

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **034282**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2020.01.24**

(51) Int. Cl. **G21B 1/05** (2006.01)  
**H05H 1/00** (2006.01)

(21) Номер заявки  
**201790774**

(22) Дата подачи заявки  
**2012.11.14**

---

(54) **СПОСОБ ГЕНЕРИРОВАНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ КОНФИГУРАЦИИ ОБРАЩЕННОГО ПОЛЯ (КОП)**

---

(31) **61/559,154; 61/559,721**

(56) **US-A1-20110142185**  
**US-A1-20100046687**  
**WO-A2-2002062112**  
**RU-C1-2059297**

(32) **2011.11.14; 2011.11.15**

(33) **US**

(43) **2017.11.30**

(62) **201490775; 2012.11.14**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ДЗЕ РИДЖЕНТС ОФ ДЗЕ**  
**ЮНИВЕРСИТИ ОФ КАЛИФОРНИЯ**  
**(US)**

(72) Изобретатель:  
**Тушевски Михель, Биндербауэр**  
**Михль, Барнз Дэн, Гарате Эусебиу, Го**  
**Хоуян (US), Путвински Сергей (FR),**  
**Смирнов Артем (US)**

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

---

(57) Предложены системы и способы, которые облегчают формирование и поддержание новых высокоэффективных конфигураций с обращенным полем (КОП). Система КОП, предназначенная для работы в высокоэффективном режиме КОП (ВРКОП), включает в себя центральную емкость для удержания, окруженную двумя диаметрально противоположными формирующими секциями  $\theta$ -пинчей с обращенным полем, и две камеры диверторов, находящиеся вне формирующих секций и предназначенные для контроля плотности нейтральных частиц и загрязнения примесями. Магнитная система включает в себя ряд зеркальных катушек квазипостоянного тока, которые находятся в осевых положениях вдоль компонентов системы КОП, причем эти зеркальные катушки квазипостоянного тока находятся между камерой удержания и соседними формирующими секциями, и зеркальные пробки между формирующими секциями и диверторами. Формирующие секции включают в себя модульные формирующие системы импульсного питания, которые способны формировать КОП на месте, а потом осуществлять ускорение и инжекцию (т.е. статическое формирование) либо формирование и ускорение одновременно (т.е. динамическое формирование). Система КОП дополнительно включает в себя инжекторы пучков нейтральных атомов, инжектор таблеток, геттерирующие системы, осевые плазменные пушки и электроды, смещающие поверхности потока.

---

**B1**

**034282**

**034282**

**B1**

### Перекрестные ссылки на родственные заявки

В заявке выдвигаются притязания на приоритет по предварительной заявке № 61/559154 на патент США, поданной 14 ноября 2011 г., и выдвигаются притязания на приоритет по предварительной заявке № 61/559721, поданной 15 ноября 2011 г., содержание которых включено сюда посредством ссылки.

### Область техники, к которой относится изобретение

Описываемые здесь варианты осуществления относятся в основном к системам для магнитного удержания плазмы, а более конкретно к системам и способам, которые способствуют формированию и поддержанию конфигураций с обращенным полем и превосходной устойчивостью, а также удержанию частиц, энергии и потока.

### Уровень техники

Конфигурация с обращенным полем (КОП) принадлежит к классу топологий магнитного удержания плазмы, известных как компактные тороиды (КТ). Она демонстрирует преобладающе полоидальные магнитные поля и обладает нулевыми или малыми самогенерируемыми тороидальными полями (см. M. Tuszewski, Nucl. Fusion 28, 2033 (1988)). Преимуществами такой конфигурации являются ее геометрия, простота для построения и поддержания, естественный неограниченный дивертор для осуществления энерговыделения и золоудаления, а также очень высокое  $\beta$  ( $\beta$  - отношение среднего давления плазмы к среднему давлению магнитного поля внутри КОП), т.е. высокая плотность мощности. Свойство высокого  $\beta$  выгодно для экономичной работы и для применения усовершенствованных анейтронных топлив, таких как D-He<sup>3</sup> и p-B<sup>11</sup>.

Традиционный способ формирования КОП предусматривает использование технологии  $\theta$ -пинча с обращенным полем, дающей горячие плазмы большой плотности (см. A.L. Hoffman и J.T. Slough, Nucl. Fusion 33, 27 (1993)). Разновидностью этого способа является способ переноса и захвата, в котором плазма, создаваемая в "источнике"  $\theta$ -пинча, в большей или меньшей степени немедленно выбрасывается из одного торца камеры удержания. Затем переносимый плазмоид захватывается между двумя прочными зеркалами на торцах камеры (см., например, H. Nimura, S. Okada, S. Sugimoto и S. Goto, Phys. Plasmas 2, 191 (1995)). Как только этот плазмоид оказывается в камере удержания, можно применять различные способы нагрева и возбуждения тока, такие как инжекция пучка частиц (нейтральных или нейтрализованных), вращающиеся магнитные поля, высокочастотный нагрев или нагрев джоулевой теплотой и т.д. Это разделение функций источника и удержания дает ключевые инженерные преимущества для потенциальных будущих термоядерных реакторов. КОП доказали свою исключительную устойчивость к внешним воздействиям, приспособляемость к динамическому формированию, переносу и интенсивным актам захвата. Более того, они демонстрируют тенденцию допускать предпочтительное состояние плазмы (см., например, H.Y. Guo, A.L. Hoffman, K.E. Miller и L.C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett. 92, 245001 (2004)). За последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в развитии других способов формирования КОП - посредством объединения сфероматов с противоположно направленными спиральностями (см., например, Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama и T. Okazaki, Nucl. Fusion 39, 2001 (1999)) и посредством возбуждения тока вращающимися магнитными полями (ВМП) (см., например, I.R. Jones, Phys. Plasmas 6, 1950 (1999)), которые также обеспечивают дополнительную устойчивость.

Недавно был существенно доработан метод столкновения и объединения, предложенный уже давно (см., например, D.R. Wells, Phys. Fluids 9, 1010 (1966)): два отдельных  $\theta$ -пинча на противоположных торцах камеры удержания одновременно генерируют два плазмоида по направлению друг к другу, которые затем сталкиваются в центре камеры удержания и объединяются, образуя составную КОП. При разработке и успешном проведении одного из наиболее крупномасштабных (к настоящему времени) экспериментов с КОП обычный способ столкновения и объединения показал, что дает устойчивые высокотемпературные КОП с большим временем жизни и большой плотностью потока частиц (см., например, M. Binderbauer, H.Y. Guo, M. Tuszewski et al., Phys. Rev. Lett. 105, 045003 (2010)).

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

В экспериментах с типичными КОП, разработанными в прошлом, доминировали конвективные потери, а удержание энергии определялось переносом частиц. Частицы диффундируют из ограниченного сепаратрисой объема главным образом радиально, а потом происходят их аксиальные потери в граничном слое. Соответственно, удержание КОП зависит от свойств областей силовых линий как замкнутого, так и открытого поля. Время диффузии частиц наружу из объема, очерченного сепаратрисой, составляет  $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$  ( $a \sim r_s/4$ , где  $r_s$  - центральный радиус сепаратрисы), а  $D_{\perp}$  - характеристический коэффициент

диффузии, такой, как  $D_{\perp} \sim 12,5 \rho_{ie}$ , причем  $\rho_{ie}$  представляет собой гирорадиус ионов, оцениваемый в магнитном поле, прикладываемом извне. В экспериментах с КОП, разработанными в прошлом, время  $\tau_1$  удержания частиц граничного слоя, по существу, представляет собой время осевого пробега.

В установившемся состоянии баланс между радиальными и осевыми потерями частиц дает длину градиента плотности у сепаратрисы, составляющую  $\delta \sim (D_{\perp} \tau_1)^{1/2}$ . Временные масштабы удержания частиц в КОП составляют  $(\tau_{\perp} \tau_1)^{1/2}$  для КОП, разработанных в прошлом, которые имеют существенную плотность у сепаратрисы (см., например, M. Tuszewski, "Field Reversed Configurations," Nucl. Fusion 28, 2033 (1988)).

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

Поэтому в свете вышеизложенного желательно улучшить удержание и повысить устойчивость, обеспечиваемые КОП, чтобы использовать КОП, работающие в установившемся состоянии, как путь к целому множеству приложений, от компактных источников нейтронов (для производства изотопов медицинского назначения и очистки от ядерных отходов) до систем для разделения изотопов и обогащения и к активной зоне реактора для синтеза легких ядер с целью выработки энергии в будущем.

### **Раскрытие изобретения**

Варианты осуществления данного изобретения, предложенные здесь, направлены на разработку систем и способов, которые облегчают формирование и поддержание высокоэффективных конфигураций с обращенным полем (КОП). В соответствии с новой парадигмой высокоэффективной КОП данная система сочетает огромное количество новых идей и средств для резкого улучшения удержания частиц, энергии и потока в КОП, а также обеспечение контроля устойчивости без негативных побочных эффектов.

Предлагаемая здесь система КОП включает в себя центральную емкость для удержания, окруженную двумя диаметрально противоположными формирующими секциями  $\theta$ -пинчей с обращенным полем, и две камеры диверторов, находящиеся вне формирующих секций и предназначенные для контроля плотности нейтральных частиц и загрязнения примесями. Магнитная система включает в себя ряд зеркальных катушек квазипостоянного тока, которые находятся в осевых положениях вдоль компонентов системы КОП, причем эти зеркальные катушки квазипостоянного тока находятся между любым торцом камеры удержания и соседними формирующими секциями, и зеркальные пробки, содержащие компактные зеркальные катушки квазипостоянного тока, которые находятся между каждыми из формирующих секций и диверторов и которые создают дополнительные направляющие поля для нацеливания поверхностей магнитного потока по направлению к дивертору. Формирующие секции включают в себя модульные формирующие системы импульсного питания, которые способны осуществлять сначала формирование КОП на месте, а потом ускорение и инжекцию (т.е. статическое формирование) либо осуществлять формирование и ускорение одновременно (т.е. динамическое формирование).

Система КОП включает в себя инжекторы пучков нейтральных атомов и инжектор таблеток. В состав входят еще и геттерирующие системы, а также осевые плазменные пушки. Предусмотрены также смещающие электроды для электрического смещения открытых поверхностей потока.

