состоит в том, что оно уменьшает сложность актуаторов, требуемых для управления. По сравнению с традиционными решениями с несколькими степенями свободы, технология варианта осуществления, представленного в данном документе, уменьшает сложность до проблемы управления вдоль оси вращения FRC-плазмы, имеющей одну степень свободы.

[00138] Комбинация форм сигналов в токах в катушках, в заправке топливом и в мощности пучка нейтральных частиц, которые в результате приводят к аксиально нестабильной плазме, задает сценарий управления удержанием плазмы, который переводит плазму в аксиально нестабильную ситуацию. Сценарий может предварительно программироваться с использованием априорных знаний моделирования или экспериментов либо управляться с обратной связью таким образом, чтобы поддерживать равновесие, которое является аксиально нестабильным. Позиция плазмы должна управляться во время разрядов независимо от свойств стабильности равновесия, например, схема управления должна работать для аксиально стабильных или аксиально нестабильных плазм, вплоть до предела. Наиболее аксиально нестабильная плазма, которая может управляться, имеет время роста, сравнимое со временем снятия оболочки сосуда.

[00139] Обращаясь теперь к системам и способам, которые способствуют стабильности FRC-плазмы в радиальном и осевом направлениях и управлению осевой позицией FRC-плазмы вдоль оси симметрии удерживающей камеры для FRC-плазмы, фиг. 27 показывает упрощенную схему, чтобы иллюстрировать примерный вариант осуществления механизма 510 управления осевой позицией. Вращающаяся FRC-плазма 520, показанная в удерживающей камере 100, имеет ток 522 плазмы и направление 524 осевого смещения. Равновесное поле (не показано) формируется в камере 100 посредством симметричных компонентов тока, таких как, например, катушки 412 квазипостоянного тока (см. фиг. 2, 3A, 3D и 3E). Равновесное поле не формирует чистую силу в направлении 524 осевого смещения, но может подстраиваться таким образом, чтобы формировать поперечно/радиально или аксиально стабильную плазму. Для целей варианта осуществления, представленного в данном документе, равновесное поле подстраивается, чтобы формировать поперечно/радиально стабильную FRC-плазму 520.

Как отмечено выше, это приводит к осевой нестабильности и в силу этого к осевому смещению FRC-плазмы 520 в направлении 524 осевого смещения. По мере того, как FRC-плазма 520 перемещается аксиально, она индуцирует токи 514 и 516, которые являются антисимметричными, т.е. во встречных направлениях в стенках удерживающей камеры 100 на каждой стороне средней плоскости удерживающей камеры 100. FRC-плазма 520 индуцирует этот тип компонентов тока как в сосуде, так и во внешних катушках. Эти антисимметричные компоненты 514 и 516 тока формируют радиальное поле, которое взаимодействует с тороидальным током 522 плазмы для того, чтобы формировать силу, которая противодействует перемещению FRC-плазмы 520, и результат этой силы заключается в том, что она замедляет осевые смещения плазмы. Эти токи 514 и 516 постепенно рассеиваются со временем вследствие удельного сопротивления удерживающей камеры 100.

[00140] Радиальные полевые катушки 530 и 531, расположенные около удерживающей камеры 100 на каждой стороне средней плоскости, предоставляют дополнительные радиальные компоненты поля, которые обусловлены токами 532 и 534, индуцированными во встречных направлениях в катушках 530 и 531. Радиальные полевые катушки 530 и 531 могут содержать набор осесимметричных катушек, которые могут позиционироваться внутренне или внешне по отношению к герметизирующему сосуду 100. Радиальные катушки 530 и 531 показаны как позиционированные внешне по отношению к герметизирующему сосуду 100, аналогично катушкам 412 квазипостоянного тока (см., фиг. 2, 3А, 3D и 3Е). Каждая из катушек 530 и 531 или наборов катушек может переносить ток, отличный от тока катушек на противоположной стороне средней плоскости, но токи являются антисимметричными относительно средней плоскости герметизирующего сосуда 100 и формируют структуру магнитного поля с  $B_z \neq 0$ ,  $B_r = 0$  вдоль средней плоскости. Радиальные полевые катушки 530 и 531 создают дополнительный радиальный компонент поля, который взаимодействует с тороидальным током 522 плазмы для того, чтобы формировать осевую силу. Осевая сила в свою очередь перемещает плазму обратно к средней плоскости удерживающей камеры 100.

[00141] Управляющий механизм 510 включает в себя систему управления, выполненную с возможностью действовать на ток в радиальной полевой катушке, чтобы быстро восстанавливать позицию плазмы к средней плоскости при минимизации перерегулирования и/или колебаний вокруг средней плоскости машины. Система управления включает в себя процессор, функционально соединенный с радиальными полевыми катушками 530 и 531, катушки 412 квазипостоянного тока, их соответствующие источники мощности и другие компоненты, такие как, например, магнитные датчики, предоставляющие измерения позиции плазмы, скорости плазмы и тока в активной катушке. Процессор может быть выполнен с возможностью выполнять вычисления и анализ, описанные в настоящей заявке, и может включать в себя или функционально соединяться с одним или более запоминающих устройств, включающих в себя энергонезависимый машиночитаемый носитель. Он может включать в себя процессорную

или микропроцессорную систему, включающую в себя системы с использованием микроконтроллеров, компьютеров с сокращенным набором команд (RISC), специализированных интегральных схем (ASIC), логических схем и любую другую схему или процессор, допускающий выполнение функций, описанных в данном документе. Вышеуказанное представляет собой только примеры и в силу этого не имеет намерение каким-либо образом ограничивать определение и/или значение термина "процессор" или "компьютер".

[00142] Функции процессора могут реализовываться с использованием программных процедур, аппаратных компонентов либо комбинаций вышеозначенного. Аппаратные компоненты могут реализовываться с использованием множества технологий, включающих в себя, например, интегральные схемы или дискретные электронные компоненты. Процессор типично включает в себя считываемое/записываемое запоминающее устройство и типично также включает в себя аппаратные средства и/или программное обеспечение, чтобы записывать в и/или считывать из запоминающего устройства.

[00143] Процессор может включать в себя вычислительное устройство, устройство ввода, модуль отображения и интерфейс, например, для осуществления доступа в Интернет. Компьютер или процессор может включать в себя микропроцессор. Микропроцессор может соединяться с шиной связи. Компьютер или процессор также может включать в себя запоминающее устройство. Запоминающее устройство может включать в себя оперативное запоминающее устройство (RAM) и постоянное запоминающее устройство (ROM). Компьютер или процессор также может включать в себя устройство хранения данных, которое может представлять собой жесткий диск или съемный накопитель хранения данных, к примеру, накопитель на гибких дисках, накопитель на оптических дисках и т.п. Устройство хранения данных также может представлять собой другое аналогичное средство для загрузки компьютерных программ или других инструкций в компьютер или процессор.

[00144] Процессор выполняет набор инструкций, которые сохраняются в одном или более элементов хранения данных, чтобы обрабатывать входные данные. Элементы хранения данных также могут сохранять данные или другую информацию требуемым образом. Элемент хранения данных может иметь форму источника информации либо физического запоминающего элемента в машине для обработки.

[00145] Проблема управления позицией аксиально стабильной или нестабильной FRC-конфигурации с использованием актуаторов радиальных полевых катушек решается с использованием ветви теории нелинейного управления, известной как управление в скользящем режиме. Линейная функция состояний системы (скользящая поверхность) выступает в качестве сигнала ошибки с требуемым асимптотически стабильным (скользящим) поведением. Скользящая поверхность конструируется с использованием теории Ляпунова, чтобы демонстрировать асимптотическую стабильность в широком диапазоне динамических FRC-параметров. Предложенная схема управления затем может

использоваться для аксиально стабильных и нестабильных плазм без необходимости перенастраивать параметры, используемые в скользящей поверхности. Это свойство является преимущественным, поскольку, как упомянуто выше, равновесие, возможно, должно переходить между аксиально стабильными и аксиально нестабильными равновесиями в различных фазах FRC-разряда.

[00146] Конфигурация схемы 500 управления показана на фиг. 28. Фильтр нижних частот ограничивает частоты переключения в требуемой управляющей полосе пропускания. Цифровой контур управления, требующий дискретизации и передачи сигналов с задержкой в одну выборку, допускается. Сигнал ошибки (скользящая поверхность) представляет собой линейную комбинацию тока в катушке, позиции плазмы и скорости плазмы. Позиция плазмы и скорость плазмы получают из внешних магнитных измерений. Токи в системах активных катушек могут измеряться посредством стандартных способов.

[00147] Токи в катушках и позиция плазмы требуются для того, чтобы реализовывать управление позицией. Скорость плазмы требуется для того, чтобы повышать производительность, но является необязательной. Нелинейная функция этого сигнала ошибки (закон релейного управления) формирует дискретные уровни напряжения для каждой пары источников мощности, соединенных с симметричными в средней плоскости катушками. Симметричные в средней плоскости катушки питаются релейным напряжением с идентичной интенсивностью, но с противоположным знаком. Это создает радиальный компонент поля, чтобы восстанавливать позицию плазмы к средней плоскости.

[00148] Чтобы продемонстрировать выполнимость схемы управления, жесткая плазменная модель используется для того, чтобы имитировать динамику плазмы. Модель использует геометрию магнитов. Распределение тока плазмы соответствует аксиально нестабильным равновесиям со временем роста в 2 мс, когда рассматриваются только плазма и сосуд. Источники мощности предположительно работают с дискретными уровнями напряжения, типично с шагами в 800 В.

[00149] Фиг. 29 показывает несколько моделирований управления удержанием плазмы, которые подчеркивают взаимосвязь между прикладываемыми напряжениями к катушкам и временами успокоения позиции плазмы, вместе с требуемым пиковым током в катушке и темпами нарастания, чтобы возвращать в среднюю плоскость плазму, которая смещается аксиально на 20 см. Эти примеры моделирования управления осевой позицией в скользящем режиме выполняются при 0,3 Тл с использованием четырех пар внешних обрезанных катушек. Четыре случая показаны согласно источникам мощности с дискретными уровнями напряжения с шагами в 200 В (заштрихованный квадрат), 400 В (заштрихованный кружок), 800 В (заштрихованный треугольник) и 1600 В (незаштрихованный квадрат). Для всех четырех случаев, управляющая полоса пропускания составляет 16 кГц, и частота дискретизации составляет 32 кГц. Показаны позиция плазмы (верхний чертеж), ток в крайней внешней паре катушек (средний) и темп

нарастания тока в катушке (нижний). Смещение плазмы может становиться нестабильным до тех пор, пока оно не достигает 20 см. В этой точке, применяется управление с обратной связью.

[00150] Результаты моделирования указывают то, что:

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

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

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

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

[00151] Пиковые токи для всех обрезанных катушек для третьего случая, изученного выше (случая темпа нарастания в 2 МА/с), также показаны на фиг. 30 в качестве функции от позиции обрезанной катушки. Примеры моделирования управления осевой позицией в скользящем режиме выполняются при 0,3 Тл с использованием четырех пар внешних обрезанных катушек с использованием источника мощности с тремя уровнями (+800 В, 0, -800 В), управляющей полосой пропускания в 16 кГц и частотой дискретизации в 32 кГц. Для того, чтобы возвращать плазму в среднюю плоскость в течение 1,3 мс, темп линейного нарастания тока в катушке в 2 МА/с требуется. Пиковый ток, требуемый во всей паре катушек, меньше 1,5 кА. Фактическая требуемая частота переключения (приблизительно 2 кГц) значительно ниже полосы пропускания системы управления.

[00152] Система управления также может реализовываться как целевая поверхность, которая представляет собой функцию только от тока в катушке и скорости плазмы, без позиции плазмы. В этом случае, контур управления осевой позицией предоставляет только стабилизацию осевой динамики, но не управление. Это означает то, что плазма находится в метастабильной ситуации и может медленно дрейфовать вдоль своей оси. Управление позицией затем предоставляется с использованием дополнительного контура обратной связи, который управляет плазменными промежутками между сепаратриссой плазмы и сосудом, в силу чего он выполняет управление формой и позицией плазмы одновременно.

[00153] Другое устройство удержания плазмы, в котором используются аналогичные системы управления, представляет собой токамак. Чтобы поддерживать удержание плазмы, ток плазмы в токамаке должен поддерживаться между нижним и верхним пределом, которые являются приблизительно пропорциональными плотности

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

#### *He-FRTP-образование*

[00154] Обратимся теперь к системам и способам, которые упрощают не-FRTP-образование с возбуждением пучка нейтральных частиц FRC-плазмы. Фиг. 31 иллюстрирует магнитную топологию и контур плотности удерживающей FRC-системы 10, показанной на фиг. 3D и 3E, в то время как фиг. 32 иллюстрирует магнитную топологию и контур плотности удерживающей FRC-системы 10, показанной на фиг. 3F. Технология FRC-образования, поясненная выше относительно удерживающих FRC-систем 10, показанных на фиг. 2 и 3A-3E, представляет собой технологию FRC-тета-пинч-образования с обращенным полем (FRTP) с использованием системы 210 подачи импульсной мощности, описанной относительно фиг. 4-6. Технология FRC-образования, представленная здесь в нижеприведенном пояснении, использует граничное смещение из северного и южного внешних диверторов 300 на фиг. 3D, 3E и 31 и северного и южного диверторов 302 на фиг. 3F и 32 и инжекцию пучка нейтральных частиц из инжекторов 600 пучка нейтральных частиц, чтобы образовывать FRC-плазму 450 без использования системы 210 подачи импульсной мощности. Перед обращением к технологии FRC-образования с возбуждением пучка, поясняются подсистемы, предоставляющие такую технологию FRC-образования.

[00155] Как пояснено выше, система граничного смещения включает в себя концентрические электроды 910, позиционированные в диверторах 300 и 302, и пушку 350 плазмы, позиционированную в концевых диверторах 300 на фиг. 31 и в диверторах 302 на фиг. 32. Как показано на фиг. 33, концентрические электроды 910 включает в себя пять (5)

концентрических электродов E0, E1, E2, E3 и E4. Все 5 концентрических электродов E0-E4 и плазменная пушка 350 электрически развязываются друг от друга и отдельно управляются посредством источников мощности. Различные конфигурации граничного смещения могут использоваться для того, чтобы получать обоснованную FRC-производительность (включающую в себя начальное линейное нарастание плазмы, включающее в себя формирование зеркальной плазмы и переход в FRC-плазму). Конфигурация смещения, в которой электроды E0 и E1 подвергаются отрицательному смещению, тогда как электрод E3 заземляется (при этом остальные электроды являются плавающими), как показано на фиг. 34, формирует входящее радиальное электрическое поле ( $-E_r$ ), которое распространяется вдоль незамкнутых силовых линий поля в удерживающий сосуд 100 и формирует азимутальный плазменный поток вокруг FRC-сепаратриссы 451 вследствие  $E_r \times B_z$ . Поскольку направление этого азимутального потока (диамагнитное направление электронов) противостоит вращению FRC (диамагнитному направлению ионов), граничное смещение стабилизирует глобальный FRC-режим, к примеру, нестабильность вращения в  $n=2$ . Также очевидно, что эффективное граничное смещение помогает ионизировать нейтральные частицы и нагревать плазмы.

[00156] FRC-система 10, показанная на фиг. 3F, включает в себя восемь (8) инжекторов нейтральных частиц, которые позиционируются около удерживающего сосуда 100 (как показано на фиг. 3E) и используются для плазменного нагрева, возбуждения током и частичной дозаправки частиц топливом. Параметры системы 600 инъекции пучка нейтральных частиц для экспериментов, поясненных ниже, включают в себя: 1) все восемь (8) пучков нейтральных частиц имеют фиксированную энергию на уровне 15 кэВ и инжектируют полную мощность  $\sim 13$  МВт в целевую FRC-плазму; 2) четыре (4) из восьми (8) пучков нейтральных частиц имеют возможность подстраивать энергию пучка от 15 кэВ до 40 кэВ во время выдачи дозы, в силу чего полная мощность инъекции может варьироваться от  $\sim 13$  МВт вплоть до  $\sim 20$  МВт. Пучки нейтральных частиц имеют наклонный угол инъекции в диапазоне  $65^\circ$ - $75^\circ$  (в настоящее время фиксированно равный  $70^\circ$ ) относительно продольной оси машины со средним параметром ударного воздействия инъекции пучка нейтральных частиц в  $\sim 19$  см, чтобы обеспечивать достаточное соединение между инжектированными пучками нейтральных частиц и целевой FRC-плазмой 450. Пучки 600 нейтральных частиц типично заправляются топливом с помощью газообразного водорода для инъекции прямого тока в FRC-плазму 450, но иногда дейтериевый газ (например, бутылка с D2-легированным газообразным водородом; смесь из 20% D2 и 80% H2) также используется для диагностических целей, а также для исследований в области физики. Пучки 600 нейтральных частиц предоставляют энергетические частицы с крупным размером орбиты, пересекающим внутреннюю и наружную область FRC-сепаратриссы, которые стабилизируют глобальные магнетогидродинамические (MHD) режимы. Пучки 600 нейтральных частиц также предоставляют высокие значения популяции быстрых ионов и давления в ядре, за счет этого формируя усовершенствованную FRC-плазму с возбуждением пучка. Линейное

нарастание магнитного поля в удерживающем сосуде 100 в фазе 2 должно согласуется за счет увеличенной энергии пучка таким образом, что оно совпадает с орбитами. Дополнительно, зарядово-обменные потери уменьшаются при более высоких энергиях частиц, и полная мощность инжекции пучка нейтральных частиц, давления быстрых ионов и плазмы также увеличиваются посредством нарастания пучка нейтральных частиц.

[00157] Газовые клапаны, такие как пьезоэлектрический газ, соединяются с портами 112 для заправки газовым топливом, расположенными в различных секциях, таких как удерживающая зеркальная секция, показанная на фиг. 11, и формирующая газовая инжекционная трубка, показанная на фиг. 34. Эти пьезоклапаны могут управлять инжекцией/расходом газа и длительностью. Номинальная заправка газовым топливом из пьезоклапанов всего составляет в диапазоне  $0,5-1,5 \times 10^{21}$  атомов в 30 миллисекунд.

[00158] Для удерживающей FRC-системы 10, показанной на фиг. 3D, 3E и 31, FRC-плазмы сформированы с и без традиционной технологии FRTP-образования на основе импульсной мощности. До пояснения технологии FRC-образования со сформированным пучком, поясняется технология FRTP FRC-образования. В процессе FRTP FRC-образования, магнитное поле прикладывается во всей удерживающей FRC-системе 10, показанной на фиг. 3D, 3E и 31, с использованием магнитов 400. Дейтериевый газ затем напускается или инжектируется в северную и южную формирующие секции 200 (например, общее количество инжектированных частиц составляет  $\sim 5 \times 10^{19}$ ). Далее, вращающееся магнитное поле (RMF) прикладывается в формирующих секциях 200 для того, чтобы предварительно ионизировать дейтериевый газ. С использованием формирующих катушечных подвесок, магнитное поле с отрицательным напряжением смещения прикладывается (в противоположном направлении относительно внешнего магнитного поля, т.е.  $-B_z$ ), например, в четверть периода/колебания  $\sim 100$  мкс, формируя  $B_z$  в  $\sim 1$  кг. Сильное основное обращенное магнитное поле (с направлением, идентичным направлению внешнего поля, т.е.  $+B_z$ ) затем прикладывается с использованием формирующих катушечных подвесок (например, со временем нарастания в  $\sim 4$  мкс, формируя  $B_z$  в  $\sim 3-4$  кг), чтобы образовывать и перемещать в пространстве FRC-плазмод, при этом формирующие подвески снабжаются питанием последовательно, начиная с внешней области к внутренней стороне формирующей секции, что называется "динамическим FRC-образованием". Две (2) противоположно направленных FRC-плазмы затем сталкиваются в средней плоскости удерживающего сосуда 100 и сливаются в одну FRC-плазму. После того как одна FRC-плазма формируется, системы прямого граничного смещения (плазменные пушки и концентрические электроды) применяются для того, чтобы стабилизировать FRC-плазму, и пучки нейтральных частиц инжектируются в целевую FRC для того, чтобы возбуждать ток и обеспечивать устойчивость FRC-топологии вместе с инжектированными быстрыми ионами в усовершенствованном FRC-состоянии с возбуждением пучка.

[00159] В процессе FRC-образования с формированием пучка, магнитное поле прикладывается во всей удерживающей FRC-системе 10, показанной на фиг. 3D, 3E, 3F,

31 и 32, с использованием магнитов 400. Дейтериевый газ затем инжектируется в удерживающий сосуд 100 посредством пьезоклапанов, расположенных в формирующих секциях и в удерживающей зеркальной секции (общее количество инжектированных частиц для 30 мс составляет  $\sim 0,5-1,5 \times 10^{21}$  атомов; т.е. расход составляет приблизительно  $\sim 2-5 \times 10^{19}$  атомов/мс). Системы прямого граничного смещения, включающие в себя плазменные пушки 350 и концентрические электроды 910, применяются как из северного и южного внешних диверторов 300, показанных на фиг. 31, так и из северного и южного диверторов 302, показанных на фиг. 32, для того чтобы ионизировать газ и первоначально образовывать "зеркальную" плазму. Пучки нейтральных частиц затем инжектируются в зеркальную плазму из инжекторов 615 пучка нейтральных частиц, чтобы заполнять зеркальную плазму быстрыми ионами, с тем чтобы первоначально формировать зеркальную плазму "с высоким числом бета". По мере того, как пучки нейтральных частиц продолжают инжектироваться, зеркальная плазма переходит в плазму, имеющую FRC-состояние, посредством обращения магнитного поля около геометрической оси вследствие возбуждения током пучка нейтральных частиц. Давление плазмы затем линейно нарастает за счет быстрых ионов (со временем нарастания в  $\sim 5-10$  мс), инжектированных посредством инжекторов 615 пучка нейтральных частиц, и плазма поддерживается в FRC-состоянии при условии, что пучки нейтральных частиц, граничное смещение, пополнение газа и внешнее магнитное поле поддерживаются. Время жизни FRC-плазмы со сформированным пучком в данный момент ограничивается посредством длительности импульса пучка нейтральных частиц (например, в данный момент вплоть до  $\sim 30-35$  мс).

