

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202392785 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2024.02.19

(51) Int. Cl. G21B 1/05 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки  
2022.05.27

(54) ЭЛЕКТРОДНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ДЛЯ ПРОДЛЕННОГО УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ

(31) 63/194,866; 63/194,877

(72) Изобретатель:

(32) 2021.05.28

Мейер Эрик, Нельсон Брайан А.,  
Шумлак Юри (US)

(33) US

(86) PCT/US2022/031388

(74) Представитель:

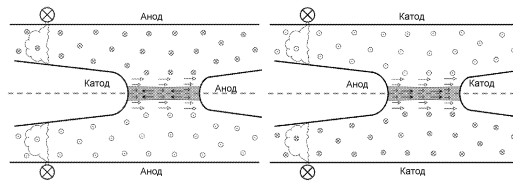
(87) WO 2022/260879 2022.12.15

Билык А.В., Поликарпов А.В.,  
Соколова М.В., Путинцев А.И.,  
Черкас Д.А., Игнатъев А.В., Дмитриев  
А.В., Бельтюкова М.В. (RU)

(88) 2023.03.16

(71) Заявитель:  
ЗЭП ЭНЕРДЖИ, ИНК. (US)

(57) Предложены способы и системы для удержания плазмы с использованием различных конфигураций электродов и клапанов. В одном примере устройство содержит первый электрод, расположенный с определением внешней границы объема ускорения, второй электрод, установленный соосно с первым электродом и расположенный с определением внутренней границы объема ускорения, по меньшей мере один источник питания для возбуждения электрического тока вдоль плазменного столба Z-пинча между первым и вторым электродами и набор клапанов для обеспечения газа в объем ускорения для питания плазменного столба Z-пинча, причем поток электронов указанного электрического тока проходит в первом направлении от второго электрода к первому электроду. В дополнительных или альтернативных примерах формовочная часть соединена с возможностью обеспечения проводимости со вторым электродом для вызывания в присутствии газа газового пробоя указанного газа для создания профиля скорости сдвигового потока.



A1

202392785

202392785

A1

## **ЭЛЕКТРОДНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ДЛЯ ПРОДЛЕННОГО УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ**

### **ПЕРЕКРЕСТНАЯ ССЫЛКА НА РОДСТВЕННЫЕ ЗАЯВКИ**

[1] Настоящая заявка испрашивает приоритет по каждой из предварительной заявки на патент США No 63/194866 под названием «УСТРОЙСТВО И СПОСОБ ПРОДЛЕННОГО УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ» от 28 мая 2021 г. и предварительной заявки на патент США No 63/194877 под названием «ЭЛЕКТРОДНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ДЛЯ ПРОДЛЕННОГО УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ» от 28 мая 2021 г. Для всех целей полное содержание каждой из вышеуказанных заявок настоящим включено посредством ссылки.

### **ЗАЯВЛЕНИЕ О ФИНАНСИРУЕМЫХ ГОСУДАРСТВОМ ИССЛЕДОВАНИЯХ ИЛИ РАЗРАБОТКАХ**

[2] Настоящее изобретение по меньшей мере частично было осуществлено при государственной поддержке в рамках грантов No DE-AR001010 и DE-AR001260, присужденных Министерством энергетики США. Государство имеет определенные права на настоящее изобретение.

### **УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ**

[3] Если в настоящем документе не указано иное, описание, раскрытое в этом разделе, не считается предшествующим уровнем техники для формулы изобретения в данной заявке и не признается предшествующим уровнем техники путем включения в этот раздел.

[4] Термоядерный синтез представляет собой процесс объединения двух ядер. При синтезе двух ядер элементов с атомными числами менее 26 [то есть, с меньшим атомным числом, чем железо (Fe)] энергия высвобождается. Высвобождение энергии происходит вследствие небольшой разности в массе между реагирующими веществами и продуктами реакции синтеза (например, в высокотемпературных термоядерных реакторах), что определяется выражением  $E = mc^2$ .

[5] Термоядерный синтез в перспективе предполагает эффективно безграничную энергию с более управляемыми отходами, чем некоторые существующие источники энергии.

[6] Управляемый термоядерный синтез в термоядерной плазме при плазменных реакциях, сохраняющихся в течение длительных периодов времени, может быть затруднен вследствие быстро растущих неустойчивостей плазмы. Разумный подход к такому управляемому термоядерному синтезу (также обозначенному ниже как «управляемый синтез» или просто

«синтез», как существительное или прилагательное, указывающее на признаки и/или свойства, относящиеся к термоядерному синтезу) продолжают применять посредством изучения различных подходов с удержанием плазмы. Такие подходы обеспечивают различные преимущества при различных уровнях научной зрелости.

### **КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ**

[7] Вышеуказанные и другие варианты осуществления, признаки и аспекты настоящего изобретения рассматриваются более подробно в отношении последующего описания вариантов осуществления, показанных на прилагаемых чертежах, на которых:

[8] на фиг. 1 проиллюстрированы результаты моделирования Z-пинча без скорости сдвигового потока в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[9] на фиг. 2 проиллюстрированы результаты моделирования Z-пинча, стабилизированного скоростью сдвигового потока в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[10] на фиг. 3 проиллюстрированы результаты моделирования Z-пинча, стабилизированного скоростью сдвигового потока в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[11] на фиг. 4 проиллюстрированы результаты моделирования Z-пинча, стабилизированного скоростью сдвигового потока в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[12] на фиг. 5 проиллюстрированы результаты интегрирования масс Z-пинча в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[13] на фиг. 6А показан изометрический вид устройства для создания и поддержания скорости азимутально симметричного сдвигового потока ионов в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[14] на фиг. 6В показан вид в поперечном сечении устройства, показанного на фиг. 6А;

[15] на фиг. 7 показана формовочная часть в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[16] на фиг. 8 схематически показан способ инициирования и возбуждения азимутально симметричного сдвигового потока для стабилизации разрядов Z-пинча в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[17] на фиг. 9 показано схематическое изображение, иллюстрирующее устройство для создания и поддержания скорости азимутально симметричного сдвигового потока ионов в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[18] на фиг. 10A-10F схематически показан процесс инициирования и возбуждения азимутально симметричного сдвигового потока для стабилизации разрядов Z-пинча для различных конфигураций анод/катод в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[19] на фиг. 11 проиллюстрированы нормированные радиальные профили плотности и температуры магнитного поля в равновесии Беннета в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[20] на фиг. 12A показаны примерные изменения по времени в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[21] на фиг. 12B показаны примерные изменения по времени интегрированной радиальной ионной кинетической энергии, нормированной к начальной магнитной энергии, в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[22] на фиг. 13A показаны результаты для идеальной пятимоментной двухжидкостной модели (5M2F) в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[23] на фиг. 13B показаны примерные изменения по времени интегрированной радиальной ионной кинетической энергии, нормированной к начальной магнитной энергии, в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[24] на фиг. 14 показаны результаты для идеальной 5M2F с несколькими возмущенными волновыми числами в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[25] на фиг. 15 показаны структуры моды идеальной 5M2F в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[26] на фиг. 16A показаны результаты для идеальной 5M2F со стабилизацией линейным потоком в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[27] на фиг. 16B показаны результаты для идеальной 5M2F со стабилизацией параболическим сдвиговым потоком в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[28] на фиг. 17 показаны структуры моды в идеальном моделировании 5M2F со сдвиговым потоком в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[29] на фиг. 18A-18D показано поведение роста моды в модели 5M2F с начальным фазовым сдвигом в возмущении и без него в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[30] на фиг. 19 показаны значения коэффициента диффузии импульса в FuZE-подобном равновесии в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[31] на фиг. 20 показаны скорректированные и не скорректированные коэффициенты температуропроводности ионов в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[32] на фиг. 21 показаны скорости роста неустойчивости в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[33] на фиг. 22 показаны скорости роста неустойчивости в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[34] на фиг. 23 показаны профили плотности ионов для нелинейного моделирования, начиная с FuZE-подобного равновесия, в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления; и

[35] на фиг. 24 показаны нормированные запасы ионов и тепловая энергия в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления.

### **ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ**

[36] Варианты осуществления настоящего изобретения могут быть лучше понятны со ссылкой на следующие описания, которые следует читать в сочетании с прилагаемыми чертежами конкретных иллюстративных вариантов осуществления. Это описание проиллюстрированного варианта осуществления, изложенное ниже для обеспечения возможности создания и использования реализации настоящего изобретения, не предназначено для ограничения настоящего изобретения, а для того, чтобы служить в качестве его конкретного примера. Специалистам в данной области техники следует понимать, что они могут легко использовать концепцию и конкретные варианты осуществления, раскрытые в качестве основы, для модификации или разработки других способов и систем для осуществления тех же целей настоящего изобретения. Специалистам в данной области техники также следует понимать, что такие эквивалентные узлы не отклоняются от сущности и объема настоящего изобретения в его наиболее широкой форме.

[37] В некоторых примерах типовые устройства и способы подачи питания, выполненные с возможностью образования и поддержания тока осевого Z-пинча, могут быть непригодны или полностью не способны создавать и поддерживать сдвиговый поток с достаточной осевой скоростью, используемый для стабилизации плазм Z-пинча. Соответственно, в данном документе описаны варианты осуществления устройств и процессов для создания и поддержания сдвигового потока с достаточной скоростью в переходной среде, связанной с граничными областями разрядов Z-пинча.

[38] Термоядерные устройства, основанные на Z-пинче [например, У. Шумлак, В. А. Нельсон, Е. Л. Клаво, Е. Дж. Форбс, Р. П. Голинго, М. С. Хьюджес, Р. Дж. Оберто, М. П. Росс и Т. Р. Вебер, «Увеличение параметров плазмы с использованием стабилизации сдвигового потока Z-пинча», *Физика Плазмы* **24**, 055702 (2017); «Шумлак '17»; включенные в данный документ посредством ссылки] могут быть привлекательными, поскольку они были бы геометрически простыми, по существу компактными и относительно недорогими. Некоторые более недавние публикации [например, У. Шумлак, «Синтез Z-пинча», *Журнал Прикладной физики* **127**, 200901 (2020); опубликовано в Интернете: 27 мая 2020 г.; «Шумлак '20»; также включенная посредством ссылки] дополнительно разрабатывают стабилизацию сдвиговым потоком (SFS, sheared-flow stabilization) для получения равновесного Z-пинча, который может поддерживать сжатое состояние плазмы в течение времени, значительно превышающего другие временные интервалы плазмы.

[39] Одна область оптимизации сдвигового потока относится к усиленному управлению подачей как нейтрального, так и ионизированного газа в вакуумируемый объем объема ускорения устройства Z-пинча. Пример уже существующего устройства можно найти на фиг. 3 публикации Шумлак '20, где проиллюстрирован схематический вид в поперечном сечении вакуумного сосуда экспериментального устройства термоядерного эксперимента Z-пинча (Fusion Z-pinch Experiment, FuZE) SFS Z-пинча. На фиг. 3 один внутренний газоструйный клапан расположен по существу в среднем осевом положении объема ускорения для обеспечения части выбранного нейтрального наполняющего газа через «внутренний электрод» (использование в настоящем документе термина «по существу» означает, что упомянутая характеристика, параметр, или значение не должны быть достигнуты точно, но что отклонения или вариации, включающие например, допуски, ошибку измерения, ограничения по точности измерения, и другие факторы, известные специалистам в данной области техники, могут возникать в количествах, которые не исключают эффекта, который, как предполагается, указанная характеристика должна обеспечивать). Дополнительные (внешние) газоструйные клапаны проиллюстрированы по существу в одинаковом осевом положении, радиально противоположном внутреннему газоструйному клапану, и расположены с возможностью обеспечения отдельной части наполняющего газа через отверстия во «внешнем электроде» экспериментального устройства FuZE SFS Z-пинча.

[40] Компоновка, проиллюстрированная на фиг. 3 публикации Шумлак '20, зависит от диффузии нейтрального газа из местоположений газоструйных клапанов в окружающие вакуумируемые объемы для создания по существу осесимметричных профилей плотности нейтрального газа, как правило, имеющих максимумы в осевом положении газоструйных

клапанов. Такие профили могут обеспечивать достаточно топливного газа для возбуждения скорости сдвигового потока в течение периода времени, соизмеримого с продолжительностью разрядов Z-пинча. После исчерпания запасов нейтрального газа (например, вследствие вынужденного истечения вокруг плазменного столба Z-пинча и/или диффузии газа в другие области замкнутого объема) ток Z-пинча может затухать вследствие неустойчивостей, даже если по меньшей мере часть энергии от высоковольтных источников питания все еще является доступной. В целях увеличения и улучшения профиля сдвигового потока, создаваемого путем впрыска нейтрального газа, можно совместно использовать впрыск предварительно ионизированного газа с использованием плазменных инжекторов, плазменных пушек или источников ионов.