Системы и способы согласно изобретению, а также его признаки и преимущества будут или станут очевидными для специалиста в данной области техники после изучения нижеследующих чертежей и подробного описания. Подразумевается, что это описание распространяется на все такие дополнительные способы, признаки и преимущества, которые находятся в рамках объема притязаний изобретения и подпадают под защиту посредством прилагаемой формулы изобретения. Также подразумевается, что изобретение не ограничивается требованием обязательного наличия всех подробностей возможных вариантов осуществления.

### **Краткое описание чертежей**

Прилагаемые чертежи, которые включены в данную заявку как ее часть, иллюстрируют предпочтительный в настоящее время вариант осуществления и, наряду с общим описанием, изложенным выше, и подробным описанием предпочтительного варианта осуществления, приводимым ниже, служат для пояснения принципов данного изобретения и обучения этим принципам.

Фиг. 1 иллюстрирует удержание частиц в предлагаемой системе КОП в высокоэффективном режиме КОП (ВРКОП) по сравнению с обычным режимом КОП (ОРКОП) и по сравнению с традиционными экспериментами с другими КОП.

На фиг. 2 иллюстрируются компоненты предлагаемой системы КОП и магнитной топологии КОП, получаемой в предлагаемой системе КОП.

На фиг. 3 иллюстрируется базовая компоновка предлагаемой системы КОП на виде сверху, включая предпочтительное расположение пучков нейтральных частиц, электродов, плазменных пушек, зеркальных пробок и инжектора таблеток.

На фиг. 4 иллюстрируется схематическое изображение компонентов системы для формирующих секций.

На фиг. 5 иллюстрируется изометрическое изображение отдельного формирующего модуля импульсного питания.

На фиг. 6 иллюстрируется изометрическое изображение узла формирующих труб.

На фиг. 7 иллюстрируется изометрическое изображение в частичном сечении системы пучков нейтральных частиц и ключевых компонентов.

На фиг. 8 иллюстрируется изометрическое изображение средств генерирования пучков нейтральных частиц на камере удержания.

На фиг. 9 иллюстрируется изометрическое изображение в частичном сечении систем Ti- и Li-геттерирования.

На фиг. 10 иллюстрируется изометрическое изображение в частичном сечении плазменной пушки, установленной в камере дивертора. Также показаны соответствующая магнитная зеркальная пробка и электродный узел дивертора.

На фиг. 11 иллюстрируется предпочтительная компоновка кольцевого электрода смещения на осевом торце камеры удержания.

Фиг. 12 иллюстрирует эволюцию радиуса исключаемого потока в системе КОП, полученного исходя из ряда наружных диамагнитных контуров в двух формирующих секциях  $\theta$ -пинчей с обращенным полем и магнитных зондов внутри центральной металлической камеры удержания. Время измеряется с момента синхронизируемого обращения поля в источниках для формирования, а расстояние  $z$  задается относительно осевой средней плоскости машины.

Фиг. 13(a)-(d) иллюстрируют данные, полученные в результате неподдерживаемого разряда в представительном не высокоэффективном режиме КОП на предлагаемой системе КОП. Как функции времени показаны: (a) радиус исключаемого потока в средней плоскости; (b) 6 хорд линейно-интегральной плотности из находящегося в средней плоскости интерферометра для определения содержания  $\text{CO}_2$ ; (c) радиальные профили распределения плотности, инвертированные по Абелю, из интерферометра для определения содержания  $\text{CO}_2$ ; и (d) полная температура плазмы исходя из равенства давлений.

На фиг. 14 иллюстрируются осевые профили исключаемого потока в выбранные моменты времени для одного и того же разряда из предлагаемой системы КОП, показанной на фиг. 13.

На фиг. 15 иллюстрируется изометрическое изображение отклоняющих катушек, установленных снаружи камеры удержания.

фиг. 16 иллюстрирует корреляции времени жизни КОП и длительности импульсов инжектируемых пучков нейтральных частиц. Как показано, более длительные импульсы пучка дают большее время жизни КОП.

Фиг. 17 иллюстрирует индивидуальные и совокупные воздействия разных компонентов системы КОП на рабочие характеристики КОП и достижение ВРКОП.

Фиг. 18(a)-(d) иллюстрируют данные, полученные в результате не неподдерживаемого разряда в представительном высокоэффективном режиме КОП на предлагаемой системе КОП. Как функции времени показаны: (a) радиус исключаемого потока в средней плоскости; (b) 6 хорд линейно-интегральной плотности из находящегося в средней плоскости интерферометра для определения содержания  $\text{CO}_2$ ; (c) радиальные профили распределения плотности, инвертированные по Абелю, из интерферометра для определения содержания  $\text{CO}_2$ ; и (d) полная температура плазмы исходя из равенства давлений.

Фиг. 19 иллюстрируют удержание потока как функцию температуры ( $T_e$ ) электронов. Это дает графическое представление о вновь устанавливаемом режиме масштабирования, который превосходит известные, для разрядов в ВРКОП.

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

### Осуществление изобретения

Варианты осуществления данного изобретения, предложенные здесь, направлены на разработку систем и способов, которые облегчают формирование и поддержание высокоэффективных конфигураций с

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

### **Описание системы КОП**

#### **Вакуумная система**

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

Формирующие секции 200  $\theta$ -пинчей с обращенным полем представляют собой стандартные тета-пинчи с обращенным полем (ТПОП), хотя и с усовершенствованной формирующей системой импульсного питания, подробно рассматриваемой ниже (см. фиг. 4–6). Каждая формирующая секция 200 выполнена из стандартных непрозрачных кварцевых труб промышленного качества, обладающих такой особенностью, как наличие внутренней футеровки из сверхчистого кварца толщиной 2 мм. Камера 100 удержания выполнена из нержавеющей стали, обеспечивая множество радиальных и тангенциальных отверстий; она также служит в качестве средства сохранения потока во временных рамках эксперимента, описываемого ниже, и ограничивает быстрые магнитные переходные процессы. Вакуумы создаются и поддерживаются в пределах системы 10 КОП с помощью набора безмасляных спиральных форвакуумных насосов, турбомолекулярных насосов и крионасосов.

#### **Магнитная система**

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

Главная магнитная система 410 включает в себя ряд катушек 412, 414 и 416 квазипостоянного тока, которые находятся в осевых положениях вдоль компонентов системы 10 КОП, т.е. вдоль камеры 100 удержания, формирующих секций 200 и диверторов 300. Питание катушек 412, 414 и 416 квазипостоянного тока осуществляется посредством импульсных источников питания квазипостоянного тока, так что катушки создают базовые магнитные поля смещения с индукцией примерно 0,1 Т в камере 100 удержания, формирующих секциях 200 и диверторах 300. Помимо катушек 412, 414 и 416 квазипостоянного тока главная магнитная система 410 включает в себя зеркальные катушки 420 квазипостоянного тока (питаемые посредством импульсных источников питания) между любым торцом камеры 100 удержания и соседними формирующими секциями 200. Зеркальные катушки 420 квазипостоянного тока обеспечивают коэффициенты отражения магнитного зеркала до 5 и обеспечивают возможность независимого возбуждения для контроля придания равновесной формы. Кроме того, между каждыми из формирующих секций 200 и диверторов 300 расположены зеркальные пробки 440. Зеркальные пробки 440 содержат компактные зеркальные катушки 430 квазипостоянного тока и зеркальные пробочные катушки 444. Зер-

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

#### **Формирующие системы импульсного питания**

Формирующие системы 210 импульсного питания работают по принципу модифицированного  $\theta$ -пинча. Имеются две системы, каждая из которых питает одну из формирующих секций 200. На фиг. 4-6 иллюстрируются главные составляющие блоки и компоновка формирующих систем 210. Система 210 формирования состоит из модульной компоновки, питающей импульсной мощности, которая состоит из отдельных блоков (модулей), каждый из которых возбуждает поднабор катушек 232 (подвесок) узла 230 подвески, которые обвиты вокруг формирующих кварцевых труб 240. Каждый модуль 220 состоит из конденсаторов 221, индукторов 223, быстродействующих сильноточных переключателей 225 и связанных с ними схем 222 запуска и 224 сброса заряда. Каждая формирующая система 210 запасает емкостную энергию в диапазоне 350-400 кДж, которая обеспечивает до 35 ГВт мощности для формирования и ускорения КОП. Координированная работа этих компонентов достигается посредством известной системы 222 запуска и 224 управления, которая обеспечивает синхронизацию между формирующими системами 210 на каждой формирующей секции 200 и минимизирует неустойчивую синхронизацию переключения, ограничивая ее десятками наносекунд. Преимуществом этой модульной конструкции является гибкая работа: можно осуществлять формирование КОП на месте, а затем ускорение и инжекцию (статическое формирование) или осуществлять формирование и ускорение одновременно (динамическое формирование).

#### **Инжекторы пучков нейтральных частиц**

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

#### **Инжектор таблеток**

Чтобы обеспечить средство инжекции новых частиц и лучшего контроля общего количества частиц в КОП, на системе 10 КОП используется 12-тистовольный инжектор 700 таблеток (см., например, I. Vinyar et al., "Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE, и HL-2A", Proceedings of the 26th Fusion Science and Technology Symposium, 09/27 to 10/01 (2010)). На фиг. 3 иллюстрируется компоновка инжектора 700 таблеток на системе 10 КОП. Цилиндрические таблетки (D~1 мм, L~1-2 мм) инжектируются в КОП со ско-

ростью в диапазоне 150-250 км/с. Каждая отдельная таблетка содержит примерно  $5 \times 10^{19}$  атомов водорода, что сравнимо с общим количеством частиц в КОП.

### Геттерирующие системы

Хорошо известно, что нейтральный газообразный галоген является серьезной проблемой во всех удерживающих системах. Процессы обмена зарядами и повторения цикла (высвобождения холодного материала примесей из стенки) могут оказывать пагубное воздействие на удержание энергии и частиц. Кроме того, любая значительная плотность нейтрального газа на границе или около нее приведет к медленным потерям, по меньшей мере, значительно сокращающим время жизни инжектируемых (высокоэнергетических) частиц на орбитах больших радиусов (термин "орбита большого радиуса" относится к частицам, имеющим орбиты в рамках топологии КОП или, по меньшей мере, радиусы орбит, которые гораздо больше, чем линейный масштаб градиента характеристического магнитного поля), и этот факт является пагубным для всех энергетических приложений плазмы, включая термоядерный синтез, из-за разогрева пучка.