[00160] Фиг. 35А-35Е показывают выборочные плазменные FRC-параметры для двух (2) экспериментов по FRC-образованию, т.е. для эксперимента по FRTP FRC-образованию и эксперимента по FRC-образованию со сформированным пучком. Обе FRC-плазмы имеют большое время жизни (т.е. вплоть до  $\sim 30$  мс) и имеют высокие температуры. Фиг. 36А-36Е показывают выборочные плазменные FRC-параметры для эксперимента по FRC-образованию со сформированным пучком, который снова показывает FRC-плазму с большим временем жизни (т.е. вплоть до  $\sim 30$  мс) и высокотемпературную FRC-плазму. Фиг. 37А-37D показывают выборочные плазменные FRC-параметры для двух (2) экспериментов по FRC-образованию, т.е. для эксперимента по FRC-образованию со сформированным пучком с использованием удерживающей FRC-системы, показанной на фиг. 3D, 3Е и 31 (т.е. системы, включающей в себя северный и южный внутренний и внешний диверторы и северную и южную формирующие трубки), и для эксперимента по FRC-образованию со сформированным пучком с использованием удерживающей FRC-системы, показанной на фиг. 3F и 32 (т.е. системы, включающей в себя только северный и южный диверторы). Обе FRC-плазмы имеют большое время жизни (т.е. до  $\sim 30-35$  мс) и имеют высокие температуры. Производительность удерживающей FRC-системы, показанной на фиг. 3F и 32, показывает установившуюся плазму, устойчивую в течение 35 мс с усредненной по объему температурой электронов

вплоть до и равной 600 эВ.

[00161] Фиг. 38 иллюстрирует сравнение пиковых температур, т.е. температуры электронов,  $T_e$ , и полной температуры,  $T_{tot}$ , в FRTP FRC и FRC со сформированным пучком. Высокотемпературные эксперименты при различных условиях подачи напряжения смещения на электроды для двух технологий FRC-образования с FRC-экспериментом со сформированным пучком показывают гораздо более высокую температуру электронов,  $T_e$ , и полную температуру,  $T_{tot}$ , по сравнению с FRTP FRC. В общем, обнаружено, что более высокое напряжение электрода (т.е. более высокое  $E_f$ ) формирует более горячие FRC (для электронных и ионных каналов), в частности, в FRC-случае со сформированным пучком (см. необязательные чертежи в конце). Фиг. 38 также показывает пиковую температуру, т.е. полную температуру,  $T_{tot}$ , выше  $\sim 5$  кэВ (либо  $\sim 50\text{M}+$  градусов Цельсия).

[00162] Согласно варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, способ для формирования и поддержания магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC) содержит формирование зеркальной плазмы в удерживающей камере, инжекцию пучков быстрых нейтральных атомов из множества инжекторов пучка нейтральных частиц в зеркальную плазму под углом к средней плоскости удерживающей камеры, чтобы осуществлять переход зеркальной плазмы в FRC-плазму, и поддержание FRC-плазмы равной или примерно равной постоянному значению без затухания посредством инжекции пучков быстрых нейтральных атомов из множества инжекторов пучка нейтральных частиц в FRC-плазму под углом к средней плоскости удерживающей камеры.

[00163] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, способ дополнительно содержит приложение магнитного поля к удерживающей камере и инжекцию газа в удерживающую камеру, чтобы образовывать зеркальную плазму.

[00164] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, способ дополнительно содержит применение систем прямого граничного смещения из первого и второго диверторов, взаимно соединенных с противоположными концами удерживающей камеры.

[00165] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, при этом системы прямого граничного смещения включают в себя плазменную пушку и концентрические электроды.

[00166] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, при этом первая и вторая формирующие секции размещены между удерживающей камерой и первым и вторым диверторами.

[00167] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, при этом второй и третий диверторы размещены между удерживающей камерой и первой и второй формирующими секциями.

[00168] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего

раскрытия сущности, способ дополнительно содержит подстройку энергий пучка для множества пучков нейтральных частиц между первой энергией пучка и второй энергией пучка, причем вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка, или подстройку энергий пучка для множества пучков нейтральных частиц между первой энергией пучка и второй энергией пучка, причем вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка, и при этом вторая энергия пучка выше первой энергии пучка, или подстройку энергий пучка для множества пучков нейтральных частиц между первой энергией пучка и второй энергией пучка, причем вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка, и причем множество пучков нейтральных частиц переключаются между первой и второй энергиями пучка в течение длительности инжекционного импульса.

[00169] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, способ дополнительно содержит формирование магнитного поля в камере, когда катушки квазипостоянного тока протягиваются около камеры.

[00170] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, способ дополнительно содержит направление поверхностей магнитного потока FRC в диверторы, соединенные с концами удерживающей камеры.

[00171] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, способ дополнительно содержит формирование магнитного поля в диверторах, когда катушки квазипостоянного тока протягиваются около формирующих секций и диверторов.

[00172] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, способ дополнительно содержит формирование зеркального магнитного поля в противоположных концах камеры, когда зеркальные катушки квазипостоянного тока протягиваются около противоположных концов камеры.

[00173] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, способ дополнительно содержит формирование одного из дипольного магнитного поля и квадрупольного магнитного поля в камере с седловидными отклоняющими катушками, соединенными с камерой.

[00174] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, способ дополнительно содержит преобразование и согласование внутренних поверхностей камеры и диверторов с системой геттерирования.

[00175] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, система геттерирования включает в себя одну из системы осаждения титана и системы осаждения лития.

[00176] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, способ дополнительно содержит управление радиальным профилем электрического поля в граничном слое FRC-плазмы.

[00177] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, приложение распределения электрического потенциала к группе незамкнутых поверхностей потока FRC с помощью смещающих электродов.

[00178] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, поддержание FRC-плазмы равной или примерно равной постоянному значению без затухания сверх 30 мс.

[00179] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, поддержание температуры электронов FRC-плазмы равной или примерно равной 600 эВ.

[00180] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, достижение полной температуры для FRC-плазмы сверх 4,4 кэВ или 50 миллионов градусов Цельсия.

[00181] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, система для формирования и поддержания магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC) содержит: удерживающую камеру; первый и второй диверторы, соединенные с удерживающей камерой; множество инжекторов пучка нейтральных атомов, соединенных с удерживающей камерой и ориентированных таким образом, чтобы инжектировать пучки нейтральных атомов к средней плоскости удерживающей камеры под углом, меньшим нормального по отношению к продольной оси удерживающей камеры; магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, позиционированных вокруг удерживающей камеры и первого и второго диверторов; первый и второй набор зеркальных катушек квазипостоянного тока, позиционированных между удерживающей камерой и первым и вторым диверторами; систему геттерирования, соединенную с удерживающей камерой и первым и вторым диверторами; один или более смещающих электродов для электрического смещения незамкнутой поверхности потока сформированной FRC-плазмы, причем один или более смещающих электродов позиционируются в одном или более из удерживающей камеры и первого и второго диверторов; и две или более седловидных отклоняющих катушки, соединенных с удерживающей камерой.

[00182] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, система для формирования и поддержания магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC) содержит:

удерживающую камеру; первый и второй диверторы, соединенные с удерживающей камерой; одно или более из множества смещающих электродов и первой и второй зеркальных пробок, при этом один или более смещающих электродов позиционируются в одном или более из удерживающей камеры и первого и второго диверторов, и при этом первая и вторая зеркальные пробки позиционируются между удерживающей камерой и первым и вторым диверторами; систему геттерирования, соединенную с удерживающей камерой и первым и вторым диверторами; множество инжекторов пучка нейтральных атомов, соединенных с удерживающей камерой и ориентированных под углом к средней плоскости удерживающей камеры; и магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, позиционированных вокруг удерживающей камеры и первого и второго диверторов, и первый и второй набор

зеркальных катушек квазипостоянного тока, позиционированных между удерживающей камерой и первым и вторым диверторами, причем система выполнена с возможностью формировать FRC и поддерживать FRC без затухания в то время, когда пучки нейтральных частиц инжектируются в плазму.

[00183] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, множество пучков нейтральных частиц являются регулируемыми между первой энергией пучка и второй энергией пучка, при этом вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка, и при этом энергии пучка для множества пучков нейтральных частиц являются переключаемыми между первой и второй энергиями пучка в течение длительности инжекционного импульса.

[00184] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, смещающие электроды включают в себя одно или более из одного или более точечных электродов, позиционированных в герметизирующей камере с возможностью контактировать с незамкнутыми силовыми линиями поля, набора кольцевых электродов между удерживающей камерой и первым и вторым диверторами и множества концентрических пакетированных электродов, позиционированных в первом и втором диверторах с возможностью заряжать несколько концентрических слоев потока.

[00185] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, система дополнительно содержит первую и вторую диаметрально противоположные формирующие секции тета-пинчей с обращенным полем, размещенные между первым и вторым диверторами и удерживающей камерой.

[00186] Согласно дополнительному варианту осуществления настоящего раскрытия сущности, система дополнительно содержит третий и четвертый диверторы, размещенные между первой и второй диаметрально противоположными формирующими секциями тета-пинчей с обращенным полем и удерживающей камерой.

[00187] Тем не менее, примерные варианты осуществления, предусмотренные в данном документе, служат просто в качестве иллюстративных примеров и никоим образом не являются ограничивающими.

[00188] Все признаки, элементы, компоненты, функции и этапы, описанные относительно любого варианта осуществления, предусмотренного в данном документе, имеют намерение быть свободно комбинируемыми и заменяемыми на признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из любого другого варианта осуществления. Если определенный признак, элемент, компонент, функция или этап описывается относительно только одного варианта осуществления, то следует понимать, что этот признак, элемент, компонент, функция или этап может использоваться со всеми остальными вариантами осуществления, описанными в данном документе, если в явной форме не указано иное. В силу этого, этот параграф служит в качестве базовых сведений и письменного подтверждения для введения пунктов формулы изобретения, в любое время, которые комбинируют функции, элементы, компоненты, функции и этапы из различных вариантов осуществления либо которые заменяют признаки, элементы, компоненты,

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

[00189] Во многих случаях, объекты описываются в данном документе как соединенные с другими объектами. Следует понимать, что термины "связанный" и "соединенный" (либо любая из их форм) используются взаимозаменяемо в данном документе и, в обоих случаях, являются общими для прямой связи двух объектов (вообще без заметных (например, паразитных) промежуточных объектов) и для косвенной связи двух объектов (с одним или более заметных промежуточных объектов). Если объекты показаны как непосредственно связанные между собой либо описываются как связанные между собой без описания промежуточных объектов, следует понимать, что эти объекты также могут косвенно связываться между собой, если контекст явно не предписывает иное.

[00190] Хотя варианты осуществления допускают различные модификации и альтернативные формы, их конкретные примеры показаны на чертежах и подробно описаны в данном документе. Тем не менее, следует понимать, что эти варианты осуществления не должны ограничиваться конкретной раскрытой формой, но наоборот, эти варианты осуществления должны охватывать все модификации, эквиваленты и альтернативы, попадающие в пределы сущности раскрытия сущности. Кроме того, любые признаки, функции, этапы или элементы вариантов осуществления могут излагаться или добавляться в формулу изобретения, как и отрицательные ограничения, которые задают изобретаемый объем формулы изобретения посредством признаков, функций, этапов или элементов, которые не находятся в пределах этого объема.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ для формирования и поддержания магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC), содержащий этапы, на которых:

- формируют зеркальную плазму в удерживающей камере,
- инжeksiруют пучки быстрых нейтральных атомов из множества инжекторов пучка нейтральных частиц в зеркальную плазму под углом к средней плоскости удерживающей камеры, чтобы осуществлять переход зеркальной плазмы в FRC-плазму, и
- поддерживают FRC-плазму равной или примерно равной постоянному значению без затухания посредством инъекции пучков быстрых нейтральных атомов из множества инжекторов пучка нейтральных частиц в FRC-плазму под углом к средней плоскости удерживающей камеры.

2. Способ по п. 1, в котором этап формирования зеркальной плазмы содержит этап, на котором прикладывают магнитное поле к удерживающей камере и инжeksiруют газ в удерживающую камеру.

3. Способ по п. 2, в котором этап формирования зеркальной плазмы дополнительно содержит этап, на котором применяют системы прямого граничного смещения из первого и второго диверторов, взаимно соединенных с противоположными концами удерживающей камеры.

4. Способ по п. 3, в котором системы прямого граничного смещения включают в себя плазменную пушку и концентрические электроды.

5. Способ по пп. 3-4, в котором первая и вторая формирующие секции размещены между удерживающей камерой и первым и вторым диверторами.

6. Способ по п. 5, в котором второй и третий диверторы размещены между удерживающей камерой и первой и второй формирующими секциями.

7. Способ по пп. 1-6, в котором этап инъекции пучков быстрых нейтральных атомов включает в себя одно из этапов, на котором подстраивают энергии пучка множества инжекторов пучка нейтральных частиц между первой энергией пучка и второй энергией пучка, при этом вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка, или этапа, на котором подстраивают энергии пучка множества инжекторов пучка нейтральных частиц между первой энергией пучка и второй энергией пучка, при этом вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка, и при этом вторая энергия пучка выше первой энергии пучка, или этапа, на котором подстраивают энергии пучка множества инжекторов пучка нейтральных частиц между первой энергией пучка и второй энергией пучка, при этом вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка, и при этом множество инжекторов пучка нейтральных частиц переключаются между первой и второй энергиями пучка в течение длительности инъекционного импульса.

8. Способ по пп. 1-7, дополнительно содержащий этап, на котором формируют магнитное поле в камере, когда катушки квазипостоянного тока протягиваются около камеры.

9. Способ по п. 8, дополнительно содержащий этап, на котором направляют

поверхности магнитного потока FRC в диверторы, соединенные с концами удерживающей камеры.

10. Способ по п. 9 дополнительно содержащий этап, на котором формируют магнитное поле в первом и втором диверторах, когда катушки квазипостоянного тока протягиваются около первого и второго диверторов.

11. Способ по п. 10, дополнительно содержащий этап, на котором формируют зеркальное магнитное поле в противоположных концах камеры, когда зеркальные катушки квазипостоянного тока протягиваются около противоположных концов камеры.

12. Способ по пп. 7-11, дополнительно содержащий этап, на котором формируют одно из дипольного магнитного поля и квадрупольного магнитного поля в камере с седловидными отклоняющими катушками, соединенными с камерой.

13. Способ, по пп. 9-12, дополнительно содержащий этап, на котором согласуют внутренние поверхности камеры и диверторы с системой геттерирования.

14. Способ по п. 13, в котором система геттерирования включает в себя одну из системы осаждения титана и системы осаждения лития.

15. Способ, по пп. 1-14 дополнительно содержащий этап, на котором управляют радиальным профилем электрического поля в граничном слое FRC-плазмы.

16. Способ по п. 15, в котором этап управления радиальным профилем электрического поля в граничном слое FRC включает в себя этап, на котором прикладывают распределение электрического потенциала к группе незамкнутых поверхностей потока FRC с помощью смещающих электродов.

17. Способ по пп. 1-16, в котором этап поддержания FRC-плазмы равной или примерно равной постоянному значению без затухания включает в себя этап, на котором поддерживают FRC-плазму равной или примерно равной постоянному значению без затухания сверх 30 мс.

18. Способ по пп. 1-17, в котором этап поддержания FRC-плазмы равной или примерно равной постоянному значению без затухания включает в себя этап, на котором поддерживают температуру электронов FRC-плазмы равной или примерно равной 600 эВ.

19. Способ по пп. 1-18, в котором этап поддержания FRC-плазмы равной или примерно равной постоянному значению без затухания включает в себя этап, на котором достигают полной температуры для FRC-плазмы сверх 4,4 кэВ или 50 миллионов градусов Цельсия.

20. Система для формирования и поддержания магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC), содержащая:

- удерживающую камеру,
- первый и второй диверторы, соединенные с удерживающей камерой,
- множество инжекторов пучка нейтральных атомов, соединенных с удерживающей камерой и ориентированных с возможностью инжектировать пучки нейтральных атомов к средней плоскости удерживающей камеры под углом, меньшим нормального по отношению к продольной оси удерживающей камеры,

- магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, позиционированных вокруг удерживающей камеры и первого и второго диверторов, первый и второй набор зеркальных катушек квазипостоянного тока, позиционированных между удерживающей камерой и первым и вторым диверторами,

- систему геттерирования, соединенную с удерживающей камерой и первым и вторым диверторами,

- один или более смещающих электродов для электрического смещения незамкнутой поверхности потока потока сформированной FRC-плазмы, причем один или более смещающих электродов позиционируются в одном или более из удерживающей камеры и первого и второго диверторов, и

- две или более седловидных отклоняющих катушки, соединенные с удерживающей камерой.

21. Система для формирования и поддержания магнитного поля с обращенной магнитной конфигурацией (FRC), содержащая:

- удерживающую камеру,

- первый и второй диверторы, соединенные с удерживающей камерой,

- одно или более из множества смещающих электродов и первой и второй зеркальных пробок, при этом один или более смещающих электродов позиционируются в одном или более из удерживающей камеры и первого и второго диверторов, и при этом первая и вторая зеркальные пробки позиционируются между удерживающей камерой и первым и вторым диверторами,

- систему геттерирования, соединенную с удерживающей камерой и первым и вторым диверторами,

- множество инжекторов пучка нейтральных атомов, соединенных с удерживающей камерой и ориентированных под углом к средней плоскости удерживающей камеры, и

- магнитную систему, содержащую множество катушек квазипостоянного тока, позиционированных вокруг удерживающей камеры и первого и второго диверторов, первый и второй набор зеркальных катушек квазипостоянного тока, позиционированных между удерживающей камерой и первым и вторым диверторами,

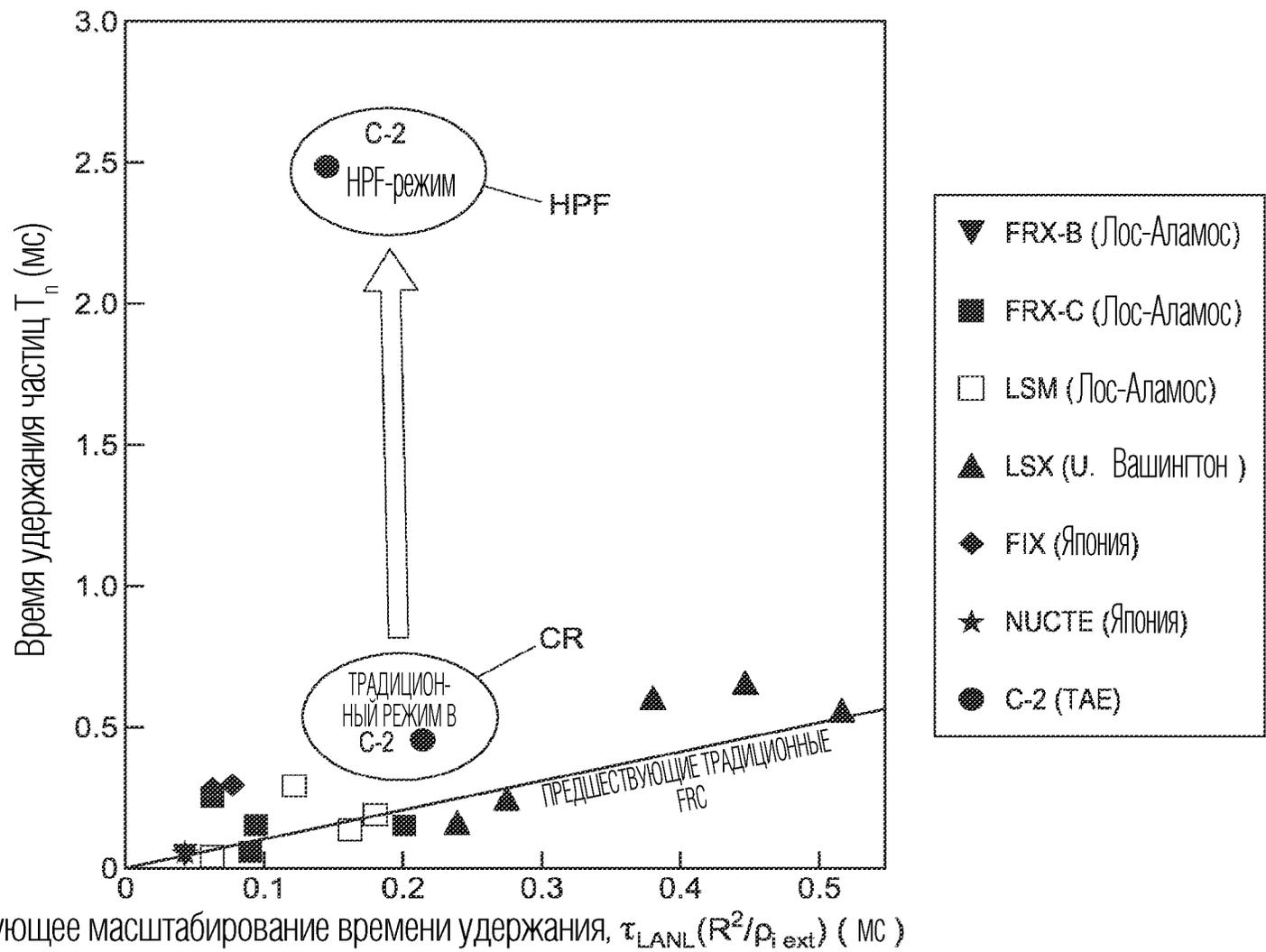
при этом система выполнена с возможностью формировать FRC-плазму и поддерживать FRC-плазму без затухания в то время, когда пучки нейтральных частиц инжектируются в FRC-плазму.

22. Система по п. 21, в которой множество пучков нейтральных частиц являются регулируемыми между первой энергией пучка и второй энергией пучка, при этом вторая энергия пучка отличается от первой энергии пучка, и при этом энергии пучка для множества пучков нейтральных частиц являются переключаемыми между первой и второй энергиями пучка в течение длительности инжекционного импульса.