[41] Соответственно, по меньшей мере в одном варианте осуществления один или более клапанов (например, один или более газоструйных клапанов и один или более плазменных инжекторов) могут быть соединены по текучей среде с подачей топливного газа и выполнены с возможностью направления достаточного топливного газа (например, нейтрального газа и/или предварительно ионизированного газа), поступающего от подачи топливного газа, для возбуждения скорости сдвигового потока плазмы в течение продолжительности каждого из разрядов Z-пинча. В частности, в одном таком варианте осуществления достаточно нейтрального газа может быть направлено для поддержки локализованного пути пробоя между внутренним и внешним электродами и для установления скорости сдвигового потока плазмы. В дополнительном или альтернативном варианте осуществления достаточно предварительно ионизированного газа может быть направлено для поддержания скорости сдвигового потока плазмы (например, для восполнения нейтрального газа).

[42] В соответствии со способами и устройствами, описанными в данном документе, стабилизация скорости сдвигового потока поддерживается по меньшей мере следующими результатами моделирования. Осесимметричная плазменная конфигурация, характерная для экспериментального устройства FuZE SFS Z-пинча, была смоделирована с использованием компьютерного кода WARPXM [У. Шумлак, Р. Лилли, Н. Редделл, Е. Соуса и Б. Сринивасан, «Расширенные физические расчеты с использованием модели многожидкостной плазмы». *Журнал Computer Physics Communications* 182, 1767 (2011)] на основе нелинейной пятимоментной двухжидкостной (5M2F) модели плазмы. Эта модель включает в себя эффекты вязкости и теплопроводности по Брагинскому.

[43] Некоторые выбранные результаты моделирования проиллюстрированы на фиг. 1—5. Для сравнения результаты, полученные без скорости сдвигового потока проиллюстрированы на фиг. 1. Результаты для трех случаев с тремя разными

параболическими профилями скорости сдвигового потока проиллюстрированы на фиг. 2—4. Эти случаи можно различать по различным значениям скорости « $vsfa$ » сдвигового потока при  $r = a$  (где  $a$  представляет собой номинальный радиус плазмы Z-пинча), нормированные к характеристической альфвеновской скорости  $v_A$  на краю пинча ( $r = a$ ). Начальные условия ( $t = 0$ ) для проиллюстрированных случаев включают в себя условие равновесия Беннета с пиковыми значениями плотности  $4 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , ионными и электронными температурами 1,27 keV и пиковыми магнитными полями 33,0 Т. Эффективный радиус ( $a$ ) пинча составляет 0,91 мм.

[44] В этих моделированиях используют определенный нормированный предел коэффициента диффузии ( $\text{difflim} = 32 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ) и задают минимальный коэффициент диффузии ( $\text{difflim} = 3.2 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ). Электронам присваивают вязкость с уровнем коэффициента диффузии, равным минимальному коэффициенту диффузии. В каждом случае используют возмущение для запуска моды с длиной волны, равной осевой длине области.

[45] На фиг. 1 значение  $vsfa = 0,0$  указывает на базовый случай, не имеющий скорости сдвигового потока. Снимки двумерных ( $r/z$ ) поперечных сечений 100 и 110 нормированных плотностей ионов в моменты времени  $t = 0,000$  (соответствующие установлению невозмущенного плазменного столба Z-пинча) и  $t = 8,000$  (нормированные к радиальному альфвеновскому времени  $\tau_A$ ), соответственно, проиллюстрированы в оттенках серого цвета. Кроме того, профили 120 и 130 осевой скорости ( $v_z$ ) (нормированные к характеристической альфвеновской скорости  $v_A$ ) по существу не имеют сдвига, как проиллюстрировано на  $r/a$  графиках  $v_z/v_A$  зависимости на фиг. 1.

[46] Случай, представленный на фиг. 1, подтверждает понимание того, что Z-пинч без стабилизации демонстрирует быстро растущие неустойчивости, например, на которые указывают возмущения 140 плотности, показывающие существенные потери ионов плазмы, растущие в относительно небольшом количестве единиц по шкале альфвеновского времени, измеренных по времени, необходимому для возмущения намагниченной плазмы для распространения от оси ( $r = 0$ ) к краю ( $r = a$ ) невозмущенного плазменного столба.

[47] На фиг. 2—4 проиллюстрированы три дополнительных результата моделирования для Z-пинча, стабилизированного скоростью сдвигового потока. Случай, проиллюстрированный на фиг. 2, отличается  $vsfa = 0,25$ . Снимки двумерных ( $r/z$ ) поперечных сечений 200 и 210 нормированных плотностей ионов в моменты времени  $t = 0,000$  (соответствующие установлению невозмущенного плазменного столба Z-пинча) и  $t = 14,000$  (нормированные к  $\tau_A$ ), соответственно, проиллюстрированы в оттенках серого цвета. Начальный ( $t = 0$ ) параболический профиль 220 сдвиговой скорости развивается в профиль 230 в (нормированный) момент времени  $t = 14$ , все еще демонстрируя



существенный сдвиг за пределами начальной границы  $r = a$  плазменного столба. Возмущения 250 плотности ионов, хотя и являются обнаруживаемыми, преимущественно локализируются на радиусах, соизмеримых с начальным  $r = a$  радиусом невозмущенного плазменного столба  $Z$ -пинча.

[48] Случай, проиллюстрированный на фиг. 3, отличается  $vsfa = 0,5$  и иллюстрирует более сильные эффекты стабилизации по сравнению с случаями, проиллюстрированными на фиг. 1 и 2. Снимки двухмерных  $(r/z)$  поперечных сечений 300 и 310 нормированных плотностей ионов в моменты времени  $t = 0,000$  (соответствующие установлению невозмущенного плазменного столба  $Z$ -пинча) и  $t = 26,400$  (нормированные к  $\tau_A$ ), соответственно, проиллюстрированы в оттенках серого цвета. Начальный ( $t = 0$ ) параболический профиль 320 сдвиговой скорости развивается в возмущенный профиль 330 ионной осевой скорости в (нормированный) момент времени  $t = 26,4$ , демонстрируя почти параболическую радиальную зависимость и существенный сдвиг за пределами начальной границы плазменного столба  $r/a = 1$ . Возмущения 350 плотности ионов преимущественно локализируются в объеме внутри плазменного столба ( $r < a$ ).

[49] Случай, проиллюстрированный на фиг. 4, отличается  $vsfa = 0,75$ . Результаты, показанные на фиг. 4, иллюстрируют более сильные эффекты стабилизации сдвиговым потоком по сравнению со случаями, проиллюстрированными на фиг. 1—3. Снимки двухмерных  $(r/z)$  поперечных сечений 400 и 410 нормированных плотностей ионов в моменты времени  $t = 0,000$  (соответствующие установлению невозмущенного плазменного столба  $Z$ -пинча) и  $t = 37,000$  (нормированные к  $\tau_A$ ) соответственно проиллюстрированы в оттенках серого цвета. Начальный ( $t = 0$ ) параболический профиль 420 осевой сдвиговой скорости ионов развивается в (незначительно) возмущенный профиль 430 ионной осевой скорости в (нормированный) момент времени  $t = 37$ , демонстрирующий по существу параболическую радиальную зависимость. Возмущения 450 плотности ионов преимущественно локализируются в объеме внутри плазменного столба ( $r < a$ ).

[50] Некоторые результаты применения компьютерного кода WARPXM проиллюстрированы на фиг. 5. График, показанный на фиг. 5, иллюстрирует временную зависимость интегрированной массы  $Z$ -пинча от времени  $t/\tau_A$  (нормированное время, соответствующее нормированному времени на  $t$  фиг. 1—4). Зависимость, показанная на фиг. 5 подчеркивает влияние значений скорости сдвигового потока, отличающихся значениями « $vsfa$ ». Можно заметить, что для случая без стабилизации ( $vsfa = 0,0$ ), в то время как удержание плазмы  $Z$ -пинча начинает деградировать после  $t = 5$  (отмечено начальным уменьшением нормированной массы 500) и демонстрирует существенную

потерю к номинальному времени  $t = 8,0$ , соответствующие массовые соотношения 525, 550, и 575 ( $v_{sfa} = 0,25, 0,5, \text{ и } 0,75$ , соответственно) демонстрируют все большей степени усиливающееся удержание плазмы, указывающее на то, что стабилизированная плазма Z-пинча может поддерживаться при условии, что подают достаточный осевой плазменный ток, и создают и поддерживают достаточную скорость азимутально симметричного сдвигового потока ионов, окружающего плазменный столб.

[51] По меньшей мере в контексте вышеизложенного варианты осуществления устройств и способов создания и поддержания скорости азимутально симметричного сдвигового потока ионов в соответствии с настоящим изобретением приведены ниже. Некоторые компоненты конкретного варианта осуществления плазменного устройства (удержания плазмы) для стабилизированного Z-пинча проиллюстрированы на фиг. 6A и 6B на изометрическом виде 600 (фиг. 6A) и виде 610 в поперечном сечении (фиг. 6B).

[52] В целом, плазменное устройство Z-пинча, имеющее вакуумный сосуд, как проиллюстрировано на фиг. 6A и 6B (с соответствующими системами, такими как электрические кабели и кабелепроводы, вакуумные насосы и каналы, диагностические проходы, оптические окна и т. п., опущенные для ясности) может быть увеличено по сравнению с некоторыми другими плазменными устройствами Z-пинча, по меньшей мере за исключением клапанов подачи нейтрального газа (описанных подробно ниже), относящихся к процессам создания и поддержания скорости улучшенного азимутального сдвигового потока в соответствии с некоторыми вариантами осуществления, предложенными в настоящем изобретении.

[53] В частности, по меньшей мере в одном варианте осуществления объем 620 ускорения может быть увеличен относительно объема некоторых других плазменных устройств плазмы Z-пинча и выполнен с возможностью наполнения газовой смесью (например, смесь нейтрального рабочего газа) по меньшей мере через один внутренний клапан 630, такой как по меньшей мере один газоструйный клапан (для обеспечения нейтрального газа в объем 620 ускорения) и/или плазменный инжектор 630 (для обеспечения предварительно ионизированного газа в объем 620 ускорения), расположенный по существу вдоль центральной оси объема 620 ускорения. Дополнительно или в качестве альтернативы, множество внешних клапанов, такое как множество газоструйных клапанов (для обеспечения нейтрального газа в объем 620 ускорения) и/или плазменных инжекторов 640 (для обеспечения предварительно ионизированного газа в объем 620 ускорения), могут быть установлены в виде правильной группы на внешней границе вакуума, которая может быть выполнена в виде внешнего или наружного электрода 650.

[54] В зависимости от конкретных вариантов осуществления газоструйные клапаны и/или плазменные инжекторы 630, 640 могут быть электронным способом активированы для доставки «струй» наполняющего нейтрального и/или предварительно ионизированного газа для запуска в начальный момент времени, программируемый до доли мс и имеющий продолжительность до нескольких сотен мкм (например, до 1 мс). Подаваемым количеством заполняющего газа (также называемого в данном документе «топливным газом») (например, в «струе») также могут управлять путем регулирования давления наполняющего газа, подаваемого на газоструйные клапаны и/или плазменные инжекторы 630, 640, по отдельности или в виде выбранного поднабора клапанов (где поднабор клапанов может включать в себя только часть клапанов и/или инжекторов 630, 640 или все клапаны и/или инжекторы 630, 640). Кроме того, на различные клапаны и/или инжекторы 630, 640 (или различные комбинации множества клапанов и/или инжекторов 630, 640) могут подавать различные смеси наполняющих газов, имеющие, например, различные элементные соотношения наполняющих газов и/или различные изотопные соотношения (например, регулируемые молекулярные соотношения  $D_2/T_2$ ). По меньшей мере в одном варианте осуществления различные газоструйные клапаны и/или плазменные инжекторы могут быть единообразными (например, все одинакового типа/размера со всеми одинаковыми рабочими настройками, если они выполнены с возможностью конфигурации таким образом), хотя в других вариантах осуществления для различных местоположений могут использовать различные клапаны. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления один или более газоструйных или других газовых клапанов и/или плазменных инжекторов могут управлять потоком газа в объем 620 ускорения через коллектор, содержащий множество отверстий, обеспечивающих проход в объем 620 ускорения. В таких вариантах осуществления отверстия коллектора могут быть единообразными или могут варьироваться по конфигурации (например, для доставки различных количеств газа в различные местоположения объема 620 ускорения, когда открыт соответствующий клапан).