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

### Зеркальные пробки

Как сказано выше, в системе 10 КОП применяются наборы зеркальных катушек 420, 430 и 444, показанных на фиг. 2 и 3. Первый набор зеркальных катушек 420 находится на двух осевых торцах камеры 100 удержания и независимо возбуждается от удерживающих катушек 412, 414 и 416 главной магнитной системы 410. Первый набор зеркальных катушек 420 способствует главным образом управлению и осевому расположению КОП 450 во время объединения и обеспечивает контроль придания равновесной формы во время поддержания. Первый набор 420 зеркальных катушек создает магнитные поля с номинально большей индукцией (примерно 0,4-0,5 Т), чем у центральной удерживающей катушки 412. Второй набор 420 зеркальных катушек 430, который включает в себя три компактные зеркальные катушки 432, 434 и 436 квазипостоянного тока, находится между формирующими секциями 200 и диверторами 300 и возбуждается посредством общего импульсного источника питания. Зеркальные катушки 432, 434 и 436 вместе с более компактными импульсными зеркальными пробочными катушками 444 (питаемыми посредством емкостного источника питания) и физическим сужением 442 образуют зеркальные пробки 440, которые обеспечивают узкий тракт с низкой электропроводностью газа и магнитными полями с очень высокой индуктивностью (в диапазоне 2-4 Т при временах нарастания примерно 10-20 мс). Наиболее компактные импульсные зеркальные катушки 444 имеют компактные радиальные размеры - расточенное отверстие диаметром 20 см и аналогичную длину - по сравнению с плоской конструкцией, предусматривающей высверленные отверстия с плюсовыми метрическими допусками ограничивающих катушек 412, 414 и 416. Назначение зеркальных пробок 440 многозначно. (1) Катушки 432, 434, 436 и 444 плотно увязывают и направляют поверхности 455 магнитного потока и текущие к торцу струи 454 плазмы в отдаленные камеры 310 диверторов. Это подразумевает, что выпускаемые частицы достигают диверторов 300 надлежащим образом, что имеются поверхности 455 непрерывного потока, которые следуют из области 452 линий открытого поля центральной КОП 450 на всем пути к диверторам. (2) Физические сужения 442 в системе 10 КОП, через которые упомянутые катушки 432, 434, 436 и 444 дают возможность проходить поверхностям 452 магнитного потока и струям 454 плазмы, затрудняют течение нейтрального газа из плазменных пушек 350, которые сидят в диверторах 300. Подобным же образом сужения 442 предотвращают обратное течение газа от формирующих секций 200 к диверторам 300, тем самым уменьшая количество нейтральных частиц, которые приходится вводить во всю систему 10 КОП в начале запуска КОП. (3) Строго осевые зеркала, образуемые катушками 432, 434, 436 и 444, уменьшают осевые потери частиц и тем самым снижают способность частиц к параллельной диффузии по силовым линиям открытого поля.

### Осевые плазменные пушки

Потоки плазмы из пушек 350, установленных в камерах 310 диверторов, принадлежащих диверторам 300, предназначены для улучшения рабочих характеристик устойчивости и пучков нейтральных частиц. Пушки 350 установлены по оси внутри камер 310 диверторов 300, как проиллюстрировано на фиг. 3 и 10, и создают плазму, текущую вдоль линий 452 открытого поля в диверторе 300 и по направлению к центру камеры 100 удержания. Пушки 350 работают при высокоплотном газовом разряде в канале из пакета шайб и предназначены для генерирования нескольких тысяч ампер полностью ионизированной плазмы в течение 5-10 мс. Пушки 350 включают в себя импульсную магнитную катушку, которая согласует выходной поток плазмы с желаемыми размерами плазмы в камере 100 удержания. Технические параметры пушек 350 характеризуются каналом, имеющим внешний диаметр 5-13 см и внутренний диаметр до 10 см, и обеспечивают разрядный ток 10-15 кА при 400-600 В посредством внутреннего магнитного поля пушки, имеющего индукцию в диапазоне от 0,5 до 2,3 Т.

Потоки плазмы из пушек могут пронизывать магнитные поля зеркальных пробок 440 и течь в формирующую секцию 200 и камеру 100 удержания. Эффективность переноса плазмы через зеркальные пробки 440 увеличивается с уменьшением расстояния между пушками 350 и пробками 440, а также с расширением и укорочением пробок 440. В приемлемых условиях каждая из пушек 350 может поставлять приблизительно  $10^{22}$  протонов в секунду через зеркальные пробки 440 с индуктивностью 2-4 Т при высоких температурах ионов и электронов, составляющих примерно 150-300 эВ и примерно 40-50 эВ соответственно. Пушки 350 обеспечивают значительное пополнение граничного слоя 456 КОП и улучшенное общее удержание частиц посредством КОП.

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

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

### Смещающие электроды

Электрическое смещение поверхностей открытого поля может обеспечить радиальные потенциалы, которые приводят к азимутальному движению,  $E \times B$ , обеспечивающему механизм управления, аналогичный повороту рукоятки, для управления вращением линейной плазмы открытого поля, а также фактической активной зоной 450 КОП посредством разрыва скорости. Чтобы достичь этого управления, в системе 10 КОП применяются различные электроды, стратегически размещенные в различных частях машины. На фиг. 3 иллюстрируются электроды смещения, расположенные в предпочтительных местах в пределах системы 10 КОП.

В принципе, существуют 4 класса электродов: (1) точечные электроды 905 в камере 100 удержания, которые вступают в контакт с конкретными силовыми линиями 452 открытого поля на границе КОП 450, обеспечивая локальную зарядку; (2) кольцевые электроды 900 между камерой 100 удержания и формирующими секциями 200, предназначенные для азимутально-симметричной зарядки удаленных от границы слоев 456 потока; (3) пакеты концентрических электродов 910 в диверторах 300 для зарядки многочисленных концентрических слоев 455 потока (вследствие чего выбором слоев можно управлять посредством регулирования катушек 416 с целью отрегулировать магнитное поле диверторов таким образом, чтобы завершать желаемые слои 456 потока на должных электродах 910); и, наконец, (4) аноды 920 (см. фиг. 10) самих плазменных пушек 350 (которые перехватывают внутренние поверхности 455 открытого поля около сепаратрисы КОП 450). На фиг. 10 и 11 показаны некоторые типичные конструкции некоторых электродов.

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

### Неподдерживаемая работа системы КОП - обычный режим

Стандартное формирование плазмы в системе 10 КОП следует развитому методу  $\theta$ -пинча с обращенным полем. Типичный процесс запуска КОП начинается возбуждением катушек 412, 414, 416, 420, 432, 434 и 436 квазипостоянного тока для работы в установившемся состоянии. Затем цепи импульсной мощности формирующих систем 210 импульсного питания, предназначенные для создания высокочастотной термической плазмы (ВЧТП), возбуждают катушки 232 возбуждения импульсного быстро вращаемого магнитного поля, создавая временное обратимое смещение примерно -0,05 Т в формирующих секциях 200. В этот момент в два формирующих объема, ограниченных камерами 240 в форме кварцевых труб (северной и южной) формирующих секций 200, инжектируют заранее определенное количество нейтрального газа при давлении 62-138 кПа (9-20 фунтов-сил на кв.дюйм) через множество азимутально-



ориентированных продувочных клапанов во фланцах, находящихся на внешних торцах формирующих секций 200. Затем из набора антенн на поверхности кварцевых труб 240 генерируют поле на малых высоких частотах (составляющих ~ сотни килогерц), создавая предпредварительную ионизацию в форме областей локальной начальной ионизации в пределах столбов нейтрального газа. За этим следует применение  $\theta$ -кольцевой модуляции к току, возбуждающему катушки 232 возбуждения импульсного быстрообращаемого магнитного поля, что приводит к более общей предварительной ионизации столбов газа. В заключение, запитывают основные импульсные источники питания формирующих систем 210 импульсного питания для возбуждения катушек 232 возбуждения импульсного быстрообращаемого магнитного поля, создавая поле с прямым смещением и индуктивностью до 0,4 Т. Этот этап можно проводить в такой последовательности во времени, что по всей длине кварцевых труб 240 равномерно генерируется поле с прямым смещением (статическое формирование) или достигается последовательная перистальтическая модуляция поля вдоль оси формирующих трубок 240 (динамическое формирование).

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

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

#### **Экспериментальные данные неподдерживаемой работы - обычный режим**

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

Данные, полученные в результате неподдерживаемого разряда, системы 10 КОП показаны как функции времени на фиг. 13. КОП инициируется в момент  $t=0$ . Радиус исключаемого потока в средней вдоль оси плоскости машины показан на фиг. 13(a). Эти данные получены из матрицы магнитных зондов, которые размещены чуть-чуть изнутри стенки, выполненной из нержавеющей стали, камеры удержания и измеряют осевое магнитное поле. Стальная стенка является хорошим средством сохранения потока во временных рамках разряда.

На фиг. 13(b) показаны линейно-интегральные плотности, полученные из работающего по б хордам интерферометра для определения содержания  $\text{CO}_2$ , расположенного в месте, соответствующем  $z=0$ . С учетом вертикального перемещения ( $y$ ) КОП, измеряемого посредством болометрической томографии, инверсия по Абелю дает профили распределения плотности согласно фиг. 13(c). После некоторого осевого и радиального колебания в течение первой 0,1 мс, устанавливается КОП с некоторым "полым" профилем плотности. Этот профиль является достаточно плоским, с существенной плотностью на оси, как требуют равновесия в типичных плоских КОП.

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

Анализ всего массива данных исключаемого потока указывает на то, что форма сепаратрисы КОП (приближаемая осевыми профилями) постепенно эволюционирует от круговой к эллиптической. Эта эволюция, показанная на фиг. 14, согласуется с постепенным магнитным пере замыканием с переходом

от двух КОП к одной-единственной. В самом деле, грубые оценки позволяют предположить, что в этом конкретном случае во время столкновения перезамыкаются примерно 10% магнитных потоков двух первоначальных КОП.