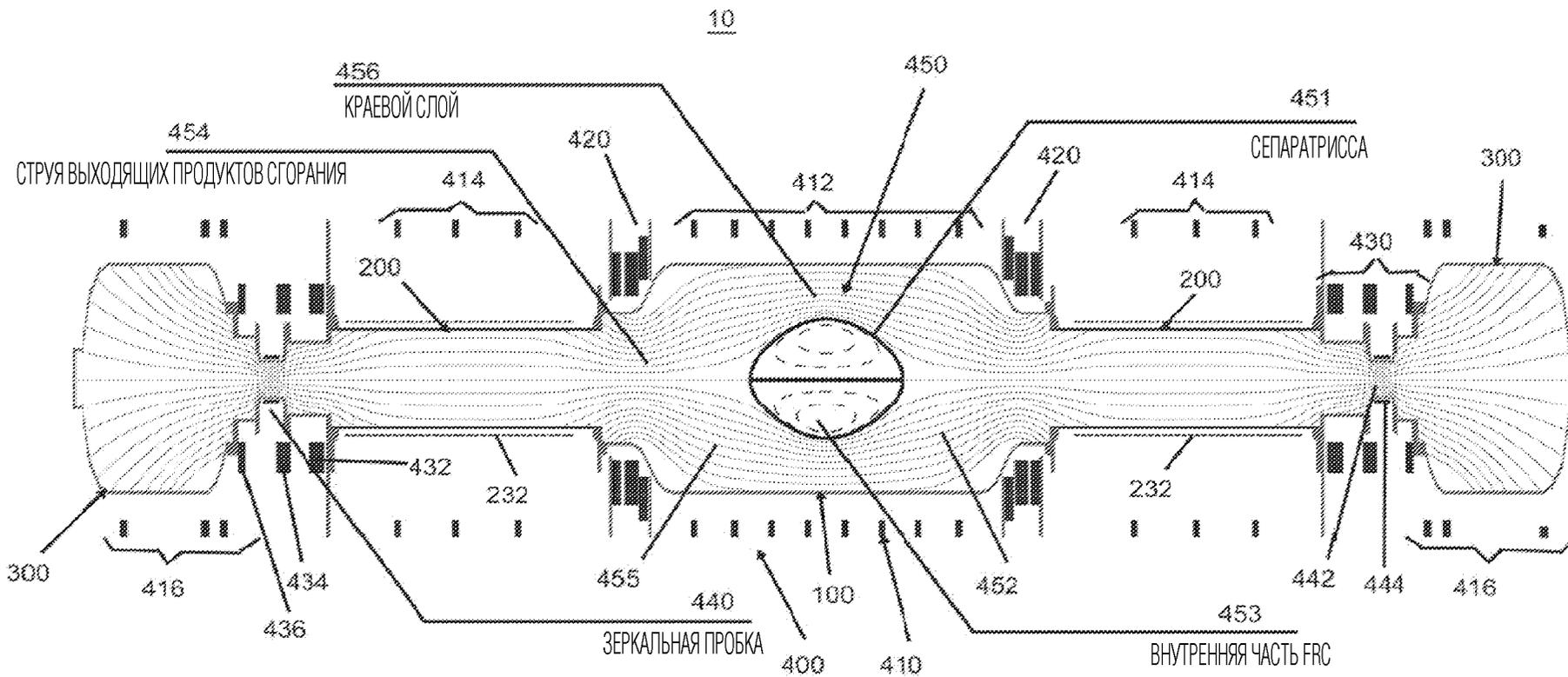
23. Система по пп. 21-22, дополнительно содержащая первую и вторую диаметрально противоположные формирующие секции тета-пинчей с обращенным полем,

размещенные между первым и вторым диверторами и удерживающей камерой.

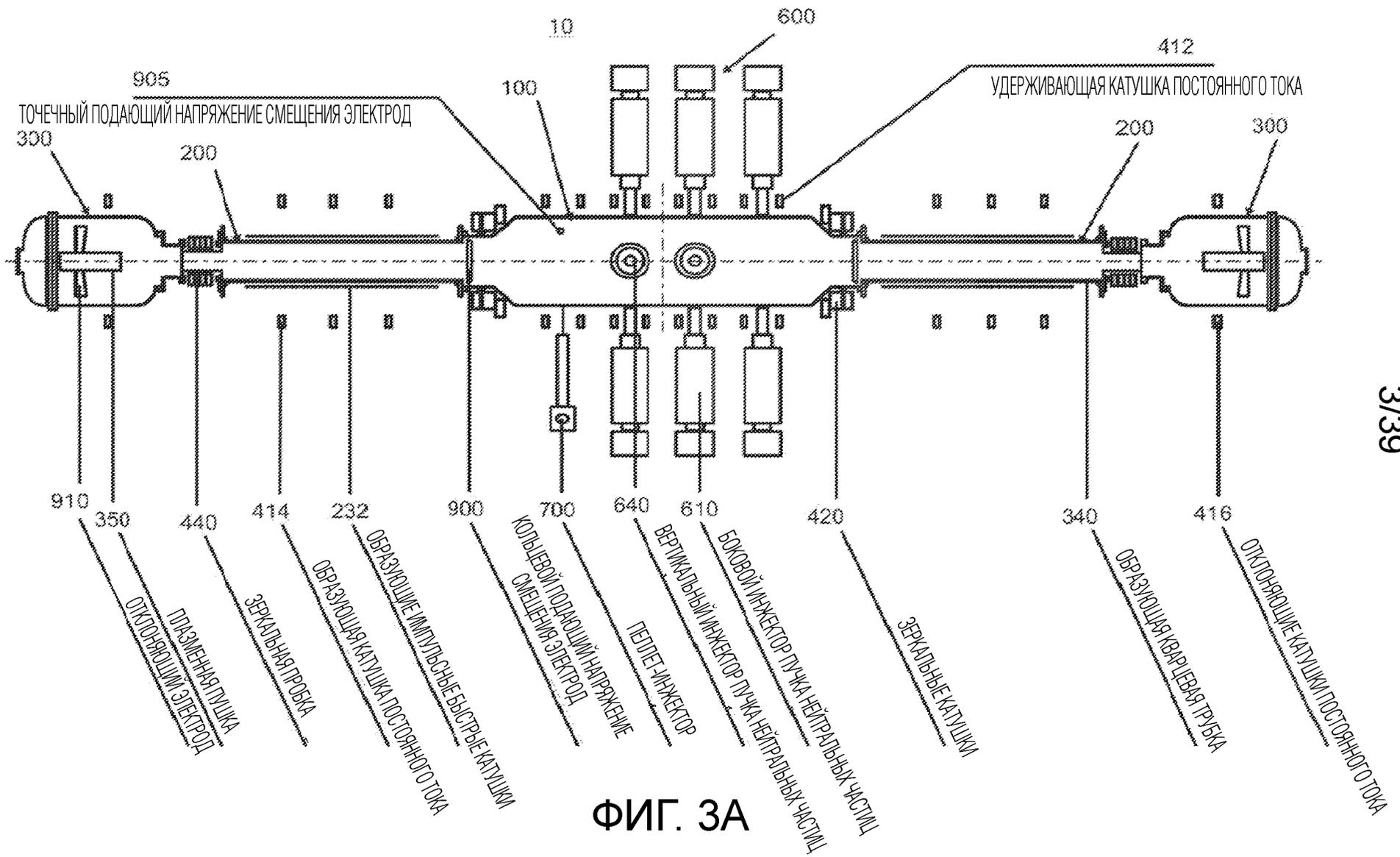
24. Система по п. 23, дополнительно содержащая третий и четвертый диверторы, размещенные между первой и второй диаметрально противоположными формирующими секциями тета-пинчей с обращенным полем и удерживающей камерой.