[55] Подобно впрыску нейтрального газа через газоструйные клапаны, ионизированный газ или плазму могут впрыскивать с использованием комбинаций или коллекторов плазменных инжекторов, расположенных различным образом. Также могут создавать и впрыскивать способом, аналогичным впрыску нейтрального газа, плазмы, образованные из газовых смесей. Впрыск плазмы может обеспечивать более тонкое управление окончательным осевым распределением плазмы, а также ее профилем сдвигового потока, что, в свою очередь, может обеспечивать возможность более точного управления устойчивостью и долговечностью плазмы. Дополнительное управление

впрыском плазмы может быть обеспечено благодаря частицам плазмы, которые представляют собой заряженные частицы и могут быть ускорены электрическими полями, создаваемыми переменным электрическим смещением (или напряжением) на инжекционных электродах. Таким образом, скоростью впрыскиваемой плазмы могут точно управлять для обеспечения возможности точной регулировки и оптимизации пробоя любого присутствующего нейтрального газа (например, в объеме 620 ускорения). Кроме того, впрыскиваемая плазма может перемещаться с более высокими скоростями, чем впрыскиваемый нейтральный газ, который может перемещаться почти неподвижным образом (относительно впрыскиваемой плазмы) во время разрядных импульсов Z-пинча. Таким образом, по сравнению с впрыском нейтрального газа, впрыск плазмы может обеспечивать предварительно ионизированное топливо «по требованию» (например, более непосредственно), например, для восполнения топливного газа во время разрядных импульсов Z-пинча.

[56] В некоторых вариантах осуществления плазму, подлежащую впрыску в объем 620 ускорения, могут создавать путем предварительной ионизации нейтрального газа с помощью свечи зажигания или посредством индукционной ионизации. В более широком смысле газоструйные клапаны и/или плазменные инжекторы 630, 640 могут содержать один или более электродных инжекторов электродной плазмы и/или один или более инжекторов безэлектродной плазмы. В примерах, содержащих указанные один или более инжекторов электродной плазмы, плазму, подлежащую впрыску в объем 620 ускорения, могут создавать по меньшей мере частично посредством электродного разряда. В дополнительных или альтернативных примерах, содержащих указанные один или более инжекторов безэлектродной плазмы, плазму, подлежащую впрыску в объем 620 ускорения могут создавать по меньшей мере частично посредством индуктивного разряда, производимого окном внешней катушки (например, радиочастотной антенной, работающей при 400 кГц, 13,56 МГц, 2,45 ГГц и/или других частотах, разрешенными для использования в данной локальной юрисдикции, например, в пределах частотных диапазонов, разрешенных Федеральной комиссией по связи). В некоторых вариантах осуществления нейтральный газ для предварительной ионизации может быть ограничен конфигурацией резервуара для нейтрального газа (не показан на фиг. 6A и 6B) и/или проводимостью нейтрального газа в выбранной конфигурации плазменного инжектора.

[57] В некоторых вариантах осуществления осевое распределение впрыскиваемой плазмы может быть обеспечено посредством осесимметричной конфигурации плазменного инжектора. По меньшей мере в одном варианте осуществления восемь плазменных инжекторов 640 могут быть расположены в восьми равномерно распределенных отверстиях

коллектора, соответственно. Каждое из восьми отверстий может быть выполнено под острым углом (например, от  $5^\circ$  до  $90^\circ$  относительно центральной оси объема 620 ускорения) относительно корпуса объема 620 ускорения. В одном примере такой острый угол может составлять  $45^\circ$  относительно центральной оси объема 620 ускорения. В некоторых вариантах осуществления восемь отверстий могут быть выполнены в одном осевом положении вдоль центральной оси объема 620 ускорения (то есть восемь отверстий могут быть равномерно распределены по окружности или другому периметру объема 620 ускорения в осевом положении). В других вариантах осуществления отверстия могут содержать множество наборов из восьми отверстий, причем каждый набор из восьми отверстий равномерно распределен относительно различного осевого положения вдоль центральной оси объема 620 ускорения. В примерном варианте осуществления наборы из восьми отверстий могут быть выполнены в виде чередующихся пар наборов, причем первый набор из восьми отверстий может быть расположен в первом осевом местоположении, а второй набор из восьми отверстий может быть расположен во втором различном осевом местоположении и повернут относительно первого набора таким образом, что каждое отверстие второго набора расположено между парой отверстий первого набора относительно окружности объема 620 ускорения. В частности, в таком варианте осуществления каждое отверстие из первого набора из восьми отверстий может быть расположено на расстоянии по окружности объема 620 ускорения через каждые  $45^\circ$ , и каждое отверстие из второго набора из восьми отверстий может быть расположено на расстоянии по окружности объема 620 ускорения через каждые  $45^\circ$  со смещением (поворотом) от первого набора отверстий на  $22,5^\circ$  таким образом, что по окружности объема 620 ускорения каждые  $22,5^\circ$  предусмотрено одно отверстие из первого и второго наборов. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления для создания азимутального потока внутри объема 620 ускорения впрыск плазмы может быть выполнен азимутально, например, вдоль хорды, перпендикулярной центральной оси объема 620 ускорения. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления клапаны могут быть выполнены различным образом (например, асимметрично распределены по азимуту и/или с различными угловыми распределениями) с другими вариациями для достижения по существу эквивалентного профиля путем компенсации эффектов этих вариаций.

[58] В некоторых вариантах осуществления впрыск предварительно ионизированного газа в объем 620 ускорения может приводить к тому, что температура плазмы будет находиться в диапазоне от 1 до 10 эВ. Кроме того, и как отмечено выше, поскольку скорость впрыска предварительно ионизированного газа может быть значительно выше, чем

нейтрального газа, скорость плазмы в объеме 620 ускорения может составлять до  $50 \times 10^3$  м/с. В некоторых вариантах осуществления впрыск предварительно ионизированного газа может обеспечивать гибкость количества впрыскиваемых частиц. В частности, в примерном варианте осуществления количество частиц предварительно ионизированного газа могут впрыскивать за 1/50 времени, используемого для впрыскивания такого же количества частиц нейтрального газа. Например, количество времени, используемого для впрыска 10 Торр-л частиц нейтрального газа (где 1 Торр-л пропорционально  $2,5 \times 10^{19}$  молекулам при 273 К), может составлять одинаковое количество времени, используемого для впрыска 500 Торр-л частиц предварительно ионизированного газа. Подобным образом, в некоторых вариантах осуществления скорость впрыска (или массовая скорость потока) предварительно ионизированного газа может изменяться в соответствии с током и напряжением источника питания (то есть, с формой волны импульса впрыска). Например, повышение напряжения источника питания (например, до значений в промежутке от 100 В до 500 В) может совокупно увеличивать скорость впрыска. В качестве другого примера, увеличение тока источника питания (например, до значений в промежутке от 1 А до 500 А) может совокупно увеличивать скорость впрыска.

[59] Впрыск нейтрального газа, в частности, может быть осуществлен при помощи газоструйных клапанов или посредством высвобождения газообразного водорода из гидрида металла, например, дейтерида титана ( $TiD_2$ ) или других гидридов металлов на основе скандия, ванадия или других металлов. В некоторых вариантах осуществления газоструйные клапаны могут представлять собой соленоидные газоструйные клапаны (хотя могут быть реализованы и другие конфигурации, находящиеся в пределах объема настоящего изобретения).

[60] Как обсуждалось выше, указанный по меньшей мере один внутренний газоструйный клапан и/или плазменный инжектор 630 и указанное множество внешних газоструйных клапанов и/или плазменных инжекторов 640 могут быть активированы либо по отдельности, либо группами. Начальная газовая нагрузка объема 620 ускорения, имеющая требуемые осевые и азимутальные профили, может быть осуществлена путем синхронизации отдельных клапанов/или групп клапанов. Такие клапаны (или их группы) могут быть синхронизированы таким образом, чтобы выравнивать поступление нейтрального и/или предварительно ионизированного газа и/или их смесей до требуемого начального профиля, таким образом, как в вариантах осуществления, подробно обсуждаемых ниже и проиллюстрированных на фиг. 8 и 10А-10F. Источники питания (не показаны на фиг. 6А и 6В) могут быть синхронизированы для осуществления ионизации в

требуемом осевом положении и использования начальной газовой нагрузки для создания и поддержания сдвигового потока.

[61] Различные комбинации (нейтрального газа) газоструйных клапанов с плазменными инжекторами могут быть активированы для дополнительной регулировки (например, оптимизации) таких параметров, например, для достижения требуемого уровня выходной мощности. Кроме того, плазму могут впрыскивать в объем 620 ускорения значительно (например,  $\sim 100x$ ) быстрее, чем задуваемый нейтральный газ. Комбинация таких различных скоростей впрыска, обеспечиваемая ускорением впрыска плазмы с впрыском нейтрального газа, обеспечивает еще большее пространство параметров для оптимизации. Кроме того, плазменные инжекторы могут служить для впрыска массы и тщательного управления местоположениями ионизации нейтрального газа.

[62] Вариант осуществления, проиллюстрированный на фиг. 6А и 6В, содержит объем 620 ускорения, выполненный таким образом, чтобы содержать соединители или другие соединительные элементы по меньшей мере для одного внутреннего газоструйного клапана и/или плазменного инжектора 630, проходящего изнутри внутреннего электрода 660. Например, указанный по меньшей мере один внутренний газоструйный клапан и/или плазменный инжектор 630 [и соответствующий соединительный элемент (элементы)] могут содержать восемь клапанов 630, симметрично распределенных по азимуту (имеют угловое разделение в  $45^\circ$ ) при  $z = -50$  см (относительно положения  $z = 0$  на неподдерживаемом конце 665 внутреннего электрода 660, где ось  $z$  совпадает с центральной осью объема 620 ускорения, и где отрицательное направление оси  $z$  проходит от неподдерживаемого конца 665 вдоль центральной оси внутреннего электрода 660, а положительное направление оси  $z$  проходит от неподдерживаемого конца 665 через объем 620 ускорения в направлении, противоположном отрицательному направлению), восемь клапанов 630, равномерно распределенных при  $z = -75$  см, и восемь клапанов 630, равномерно распределенных при  $z = -100$  см. Проиллюстрированный вариант осуществления может быть легко обновлен с помощью дополнительных клапанов для обеспечения возможности впрыска большего количества топливного газа (например, для более продолжительных разрядов пинча) и управления осевым распределением давления наполняющего нейтрального газа в объеме 620 ускорения (например, для дополнительного увеличения продолжительности скорости сдвигового потока). В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления клапаны могут быть выполнены различным образом (например, асимметрично распределены по азимуту и/или с различными угловыми распределениями) с другими вариациями для достижения по существу эквивалентного профиля путем компенсации

эффектов этих вариаций. Такие соображения в равной степени могут применять к плазменным инжекторам.

[63] Газоструйные клапаны в соответствии с проиллюстрированным вариантом осуществления содержат призматические конструктивные элементы, которые могут обеспечивать возможность использования с ними инструментальных исполнительных устройств (например, передающих усилие элементов ручных инструментов или соединительных вставок для устройств с силовым приводом) для передачи крутящего момента и других связанных напряжений непосредственно на более надежные основные конструктивные элементы, в то же время избегая различных вставок, соединителей, контактов, вакуумных или прижимных порогов, заливок и/или паяных соединений.

[64] В одном варианте осуществления газоструйные клапаны по настоящему изобретению могут быть выполнены с возможностью содержания диаметра отверстия размером не менее 0,075 дюймов и объема камеры, составляющего по меньшей мере 1 см<sup>3</sup>. Кроме того, один из признаков газоструйных клапанов в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения представляет собой способность закрываться (и оставаться закрытым) в предварительно запрограммированный момент времени до разряда Z-пинча и во время него.

[65] Как указано выше (включая документы, включенные посредством ссылки), сохранение азимутальных симметрий плазм и связанной скорости сдвигового потока представляет собой одно из преимуществ вариантов осуществления настоящего изобретения. Соответственно, воспроизводимое образование и формование начальных азимутально симметричных плазменных структур в заранее определенных осевых положениях в объеме 620 ускорения может быть осуществлено при помощи по меньшей мере некоторых вариантов осуществления настоящего изобретения. В различных вариантах осуществления могут применять различные устройства и способы «образования плазмы». Такие устройства и способ могут содержать (без ограничения): специализированные системы для образования плазмы [некоторые из которых могут быть выполнены с возможностью учета сложностей, связанных с конкретными источниками питания и каналами и/или сложными подсистемами (предварительной) ионизации], плазменные инжекторы и настраиваемые рабочие алгоритмы и другие способы.