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

#### **Поддерживаемая работа - РВКОП**

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

#### **Пучки нейтральных частиц**

Сначала быстрые нейтральные частицы (Н) в виде пучков инжектируются из восьми инжекторов 600 пучков нейтральных частиц перпендикулярно  $B_z$ . Пучки быстрых нейтральных частиц инжектируются с момента объединения северной и южной формируемых КОП в камере 100 удержания в одну КОП 450. Быстрые ионы, создаваемые главным образом посредством обмена зарядами, имеют бетатронные орбиты (с первичными радиусами в рамках топологии КОП или, по меньшей мере, значительно превышающими характеристический линейный масштаб градиента магнитного поля), которые способствуют азимутальному току КОП 450. После прохождения некоторой доли разряда (через 0,5-0,8 мс на снимок), достаточно большая популяция быстрых ионов значительно улучшает свойства внутренней устойчивости и удержания КОП (см., например, M.W. Binderbauer и N. Rostoker, Plasma Phys. 56, part 3, 451 (1996)). Кроме того, из перспективы поддержки вытекает, что пучки из инжекторов 600 пучков нейтральных частиц тоже являются первичными средствами возбуждения тока и нагревают плазму КОП.

В режиме плазмы системы 10 КОП быстрые ионы замедляются в первую очередь на электронах плазмы. В течение ранней части разряда типичные усредненные по орбитам времена замедления быстрых ионов составляют 0,3-0,5 мс, что приводит к значительному нагреву КОП, в первую очередь - электронами. Быстрые ионы совершают большие радиальные экскурсы наружу от сепаратрисы, потому что внутреннее магнитное поле КОП по своей природе имеет малую индукцию (в среднем, примерно 0,03 Т для внешнего осевого поля с индукцией 0,1 Т). Быстрые ионы были бы подвержены потерям при обмене зарядами, если бы плотность нейтрального газа снаружи от сепаратрисы была слишком большой. Поэтому геттерирование стенкой и другие методы (такие как предусматривающие использование плазменной пушки 350 и зеркальных пробок 440, которые, помимо всего прочего, вносят вклад в контроль газа), используемые в системе 10 КОП, демонстрируют тенденцию к минимизации граничных нейтральных частиц и обеспечивают требуемое нарастание тока, обуславливаемого быстрыми ионами.

#### **Инъекция таблеток**

Когда в пределах КОП 450 вырастает значительная популяция быстрых ионов, и при этом температуры электронов являются повышенными, а времена жизни КОП - увеличенными, в КОП 450 инжектируют замороженные таблетки Н или D из инжектора 700 таблеток, чтобы поддержать общее количество частиц в КОП, требуемое для КОП 450. Предполагаемые временные интервалы уноса являются достаточно короткими, чтобы обеспечить источник значительного количества частиц для КОП. Скорость этого уноса также можно увеличивать за счет увеличения площади поверхности инжектируемого кусочка путем разламывания отдельной таблетки на меньшие фрагменты, когда они находятся в стволах или инжекционных трубах инжектора 700 таблеток и до того, как они попадают в камеру 100 удержания - этап, который можно воплотить путем увеличения трения между таблеткой и стенками инжекционной трубы за счет уменьшения радиуса изгиба последнего сегмента инжекционной трубы непосредственно перед входом в камеру 100 удержания. Путем изменения последовательности и скорости стрельбы из 12 стволов (инжекционных трубок), а также фрагментации, можно настроить систему 700 инъекции таблеток на обеспечение как раз желаемого уровня поддержки общего количества частиц. В свою очередь, это способствует сохранению внутреннего кинетического давления в КОП 450, а также поддерживаемой работы и времени жизни КОП 450.

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

### Отклоняющие катушки

Чтобы достичь возбуждения тока в установившемся состоянии и сохранить требуемый ионный ток, желательно предотвращать или значительно уменьшать направленные вверх спины электронов, обуславливаемые силой трения между электронами и ионами (являющейся результатом переноса количества движения, возникающего при столкновении ионов и электронов). В системе 10 КОП используется новый метод обеспечения разрыва в распределении электронов посредством прикладываемого извне статического магнитного дипольного или квадрупольного поля. Это достигается посредством внешних отклоняющих катушек, изображенных на фиг. 15. Радиальное магнитное поле, поперечно прикладываемое из отклоняющих катушек 460, индуцирует осевое электрическое поле во вращающейся плазме КОП. Результирующий осевой электронный ток взаимодействует с радиальным магнитным полем, создавая азимутальную разрывную силу  $F_e = -\sigma_{ve} \theta |B_r|^2$ , воздействующую на электроны. Чтобы обеспечить адекватный разрыв в распределении электронов для типичных условий в системе 10 КОП, требуемое прикладываемое магнитное дипольное (или квадрупольное) поле внутри плазмы должно иметь индуктивность лишь порядка 0,001 Т. Соответствующее внешнее магнитное поле с индуктивностью примерно 0,015 Т является достаточно слабым, чтобы не вызывать ощутимые потери быстрых частиц или оказывать иное негативное влияние на удержание. Фактически, прикладываемое магнитное дипольное (или квадрупольное) поле вносит вклад в подавление неустойчивостей. В сочетании с тангенциальной инжекцией пучков нейтральных частиц и осевой инжекцией плазмы отклоняющие катушки 460 обеспечивают дополнительный уровень контроля в связи с сохранением тока и устойчивостью.

### Зеркальные пробки

Конструкция импульсных катушек 444 внутри зеркальных пробок 440 допускает локальное генерирование сильных магнитных полей (2-4 Т) с помощью небольшой емкостной энергии (примерно 100 кДж). Для формирования магнитных полей, типичных при рассматриваемой работе системы 10 КОП, все силовые линии поля в пределах объема формирования проходят сквозь сужения 442 у зеркальных пробок 440, как предполагается при наличии силовых линий магнитного поля, показанных на фиг. 2, и контакт плазмы со стенкой не происходит. Помимо этого, зеркальные пробки 440 совместно с магнитами 416 диверторов квазипостоянного тока можно отрегулировать так, чтобы направлять силовые линии поля на электроды 910 диверторов, или выравнивать силовые линии поля в (не показанной) конфигурации острых торцевых выступов. Последняя повышает устойчивость и подавляет параллельную теплопроводность электронов.

Сами зеркальные пробки 440 тоже вносят вклад в контроль нейтрального газа. Зеркальные пробки 440 обеспечивают лучшее использование газообразного дейтерия, продуваемого в кварцевые трубы во время формирования КОП, поскольку обратный поток газа в диверторы 300 значительно уменьшен благодаря малой способности пробок пропускать газ (столь мизерной, как 500 л/с). Большинство остаточного продуваемого газа внутри формирующих труб 210 быстро ионизируется. Кроме того, высокоплотная плазма, текущая сквозь зеркальные пробки 440, обеспечивает эффективную ионизацию нейтральных частиц, а значит и эффективный газовый барьер. В результате, большинство нейтральных частиц, рециркулируемых в диверторах 300 из граничного слоя 456 КОП, не возвращаются в камеру 100 удержания. Кроме того, нейтральные частицы, связанные с работой плазменных пушек 350 (рассматриваемой ниже), будут в большинстве своем заключаться в диверторы 300.

И, наконец, зеркальные пробки 440 склонны улучшать удержание граничного слоя КОП. При коэффициентах отражения зеркала (пробка/удерживающие магнитные поля) в диапазоне 20-40 и при отрезке 15 м между северной и южной зеркальными пробками 440, время  $\tau_1$  удержания частиц граничного слоя увеличивается на порядок величины. Увеличение  $\tau_1$  легко улучшает удержание частиц в КОП.

Предполагая, что обуславливаемые радиальной диффузией (D) потери частиц из ограничиваемого сепаратрисой объема 453 балансируются осевыми потерями ( $\tau_1$ ) из граничного слоя 456, получаем  $(2\pi r_s L_s) (Dn_s/\delta) = (D\pi r_s L_s \delta) (D_s/\tau_1)$ , откуда следует, что длину градиента плотности у сепаратрисы можно переписать в виде  $\delta = (D\tau_1)^{1/2}$ . Здесь  $r_s$ ,  $L_s$  и  $n_s$  - это радиус сепаратрисы, длина сепаратрисы и плотность у сепаратрисы соответственно. Время удержания частиц в КОП составляет  $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s) (Dn_s/\delta) = (\langle n \rangle / n_s) (\tau_1 \tau_1)^{1/2}]$ , где  $\tau_1 = a^2/D$  и при этом  $a = r_s/4$ . Физически увеличение  $\tau_1$  ведет к увеличенному  $\delta$  (уменьшенному градиенту плотности и параметру дрейфа у сепаратрисы), а значит и к уменьшенным потерям частиц в КОП. Общее увеличение параметра удержания частиц в КОП обычно несколько меньше, чем квадратичное, поскольку  $n_s$  увеличивается вместе с  $\tau_1$ .

Значительное увеличение  $\tau_1$  также требует, чтобы граничный слой 456 оставался по большому счету устойчивым (т.е. чтобы при  $n=1$  не было желобковой, рукавной или иной магнитогидродинамической неустойчивости, типичной для открытых систем). Использование плазменных пушек обеспечивает предпочтительную устойчивость на границе. В этом смысле зеркальные пробки 440 и плазменные пушки 350 образуют эффективную систему контроля границы.

### Плазменные пушки

Плазменные пушки 350 повышают устойчивость струй 454, выпускаемых из КОП, посредством линейного связывания. Плазмы, выпускаемые из плазменных пушек 350, образуются без привлечения ко-

личества азимутального углового движения, что показало себя полезным при контроле неустойчивостей вращения в КОП. А если так, то пушки 350 являются эффективным средством контроля устойчивости КОП при отсутствии необходимости устаревшего метода квадрупольной стабилизации. В результате, плазменные пушки 350 дают возможность получения преимуществ выгодных эффектов быстрых частиц или доступа к режиму усовершенствованной гибридной КОП, как подчеркивается в этом описании. Следовательно, плазменные пушки 350 позволяют эксплуатировать систему 10 КОП при токах отклоняющих катушек, подходящих как раз для разрыва в распределении электронов, но являющихся меньшими, чем те, которые вызывали бы неустойчивость КОП и/или приводили бы к интенсивной диффузии быстрых частиц.