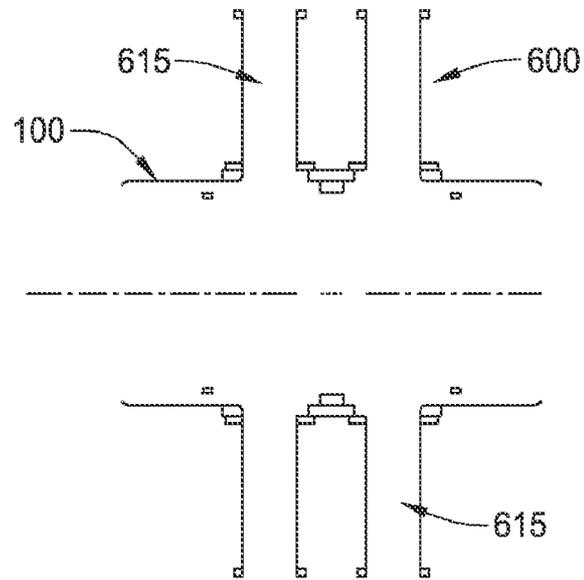
ФИГ. 1



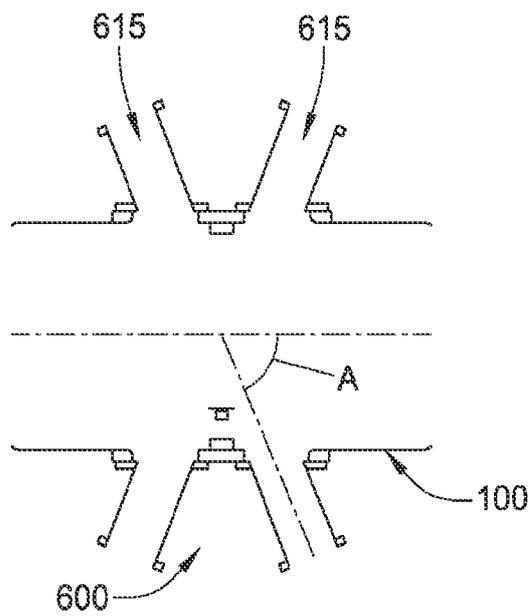
ФИГ. 2



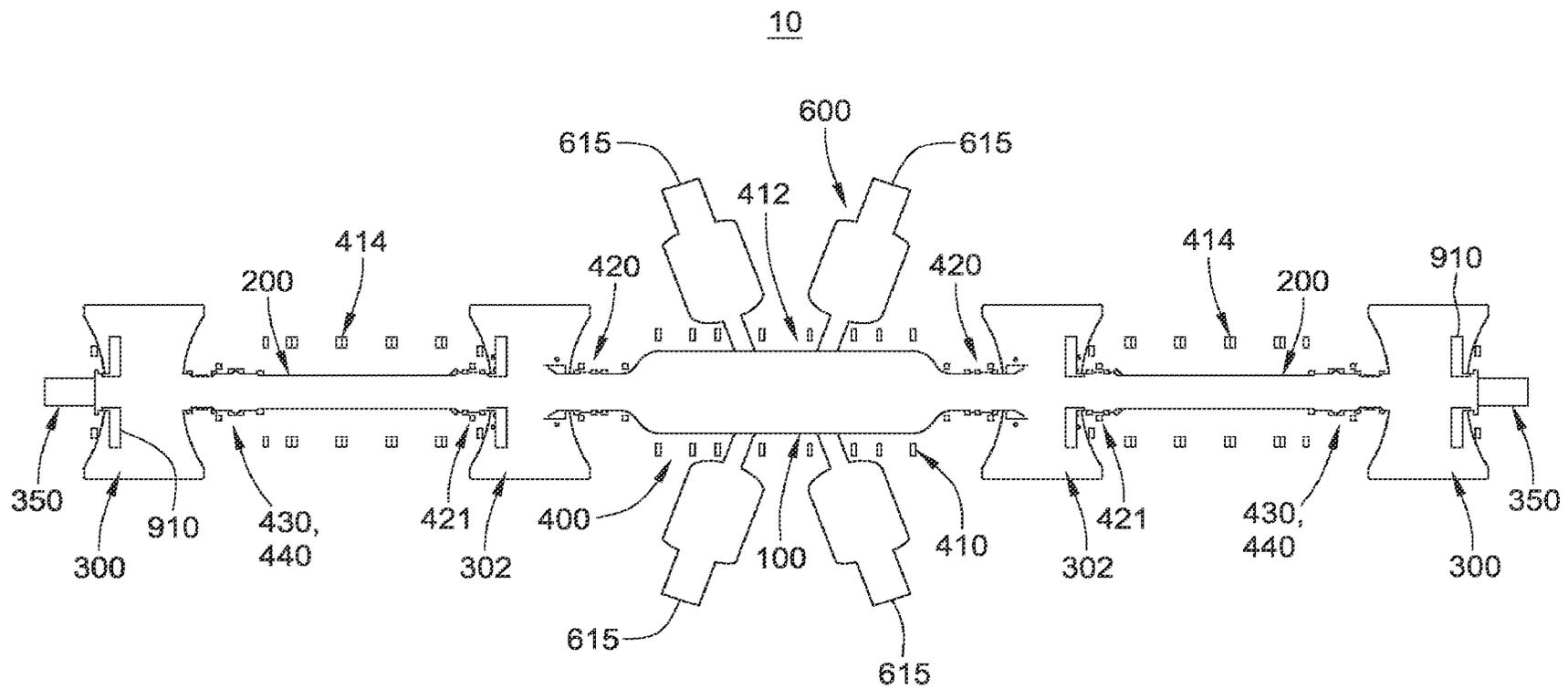
ФИГ. 3А



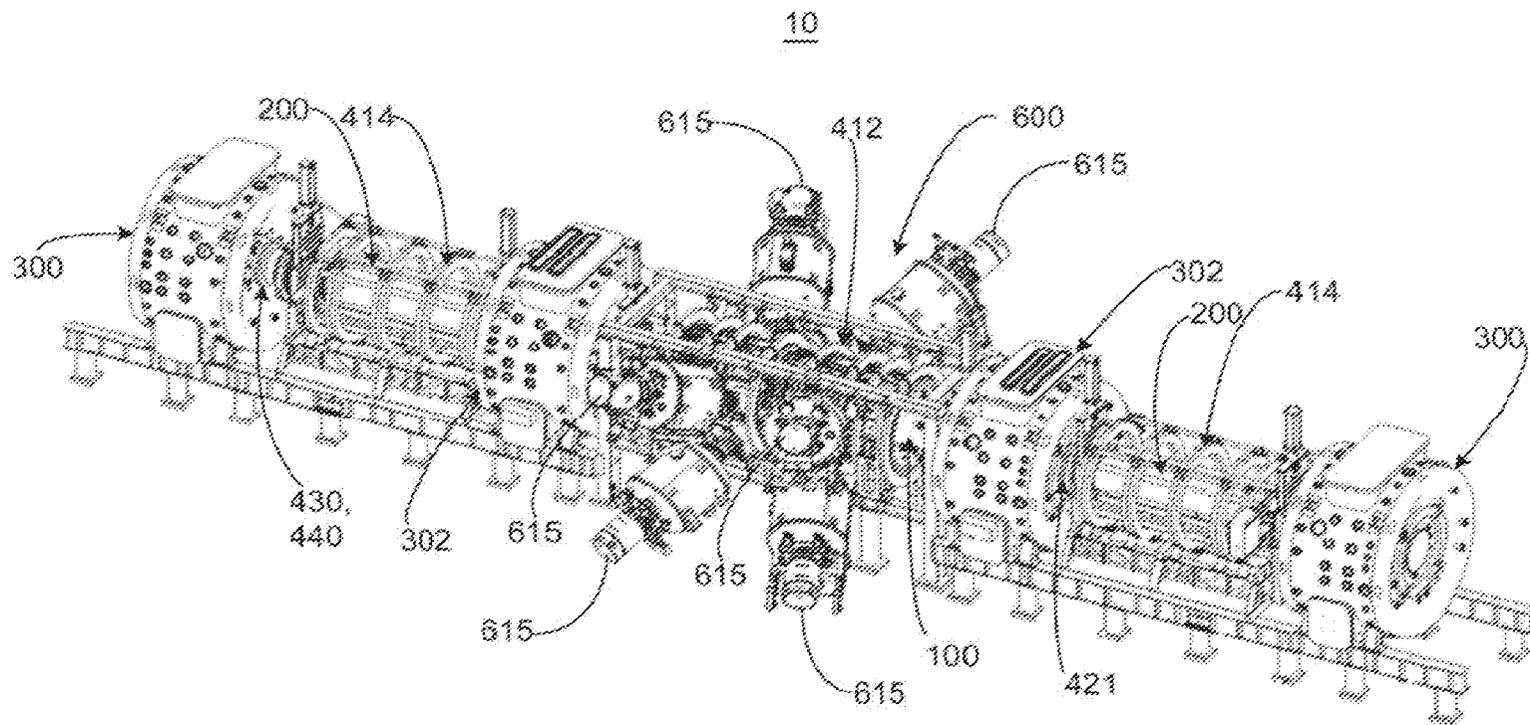
ФИГ. 3В



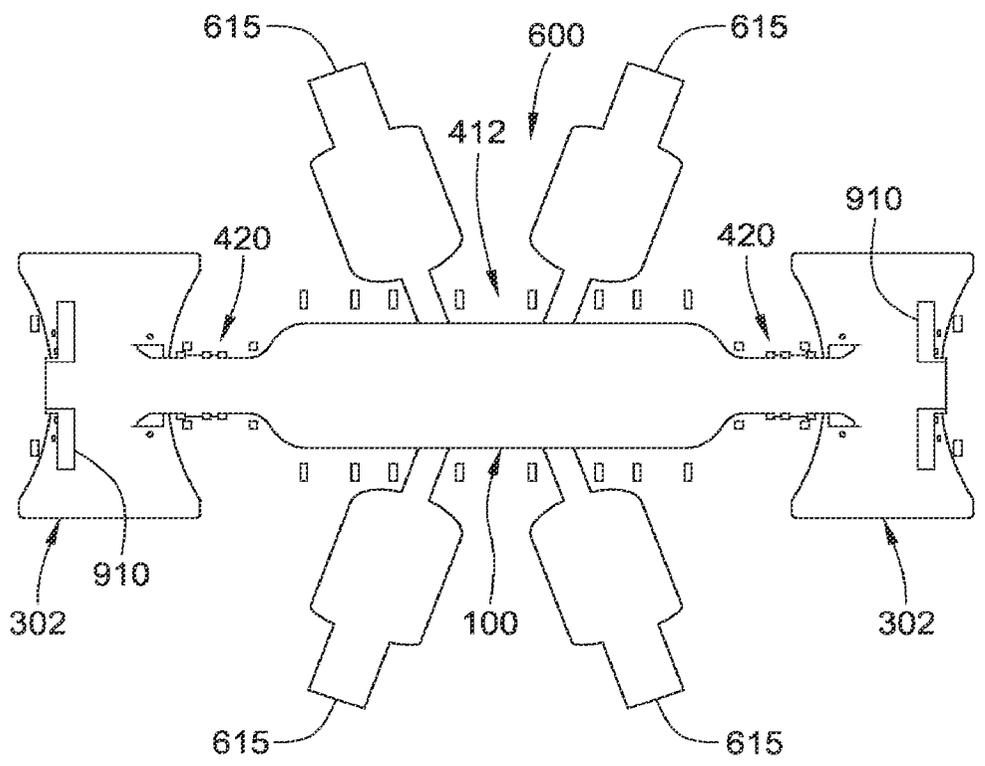
ФИГ. 3С



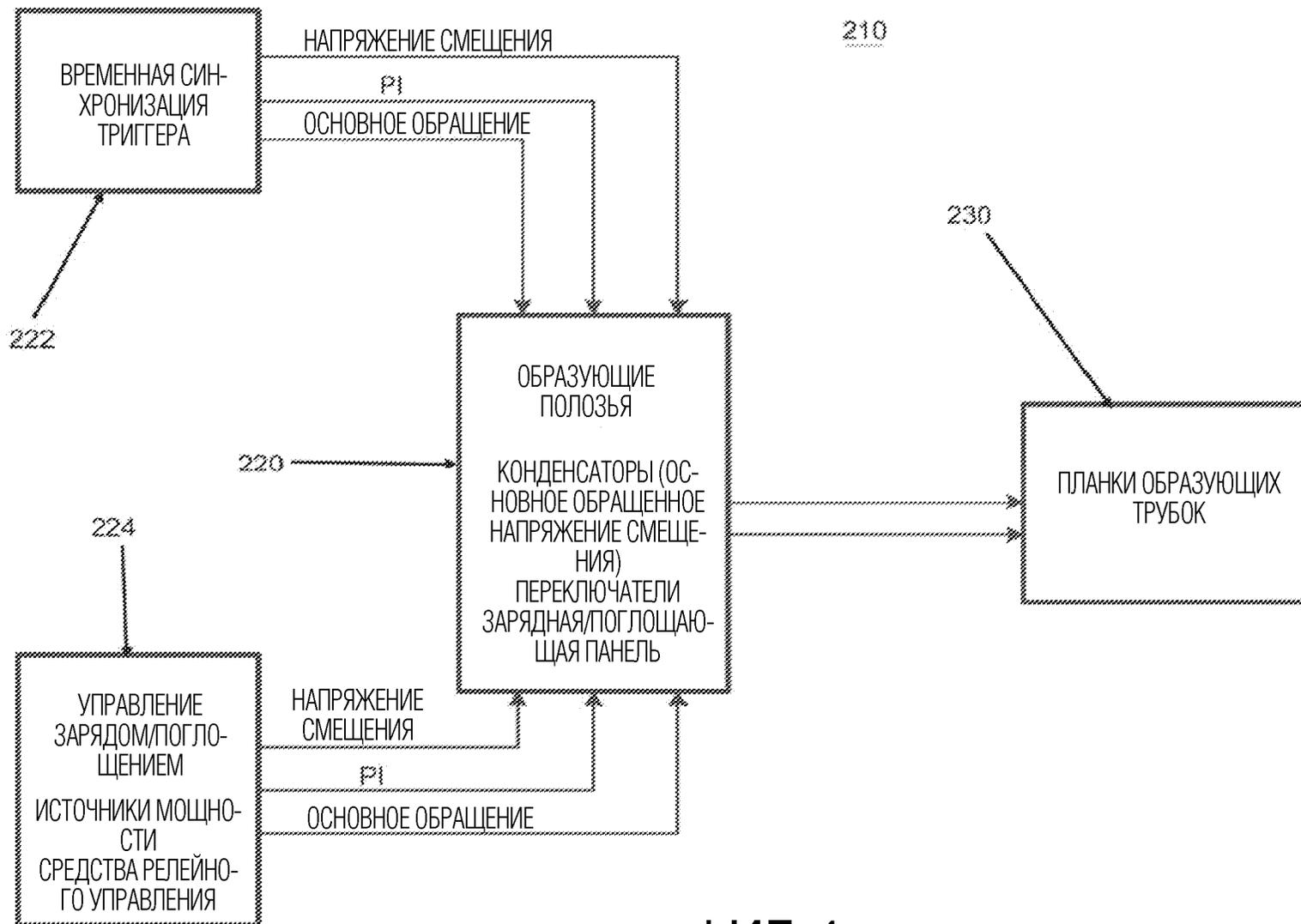
ФИГ. 3D



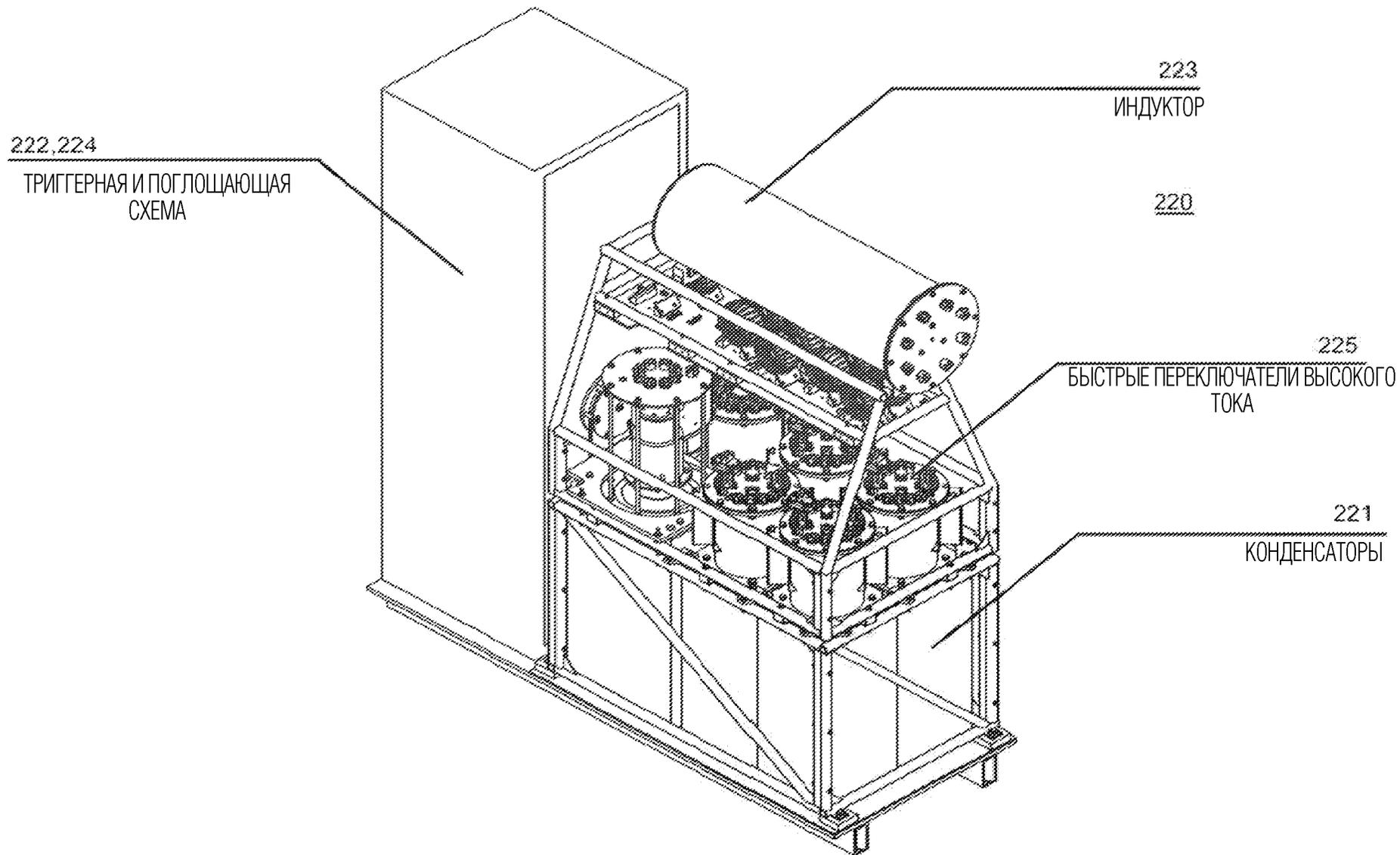
ФИГ. 3Е



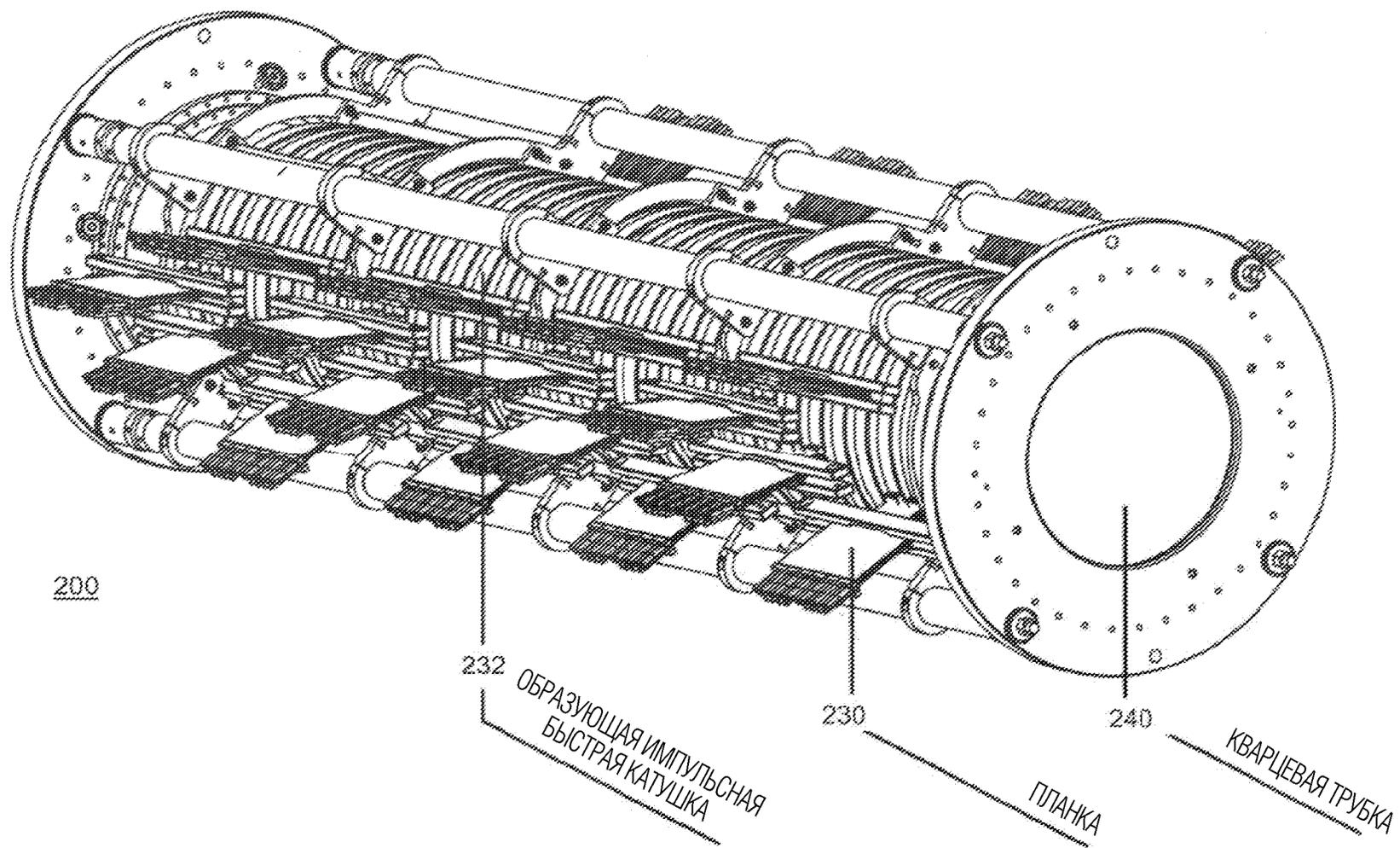
ФИГ. 3F



ФИГ. 4

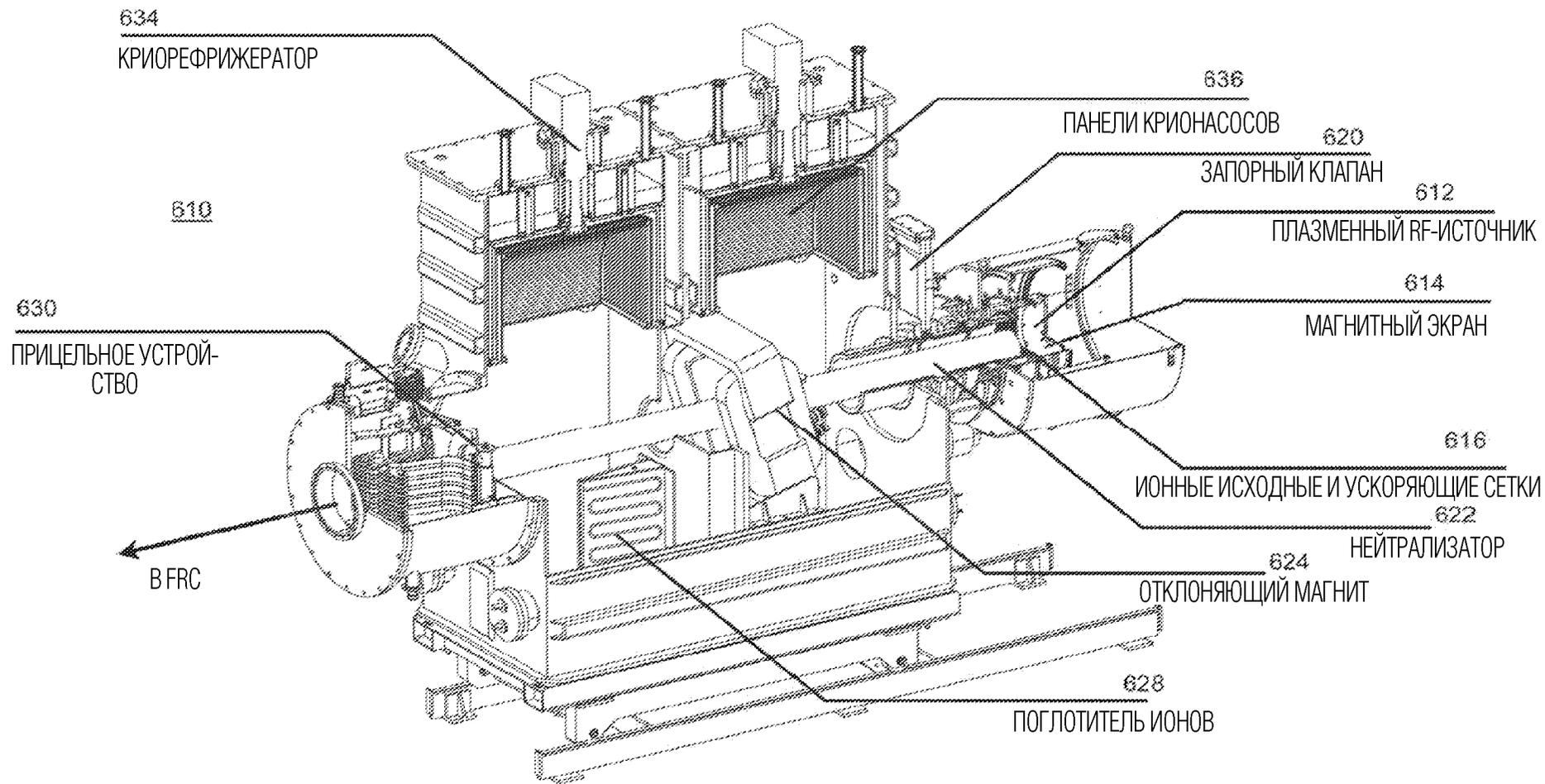


ФИГ. 5

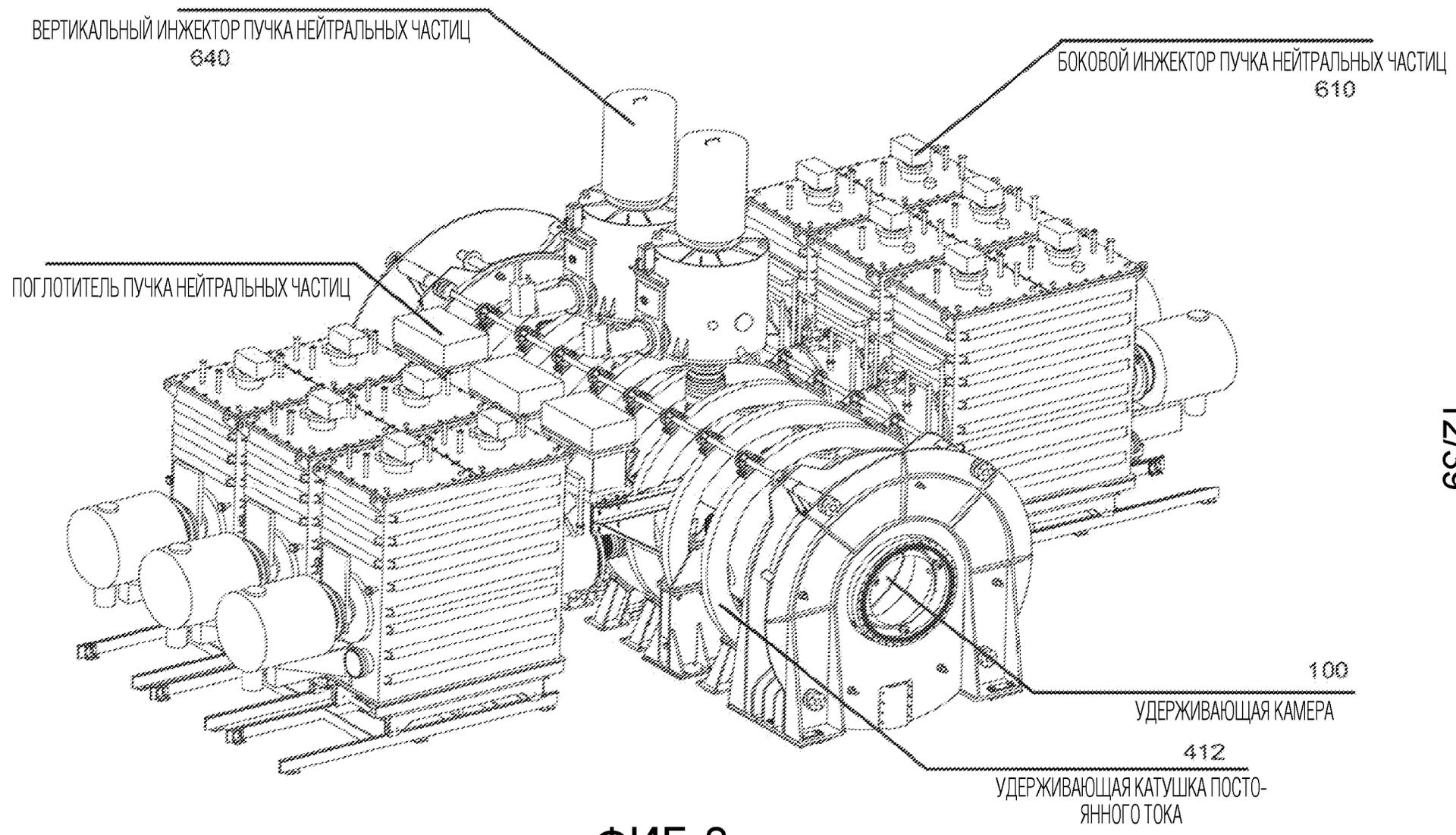


10/39

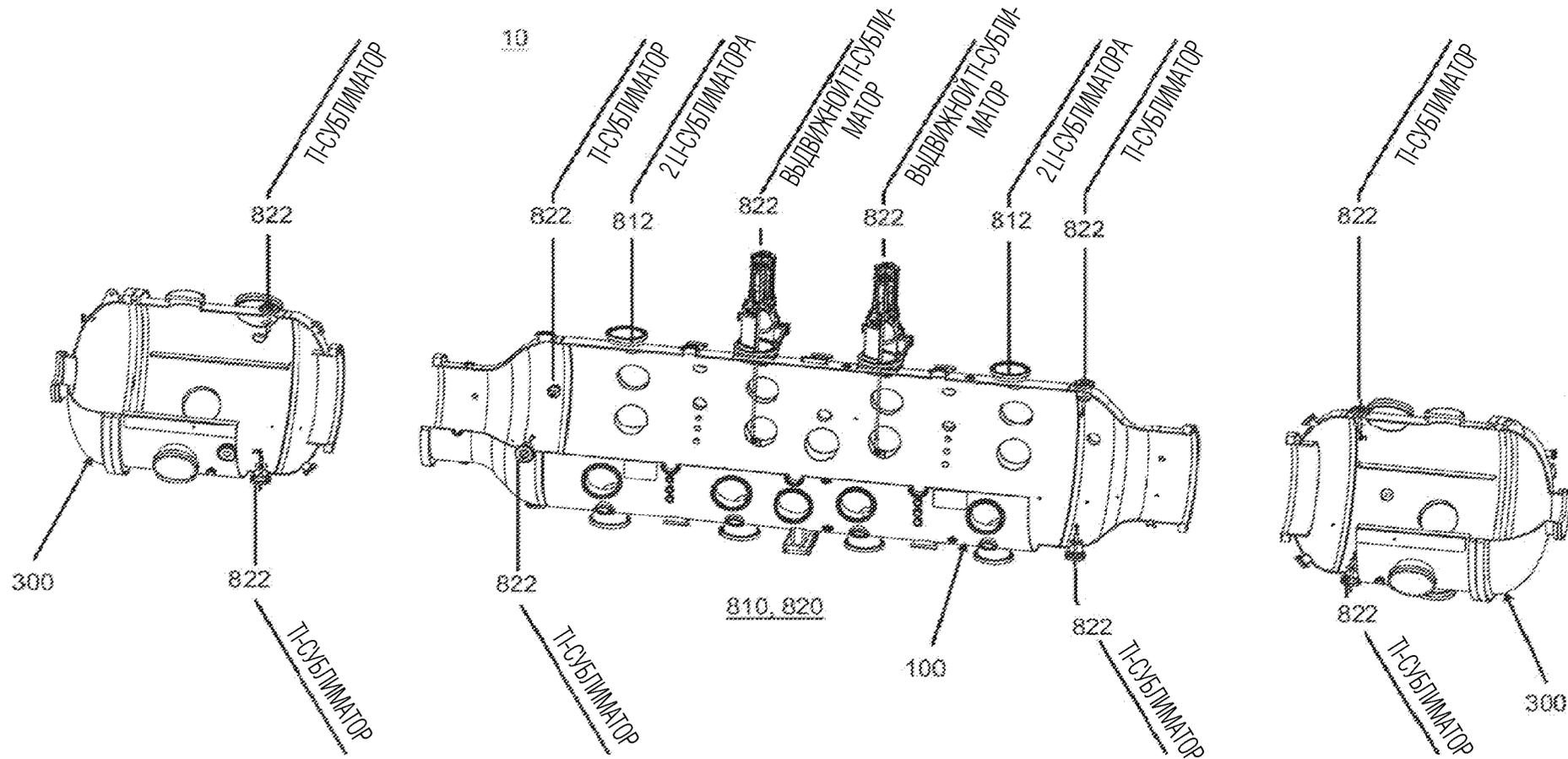
ФИГ. 6



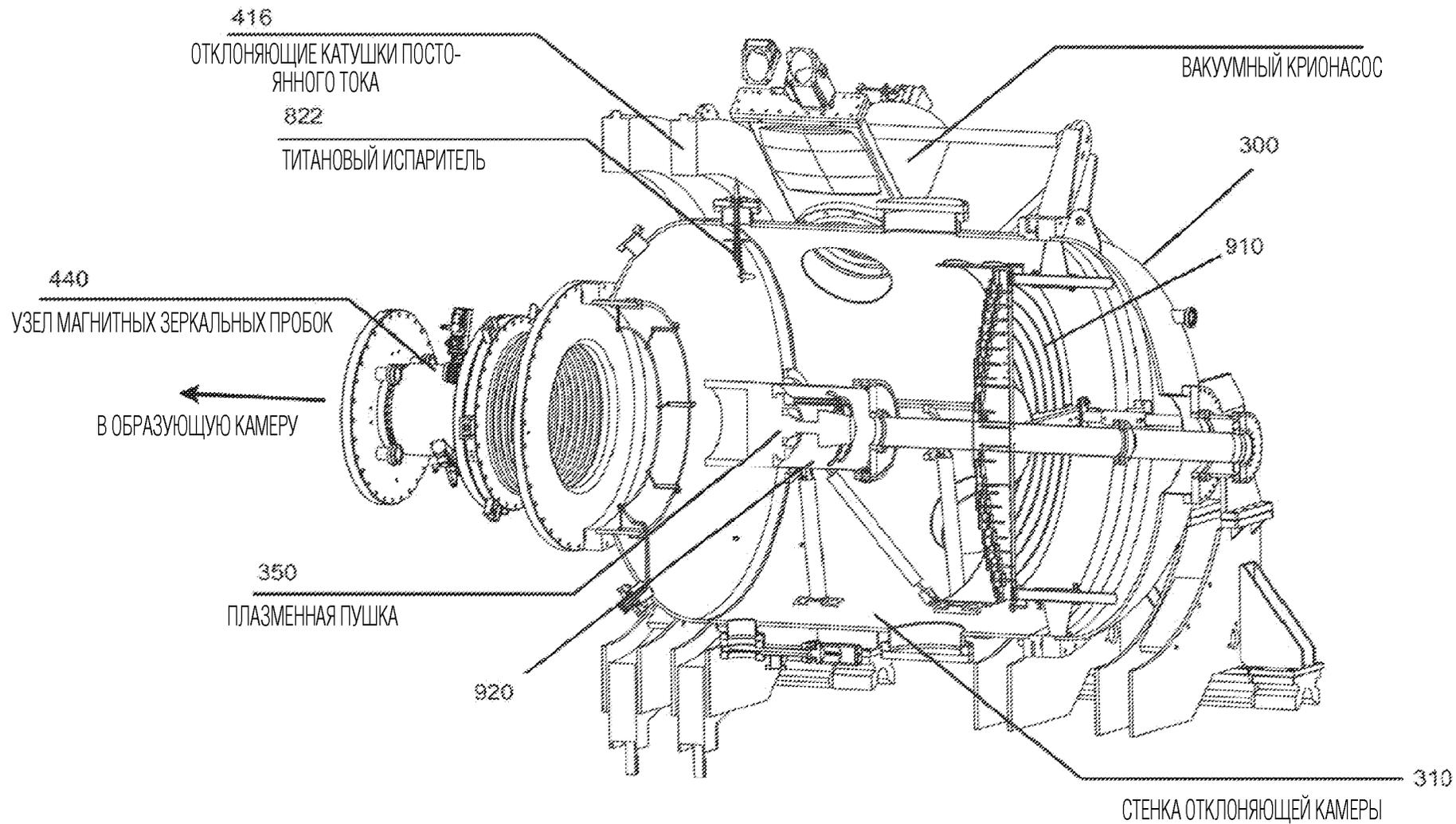
ФИГ. 7



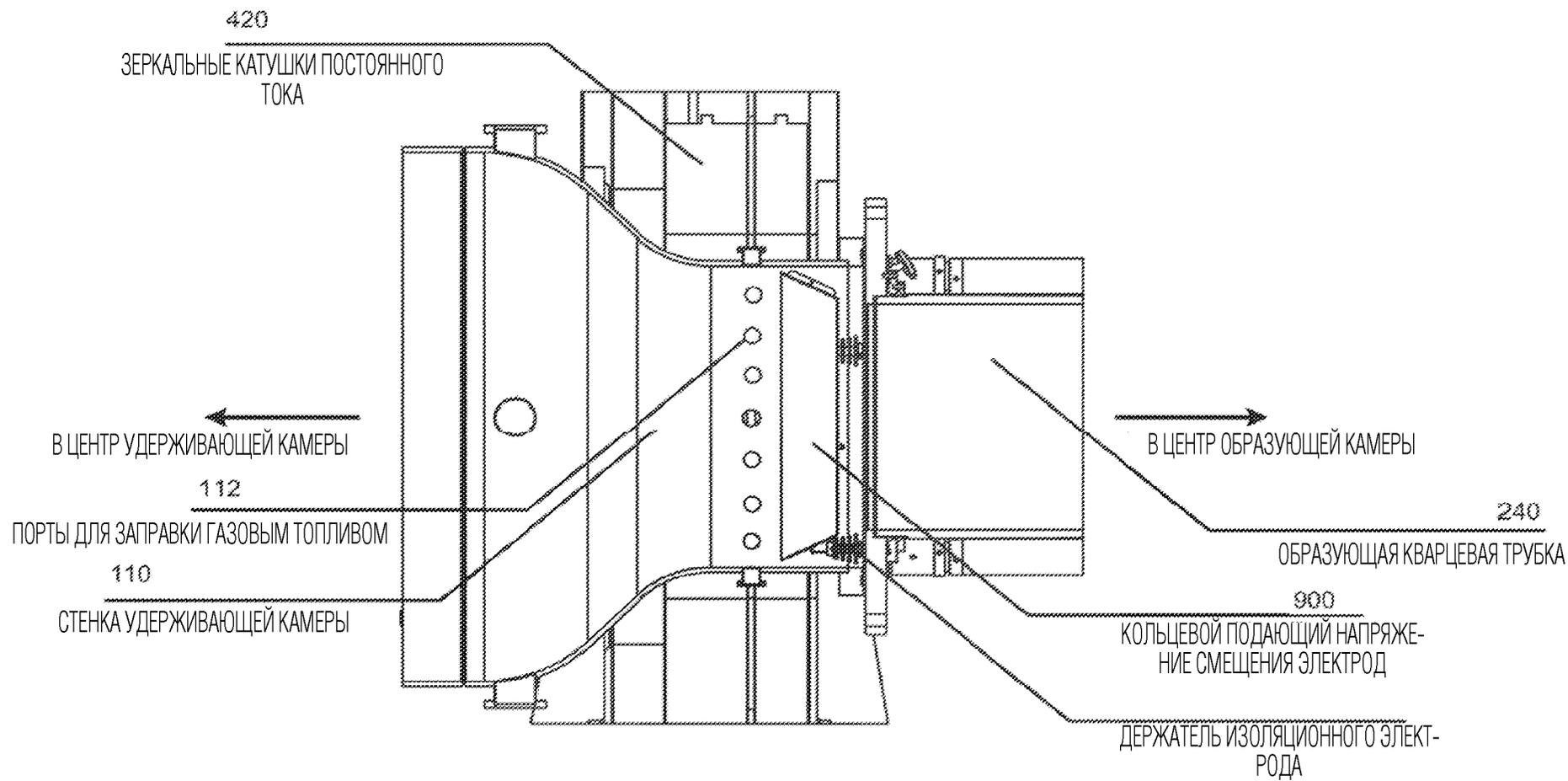
ФИГ. 8