[66] Устройство для удержания плазмы по фиг. 6A и 6B может содержать контроллер или другое вычислительное устройство (не показано), которое может содержать энергонезависимое запоминающее устройство, в котором могут храниться исполняемые инструкции. Исполняемые инструкции могут быть исполнены одним или более процессоров контроллера для выполнения различных функциональных возможностей



устройства для удержания плазмы. Соответственно, исполняемые инструкции могут содержать различные подпрограммы для эксплуатации, технического обслуживания и тестирования устройства для удержания плазмы. Контроллер может дополнительно содержать пользовательский интерфейс, с помощью которого оператор устройства для удержания плазмы может вводить команды или иным образом изменять работу устройства для удержания плазмы. Пользовательский интерфейс может содержать различные компоненты для упрощения использования оператором устройства для удержания плазмы и для приема входных данных от оператора (например, запросов на создание плазм для термоядерного синтеза и т. д.), такие как один или более дисплеев, устройства ввода (например, клавиатуры, сенсорные экраны, компьютерные манипуляторы типа мышь, нажимаемые кнопки, механические переключатели или другие механические исполнительные элементы и т. д.), световые сигналы и т. д. Контроллер может быть соединен с возможностью осуществления связи с различными компонентами (например, клапанами, источниками питания и т. д.) устройства для удержания плазмы для управления их приведением в действие и использованием (проводные и/или беспроводные пути связи между контроллером и различными компонентами на фиг. 6А и 6В опущены для ясности).

[67] Некоторые аспекты иницирующих и последующих формовочных частей плазмы, относящихся к вариантам осуществления настоящего изобретения, схематически проиллюстрированы на фиг. 7. Эти формовочные части могут содержать острые точки (например, вершины, образованные на локализованных вогнутых элементах 725; см. ниже), которые улучшают локальное электрическое поле и способствуют пробоя плазмы. Различные конфигурации «пассивных» (то есть, не содержащих специальные источники питания или газа, которые активно возбуждают эмиссию) формовочных частей 700 могут быть расположены в виде посадки кольцевого электрода в одно или более углублений во внутреннем электроде 660 в одном или более отрицательных положений по оси Z, как правило, вблизи одного или более внутренних газоструйных клапанов 630 (внутренний электрод 660 и газоструйные клапаны 630 не показаны на фиг. 7; см. фиг. 6В и 8). Одной из важных функциональных возможностей таких частей по меньшей мере в одном варианте осуществления является иницирование и поддержание многоканального пробоя окружающих нейтральных газов (начиная с различных по существу независимых азимутально распределенных потоков радиальных разрядов), способствующих созданию и поддержанию по существу равного потока тока во всех радиальных направлениях. Следует отметить, что формовочная часть 700 может быть размещена в местоположении газовых клапанов или ниже по потоку от них (например, справа на фиг. 6В и 8-10F) в различных вариантах осуществления. Хотя острые формовочные части описаны со ссылкой на

внутренний электрод 660, такие признаки могут быть использованы на любом из внутреннего электрода 660 или внешнего электрода 650 (не показан на фиг. 7; см. фиг. 6А, 6В и 8), или на обоих. В некоторых вариантах осуществления улучшение электрического поля вблизи таких острых точек является преимущественным на катоде (от которого излучают электроны), который может представлять собой либо внутренний электрод 660, либо внешний электрод 650. Острые точки на поверхности анода также могут быть включены таким образом, что путь пробоя может быть выборочно установлен между формовочными частями на катоде и формовочными частями на аноде (которые могут представлять собой, например, внутренний электрод 660 и внешний электрод 650 соответственно).

[68] Формовочная часть 700, проиллюстрированная на фиг. 7, содержит проводящее кольцо 710, расположенное с возможностью размещения по меньшей мере одной контактной поверхности 720, образующей контакт с поверхностью с низким контактным сопротивлением (например, чтобы вызвать падение напряжения между указанной по меньшей мере одной контактной поверхностью 720 и внутренним электродом 660, составляющее менее 100 V), с цилиндрической, конической или иным образом сужающейся наружной поверхностью внутреннего электрода 660. В некоторых вариантах осуществления проводящее кольцо 710 может быть образовано из одного или более проводящих материалов, которые могут быть полностью или по меньшей мере частично химически и/или термомеханически совместимыми (например, тепло и напряжения, испытываемые во время эксплуатации, не будут существенно влиять на использование проводящего кольца 710 в течение срока службы) с проводниками внутреннего электрода 660. Кроме того, обращенная к плазме часть 715 формовочной части 700 может быть образована из проводников, устойчивых к химическому и физическому повреждению под действием поддерживаемых разрядов. Во многих вариантах осуществления один или более тугоплавких металлов (таких как один или более из W, Ta, Nb, Mo или Re; дополнительно или в качестве альтернативы содержащих один или более из Ti, V, Cr, Mn, Zr, Tc, Ru, Rh, Hf, Os или Ir) и/или их сплавов или комбинаций могут быть использованы по меньшей мере для относительно низкой химической активности, относительно высоких точек плавления и относительно высокого сопротивления абляции и распылению плазмы.

[69] В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления обращенные к плазме материалы могут быть основаны на проводящих формах углерода, содержащих графит, спеченные или прессованные углеродные порошки, матрицы из углеродных волокон и/или структуры и композиции, содержащие углеродные нанотрубки. В дополнение к относительной нечувствительности к эффектам, деградации и пробоям

плазмы структуры на основе углерода (особенно углеродные нанотрубки) могут проявлять свойства умножения электронов, требуемые во время фаз создания плазмы.

[70] В других вариантах осуществления обращенные к плазме части 715 могут быть текстурированы с возможностью размещения множества локализованных вогнутых элементов 725 с образованием структурированных групп. Такие элементы в некоторых вариантах осуществления могут усиливать локальные электрические поля и способствовать электронной эмиссии от твердых (и жидких) поверхностей. Элементы 725 могут быть образованы посредством механического действия (содержащего резание, царапание, шлифование, пескоструйную обработку, выполнение канавок, насечек, штампование, тиснение, рифление и т. д.). Также могут быть использованы различные химические и/или термические процессы (например, травление, химическое осаждение, распыление, напыление, ионная и нейтральная имплантация, эпитаксиальное выращивание и т. д.). В некоторых вариантах осуществления могут производить и поддерживать множество элементов 725, имеющих относительно небольшие характерные размеры (например, по сравнению с размером обращенных к плазме частей 715), для того, чтобы избежать значительных изменений геометрии, когда/если какие-либо отдельные элементы 725 повреждаются или деформируются (например, благодаря дуговому пробою или локальному перегреву). Например, в некоторых вариантах осуществления элементы 725 могут иметь среднюю высоту, составляющую 1 – 10% от высоты обращенных к плазме частей 715 (за исключением элементов 725).

[71] По меньшей мере в одном варианте осуществления формовочная часть 700 (либо содержащая, либо исключаящая элементы 725) вокруг внутреннего электрода 660 может быть выполнена в виде в целом однородного контактного кольца, изменяющегося, например, в тех местоположениях, где отверстия для внутренних газоструйных клапанов 630 пересекают поперечное сечение обращенных к плазме частей 715 и указанной по меньшей мере одной контактной поверхности 720. Однако в некоторых вариантах осуществления (например, когда формовочная часть 700 выполнена в виде в целом однородного контактного кольца), формовочная часть 700 может иметь изменяющееся поперечное сечение вокруг внутреннего электрода 660 и/или вдоль него. Другие вариации, например, когда несколько отдельных формовочных частей 700, которые не образуют одно кольцо, размещены вокруг внутреннего электрода 660, также находятся в пределах объема настоящего изобретения.

[72] Также, как подробно описано ниже со ссылкой на фиг. 8, формовочная часть, подобная формовочной части 700, показанной на фиг. 7, может образовывать кольцо вдоль внутренней поверхности внешнего электрода 650. Такая формовочная часть и

соответствующая контактная поверхность (аналогичная по меньшей мере одной контактной поверхности 720) могут быть выполнены таким образом, как показано на фиг. 7 (или в соответствии с вариантами, рассмотренными в данном документе), за исключением того, что поперечное сечение указанной по меньшей мере одной контактной поверхности 720 и обращенной к плазме части 715 повернуто  $180^\circ$  для размещения на внутренней поверхности внешнего электрода 650 вместо его внешней поверхности. Наклон указанной по меньшей мере одной контактной поверхности 720 также может отличаться от показанного на фиг. 7 для размещения сужения или других изменений поверхности внешнего электрода 650 или их отсутствия (см., например, обсуждение «конфигурации сужающихся электродов», приведенное ниже со ссылкой на фиг. 9).

[73] В дополнение к формовочной части 700, проиллюстрированной на фиг. 7, могут по отдельности или в комбинации использовать другие способы содействия/управления/направления образования плазмы. Одна возможность включает использование радиоактивного материала (материалов), внедренного во внешний электрод 650 и/или внутренний электрод 660. В частности, высокоэнергетические частицы или фотоны, испускаемые в результате процессов радиоактивного распада, могут приводить к предварительной ионизации вблизи внедренного радиоактивного материала (материалов), что приводит к образованию области, имеющей увеличенный пробой плазмы по сравнению с областями, не содержащими внедренный радиоактивный материал (материалы). Например, для внедренного радиоактивного материала (материалов) могут быть выбраны бета-излучатели и/или гамма-излучатели.

[74] Дополнительная или альтернативная возможность включает освещение внешнего электрода 650 и/или внутреннего электрода 660 с помощью падающего лазерного излучения в области, где требуется предварительная ионизация плазмы. В таких областях поверхности электродов (например, внешнего электрода 650 и/или внутреннего электрода 660) могут содержать материалы, выбранные специально для излучения рентгеновского излучения или других форм ионизирующего излучения при воздействии падающего лазерного излучения. Дополнительная или альтернативная возможность включает использование лазерного излучения для непосредственной ионизации газа (например, посредством прямых взаимодействий лазерного излучения с частицами нейтрального газа). В таких вариантах осуществления лазерное излучение может проходить через нейтральный газ и выделять энергию по всему пути лазера, что приводит к предварительной ионизации и образованию направленного канала для пробоя плазмы (например, канала, имеющему больший пробой плазмы, чем окружающий объем).

[75] В других способах содействия/управления/прямого образования плазмы могут использовать различные формы катодов, такие как полевые излучатели или термионные излучатели, расположенные на электродных поверхностях (например, внешнего электрода 650 и/или внутреннего электрода 660), где требуется пробой. Полевые излучатели могут использовать относительно высокие электрические поля для излучения электронов от небольших острых элементов. Примеры таких излучателей могут содержать наноструктуры, такие как углеродные нанотрубки, графеновые излучатели, нанопроводные излучатели, излучатели Шоттки и т. д. Дополнительно или в качестве альтернативы, для обеспечения пробоя плазмы могут использовать термионные излучатели. Примеры таких излучателей могут включать нагретые вольфрамовые нити, которые испускают электроны при относительно высокой температуре. Излучатели Шоттки могут считаться полевыми усиленными термионными излучателями.

[76] Один вариант осуществления способа инициирования и возбуждения азимутально симметричного сдвигового потока для стабилизации разрядов Z-пинча в устройстве для удержания плазмы, таком как устройство для удержания плазмы, подробно описанное выше со ссылкой на фиг. 6A-7, схематически проиллюстрирован на фиг. 8. В этом примере способ может характеризоваться схематическими иллюстрациями шагов или этапов 810, 820, 830, 840, 850, 860, 870 и 880, как правило, неравной продолжительности. В некоторых вариантах осуществления способ может включать последовательное выполнение этапов 810, 820, 830, 840, 850, 860, 870 и 880.

[77] В некоторых вариантах осуществления способ или его часть могут быть реализованы в виде исполняемых инструкций, хранящихся в энергонезависимом запоминающем устройстве вычислительного устройства, такого как контроллер, соединенный с возможностью осуществления связи с устройством для удержания плазмы. Кроме того, в некоторых вариантах осуществления дополнительные или альтернативные последовательности этапов могут быть реализованы в виде исполняемых инструкций, расположенных на таком вычислительном устройстве, где могут быть добавлены, удалены, замещены, модифицированы или взаимозаменяемы отдельные этапы, обсуждаемые со ссылкой на способ.