Как упоминалось в рассмотренном выше разделе "Зеркальные пробки", если бы можно было значительно увеличить  $\tau_1$ , то подаваемая из пушек плазма была бы сопоставимой со скоростью ( $\sim 10^{22}/\text{с}$ ) потерь частиц в граничном слое. Время жизни получаемой из пушек плазмы в системе 10 КОП находится в миллисекундном диапазоне. В самом деле, рассмотрим плазму из пушек, имеющую плотность  $n_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и температуру ионов примерно 200 эВ, заключенную между торцовыми зеркальными пробками 440. Длина  $L$  захвата и коэффициент  $R$  отражения зеркала составляют примерно 15 м и 20 соответственно. Средняя длина свободного пробега ионов благодаря кулоновским столкновениям составляет  $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3 \text{ см}$ , а поскольку  $\lambda_{ii} \ln R / R < L$ , ионы находятся в газодинамическом режиме. Время удержания плазмы в этом режиме составляет  $\tau_{gd} \sim RL / 2V_s \sim 2 \text{ мс}$  где  $V_s$  - скорость ионного звука. Для сравнения классическое время удержания ионов для этих параметров плазмы составляло бы  $\tau_c \sim 0,5 \tau_1 (\ln R + (\ln R)^{0,5}) \sim 0,7 \text{ мс}$ . В принципе, аномальная поперечная диффузия может сократить время удержания плазмы. Вместе с тем, если предположить, что в системе 10 КОП имеет место бомбовая диффузия, то оценочное время поперечного удержания для плазмы из пушек составляет  $\tau_1 > \tau_{gd} \sim 2 \text{ мс}$ . Следовательно, пушки могли бы обеспечить значительное пополнение граничного слоя 456 КОП и улучшенное общее удержание частиц в КОП.

Помимо этого, потоки плазмы из пушек можно включать примерно на 150-200 мкс, что позволяет использовать их при запуске, поступательном перемещении и объединении КОП с попаданием в камеру 100 удержания. Если включение происходит примерно в момент  $t \sim 0$  (инициация основных источников питания КОП), то плазмы из пушек способствуют поддержанию КОП 450, полученной теперь после динамического формирования и объединения. Объединенные общие количества частиц, получаемые в результате формирования КОП и из пушек, являются удовлетворительными для захвата пучков нейтральных частиц, нагрева плазмы и длительной поддержки. Если включение происходит в момент  $t$  в диапазоне  $-1-0 \text{ мс}$ , то плазмы из пушек могут привести к заполнению кварцевых труб 210 плазмой или к ионизации газа, продуваемого в кварцевые трубы, тем самым допуская формирование КОП при уменьшенном или вообще нулевом объеме продуваемого газа. Последнее условие может потребовать достаточно холодной формирующей плазмы, чтобы обеспечить быструю диффузию магнитного поля с обратным смещением. Если включение происходит в момент  $t < -2 \text{ мс}$ , то потоки плазмы могут заполнить примерно  $1-3 \text{ м}^3$  линейного объема поля областей формирования и удержания формирующих секций 200 и камеру 100 удержания, с целевой плотностью в несколько единиц на  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ , достаточной для обеспечения создания пучков нейтральных частиц до прибытия в КОП. После этого КОП, подлежащие формированию, можно формировать и поступательно перемещать в результирующую плазму емкости для удержания. Таким образом, плазменные пушки 350 обеспечивают большое разнообразие рабочих условий и режимов настройки параметров.

#### Электрическое смещение

Контроль радиального профиля электрического поля в граничном слое 456 различными способами выгоден для устойчивости КОП и удержания в ней. Посредством новых, обеспечивающих смещение компонентов, развернутых в системе 10 КОП, можно прикладывать множество заблаговременно подготовленных распределений электрических потенциалов к группе открытых поверхностей потока по всей машине из областей далеко снаружи от центральной области удержания в камере 100 удержания. Таким образом, можно генерировать радиальные электрические поля через граничный слой 456 в непосредственной близости к КОП 450. Потом эти радиальные электрические поля модифицируют азимутальное вращение граничного слоя 456 и осуществляют его удержание посредством разрыва скорости,  $E \times V$ . Любое дифференциальное вращение между граничным слоем 456 и активной зоной 453 КОП можно затем передать вовнутрь плазмы КОП за счет разрыва. В результате, контроль граничного слоя 456 оказывает непосредственное влияние на активную зону 453 КОП.

Кроме того, поскольку свободная энергия при вращении плазмы также может являться причиной неустойчивостей, этот метод обеспечивает прямое средство борьбы с зарождением и ростом неустойчивостей. Подходящее граничное смещение в системе 10 КОП обеспечивает эффективный контроль переноса и вращения силовых линий открытого поля, а также вращения активной зоны КОП. Местонахождение и форма различных предусматриваемых электродов 900, 905, 910 и 920 обеспечивают контроль разных групп поверхностей 455 потока, а также контроль при разных и независимых потенциалах. Таким образом, можно реализовать широкий спектр разных конфигураций электрических полей и напряженно-

стей, каждый раз с отличающимся характеристическим воздействием на рабочие параметры плазмы.

Ключевое преимущество всех этих новых методов смещения состоит в том, что на поведение плазмы в активной зоне и на границе можно повлиять из мест, находящихся далеко снаружи от плазмы КОП, т.е. нет необходимости введения каких-либо физических компонентов в контакт с центральной горячей плазмой (что имело бы серьезные последствия для потерь энергии, потока и частиц). Это оказывает основополагающее выгодное воздействие на рабочие характеристики и все потенциальные приложения идеи ВРКОП.

#### Экспериментальные данные - работа в ВРКОП

Инжекция быстрых частиц посредством пучков из пушек 600, испускающих пучки нейтральных частиц, играет важную роль в обеспечении ВРКОП. Фиг. 16 иллюстрирует этот факт. Изображен набор кривых, показывающих, как время жизни КОП коррелируется с длительностью импульсов пучков. Все другие рабочие условия поддерживаются неизменными для всех разрядов, охватываемых этим исследованием. Данные усредняются по многим снимкам и поэтому отображают типичное поведение. Совершенно очевидно, что увеличенная длительность пучков дает "дольше живущие" КОП. Уделение внимания этой очевидности, а также другим результатам диагностики в течение этого исследования, выявляет, что пучки увеличивают устойчивость и уменьшают потери. Корреляция между длительностью импульсов пучков и временем жизни КОП не является совершенной, поскольку захват пучков становится неэффективным, когда размеры плазмы меньше определенных, т.е. когда физические размеры КОП 450 сокращаются и не все инжектируемые пучки перехватываются и захватываются. Сокращение размеров КОП происходит в первую очередь из-за того, что чистые потери энергии (~4 МВт) из плазмы КОП во время разряда несколько больше, чем общая мощность, подводимая в КОП посредством пучков нейтральных частиц (~2,5 МВт) для конкретного экспериментального запуска. Расположение пучков в месте, находящемся ближе к средней плоскости емкости 100, может привести к тенденции уменьшения этих потерь и продления времени жизни КОП.

Фиг. 17 иллюстрирует воздействия разных компонентов на достижение ВРКОП. Здесь показано семейство типичных кривых, отображающих время жизни КОП 450 как функцию времени. Во всех случаях предусматривается инжекция постоянной, небольшой по величине мощности пучков (примерно 2,5 МВт) на протяжении всей длительности каждого разряда. Каждая кривая является представительной для отличающейся комбинации компонентов. Например, работа системы 10 КОП без каких-либо зеркальных пробок 440, плазменных пушек 350 или геттерирования геттерирующими системами 800 приводит к быстрому появлению неустойчивости вращения и утрате топологии КОП. Введение только зеркальных пробок 440 задерживает появление неустойчивостей и улучшает удержание. Использование совокупности зеркальных пробок 440 и плазменной пушки 350 дополнительно уменьшает неустойчивости и увеличивает время жизни КОП. И, наконец, введение геттерирования (Г<sub>1</sub> в этом случае) вдобавок к пушке 350 и пробкам 440 дает наилучшие результаты: в получаемой КОП нет неустойчивостей, и она демонстрирует самое продолжительное время жизни. Из этой экспериментальной демонстрации ясно, что вся совокупность компонентов дает наилучший эффект и обеспечивает пучки с наилучшими расчетными условиями.

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

затраты на эксплуатацию и сооружение, а также пониженная техническая сложность.

Для дальнейшего сравнения, данные представительного разряда в ВРКОП в системе 10 КОП показаны на фиг. 18 как функция времени. На фиг. 18(a) изображен радиус исключаемого потока в средней плоскости. Для этих раздвинутых временных рамок проводящая стальная стенка больше не является хорошим средством сохранения потока, а магнитные зонды изнутри от стенки дополнены зондами снаружи от стенки для надлежащего учета магнитной диффузии потока сквозь сталь. По сравнению с типичными рабочими параметрами в обычном режиме, ОР, показанными на фиг. 13, режим работы, соответствующий ВРКОП, демонстрирует время жизни, увеличенное более чем на 400%.

На фиг. 18(b) показан представительный график следа линейно-интегральной плотности с его инвертированным по Абелю дополнением, а на фиг. 18(c) - профили плотности. По сравнению с обычным режимом КОП-ОРКОП, показанном на фиг. 13, плазма оказывается статичнее на всем протяжении импульса, что свидетельствует о весьма устойчивой работе. Пиковая плотность на снимках ВРКОП также немного ниже - это следствие большей (с коэффициентом увеличения до 2) полной температуры плазмы, как показано на фиг. 18(d).

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

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

Хотя изобретение допускает различные модификации и альтернативные формы, лишь конкретные его примеры показаны на чертежах и подробно описаны выше. Вместе с тем, следует понять, что изобретение не ограничивается раскрытыми конкретными формами или способами; наоборот, изобретение следует считать охватывающим все модификации, эквиваленты и альтернативы, находящиеся в рамках существа и объема притязаний прилагаемой формулы изобретения.

В вышеизложенном описании конкретная совокупность признаков приводится лишь в целях пояснения, обеспечивающего полное понимание данного изобретения. Вместе с тем, специалист в данной области техники поймет, что эти конкретные подробности не являются обязательными для воплощения данного изобретения на практике.