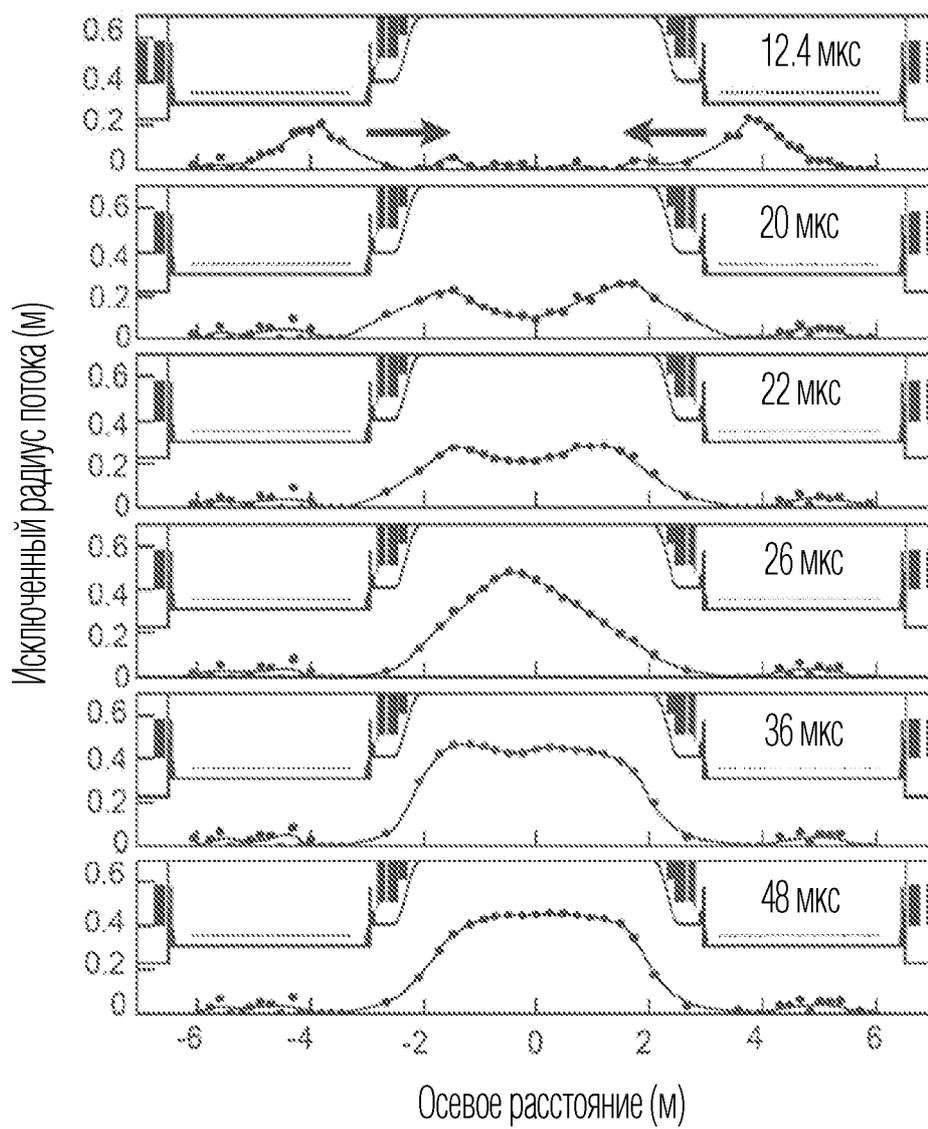
ФИГ. 9



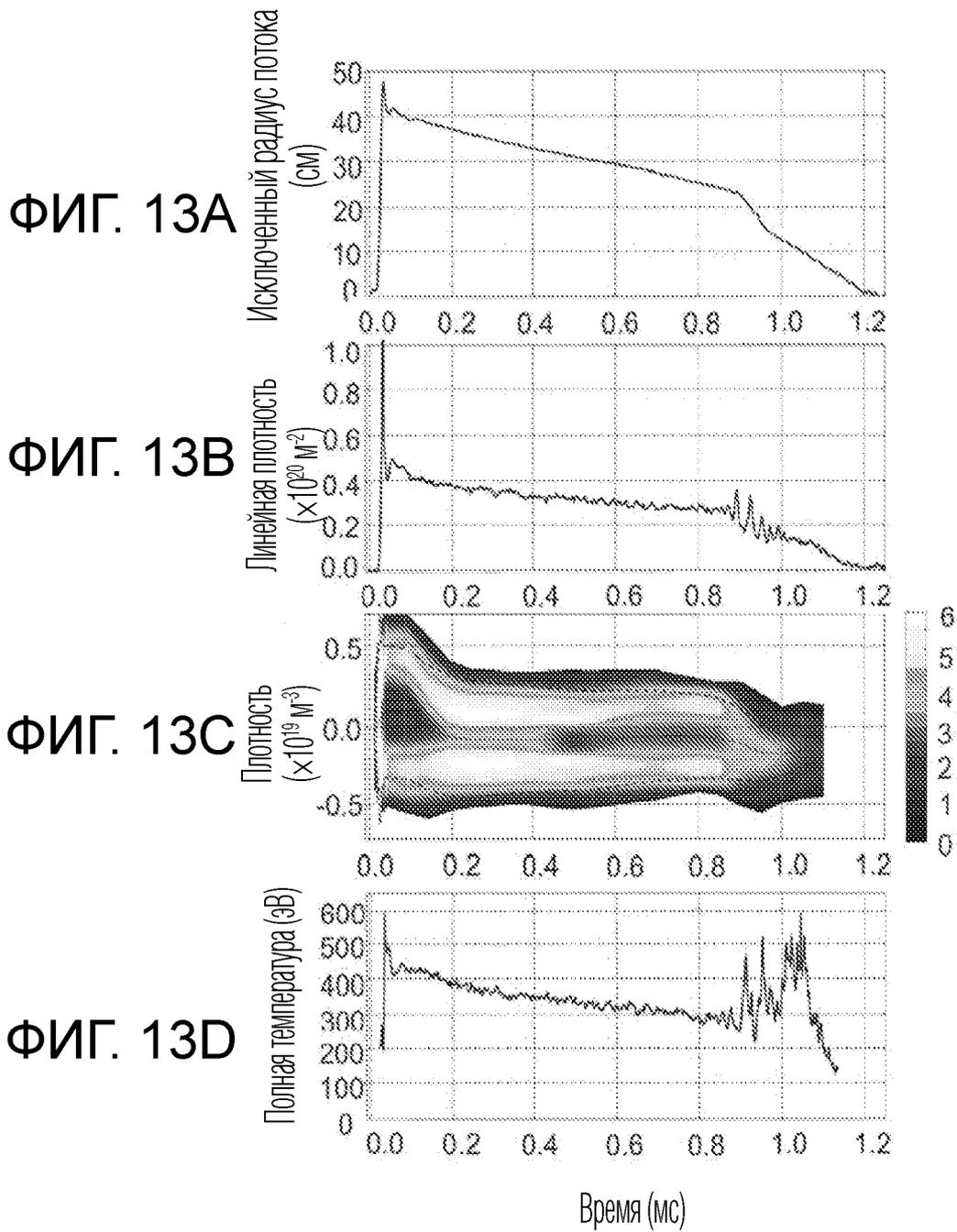
ФИГ. 10

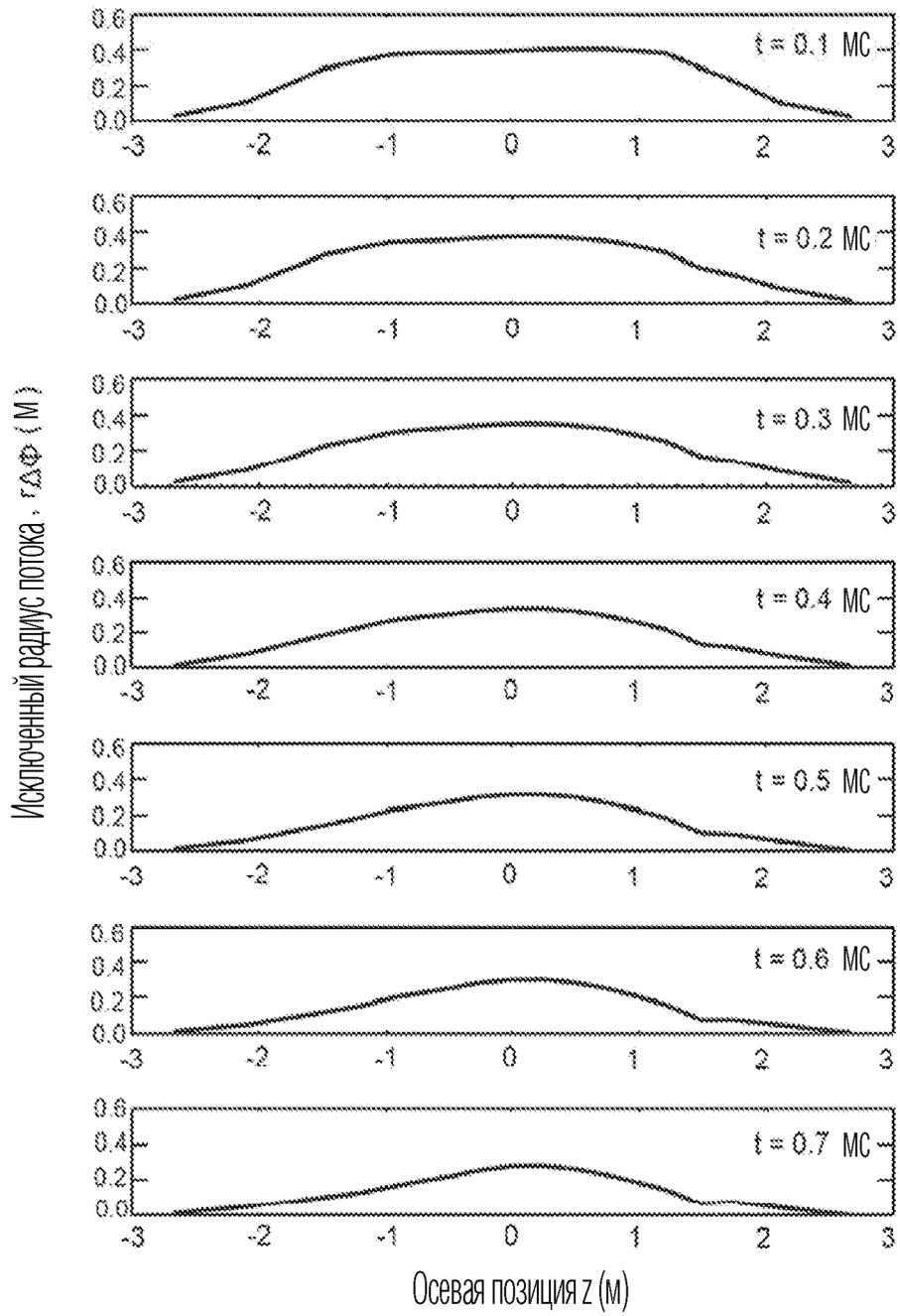


ФИГ. 11

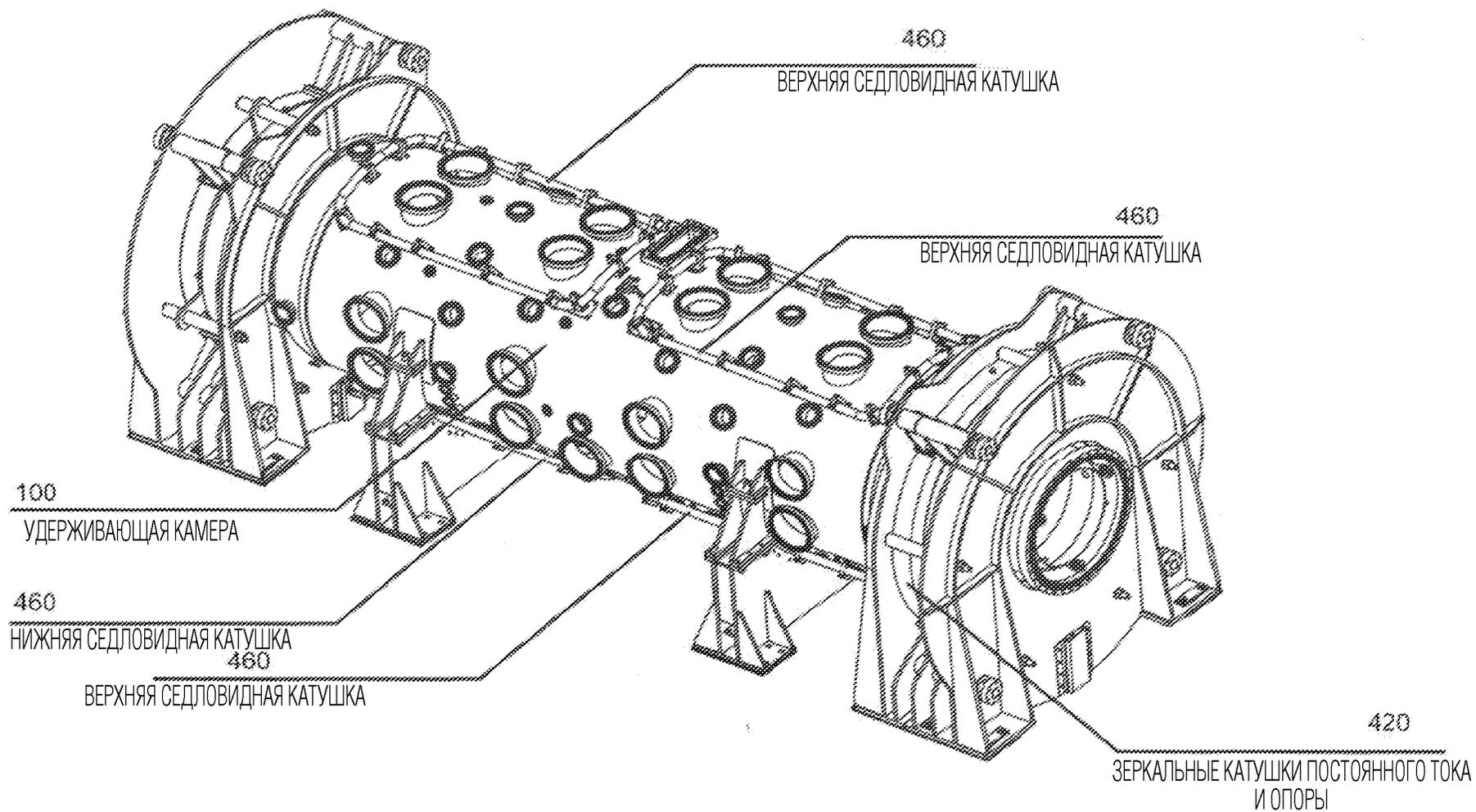


ФИГ. 12



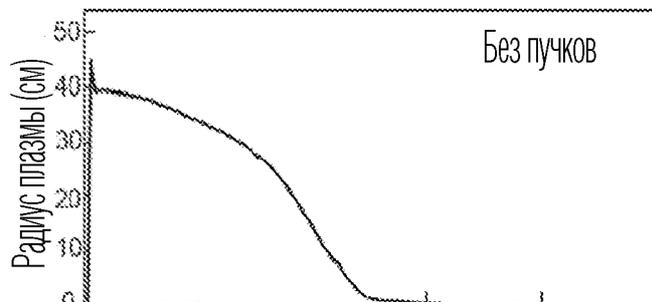


ФИГ. 14



ФИГ. 15

ФИГ. 16А



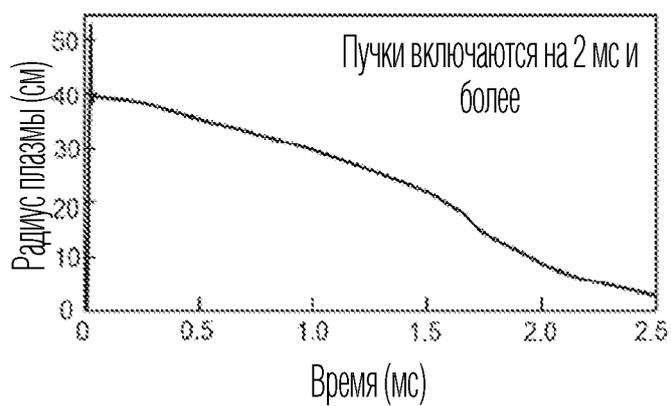
ФИГ. 16В



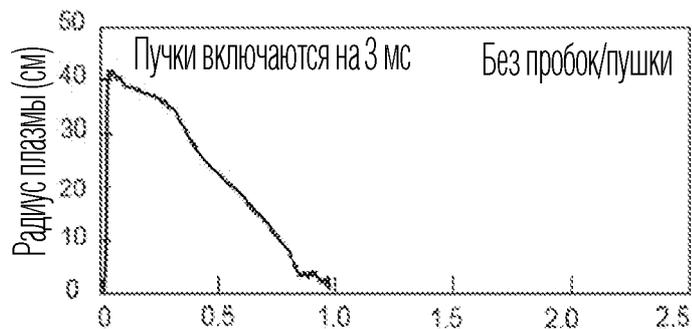
ФИГ. 16С



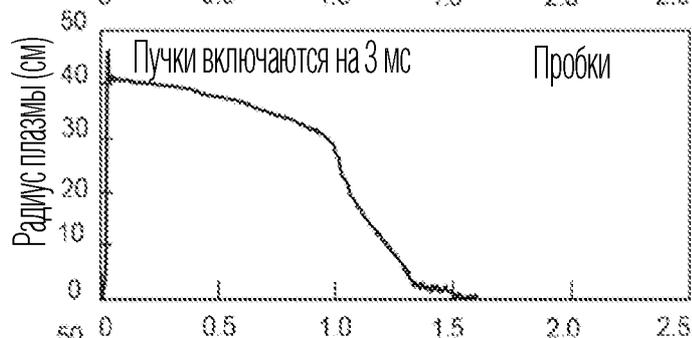
ФИГ. 16D



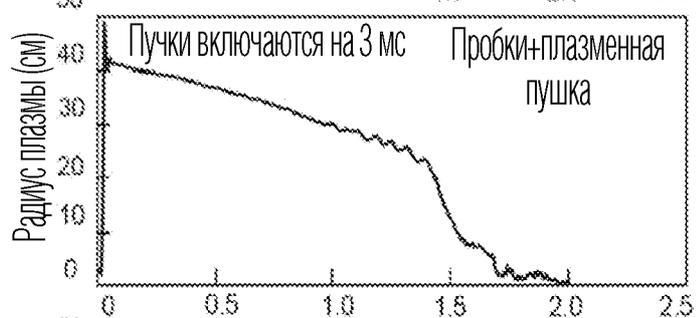
ФИГ. 17А



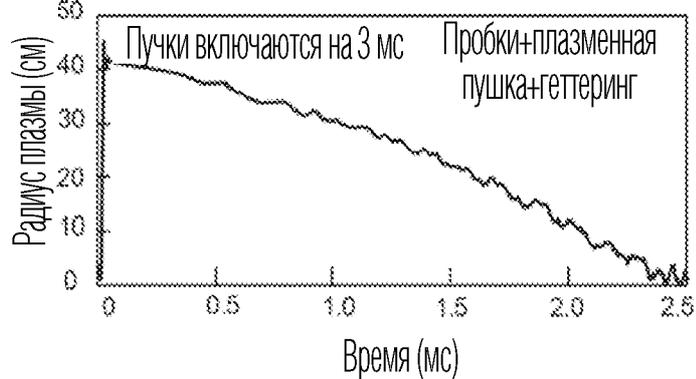
ФИГ. 17В



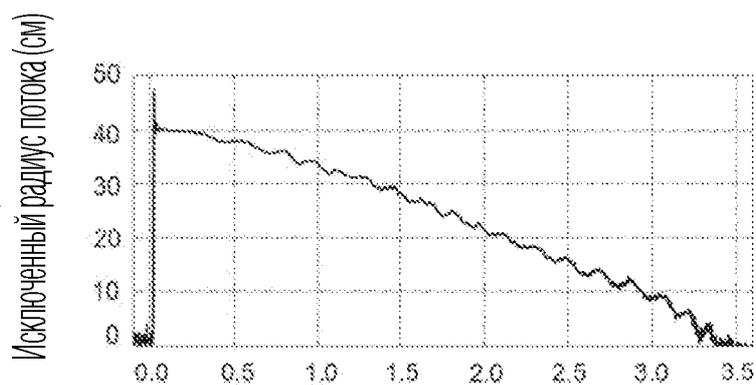
ФИГ. 17С



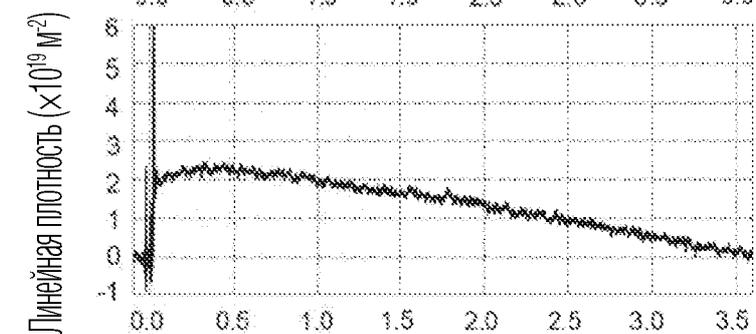
ФИГ. 17D