[78] Процесс начинается с этапа 810, который может включать приложение высокого напряжения, создающего радиальное электрическое поле (не показано), между электродами 650 и 660 и последовательную активацию одного или более внутренних и внешних клапанов 630 и 640 (в возможной комбинации с плазменными инжекторами 640). Клапаны 630 и 640 могут быть расположены с возможностью локального введения начальных измеренных и заранее определенных концентраций 812 наполняющего газа. В некоторых

вариантах осуществления может потребоваться инициация струи газа и/или впрыск плазмы во время фазы инициализации и продолжение доставки достаточных начальных концентраций 812 наполняющего газа вблизи формовочной части 700 для дополнительной защиты от преждевременного и/или асимметричного пробоя газа.

[79] В течение этапа 820 начальные концентрации 812 могут самопроизвольно развиваться вследствие процессов диффузии нейтрального газа с образованием постоянного (например, непрерывного) осесимметричного объема образования 822 нейтрального наполняющего газа, занимающего значительную часть (например, большую часть) объема 620 ускорения. В некоторых вариантах осуществления объем образования 822 нейтрального наполняющего газа демонстрирует градиент плотности количества молекул нейтрального газа в осевом направлении вдоль центральной оси объема 620 ускорения (например, в направлении неподдерживаемого конца 665 внутреннего электрода 660), в то же время по существу поддерживая азимутальную симметрию, благоприятную для по существу симметричного распределения потоков разряда во время первоначального пробоя наполняющего газа. В некоторых вариантах осуществления градиент плотности количества молекул нейтрального газа может быть таким, что в формовочной части 700 происходит пробой по Пашену. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления предварительно ионизированный газ могут впрыскивать в формовочную часть 700 для способствования образованию ионизационной волны, которая перемещается в нейтральный газ, который был впрыснут выше по потоку (например, в направлении к поддерживаемому концу внутреннего электрода 660, противоположному неподдерживаемому концу 665).

[80] В течение этапа 830 ближняя структура электрического поля, сформированная геометрическими и материальными свойствами формовочной части 700, может способствовать пробоем нейтрального газа, образуя осесимметричную плазменную структуру 835, поддерживающую поток 837 тока между внутренним электродом 660 и (окружающим) внешним электродом 650, например, локализованный в осевом направлении вблизи формовочной части 700. Поток 837 тока, поддерживаемый энергией от источников питания (например, групп конденсаторов или подобных), может образовывать постоянный (например, непрерывный) токовой контур (от внешнего электрода 650 через плазменную структуру 835 и во внутренний электрод 660 и через него), который может создавать по существу азимутальное магнитное поле 838 (как указано линиями азимутального поля). В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления для образования плазменной структуры 835 предварительно ионизированный газ могут впрыскивать от плазменных инжекторов 640 к неподдерживаемому концу 665 внутреннего электрода 660.

[81] Взаимодействия силы Лоренца между потоком 837 тока и магнитным полем 838 могут вызывать перемещение потока 837 тока от формовочной части 700 в направлении неподдерживаемого конца 665, как проиллюстрировано на схематическом изображении этапа 840. Кроме того, взаимодействие силы Лоренца может индуцировать поток 837 тока вдоль поверхности внешнего электрода 650.

[82] В течение этапа 850 поток 837 тока может продолжать развиваться к неподдерживаемому концу 665 и до него. Одновременно магнитное давление, возбуждаемое магнитным полем 838, окруженным потоком 837 тока, может смещать развивающуюся плазменную структуру 835 в направлении противоположной части 655 внешнего электрода 650, расположенной обращенной к неподдерживаемому концу 665. В вариантах осуществления, где это присутствует, ионизационной волной, которая перемещается в нейтральный газ, могут управлять путем впрыска различных количеств предварительно ионизированного газа, например, во внутренние клапаны 630 и/или внешние клапаны 640. По меньшей мере в одном варианте осуществления по существу азимутальная симметрия плазменной структуры 835, поддерживающей поток 837 тока, может вносить значительный вклад в эффективность процесса, поскольку любые значительные возмущения в потоке 837 тока могут вызывать неустойчивости, повреждение электрода и/или введение металлических примесей в развивающийся разряд.

[83] В некоторых вариантах осуществления этапы 830, 840 и 850 развития разряда могут длиться от доли микросекунды до нескольких микросекунд, что, например, значительно короче, чем этап 810 (соответствующий наполнению нейтральным газом объема 620 ускорения) или этапы 860, 870 и 880 (соответствующие разряду Z-пинча). Таким образом, образование 822 нейтрального наполняющего газа проиллюстрировано как неподвижное, поскольку образование 822 нейтрального наполняющего газа может развиваться в течение (например, только в течение) интервалов времени, значительно превышающих продолжительность этапов 830, 840 и 850.

[84] В некоторых вариантах осуществления впрыск плазмы может происходить между этапами 810 и 820. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления впрыск плазмы может происходить быстро и в том же масштабе, что и этапы 830, 840 и 850, и может быть использован для управления образованием/инициацией и динамикой таких этапов.

[85] Этап 860 соответствует начальному рабочему этапу Z-пинча, включающему образование плазменного столба 865 Z-пинча, создаваемого для поддержки тока  $I_{pinch}$  Z-пинча. Кроме того, остаточная плазменная структура 866 может быть образована для поддержки остаточного (радиального) тока 867, протекающего через образование 822

нейтрального наполняющего газа в объеме 620 ускорения. Кроме того, в различных вариантах осуществления распространение плазменной структуры 835 может возбуждать начальную скорость сдвигового потока 868 плазмы, окружающего (и стабилизирующего) плазменный столб 865 Z-пинча. В некоторых вариантах осуществления остаточная плазменная структура 866 может быть инициирована вблизи формовочной части 700, что характеризуется (локально) наибольшей численной плотностью составляющих нейтрального газа (молекул и/или атомов).

[86] Как обсуждалось выше, по меньшей мере в одном варианте осуществления в течение поддержания разряда на этапе 870 плазменный столб 865 Z-пинча может быть устойчивым и стабилизированным посредством непрерывного плазменного потока из объема 620 ускорения. Ионизационный фронт 872 может непрерывно производить плазму, ускоряемую из объема 620 ускорения остаточным током 867, для возбуждения скорости сдвигового потока 868 плазмы.

[87] В течение этапа 880 по меньшей мере в одном варианте осуществления ионизационный фронт 872 может перемещаться в направлении казенного конца объема 620 ускорения, ионизируя оставшийся нейтральный топливный газ в постоянным (например, непрерывным) образом до тех пор, пока весь или по существу весь топливный газ, доступный в объеме 620 ускорения, не будет ионизирован, что приводит к угасанию ионизационного фронта 872 и последующему разложению тока  $I_{\text{pinch}}$  Z-пинча (например, ток, проходящий через плазменный столб 865 Z-пинча и внутренний электрод 660, такой как ток 950, проиллюстрированный на фиг. 9 и описанный ниже). После завершения этапов 810, 820, 830, 840, 850, 860, 870 и 880 систему для удержания плазмы могут промывать для удаления побочных продуктов синтеза, и могут повторять процесс, описанный выше, для другого импульса. В некоторых вариантах осуществления процесс и его повторение могут быть автоматизированы и управляться программным приложением, например, реализованным при помощи контроллера, соединенного с возможностью осуществления связи с системой для удержания плазмы.

[88] Другой вариант осуществления устройства для удержания плазмы, плазменного устройства 900 Z-пинча, схематически показано на фиг. 9. Плазменное устройство 900 Z-пинча может создавать плазму в сборочном объеме 635 камеры 615 для удержания плазмы, причем плазма ограничена, сжата и поддерживается посредством симметричного по оси магнитного поля. Симметричное по оси магнитное поле может быть стабилизировано скоростью сдвигового потока ионов, возбуждаемым электрическим разрядом между парой электродов, сопрягаемых с камерой 615 для удержания плазмы.



[89] Устройства, принадлежащие к проиллюстрированному классу устройств для удержания плазмы, как правило, относятся к предыдущим вариантам осуществления, рассмотренным выше и проиллюстрированным на фиг. 6А-8, и имеют подобные признаки, за исключением дополнительных или альтернативных подсистем и функциональных возможностей, приведенных ниже. За исключением определенных сборочных и рабочих аспектов, которые могут возникать в результате таких различий, описание, представленное выше со ссылкой на фиг. 6А-8, может быть дополнительно применено к варианту осуществления, изображенному на фиг. 9. В некоторых вариантах осуществления в плазменное устройство 900 Z-пинча также могут быть включены дополнительные подсистемы и/или функциональные возможности, которые не были подробно описаны выше со ссылкой на фиг. 6А-8 и могут быть дополнительно применены к вариантам осуществления, изображенным на фиг. 6А-8.

[90] В одном примерном варианте осуществления плазменное устройство 900 Z-пинча может содержать внешний электрод 650, отделенный физически и функционально от внешней границы 910 вакуума, причем внешняя граница 910 вакуума вместе с частями внутреннего электрода 660 образует вакуумный сосуд 645 в качестве контейнера низкого давления, содержащего камеру 615 для удержания плазмы. Промежуточный электрод 920 может быть расположен таким образом, чтобы его радиус был между радиусом внутреннего электрода 660 и радиусом внешнего электрода 650. В частности, промежуточный электрод 920 может по существу окружать внутренний электрод 660, а внешний электрод 650 может по существу окружать промежуточный электрод 920. Например, внутренний электрод 660 может содержать один конец 665, который по меньшей мере частично окружен промежуточным электродом 920, а промежуточный электрод 920 может содержать один конец 965, который по меньшей мере частично окружен внешним электродом 650.

[91] Плазменное устройство 900 Z-пинча может содержать по меньшей мере два функционально раздельных источника питания, например, по меньшей мере один основной источник 930 питания, в основном расположенный и управляемый для возбуждения тока 950 ( $I_{\text{pinch}}$ ) (разряда) Z-пинча, и по меньшей мере один дополнительный источник 940 питания, в основном расположенный и управляемый для возбуждения остаточного тока 867. В некоторых вариантах осуществления указанный по меньшей мере один основной источник 930 питания может представлять собой устройство (устройства) подачи питания, отдельное от указанного по меньшей мере одного дополнительного источника 940 питания. В других вариантах осуществления указанный по меньшей мере один основной источник 930 питания и указанный по меньшей мере один дополнительный источник 940 питания могут представлять собой компоненты одного и того же устройства подачи питания.

[92] Например, по меньшей мере в одном варианте осуществления одно устройство подачи питания может иметь множество выводов, которые по отдельности обеспечивают количество мощности для обеспечения возможности выполнения соответствующей функции (например, возбуждения тока 950 Z-пинча, возбуждения остаточного тока 867 и т. д.). Такая компоновка может быть основана по меньшей мере на двух источниках питания (например, одном основном источнике 930 питания и одном дополнительном источнике 940 питания) и может обеспечивать возможность дополнительного управления током 950 Z-пинча и его стабилизацией сдвиговым потоком. В принципе, указанные по меньшей мере два источника питания могут быть масштабированы, заряжены и управляться таким образом, что ток 950 Z-пинча и его стабилизация могут поддерживаться в течение соразмерных периодов времени перед тем, как любой из указанных по меньшей мере двух источников питания преждевременно истощится или закончится накопленная энергия.

[93] В некоторых вариантах осуществления плазменное устройство 900 Z-пинча может содержать конфигурацию «сужающихся электродов», характеризующуюся расширением зазора между внутренним электродом 660 и промежуточным электродом 920 путем сужения вдоль центральной оси объема 620 ускорения конца 965 промежуточного электрода 920 наружу для увеличения объема по меньшей мере части объема 620 ускорения, например, в направлении (неподдерживаемых) концов 665 и 965. В одном примере указанное сужение может быть расположено в промежутке от  $0^\circ$  до  $15^\circ$  от центральной оси объема 620 ускорения. Такая компоновка может способствовать переносу импульса от плазмы, нагреваемой остаточным током 867, к нейтральному газу, например, вдоль центральной оси, тем самым создавая и поддерживая стабилизацию сдвиговым потоком. Перенос импульса может быть описан и смоделирован с использованием методологии, применимой для проектирования/оптимизации «сопел Лавалья», известных в области реактивного движения.

[94] Хотя техники, описанные в данном документе, обсуждаются в связи с термоядерным синтезом и, например, использованием вырабатываемой с его помощью энергии, техники, описанные в данном документе, могут быть использованы для других целей, таких как выработка тепла (например, для производства с использованием относительно высоких температур) и движение. Например, вариант осуществления по фиг. 6А-8 или вариант осуществления по фиг. 9 может быть модифицирован по меньшей мере путем удаления вакуумной камеры 338 или внешней границы 910 вакуума, соответственно, и выполнение отверстия в одном конце внешнего электрода 650 для обеспечения возможности выхода продуктов синтеза (например, параллельно центральной оси объема 620 ускорения). В одном варианте осуществления магнитное сопло (не показано на фиг. 9)

расположено ниже по потоку относительно внешнего электрода 650, например, справа от внешнего электрода 650 в плоскости, показанной на фиг. 9, для коллимации плазмы для уменьшения любого расхождения шлейфа выходящих газов.