Различные признаки из представительных примеров и зависимых пунктов формулы изобретения можно объединять способами, не перечисляемыми конкретно и в явном виде, с целью обеспечения дополнительных полезных вариантов осуществления принципов данного изобретения. Также явно видно, что все диапазоны значений или указания групп объектов раскрывают каждое возможное промежуточное значение или каждый промежуточный объект с целью обычного описания, а также с целью ограничения заявляемого объекта изобретения.

Предложены системы и способы генерирования и поддержания КОП, работающих в ВРКОП. понятно, что варианты осуществления, описанные здесь, приведены с целью пояснения и не должны считаться ограничивающими объект изобретения. Для специалиста в данной области техники будут очевидны различные модификации, приложения, замены, комбинации, усовершенствования, способы получения, находящиеся в рамках объема притязаний или существа данного изобретения. Например, читатель должен понять, что конкретный порядок и совокупность технологических операций, описанные здесь, являются лишь иллюстративными, если не указано иное, а изобретение можно осуществить с использованием отличающихся или дополнительных технологических операций или другой совокупности либо порядка технологических операций. В качестве еще одного примера отметим, что каждый признак одного варианта осуществления можно сочетать и согласовывать с другими признаками, приведенными в других вариантах осуществления. При желании, можно также предусмотреть наличие признаков и процессов, известных обычным специалистам. Помимо этого, очевидно, что, при желании, признаки можно вносить или исключать.

Соответственно, изобретение не ограничивается ничем, кроме того, что изложено в прилагаемой формуле изобретения и ее эквивалентах.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ генерирования и поддержания магнитного поля с помощью конфигурации обращенного поля (КОП), содержащий этапы, на которых

генерируют магнитное поле с помощью магнитной системы (410), связанной с камерой (100) удержания, первой и второй диаметрально противоположными секциями (200), формирующими КОП и связанными с камерой удержания, и первым и вторым диверторами (300), связанными с первой и второй формирующими секциями, при этом магнитная система включает в себя множество катушек (432, 434, 436, 444) квазипостоянного тока, находящихся в осевых положениях вдоль камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первого и второго диверторов, первые и вторые наборы зеркальных катушек квазипостоянного тока, расположенных между торцами камеры удержания и первой и второй формирующими секциями, и первую и вторую зеркальные пробки (440), расположенные между первой и второй формирующими секциями и первым и вторым диверторами;

осуществляют геттерирование камеры удержания и первого и второго диверторов, используя слой геттерирующего материала из геттерирующей системы (800), связанной с камерой удержания и первым и вторым диверторами;

генерируют КОП в каждой из первой и второй формирующих секций и поступательно перемещают каждую КОП по направлению к средней плоскости камеры удержания, где эти КОП объединяются в единую КОП;

инжектируют пучки нейтральных атомов в единую КОП из множества инжекторов (600) пучков нейтральных атомов, связанных с камерой удержания и ориентированных перпендикулярно оси камеры удержания;

инжектируют плазму в единую КОП из первой и второй осевых плазменных пушек (350), функционально связанных с первым и вторым диверторами, первой и второй формирующими секциями и камерой удержания; и

осуществляют электрическое смещение поверхностей (455) открытого потока единой КОП, используя один или более смещающих электродов (900, 905, 910), расположенных внутри одного или более из камеры удержания, первой и второй формирующих секций и первого и второго диверторов.

2. Способ по п.1, в котором магнитная система дополнительно содержит две или более отклоняющие катушки (460), связанные с камерой удержания.

3. Способ по п.1, дополнительно содержащий этап, на котором инжектируют ионные таблетки в единую КОП из инжектора (700) ионных таблеток, связанного с камерой удержания.

4. Способ по п.1, в которой формирующая секция содержит модульные формирующие системы (210) для генерирования КОП и поступательного перемещения ее по направлению к средней плоскости камеры удержания.

5. Способ по п.1, в котором каждая из первой и второй зеркальных пробок содержит набор зеркальных катушек (432, 434, 436) между каждыми из первой и второй формирующими секциями и первого и второго диверторов.

6. Способ по п.5, в котором каждая из первой и второй зеркальных пробок дополнительно содержит набор зеркальных пробочных катушек (444), обвитых вокруг сужения (442) в канале между каждыми из первой и второй формирующими секциями и первого и второго диверторов.

7. Способ по п.6, в котором зеркальные пробочные катушки являются компактными импульсными зеркальными катушками.

8. Способ по любому из пп.1, 4-5 и 7, в котором первая и вторая формирующие секции содержат удлиненную трубу.

9. Способ по любому из пп.1, 4-5 и 7, в котором формирующие системы являются формирующими системами импульсного питания.

10. Способ по любому из пп.1, 4-5, 7-8, в котором этап генерирования и поступательного перемещения КОП включает в себя этап, на котором возбуждают набор катушек отдельных узлов из множества узлов (230) подвески, обвитых вокруг удлиненной трубы первой и второй формирующих секций, причем формирующие системы содержат множество блоков (220) питания и управления, связанных с отдельными узлами из множества узлов подвески.

11. Способ по п.10, в котором отдельные блоки из множества блоков питания и управления содержат систему (222) запуска и управления.

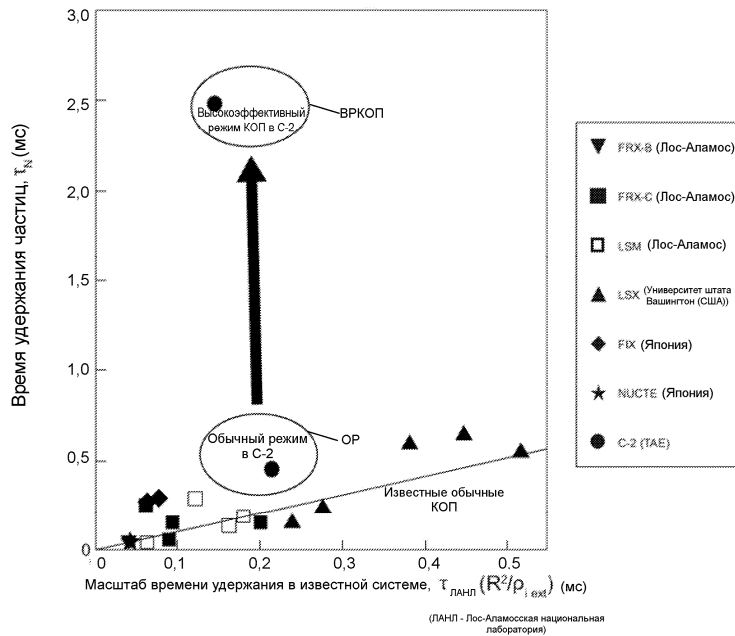
12. Способ по п.11, в котором системы запуска и управления отдельных блоков из множества блоков питания и управления выполнены с возможностью синхронизации для обеспечения статического формирования КОП, при котором формирование КОП происходит с последующей инъекцией, или динамического формирования КОП, при котором формирование и поступательное перемещение КОП происходят одновременно.

13. Способ по любому из пп.1, 4-5 и 7, в котором множество инжекторов (600) пучков нейтральных атомов содержит один или более инжекторов пучков нейтральных атомов с источниками высокочастотной (ВЧ) плазмы и один или более инжекторов пучков нейтральных атомов с дуговыми источниками.

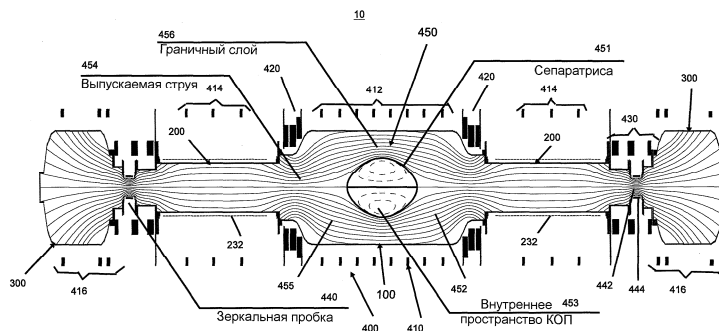
14. Способ по любому из пп.1, 4-5 и 7, в котором множество инжекторов пучков нейтральных атомов ориентировано так, что тракты инъекции оказываются тангенциальными по отношению к КОП, причем целевая зона захвата находится внутри сепаратрисы (451) КОП.

15. Способ по любому из пп.1, 4-5 и 7, в котором геттерирующая система содержит одну или более из системы (810) осаждения титана и системы (820) осаждения лития, которые покрывают обращенные к плазме поверхности камеры удержания и первого и второго диверторов.

16. Способ по любому из пп.1, 4-5 и 7, в котором смещающие электроды включают в себя один или более из одного или более точечных электродов, расположенных внутри камеры удержания для обеспечения контакта с силовыми линиями открытого поля, набора кольцевых электродов между камерой удержания и первой и второй формирующими секциями для азимутально-симметричной зарядки удаленных от границы слоев потока, множества концентрических уложенных в пакет электродов, расположенных в первом и втором диверторах для зарядки множества концентрических слоев потока, и анодов плазменных пушек для перехвата открытого потока (452).