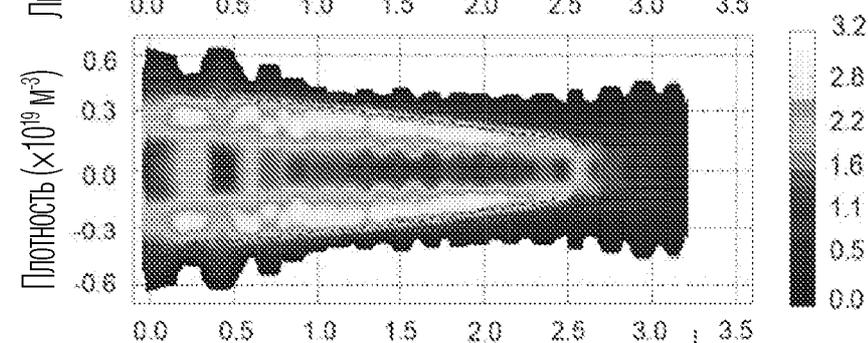
ФИГ. 18А



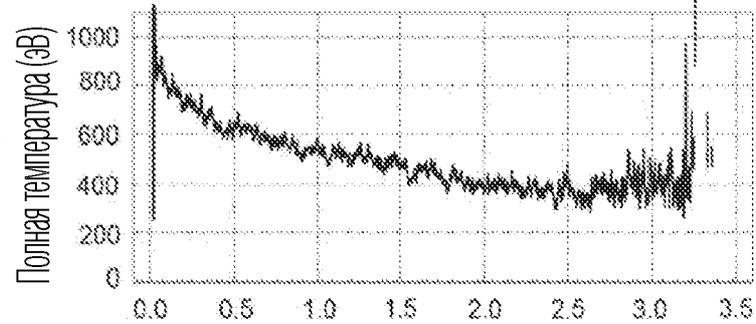
ФИГ. 18В



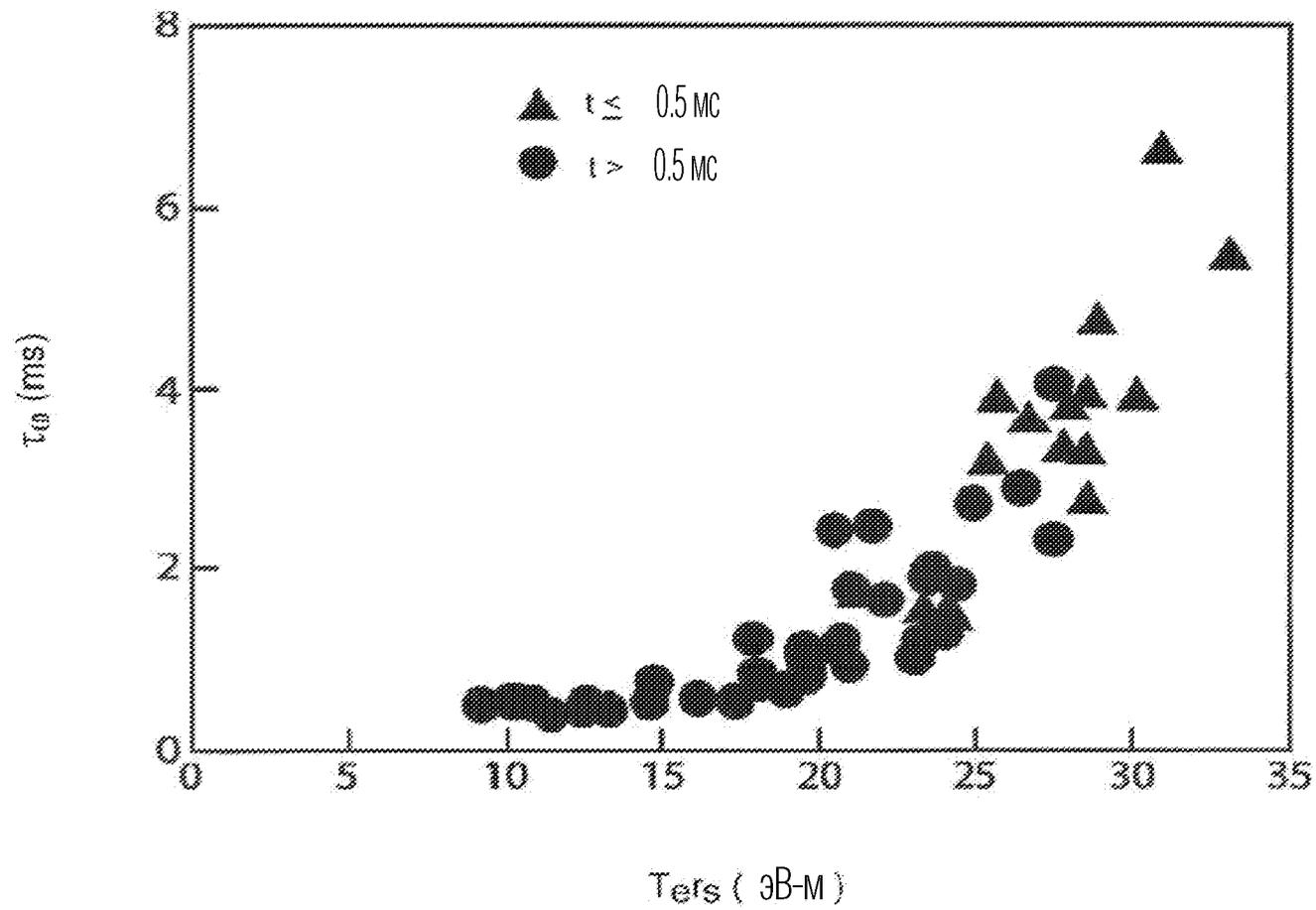
ФИГ. 18С



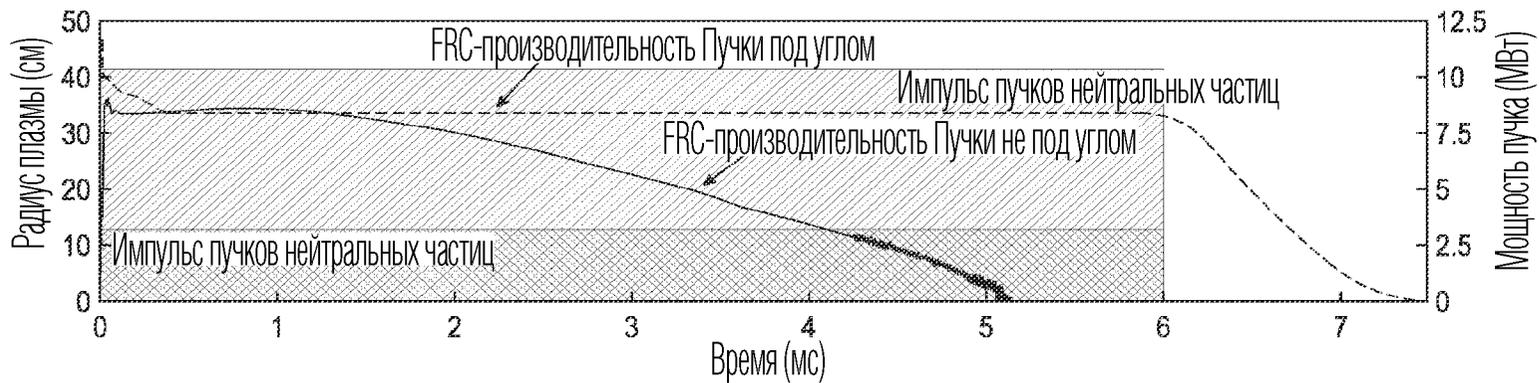
ФИГ. 18D



Время (мс)

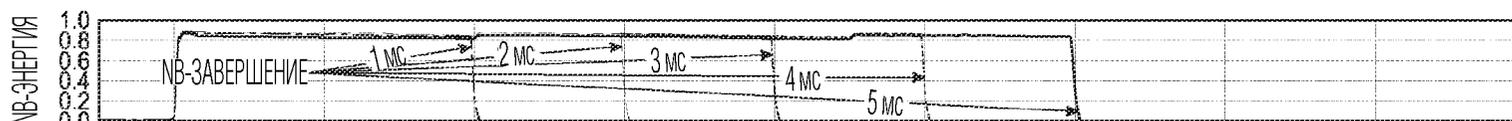


ФИГ. 19

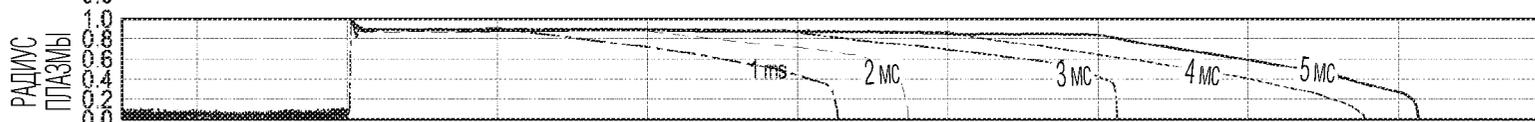


ФИГ. 20

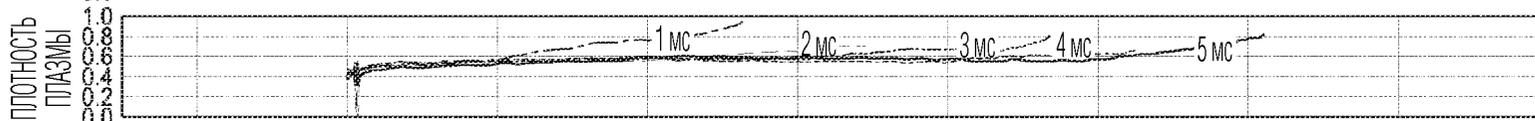
ФИГ. 21А



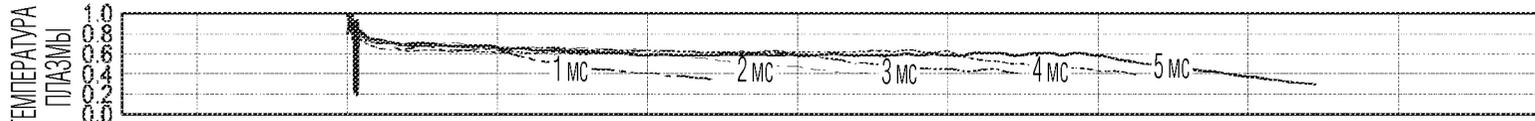
ФИГ. 21В



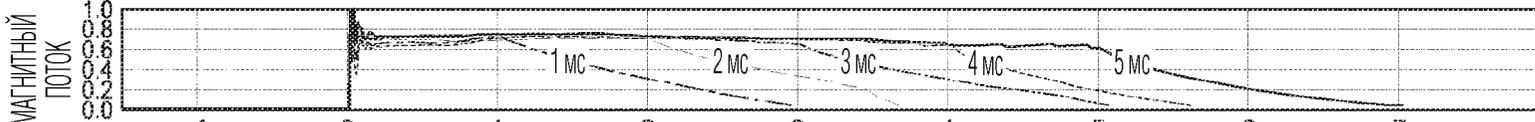
ФИГ. 21С



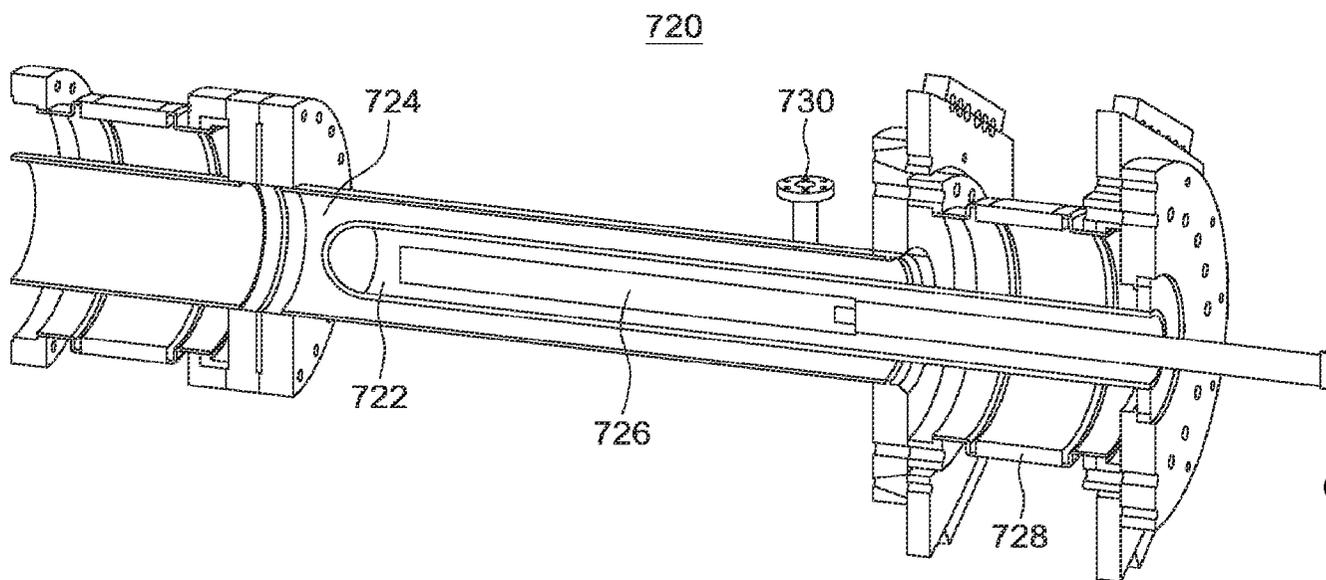
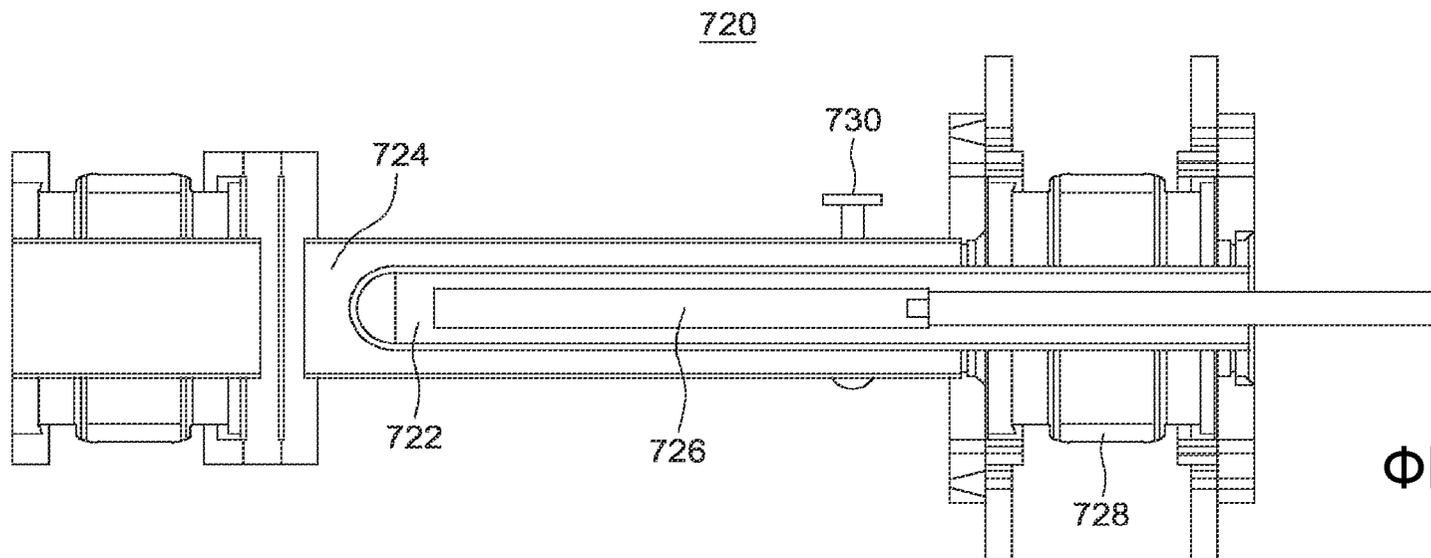
ФИГ. 21D

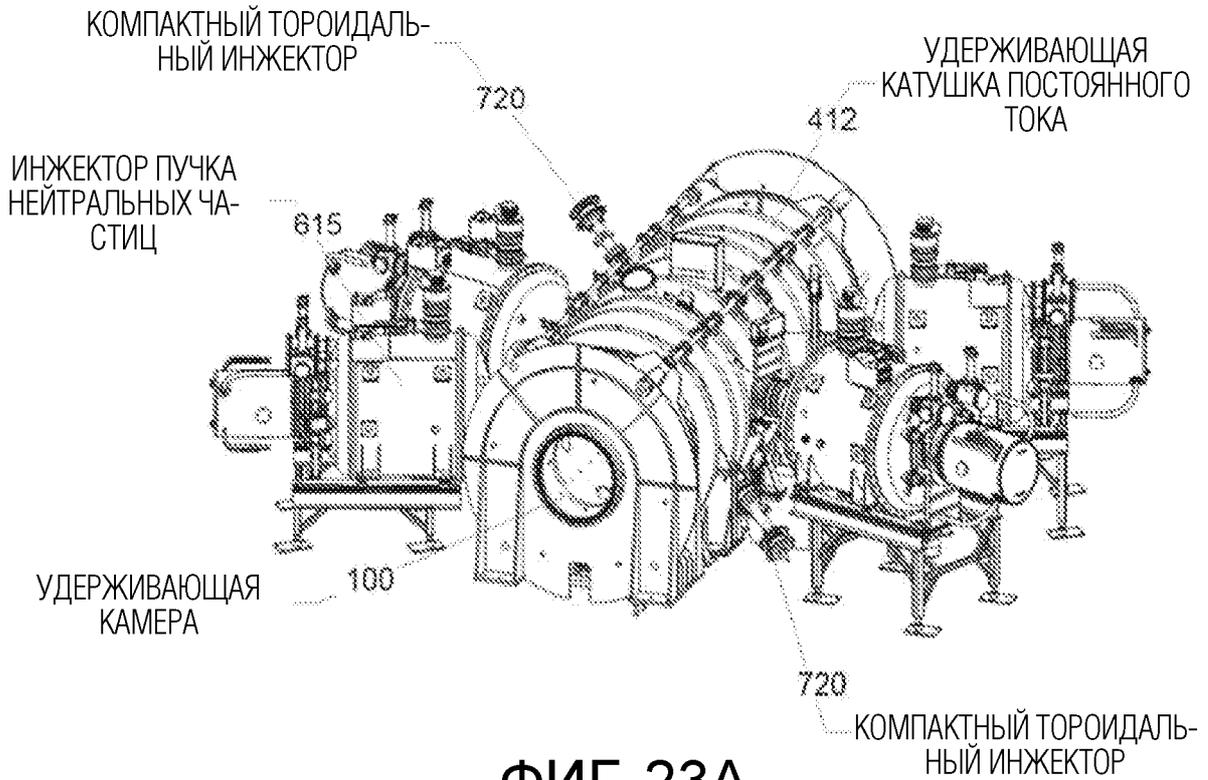


ФИГ. 21E

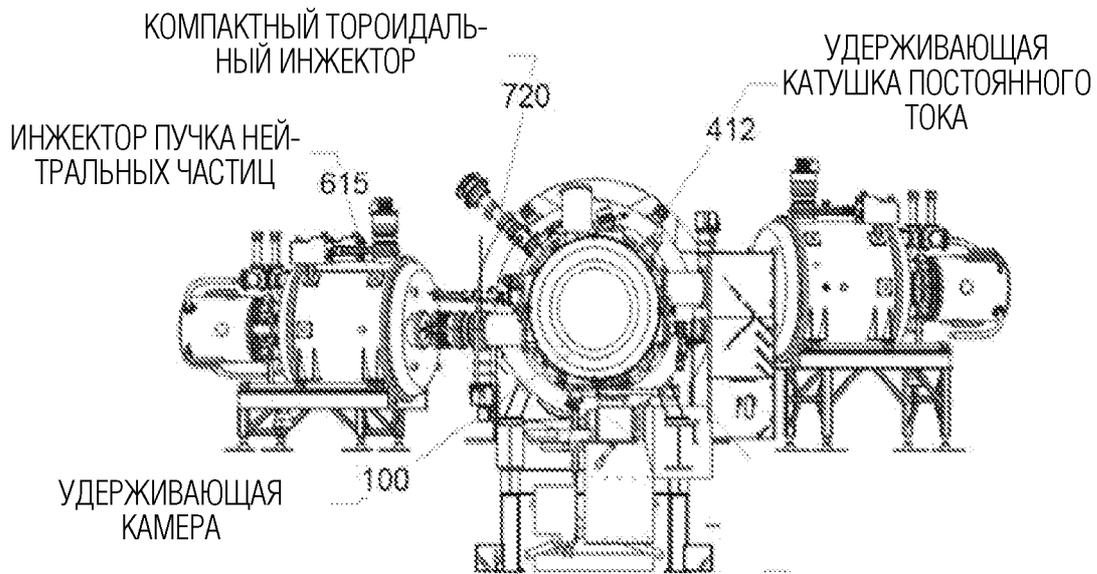


Время (мс)