[95] Плазменное устройство 900 Z-пинча может содержать контроллер или другое вычислительное устройство 948, которое может содержать энергонезависимое запоминающее устройство, в котором могут храниться исполняемые инструкции. Исполняемые инструкции могут быть исполнены одним или более процессоров контроллера 948 для выполнения различных функциональных возможностей плазменного устройства 900 Z-пинча. Соответственно, исполняемые инструкции могут содержать различные подпрограммы для эксплуатации, технического обслуживания и тестирования плазменного устройства 900 Z-пинча. Контроллер 948 может дополнительно содержать пользовательский интерфейс, в котором оператор плазменного устройства 900 Z-пинча может вводить команды или иным образом изменять работу плазменного устройства 900 Z-пинча. Пользовательский интерфейс может содержать различные компоненты для упрощения использования оператором плазменного устройства 900 Z-пинча и для приема входных данных от оператора (например, запросов на создание плазм для термоядерного синтеза и т. д.), такие как один или более дисплеев, устройств ввода (например, клавиатуры, сенсорные экраны, компьютерные манипуляторы типа мышь, нажимаемые кнопки, механические переключатели или другие механические исполнительные элементы и т. д.), световые сигналы и т. д. Контроллер 948 может быть соединен с возможностью осуществления связи с различными компонентами (например, клапанами, источниками питания и т. д.) плазменного устройства 900 Z-пинча для управления их приведением в действие и использованием (проводные и/или беспроводные пути связи между контроллером 948 и различными компонентами на фиг. 9 опущены для ясности).

[96] На фиг. 10A-10F схематически изображен вариант осуществления процесса инициирования и возбуждения азимутально симметричного сдвигового потока для стабилизации разрядов Z-пинча в устройстве для удержания плазмы. На серии фиг. 10A-10F показаны две конфигурации, причем в первой конфигурации внутренний электрод представляет собой катод, а внешний электрод представляет собой анод (с левой стороны каждой из фиг. 10A-10F при ориентации фиг. 10A-10F таким образом, что изображенные на них буквенно-цифровые символы ориентированы стандартным образом), а во второй конфигурации внутренний электрод представляет собой анод, а внешний электрод представляет собой катод (с правой стороны каждой из фиг. 10A-10F при ориентации фиг. 10A-10F таким образом, что изображенные на них буквенно-цифровые символы ориентированы стандартным образом). Некоторые устройства для удержания плазмы Z-

пинча могут соответствовать первой конфигурации, которая может быть более простой для конструирования и успешной работы. Однако, как более подробно показано в обсуждении ниже в отношении фиг. 11—24, вторая конфигурация может давать преимущественные и неожиданные результаты в соответствии с различными вариантами осуществления, описанными в данном документе. Некоторые небуквенно-цифровые символы, используемые на фиг. 10А-10F (например, стрелки потока тока, газовые клапаны, газовые облака, символы магнитного поля, стрелки потока газа и т. д.) являются такими же, как используемые на фиг. 8. Следует отметить, что части, обозначенные как «катод» и «анод», могут быть электрически соединены с частями с одинаковым названием («катод» или «анод»). Следует отметить, что в то время как на фиг. 10А-10F показан набор газовых клапанов, расположенных в физическом контакте с внешним электродом или непосредственно смежно с ним, другие конфигурации также находятся в пределах объема настоящего изобретения, такие как конфигурации клапанов, проиллюстрированные и подробно описанные выше со ссылкой на фиг. 8, которые могут содержать или не содержать одну или более формовочных частей, таких как подробно описанные выше со ссылкой на фиг. 7.

[97] По меньшей мере в одном варианте осуществления более высокая устойчивость плазмы Z-пинча может быть получена с помощью систем для удержания плазмы, таких как раскрытые в данном документе, где внешний электрод представляет собой катод, а внутренний электрод представляет собой анод. В частности, и как более подробно обсуждается ниже со ссылкой на фиг. 11—24, неустойчивость  $m = 0$  Z-пинча и его стабилизация посредством радиально осевого сдвигового потока изучаются с использованием нелинейной идеальной модели 5M2F и расширения этой модели, включающего перенос тепла и импульса по Брагинскому. При использовании идеальной модели 5M2F результаты скорости линейного роста сравнивают с предыдущей работой с использованием магнитогидродинамики (МГД) и холловской МГД. В сценариях с радиально осевым сдвиговым потоком и без него, согласование с холловской МГД является отличным, что позволяет предположить, что среди двухжидкостных членов холловский член является преобладающим. В пределах малой инерционной длины ионов результаты также соответствуют МГД. Сравнение с моделированием по методу частиц в ячейке (PIC, particle-in-cell) устойчивости без сдвига  $m = 0$  сосредоточено на сценарии плазмы на основании недавних экспериментальных результатов. При сканировании модового волнового числа результаты идеальной модели 5M2F качественно подобны PIC: скорость роста возрастает до пиковой при среднем волновом числе и уменьшается при большом волновом числе, в отличие от результатов МГД, которые демонстрируют насыщение

скоростей роста с увеличением волнового числа, а не с уменьшением. Максимальное нормированное значение скорости роста для модели 5M2F составляет  $\gamma\tau_A = 1,5$ , где  $\tau_A$  представляет собой альфвеновское время прохождения через пинч. Пик возникает при нормированном волновом значении  $ka = 10$ , где  $a$  представляет собой эффективный радиус пинча. Для сравнения, результаты PIC характеризуются пиковым ростом  $\gamma\tau_A = 0,77$  при  $ka = 5$ . Включение замыкания по Брагинскому для модели 5M2F не приводит к качественному изменению идеальных результатов в этом конкретном случае. Нелинейное моделирование 5M2F с диссипативным замыканием по Брагинскому выполняется в случаях, когда скорость сдвигового потока края пинча равна половине альфвеновской скорости. Нелинейное смешивание вследствие сдвигового потока приводит к насыщенному квазистабильному состоянию со скромными потерями запаса ионов пинча и тепловой энергии пинча: приблизительно составляет 30% и 10%, соответственно. Моделирование 5M2F охватывает основные физические аспекты неустойчивости  $m = 0$  и предлагает доступный для вычислений путь к высокоточному моделированию трехмерного поведения Z-пинча, включая нестабильность  $m = 1$ .

[98] Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования SFS Z-пинча, вместе с конструктивным численным анализом устойчивости позволяют предположить, что радиально осевой сдвиговый поток обеспечивает наблюдаемый длительный срок существования плазмы; статические Z-пинчи, как правило, заканчиваются неустойчивостями  $m = 0$  (перетяжка) и  $m = 1$  (кинк), которые характеризуются скоростями роста, близкими к радиальной альфвеновской частоте перехода.

[99] Ожидается, что анализ вычислительного моделирования будет важной частью текущей разработки SFS Z-пинча. Поскольку параметры плазмы увеличиваются в будущих экспериментах, высокоточное моделирование можно использовать для изучения различных процессов, связанных с образованием, сборкой и удержанием плазмы. Способы, представляющие особый интерес, содержат, например, моду дефлаграции, которая связана с поддержанием эффективного сопротивления сдвигового потока вследствие микротурбулентности электронного дрейфа, и динамику самого текущего Z-пинча.

[100] Пятимоментная многожидкостная модель представляет собой превосходного кандидата для точного захвата интересующих аспектов физики. Пятимоментная двухжидкостная (5M2F) модель плазмы (с двумя текучими средами, представляющими ионы и электроны) ранее была применена к модели неустойчивостей Z-пинча, захватывая реальные  $m = 0$  скорости роста и интересующую неустойчивость электронного дрейфа, когда скорость электронного дрейфа поперек силовых линий поля превышает тепловую скорость ионов. Модель 5M2F может обеспечивать эффективный компромисс между

точностью (но чрезмерными вычислительными расходами) кинетической модели и вычислительной способностью (но с ограниченной точностью) подхода, основанного на МГД.

[101] В исследовании, представленном в данном документе, применяют модель 5M2F для изучения неустойчивостей  $m = 0$  со сдвиговым потоком и без него. Модель 5M2F включает коррекцию конечной инерционной длины для ионов и электронов, а также эффекты конечной скорости света. При ограничении, что инерция электронов пренебрежимо мала, а скорость света бесконечна, результаты должны соответствовать результатам холловской МГД. В некоторых примерах линеаризованную модель холловской МГД применяют для исследования устойчивости  $m = 0$  равновесия Беннета с параболическим профилем сдвигового потока ( $v_{sf} \propto r^2$ ). Дополнительная работа была выполнена с использованием одинаковых настроек, но с нелинейной моделью МГД, рассматривая как линейные ( $v_{sf} \propto r$ ), так и параболические профили сдвигового потока. Ниже модель 5M2F сравнивают с результатами этих МГД и холловской МГД.

[102] Для оценки физической точности модели 5M2F с полным замыканием по Брагинскому проводили сравнение с использованием полностью кинетического (то есть, не гирокинетического или иным образом восстановленного) моделирования PIC устойчивости  $m = 0$  Z-пинча, включая кулоновские столкновения. В этой работе модель PIC применяют для изучения FuZE-подобного профиля Беннета с линейным профилем сдвигового потока. Сканирование  $ka$  без сдвигового потока показывает скорости роста, подобные результатам МГД до  $ka = 5$ , причем в этой точке скорость роста PIC достигает максимума. Для более большого  $k$  результаты PIC демонстрируют снижение скорости роста, в отличие от результатов МГД, которые, как правило, демонстрируют постоянные или возрастающие скорости роста при большом  $k$ . Моделирование при  $ka = 5$  со сдвиговым потоком показывает устойчивость  $m = 0$  для  $v_{sf}^a \gtrsim 0,75$ . Анализ стабильности, выполненный в условиях подобия реактору, в которых возможность столкновений снижена, дает аналогичные результаты.

[103] Пятимоментные жидкостные уравнения для данного вида выводят с помощью моментов связанного уравнения Больцмана. Как описано Брагинским, первые три момента уравнения Больцмана для видов  $\alpha$  приводят к уравнениям эволюции для пяти независимых переменных: численная плотность ( $n_\alpha$ ), три импульсных компонента ( $m_\alpha n_\alpha \mathbf{v}_\alpha$ , где  $m_\alpha$  и  $\mathbf{v}_\alpha$  представляют собой массу и скорость частиц) и скалярное давление ( $p_\alpha$ ). Пятимоментная многожидкостная модель и ее сокращение до модели 5M2F кратко изложены ниже, и детали замыкания по Брагинскому представлены ниже. Реализация модели в рамках структуры WARPXM также обсуждается ниже.

[104] Моменты уравнения Больцмана для частица  $\alpha$  дают следующие уравнения для текучей среды:

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (n_\alpha \mathbf{v}_\alpha) = S_\alpha^n, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (m_\alpha n_\alpha \mathbf{v}_\alpha) + \nabla \cdot (m_\alpha n_\alpha \mathbf{v}_\alpha \mathbf{v}_\alpha + p_\alpha \mathbb{I} + \Pi_\alpha) \\ & = q_\alpha n_\alpha (\mathbf{E} + \mathbf{v}_\alpha \times \mathbf{B}) + S_\alpha^m, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial e_\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [e_\alpha \mathbf{v}_\alpha + \mathbf{v}_\alpha \cdot (p_\alpha \mathbb{I} + \Pi_\alpha) + \mathbf{h}_\alpha] \\ & = q_\alpha n_\alpha \mathbf{v}_\alpha \cdot \mathbf{E} + S_\alpha^e, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $e_\alpha = m_\alpha n_\alpha \mathbf{v}_\alpha^2 / 2 + p_\alpha / (\Gamma - 1)$  представляет собой общую плотность энергии текучей среды и  $q_\alpha$  представляет собой заряд частиц. Единичная матрица представлена  $\mathbb{I}$ . В одном примере  $\Gamma = 5/3$  используют адиабатический коэффициент. Температуру частиц определяют с помощью соотношения  $p_\alpha = n_\alpha k_B T_\alpha$ , где  $k_B$  представляет собой постоянную Больцмана. Неидеальные члены, которые будут обсуждаться ниже, представляют собой тензоры напряжения ( $\Pi_\alpha$ ), тепловые потоки ( $\mathbf{h}_\alpha$ ) и исходные члены  $S_\alpha^n$ ,  $S_\alpha^m$  и  $S_\alpha^e$ , которые представляют собой источники столкновений частиц, импульс и энергию от реакций и взаимодействий между частицами. В этом примере существует всего пять уравнений — два скалярных уравнения и одно векторное уравнение — что привело к обозначению «пятимоментный». Все выражения представлены в единицах системы СИ, если не указано иное.