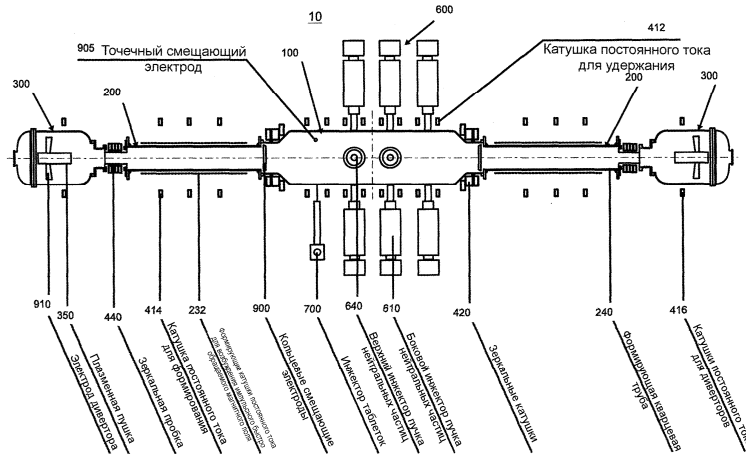


Фиг. 1

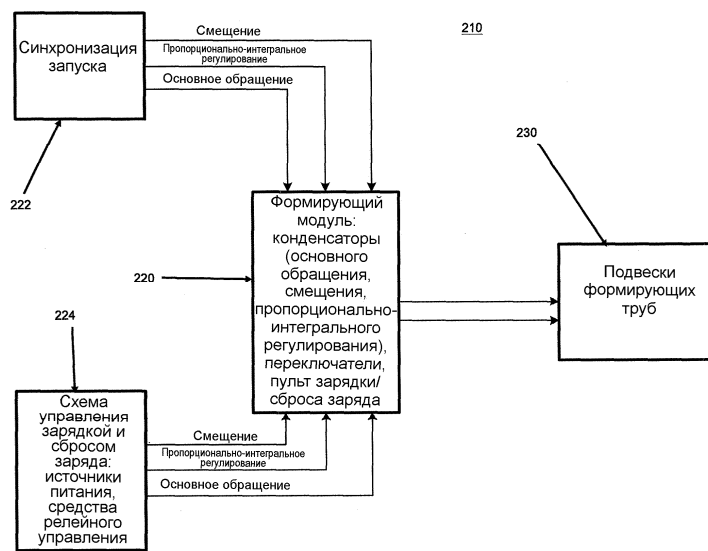


Фиг. 2

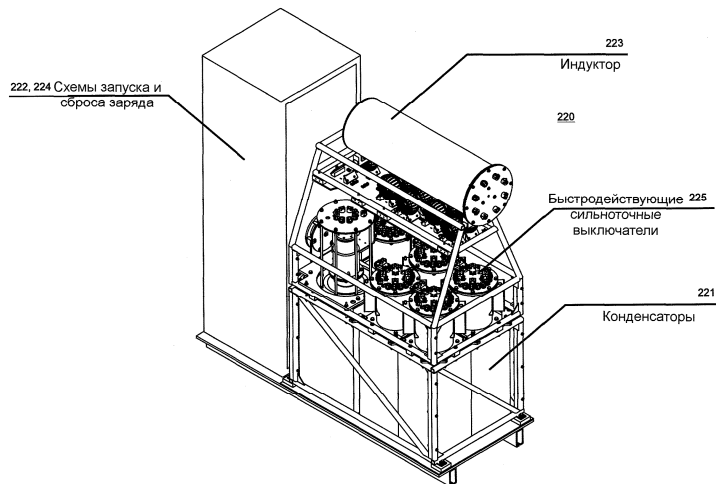




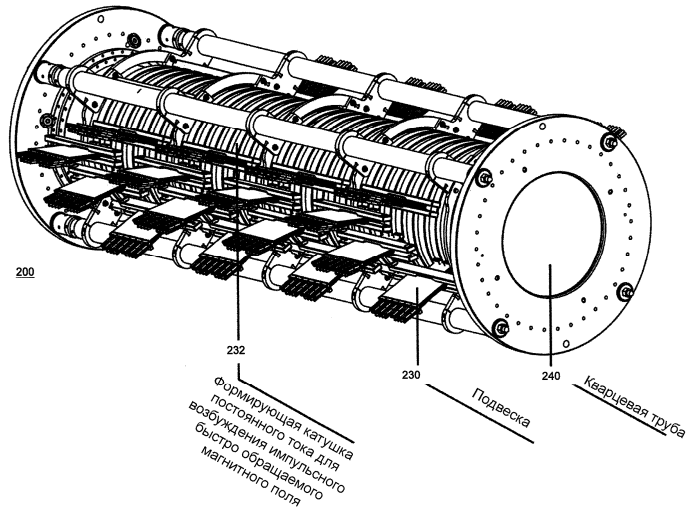
Фиг. 3



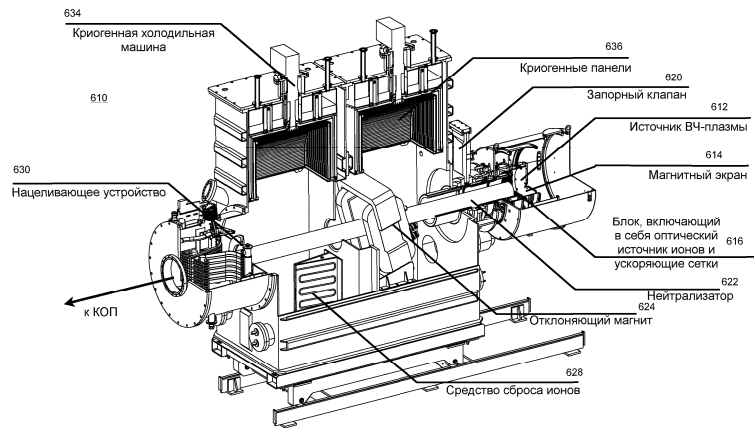
Фиг. 4



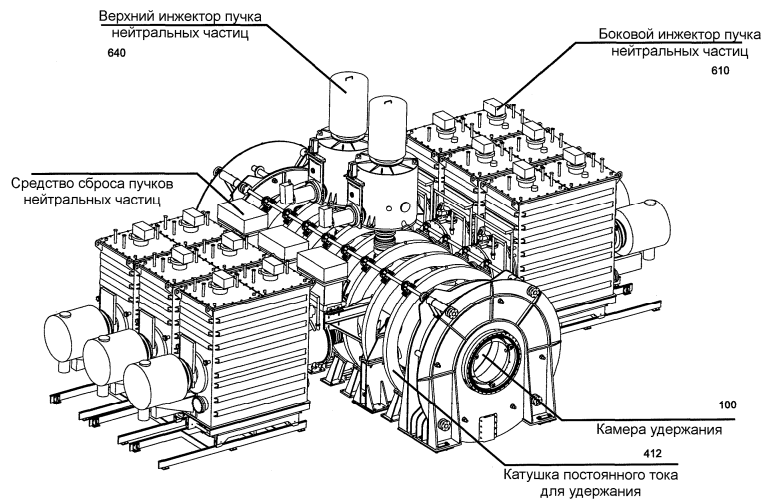
Фиг. 5



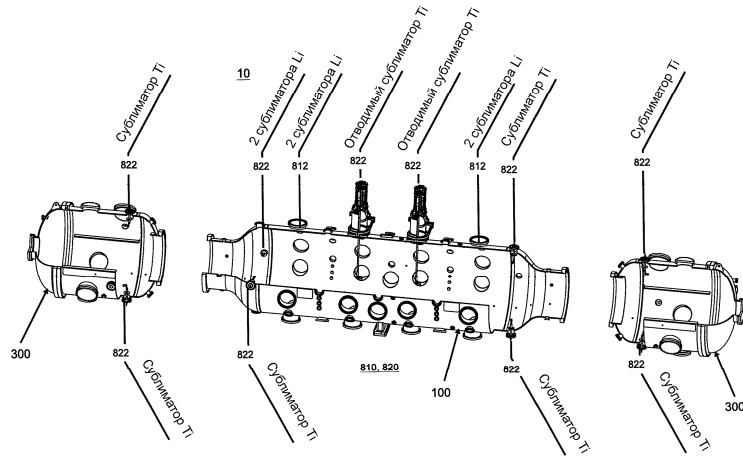
Фиг. 6



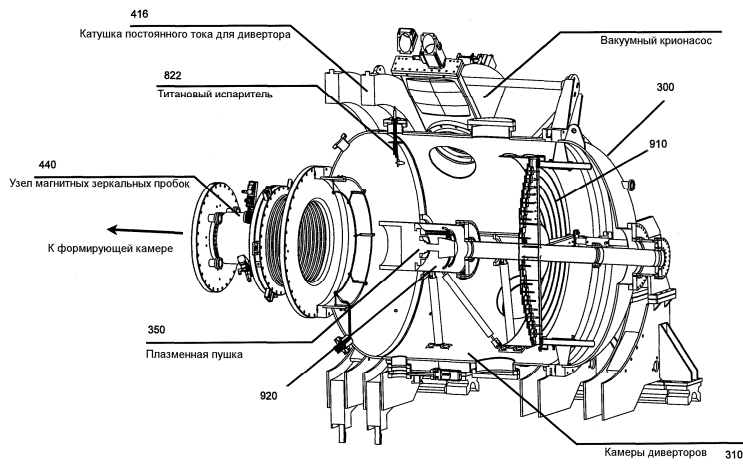
Фиг. 7



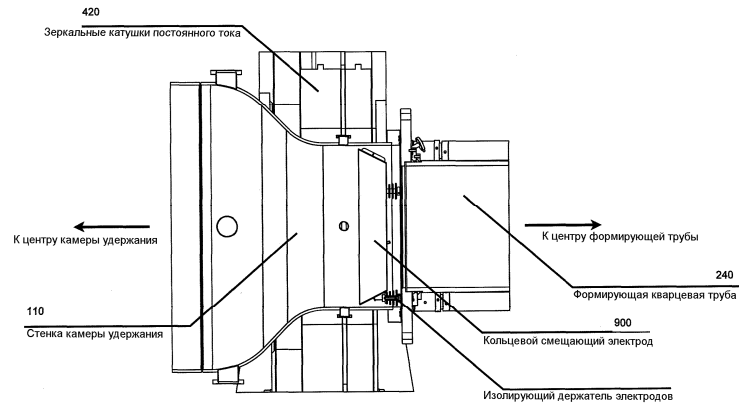
Фиг. 8