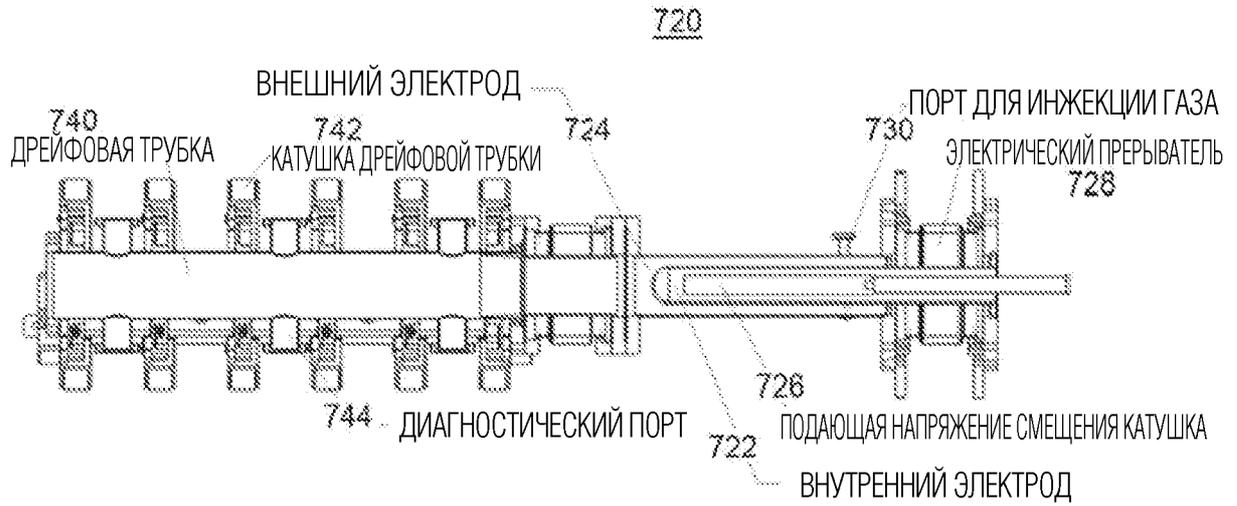




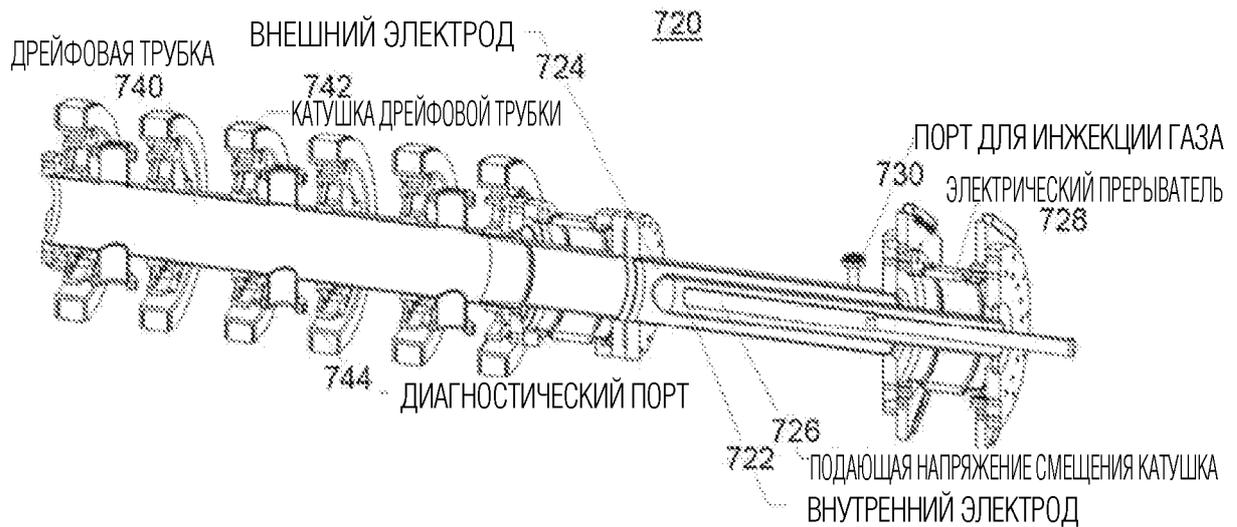
ФИГ. 23А



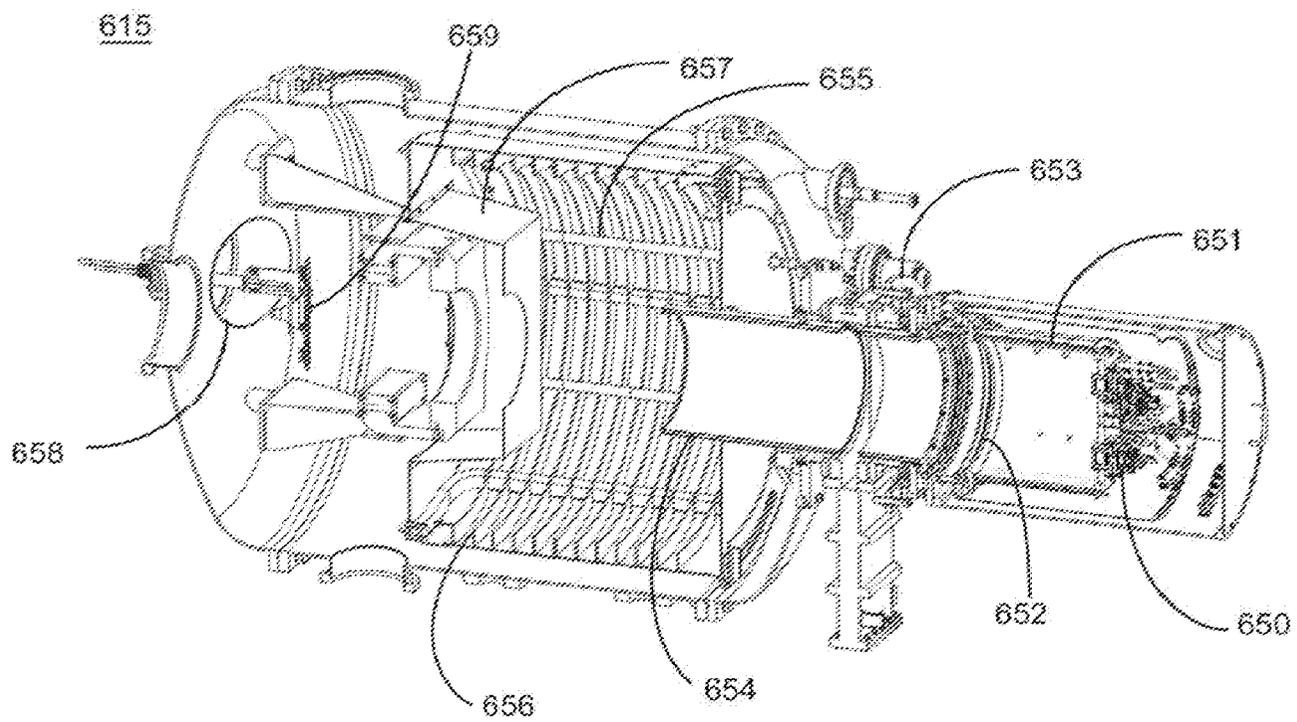
ФИГ. 23В



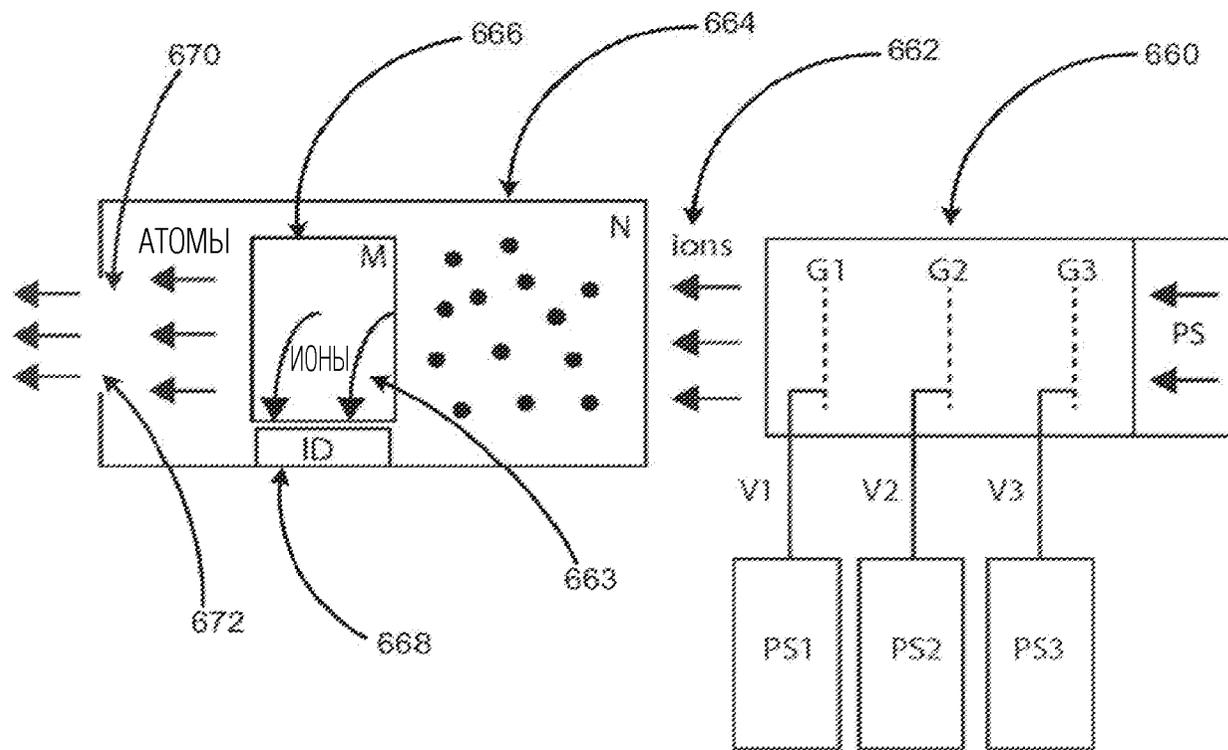
ФИГ. 24А



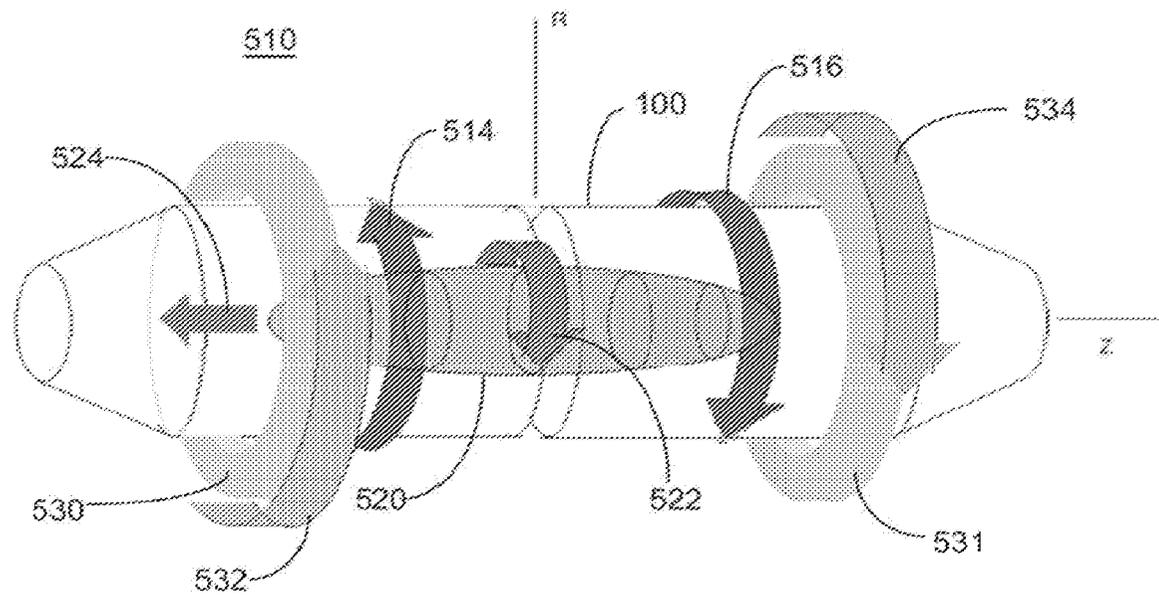
ФИГ. 24В



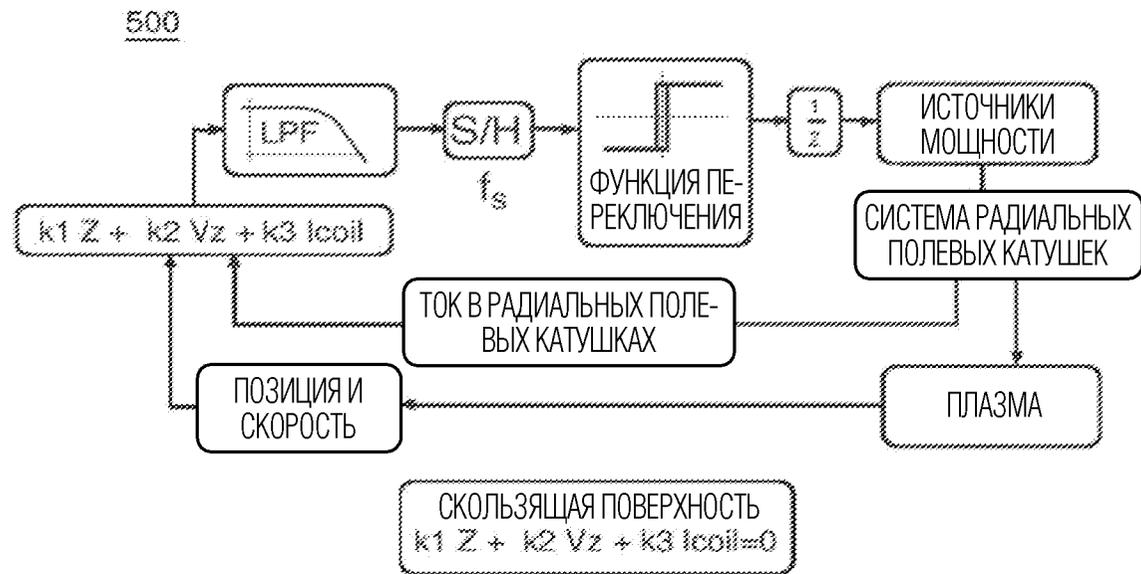
ФИГ. 25



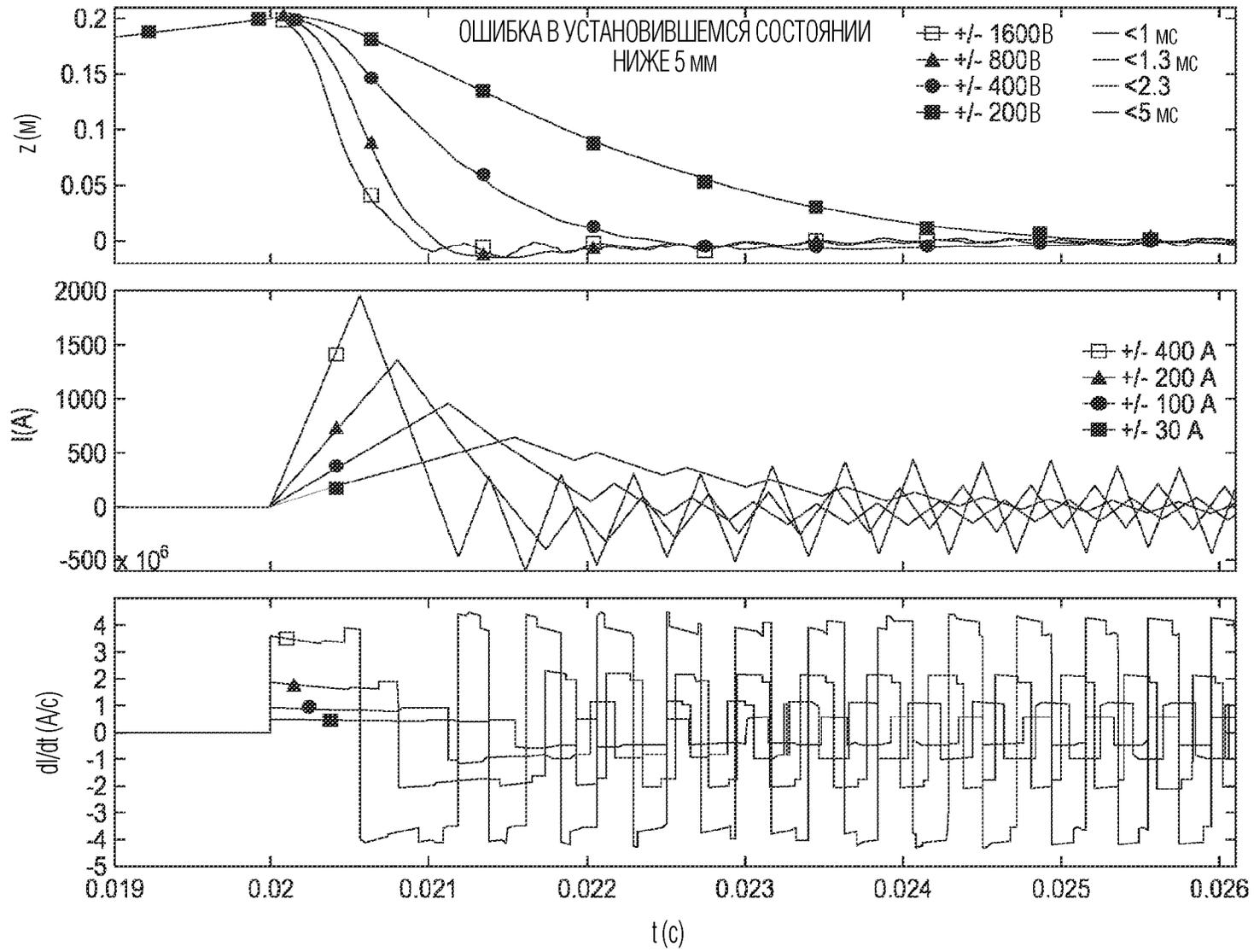
ФИГ. 26



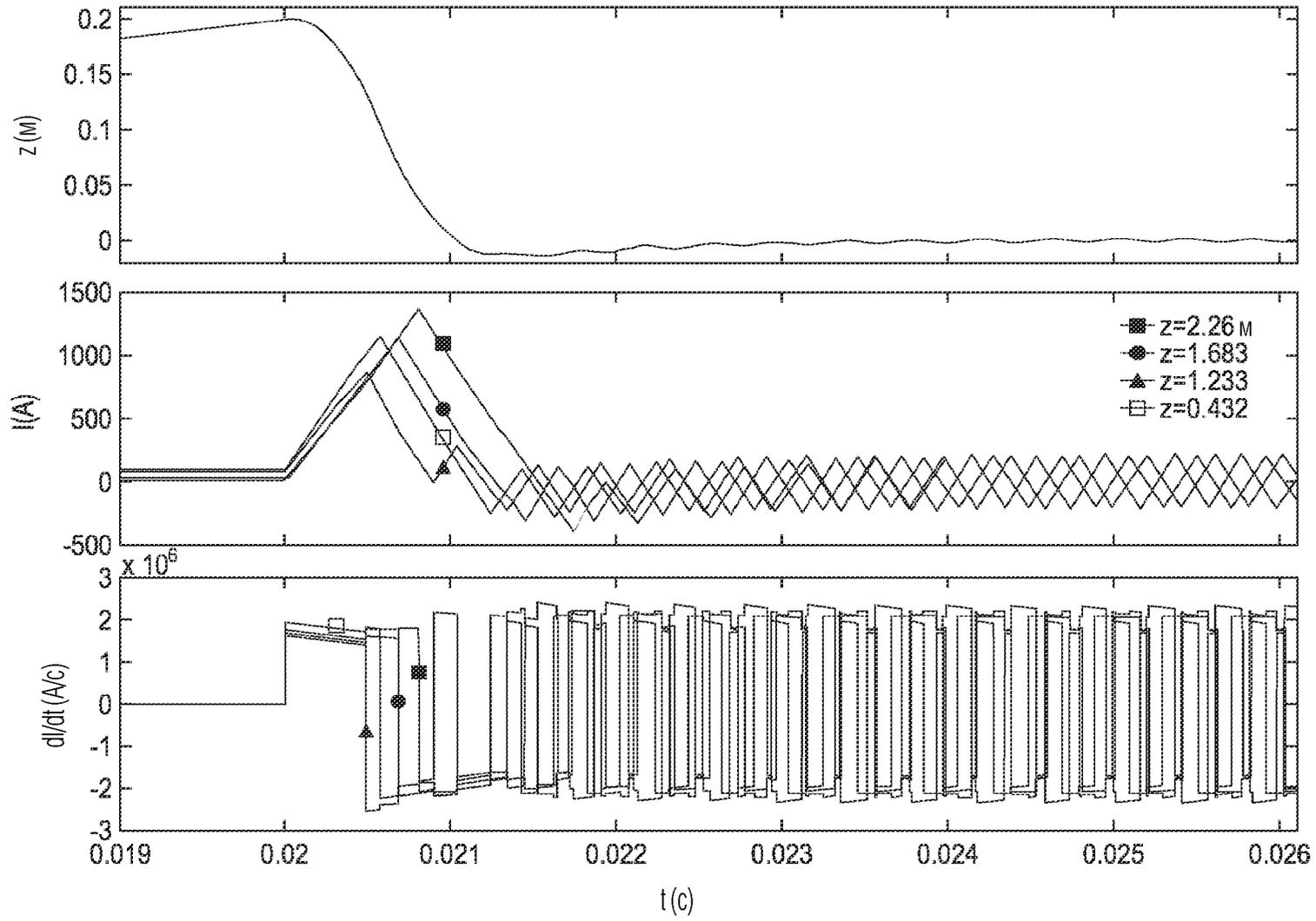
ФИГ. 27



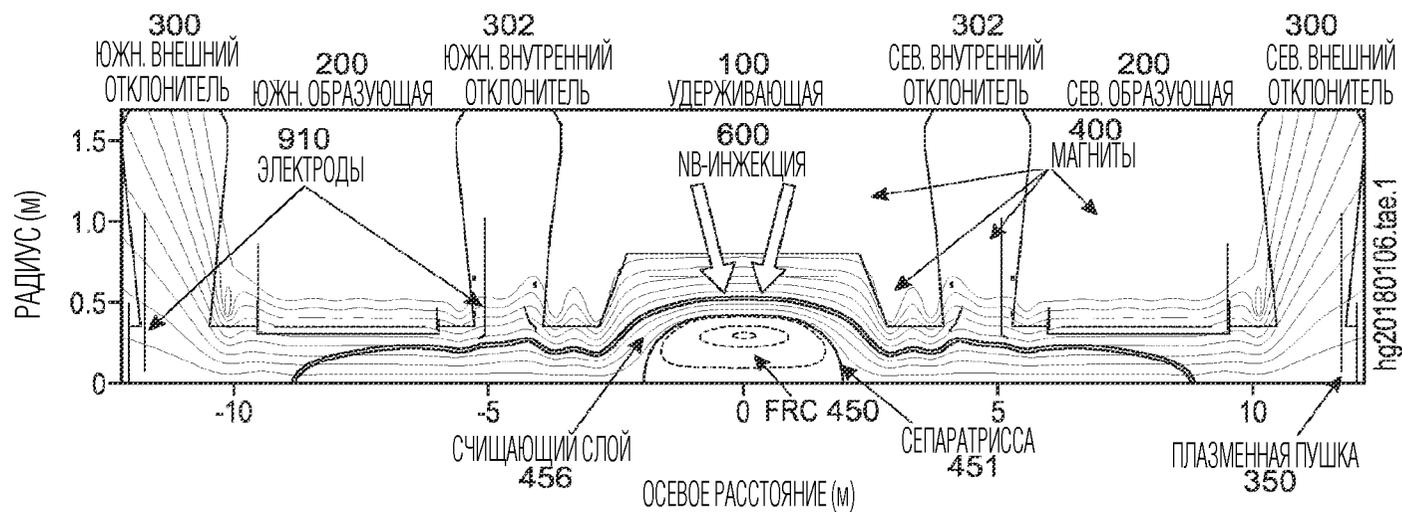
ФИГ. 28