[105] Уравнения текучей среды связаны с уравнениями Максвелла для магнитных ( $\mathbf{B}$ ) и электрических ( $\mathbf{E}$ ) полей,

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mathbf{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right), \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_c}{\epsilon_0}. \quad (7)$$

Здесь  $\mu_0$  и  $\epsilon_0$  представляют собой магнитную проницаемость и диэлектрическую проницаемость вакуума, соответственно. Плотность тока  $\mathbf{j} = \sum q_\alpha n_\alpha \mathbf{v}_\alpha$  и плотность заряда  $\rho_c = \sum q_\alpha n_\alpha$  (суммируемые по  $\alpha$ ) обеспечивают связь с уравнениями текучей среды. При ограничениях дивергенции в задаче с начальными значениями уравнения (6) и (7) удовлетворяются, они будут удовлетворяться математически; затем уравнения (4) и (5) полностью описывают эволюцию  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ . Эта строгая математическая гарантия нарушается благодаря наличию числовых ошибок или границ области, что служит причиной формулировок, которые недвусмысленно сохраняют ограничения. В результатах,

представленных в данном документе, ограничения дивергенции хорошо удовлетворяются, и такая специальная формулировка не используется.

[106] Для того, чтобы придти к модели 5M2F, частицы ограничены ионами и электронами,  $\alpha = i, e$ . Члены источников столкновения возникают только вследствие кулоновского рассеяния между ионами и электронами. В частности, полученные источники представляют собой  $S_\alpha^n = 0$ ,  $S_\alpha^m = \mathbf{R}_\alpha^{ie}$  и  $S_\alpha^e = v_\alpha \cdot \mathbf{R}_\alpha^{ie} + Q_\alpha^{ie}$ , где  $\mathbf{R}_\alpha^{ie}$  и  $Q_\alpha^{ie}$  представляют собой обусловленный трением обмен импульсом и энергией, соответственно. Физические и числовые аспекты модели 5M2F подробно описаны в более ранней работе.

[107] Модель замыкают с использованием замыкания типа Чепмана-Энскога, следующего за замыканием по Брагинскому. Тензоры напряжения ( $\Pi_\alpha$ ) и тепловые потоки ( $\mathbf{h}_\alpha$ ) заданы в соответствии с формулировкой Брагинского, принимая во внимание произвольную намагниченность,  $x_\alpha = \omega_{c\alpha} \tau_\alpha$  где  $\omega_{c\alpha}$  представляет собой циклотронную частоту, а  $\tau_\alpha$  представляет собой время столкновения частиц  $\alpha$ .

[108] Члены импульса и теплообмена ( $\mathbf{R}_\alpha^{ie}$  и  $Q_\alpha^{ie}$ ) отбрасывают со следующим обоснованием. Обусловленный трением обмен импульсом изменяет объемный импульс плазмы во временном масштабе  $\tau_{\text{exch}} \approx (m_i/m_e)\tau_e$ , где  $\tau_e$  представляет собой время столкновительной релаксации электронов. Обмен тепловой энергией происходит в одинаковом временном масштабе. Если  $\tau_{\text{exch}}/\tau_{\text{dyn}} \gg 1$ , где  $\tau_{\text{dyn}}$  представляет собой интересующий динамический временной масштаб, члены, относящиеся к трению и теплообмену, могут быть опущены без потери точности. Условие  $\tau_{\text{exch}}/\tau_{\text{dyn}} \gg 1$  удовлетворяется, например, в FuZE-подобной плазме, рассматриваемой ниже. Хотя эти члены не представляют собой вычислительной задачи, они опущены, чтобы позволить изложению и анализу сфокусироваться на членах, относящихся к вязкости и тепловому потоку, которые являются более важными для характеранеустойчивостим  $m = 0$ .

[109] Тепловые потоки представляют собой

$$\mathbf{h}_\alpha = -\kappa_\perp^\alpha \nabla_\perp T_\alpha \pm \kappa_\parallel^\alpha \mathbf{b} \times \nabla_\perp T_\alpha, \quad (8)$$

где знаки плюса и минуса взяты у членов диамагнитного теплового потока (включающих  $\kappa_\parallel^\alpha$ ) для ионов и электронов, соответственно. Направление магнитного поля представляет собой  $\mathbf{b} = \mathbf{B}/B$ , где  $B = |\mathbf{B}|$ . Члены, содержащие  $\nabla_\parallel$ , были отброшены, поскольку  $\mathbf{b}$  находится в направлении симметрии. Перпендикулярные теплопроводности составляют

$$\kappa_\perp^\alpha = \frac{n_\alpha k_B^2 T_\alpha \tau_\alpha \gamma'_{1\alpha} x_\alpha^2 + \gamma'_{0\alpha}}{m_\alpha \Delta_\alpha}, \quad (9)$$

и коэффициенты диамагнитного теплового потока составляют

$$\kappa_\parallel^\alpha = \frac{n_\alpha k_B^2 T_\alpha \tau_\alpha x_\alpha (\gamma''_{1\alpha} x_\alpha^2 + \gamma''_{0\alpha})}{m_\alpha \Delta_\alpha}, \quad (10)$$



где  $\Delta_\alpha = x_\alpha^4 + \delta_{1\alpha}x_\alpha^2 + \delta_{0\alpha}$ . Для электронов постоянные представляют собой

$$\begin{aligned} & (\gamma'_{0e}, \gamma'_{1e}, \gamma''_{0e}, \gamma''_{1e}, \delta_{0e}, \delta_{1e}) \\ & = (11.92, 4.664, 21.67, 2.5, 3.7703, 14.79), \end{aligned}$$

и для ионов

$$\begin{aligned} & (\gamma'_{0i}, \gamma'_{1i}, \gamma''_{0i}, \gamma''_{1i}, \delta_{0i}, \delta_{1i}) \\ & = (2.645, 2.0, 4.65, 2.5, 0.677, 2.7). \end{aligned}$$

[110] Намагниченность рассчитывают следующим образом:  $x_\alpha = \omega_{c\alpha}\tau_\alpha$ , где циклотронная частота представляет собой  $\omega_{c\alpha} = eB/m_\alpha$ . Предполагая, что здесь ионы водорода, частоты столкновения частиц составляют

$$\tau_e = \frac{3.5 \times 10^{11} T_{e,eV}^{3/2}}{\ln \Lambda} \frac{1}{n_i} \quad (11)$$

и

$$\tau_i = \frac{2.12 \times 10^{13} T_{i,eV}^{3/2}}{\ln \Lambda} \frac{1}{n_i}. \quad (12)$$

[111] В этих выражениях  $\ln \Lambda$  представляет собой кулоновский логарифм, который, как предполагается, здесь равен 10, а температуры представлены в eV. Следует отметить, что часть теплового потока, относящаяся к трению иона и электрона, здесь опущена; в этом осесимметричном представлении эта часть будет равна  $\mathbf{h}_e^u = 3n_e k T_e \mathbf{u}_\perp / (2\omega_{ce}\tau_e)$ , где  $\mathbf{u} = \mathbf{v}_e - \mathbf{v}_i$ . Данный член отбрасывают при предположении большой  $\omega_{ce}\tau_e$  по объему Z-пинча.

[112] Тензор напряжений строят из тензора скорости деформации:

$$\mathbb{W} = \nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T - \frac{2}{3} \mathbb{I} \nabla \cdot \mathbf{v}, \quad (13)$$

и пять коэффициентов вязкости представляют собой  $\eta_0$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_2\eta_3$ , и  $\eta_4$ . Четные коэффициенты вязкости равны

$$\eta_0 = 0.96 n_i k_B T_i \tau_i, \quad (14)$$

$$\eta_2 = n_i k_B T_i \tau_i \left( \frac{6}{5} x_i^2 + 2.23 \right) / \Delta_\eta, \quad (15)$$

$$\eta_4 = n_i k_B T_i \tau_i x_i (x_i^2 + 2.38) / \Delta_\eta, \quad (16)$$

где  $\Delta_\eta = x_i^4 + 4.03x_i^2 + 2.33$ . Нечетные коэффициенты  $\eta_1$  и  $\eta_3$  находят из  $\eta_2$  и  $\eta_4$  путем замены  $\omega_{ci}$  на  $2\omega_{ci}$ ; то есть  $\eta_1 = \eta_2(2x_i)$  и  $\eta_3 = \eta_4(2x_i)$ . Здесь используют цилиндрическую систему координат с радиальными, азимутальными и осевыми координатами  $r$ ,  $\theta$  и  $z$ , соответственно. Магнитное поле считается строго азимутальным. При предположении нулевой азимутальной скорости и отсутствии изменения в азимутальном направлении компоненты тензора напряжений представляют собой следующее

$$P_{\theta\theta} = -\eta_0 \mathbb{W}_{\theta\theta}, \quad (17a)$$

$$P_{zz} = -\eta_0 \frac{1}{2} (\mathbb{W}_{zz} + \mathbb{W}_{rr})$$

$$-\eta_1 \frac{1}{2} (\mathbb{W}_{zz} - \mathbb{W}_{rr}) - \eta_3 \mathbb{W}_{zr}, \quad (18b)$$

$$\Pi_{rr} = -\eta_0 \frac{1}{2} (\mathbb{W}_{zz} + \mathbb{W}_{rr})$$

$$-\eta_1 \frac{1}{2} (\mathbb{W}_{rr} - \mathbb{W}_{zz}) + \eta_3 \mathbb{W}_{zr}, \quad (19c)$$

$$\Pi_{zr} = \Pi_{rz} = -\eta_1 \mathbb{W}_{zr} + \eta_3 \frac{1}{2} (\mathbb{W}_{zz} - \mathbb{W}_{rr}), \quad (20d)$$

$$\Pi_{z\theta} = \Pi_{\theta z} = 0, \quad (21e)$$

$$\Pi_{r\theta} = \Pi_{\theta r} = 0. \quad (22f)$$

[113] Как обсуждалось в отношении метода Брагинского, члены, пропорциональные  $\eta_0$ , соответствуют напряжению, связанному со сжатием или расширением плазмы. Члены, пропорциональные  $\eta_1$ , связаны с диффузией через магнитное поле с размером шага, равным ларморовскому радиусу, и частотой шага, заданной столкновениями. Коэффициент  $\eta_3$  связан с гировязкостью, которая представляет собой диамагнитный поток импульса. Члены, пропорциональные  $\eta_2$  and  $\eta_4$ , были отброшены. В этой реализации опущена электронная вязкость (за исключением изотропной вязкости  $m_e/m_i$ , применяемой для численных целей) на основании того, что для подобных ионных и электронных температур коэффициенты электронной вязкости  $\eta_0^e$ ,  $\eta_3^e$ , и  $\eta_1^e$  будут меньше, чем у их ионных аналогов, приблизительно на  $(m_e/m_i)^{1/2}$ , и  $(m_e/m_i)^{3/2}$ , соответственно, и при дополнительном предположении, что градиенты скорости ионов электронов и ионов являются сопоставимыми.