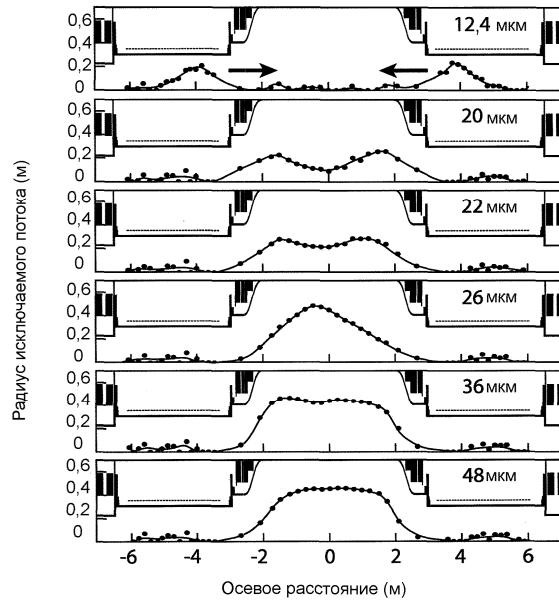
Фиг. 9



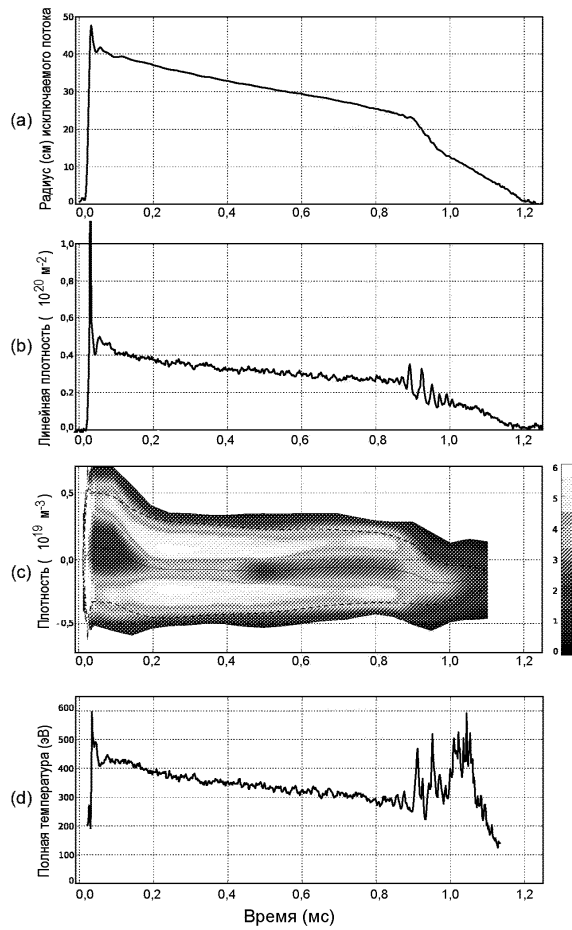
Фиг. 10



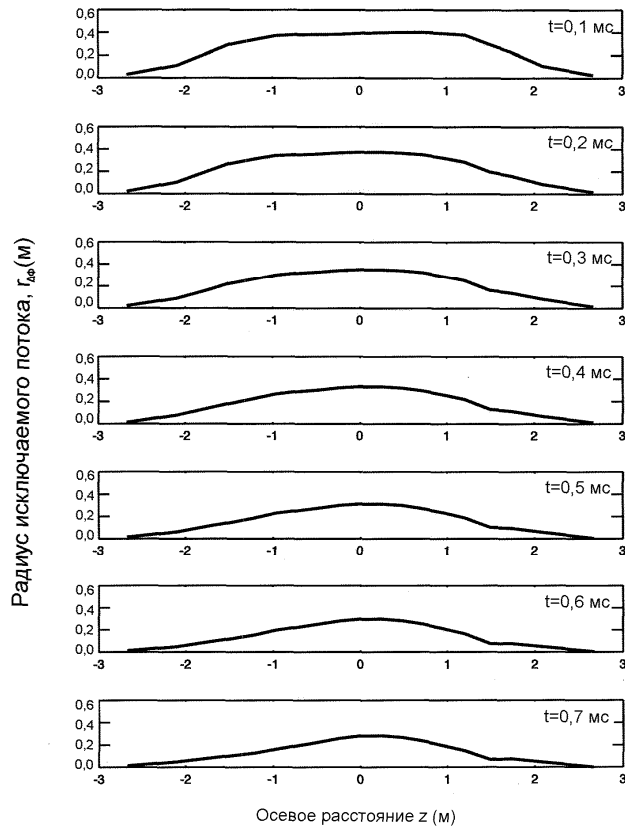
Фиг. 11



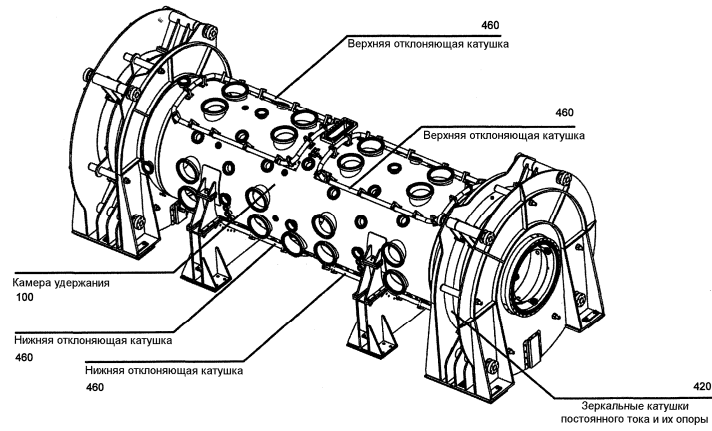
Фиг. 12



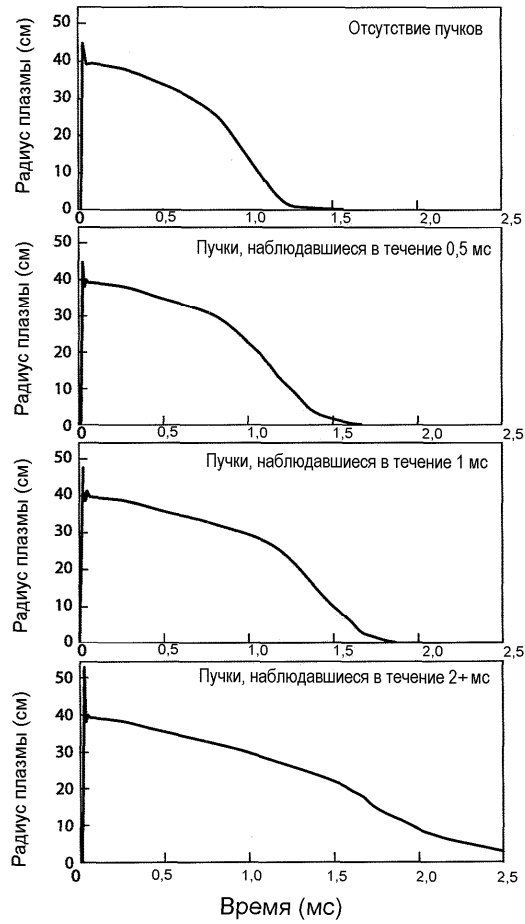
Фиг. 13



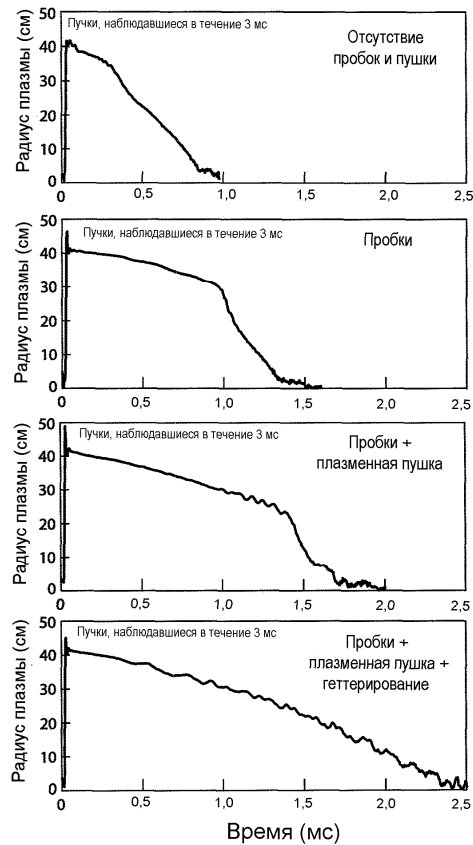
Фиг. 14



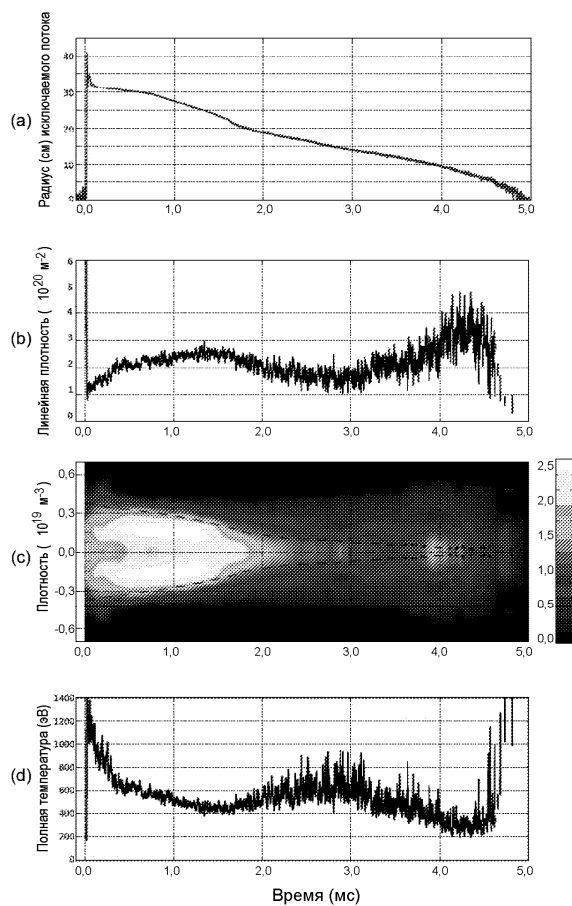
Фиг. 15



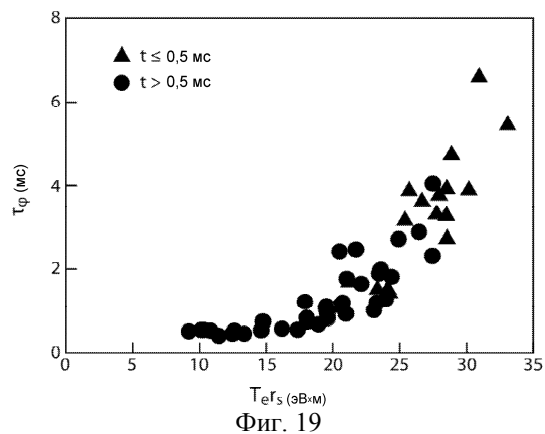
Время (мс)  
Фиг. 16



Время (мс)  
Фиг. 17



Фиг. 18



Фиг. 19