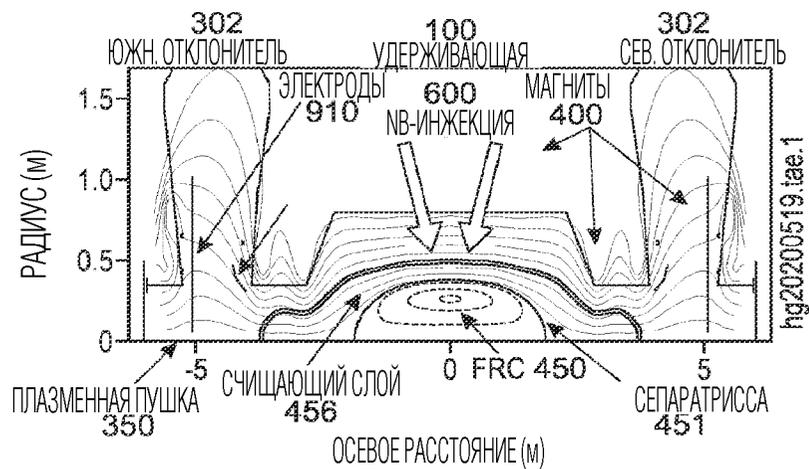
ФИГ. 29



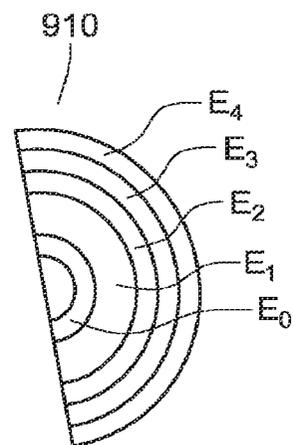
ФИГ. 30



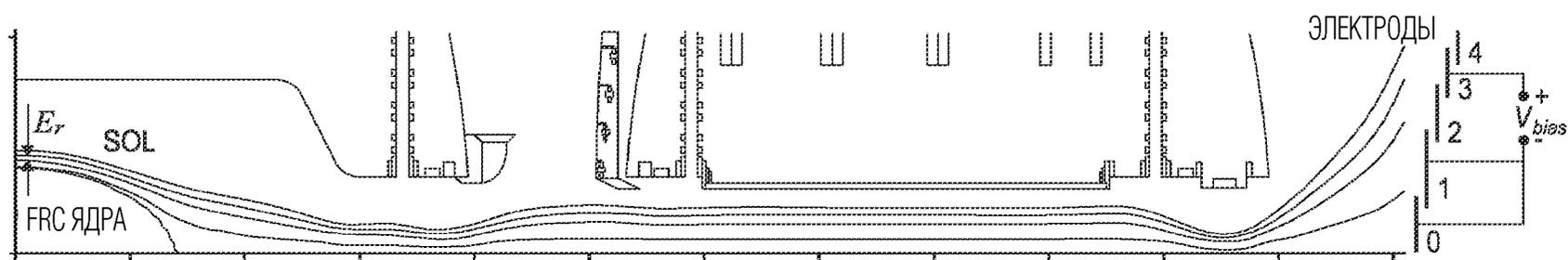
ФИГ. 31



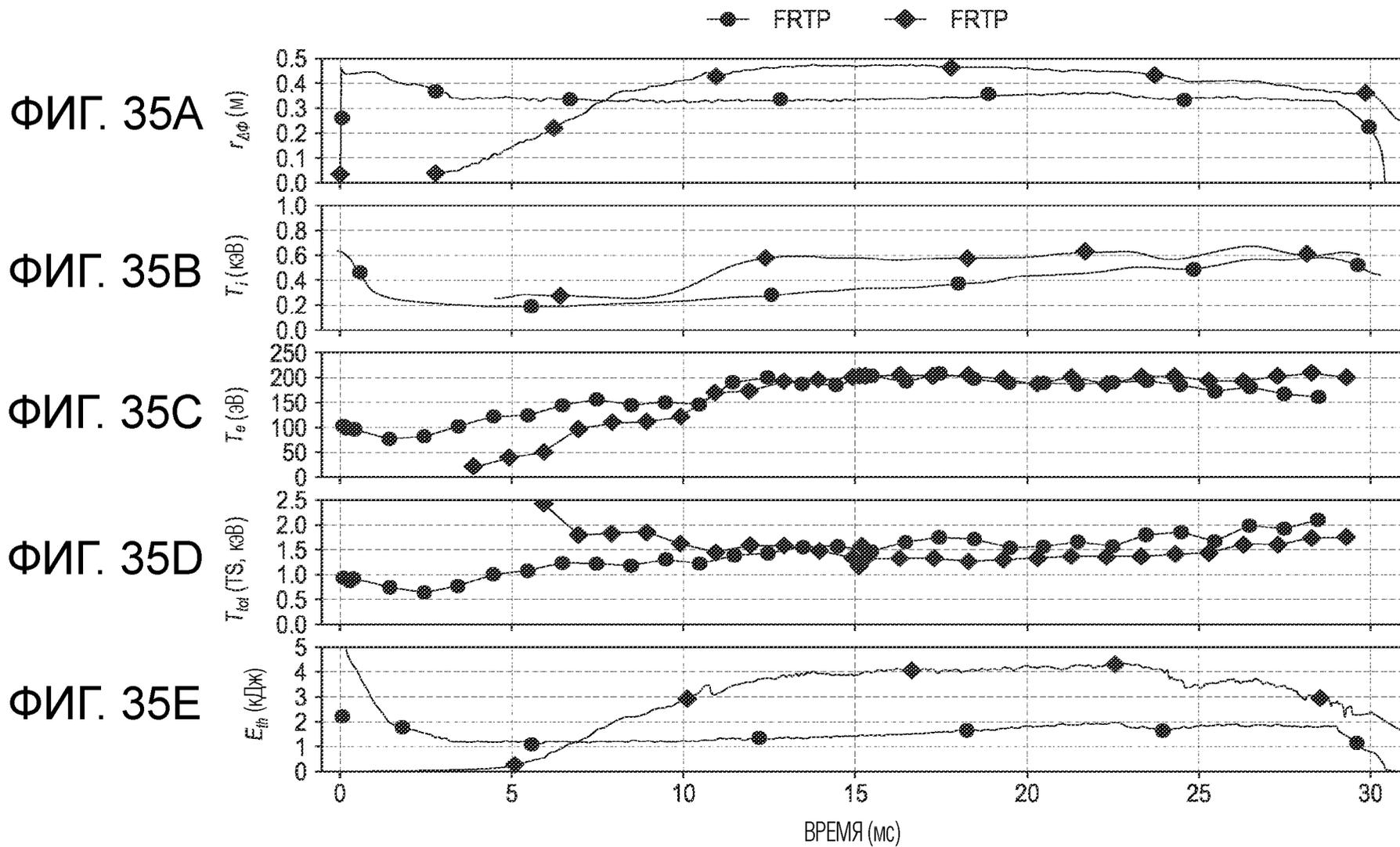
ФИГ. 32



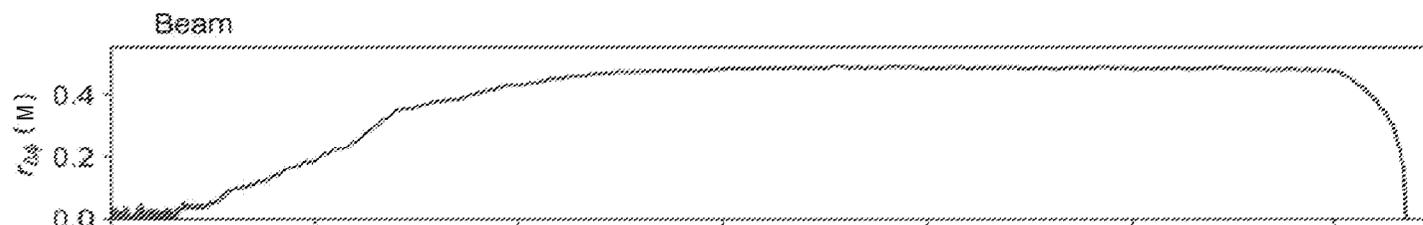
ФИГ. 33



ФИГ. 34



ФИГ. 36А



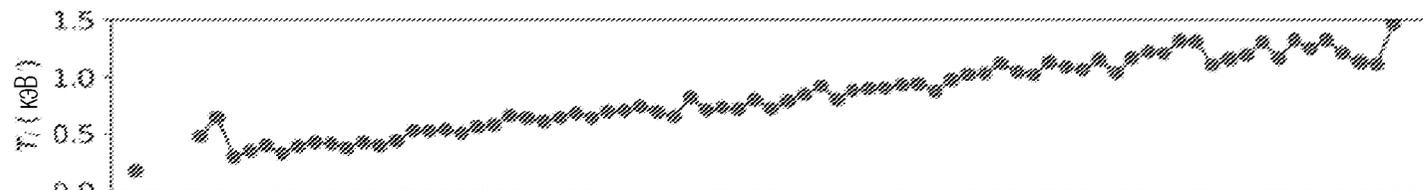
ФИГ. 36В



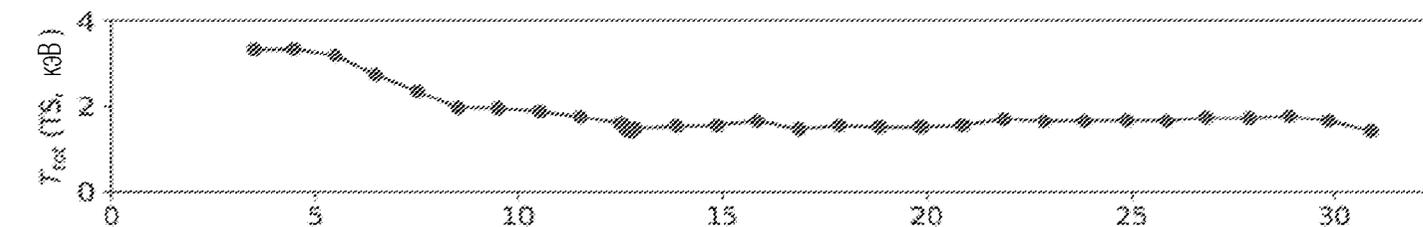
ФИГ. 36С

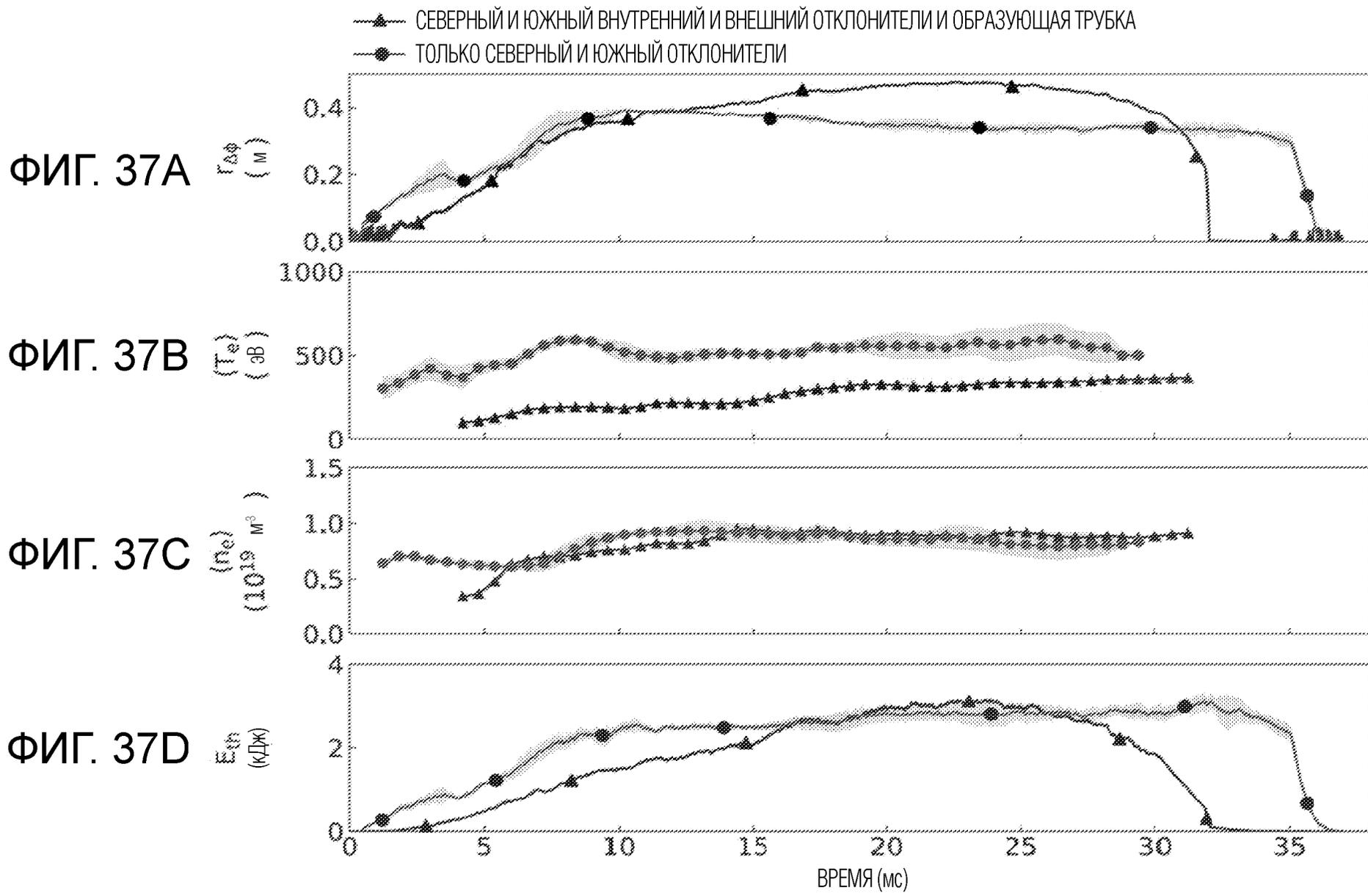


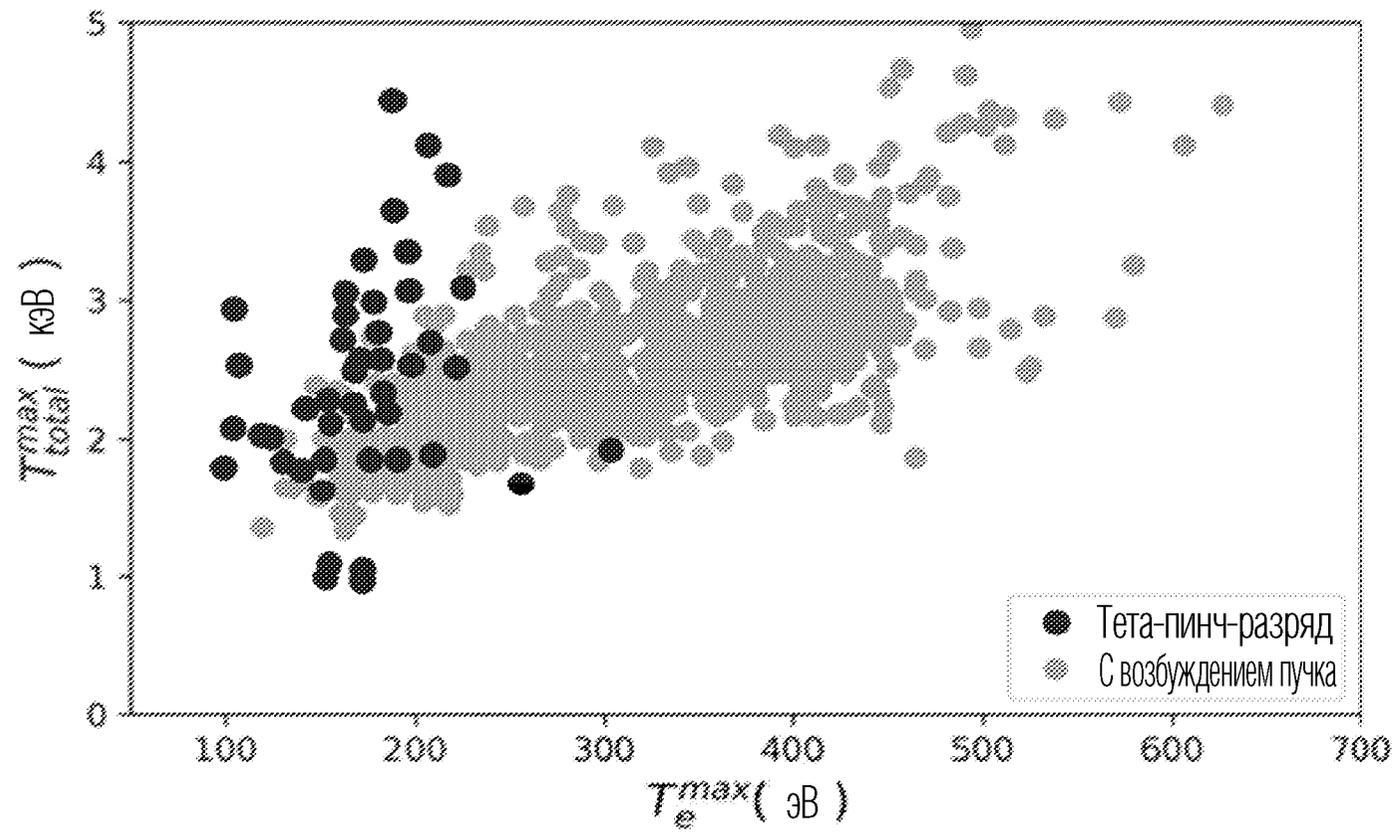
ФИГ. 36D



ФИГ. 36Е







ФИГ. 38