[114] Здесь рассматриваются три типа коррекции коэффициентов переноса Брагинского. Первая относится к предположению, сделанному при получении этих коэффициентов, что временные масштабы являются длинными по сравнению со временем столкновения частиц. Напряжение в плоскости  $r$ - $z$  вследствие сжатия или расширения плазмы регулируют посредством ненамагниченной вязкости,  $\eta_0 = 0.96 p_i \tau_i$ . Как описано Брагинским,  $\nabla \cdot \mathbf{v} < 0$  (сжатие) увеличивает напряжение, тогда как  $\nabla \cdot \mathbf{v} > 0$  (расширение) уменьшает напряжение. Значение этого напряжения равно  $\approx p_i \tau_i |\nabla \cdot \mathbf{v}|$ . Физический механизм представляет собой следующее. Уравнение непрерывности показывает, что  $\nabla \cdot \mathbf{v} = -\dot{n}/n$  (игнорируя градиенты  $n$ ); в отношении динамического временного масштаба  $\dot{n}/n = (\delta n/n)/\tau_{\text{dyn}}$ . Затем, предполагая, что поток заморожен в текучей среде,  $\dot{n}/n = \dot{B}/B = (\delta B/B)/\tau_{\text{dyn}}$ . Если предположить, что размер ларморовской орбиты иона является небольшим по сравнению с размером области сжатия или расширения, увеличение магнитного поля обеспечивает увеличение поперечной скорости и связанных поперечных энергии и напряжения. Данный эффект проявляется как температурная анизотропия, как наблюдается при непрерывном кинетическом моделировании. Увеличенную энергию разделяют на поперечное и параллельное направления в течение времени, заданного

посредством  $\tau_i$ ; этот процесс известен как гирорелаксация. При  $\tau_i \approx \tau_{dyn}$  поперечное напряжение приблизительно представляет собой  $p\delta B/B$ . Например,  $\delta B/B = 1$ , величина напряжения аналогична изотропному давлению. При  $\tau_i < \tau_{dyn}$  напряжение уменьшается вследствие быстрого равномерного распределения. Однако при  $\tau_i > \tau_{dyn}$  полученный эффект является нефизически сильным, что приводит к напряжению, превышающему изотропное давление для  $\delta B/B = 1$ . В реализуемой здесь модели коэффициент коррекции, представляющий собой следующее

$$f_{\text{согг}}^{\tau} = \left(1 + \frac{\hat{\tau}_i}{\tau_{dyn}}\right)^{-1}, \quad (23)$$

применяют к коэффициенту  $\eta_0$ . Здесь  $\hat{\tau}_i$  представляет собой репрезентативное время столкновения ионов. Форма, используемая для этой коррекции, аналогична коррекции параллельного теплового потока, обычно используемой в моделировании по Брагинскому в установках Токамак. Благодаря использованию репрезентативного времени столкновения эта коррекция представляет собой глобальную постоянную, а изменяющуюся в зависимости от локальных параметров плазмы. Априори, этот подход требует спецификации  $\tau_{dyn}$ . Для моделирования неустойчивости  $m = 0$  Z-пинча  $\tau_{dyn}$  задают как характеристическое альфвеновское время,  $\tau_A$ , определяемое как характеристический радиус пинча, деленный на альфвеновскую скорость (см. полное определение в данном документе).

[115] Вторая и третья коррекции относятся к нарушению модели по Брагинскому, когда ларморовские радиусы являются большими по сравнению с интересующим масштабом длин. (В сообществе по моделированию токамаков отсутствуют аналоги этих коррекций, в которых обычно предполагается небольшой ларморовский радиус.) Одна из них представляет собой глобальную коррекцию,

$$f_{\text{согг}}^L = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi \ell}{2 \hat{r}_{L\alpha}}\right)\right] \text{ где } \hat{r}_{L\alpha} > \frac{\ell}{2}, \text{ и}$$

$$f_{\text{согг}}^L = 1 \text{ в других местах,} \quad (24)$$

на основе репрезентативного ларморовского радиуса,  $\hat{r}_{L\alpha}$ , и интересующего масштаба длин,  $\ell$ . Коррекция с линейной зависимостью от  $r_L$  будет обеспечивать возможность сильного переноса даже в тех случаях, когда ларморовский радиус будет больше размера этого признака. Нелинейная зависимость в уравнении (24) от ларморовского радиуса физически более возможна. Для  $\hat{r}_{L\alpha} = \ell$ , коррекция будет  $1/2$ , а для  $\hat{r}_{L\alpha} > \ell$ , коррекция станет больше  $1/2$  (например,  $f_{\text{согг}}^L \approx 0,15$  для  $\hat{r}_{L\alpha} = 2\ell$ ). Эта коррекция применима к гировязкости ( $\eta_3$ ) и диамагнитным тепловым потокам ( $\kappa_{\lambda}^{\alpha}$ ), а также поперечному (в плоскости  $r$ - $z$ )

напряжению, связанному с  $\eta_0$ , которое связано с изменением размерва ларморовской орбиты вследствие градиентов длиной  $\ell$  шкалы. Что касается  $\tau_{\text{dyn}}$ ,  $\ell$  задано априори. Для моделирования линейного роста моды с известным волновым числом  $k$ , разумным выбором будет  $\ell = k^{-1}$ . Для нелинейного моделирования разумным выбором является  $\ell = k_{\text{max}}^{-1}/2$ , где  $k_{\text{max}}$  представляет собой волновое число, при котором линейный рост является максимальным. Поскольку скорости линейного роста имеют тенденцию падать при  $k > k_{\text{max}}$ , тот выбор обеспечивает, что коррекции перенося применяются к быстрорастущим модам.

[116] Другая коррекция для большого ларморовского радиуса относится к особой ситуации вблизи  $r = 0$ , где магнитное поле приближается к нулю, а ларморовские орбиты больше не являются простыми спиралями. При радиальном перемещении от  $r = 0$ , ларморовская орбита становится конечной и, в конечном итоге, может достигать значения, которое соответствует радиусу. С использованием критического радиуса,  $r_{\text{crit}}$ , для приближения к этому местоположению, и для  $r$ -зависимой коррекции,

$$f_{\text{corr}}^r = \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{\pi r}{r_{\text{crit}}} \right) \right] \text{ где } r < r_{\text{crit}}, \text{ и}$$

$$f_{\text{corr}}^r = 1 \text{ в других местах,} \quad (25)$$

применяют для уменьшения переноса вблизи  $r = 0$ , где орбиты ионов больше не являются простыми спиралями. Эта коррекция применяется только к  $\eta_3$  и  $\kappa_{\lambda}^{i,e}$ . Как упоминалось в приведенном выше обсуждении уравнения (24), нелинейная зависимость  $f_{\text{corr}}^r$  дает сильное обрезание, когда локальный ларморовский радиус превышает расстояние от цилиндрической оси. Следует отметить, что область малого магнитного поля вблизи  $r = 0$ , как ожидается, также повлияет на поперечное напряжение, связанное с  $\eta_0$ . Однако вместо стремления к нулю при  $r = 0$ ,  $\eta_0$  должно соответствовать перпендикулярному переносу,  $\eta_1$ , на некотором уровне, который представляет собой процесс случайного блуждания в области неспиральных орбит. Соответствующую коррекцию здесь не выполняют.

[117] Комбинация этих трех коэффициентов коррекции является достаточной для изучения основных эффектов переноса Брагинского в отношении устойчивости Z-пинча. Как дополнительно описано в данном документе, примеры скорректированных коэффициентов представлены в контексте FuZE-подобного равновесия.

[118] Базовую структуру моделирования WARPXM используют для решения модели 5M2F на неструктурированной сетке треугольников с использованием конечно-элементного метода RKDG (Runge-Kutta discontinuous Galerkin, разрывной метод Галеркина и метод Рунге-Кутты). В структуре WARPXM используют параллелизацию MPI, а масштабируемость метода RKDG подходит для проблем с большой размерностью.

[119] Благодаря применению определенного временного шага необходимо принять решение о самом быстром временном масштабе. Для гиперболических явлений размер временного шага ( $\Delta t_{\text{hyp}}$ ) ограничен в соответствии с  $u\Delta t_{\text{hyp}}/h_{\text{eff}} \leq C$ , где  $u$  представляет собой волновую скорость,  $h_{\text{eff}}$  представляет собой эффективное разрешение сетки, а  $C$  представляет собой число Куранта, которое зависит от конкретной выбранной схемы Рунга-Кутты, но, как правило, составляет  $\leq 1$ . При применениях 5M2F скорость света,  $c = 1/(\mu_0\epsilon_0)^{1/2}$ , часто представляет собой самую высокую скорость. Для обеспечения большего  $\Delta t_{\text{hyp}}$ ,  $c$  можно уменьшать путем искусственного увеличения  $\epsilon_0$ . Для обеспечения устойчивости системы,  $c$  должна превышать тепловую скорость электрона,  $v_{Te} = (2k_B T_e/m_e)^{1/2}$ . Дальнейшее увеличение  $\Delta t_{\text{hyp}}$  возможно за счет искусственного увеличения массы электрона для уменьшения  $v_{Te}$ . Следует умерять изменения  $c$  и  $m_e$  для сохранения физической точности. Допустимое полное  $\Delta t$  ограничивается не только гиперболической физикой, но также колебательным и диффузионным характером. Колебания с угловой частотой  $\omega$  требуют  $\Delta t_{\text{osc}} \lesssim 0.5\omega^{-1}$ . Для диффузного поведения временной шаг должен удовлетворять  $D\Delta t_{\text{diff}}/h_{\text{eff}}^2 < C_D$ , где  $D$  представляет собой соответствующую диффузионную способность, а  $C_D$  представляет собой диффузионное число Куранта порядка единицы. Это ограничение на  $\Delta t_{\text{diff}}$  может быть строгим, и иногда полезно искусственно уменьшать коэффициент диффузии при физическом обосновании. На каждом временном шаге используют  $\Delta t = \min(\Delta t_{\text{hyp}}, \Delta t_{\text{osc}}, \Delta t_{\text{diff}})$  с учетом всех этих ограничений.

[120] Три дополнительные детали структуры WARPXM требуют пояснений. Во-первых, для точного расчета необходимых градиентов потоков, связанных с замыканием по Брагинскому, необходимо особое внимание, поскольку дискретизация первичных переменных является разрывной. Для решения этой проблемы используется подход Басси-Ребая. Во-вторых, для приспособления к цилиндрической системе координат операции векторных вычислений записывают в терминах прямолинейных производных и исходных членов. Например, дивергенцию вектора  $\mathbf{A}$  часто записывают как

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rA_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial A_z}{\partial z}.$$

[121] Азимутальная производная равна нулю в некоторых вариантах осуществления осесимметричной системы, описанной в данном документе. Член, включающий радиальную производную, может быть переписан таким образом:

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial A_r}{\partial r} + \frac{\partial A_z}{\partial z} + \frac{A_r}{r}.$$

[122] Тогда инфраструктура структуры WARPXM может естественным образом обрабатывать первые два члена, а последний член будет включен в качестве исходного члена. Операции ротора, дивергенции тензора и градиента вектора также написаны в терминах прямолинейных производных плюс цилиндрические исходные члены. Третья деталь относится к пространственной интеграции этих цилиндрических исходных членов. Основной разрывной метод Галеркина (discontinuous Galerkin, DG), реализованный в структуре WARPXM, интегрирует исходные члены с использованием квадратуры на основе значений в узлах Лежандра-Гаусса-Лобатто (LGL, Legendre-Gauss-Lobatto). Треугольники имеют узлы LGL на краях, и поэтому некоторые узлы находятся на  $r = 0$ . Выполнение квадратуры затем требует вычисления исходных членов в  $r = 0$ . Некоторые из цилиндрических исходных членов содержат первые производные первичных переменных, деленных на  $r$ . Применение правила Лопиталья потребует знания второй производной. Чтобы избежать необходимости во вторых производных квадратуру LGL заменяют на симметричную гауссовскую квадратуру, которая не имеет квадратурных точек на краях треугольника и, таким образом, позволяет избежать деления на 0 в  $r = 0$ .

[123] Диффузное равновесие Беннетта Z-пинча является основной темой моделирования, представленного ниже. Это равновесие может быть параметризовано радиусом ( $a$ ) пинча и плазменным током ( $I_p$ ). Затем определяют азимутальное магнитное поле ( $B_\theta$ ), плотность осевого тока ( $j_z$ ) и общее давление плазмы ( $p$ ) как

$$B_\theta = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi} \frac{r}{r^2 + a^2}, \quad (26)$$

$$j_z = \frac{I_p}{\pi} \frac{a^2}{(r^2 + a^2)^2}, \quad (27)$$

$$p = \frac{\mu_0 I_p^2}{8\pi^2} \frac{a^2}{(r^2 + a^2)^2}. \quad (28)$$

[124] На фиг. 11 проиллюстрированы нормализованные радиальные профили магнитного поля ( $B_\theta$ ), плотности ( $n$ ) и температуры ( $T$ ) в равновесии Беннета.

[125] Общее давление состоит из равных вкладов ионного и электронного давлений. Предполагается, что равномерная температура ( $T$ ) является такой, что плотность ( $n_i = n_e = n$  для равновесия без сдвига) пропорциональна давлению ( $p/2 = nk_B T$ ). Точно половина массы и тока плазмы содержится в  $r = a$ . Общее давление  $r = a$  равно магнитному давлению,  $B_\theta^2/(2\mu_0)$ , при  $r = a$ . Магнитное поле, плотность и температурные профили для этого равновесия, нормированные к их соответствующим пиковым значениям, показаны на фиг. 11.

[126] Равновесие импульса в модели 5M2F требует

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = q_i n_i (E_r + v_{iz} B_\theta), \quad (29)$$

и

$$\frac{\partial p_e}{\partial r} = q_e n_e (E_r + v_{ez} B_\theta). \quad (30)$$

[127] За исключением случаев с сдвиговым потоком (см. ниже), предполагается, что равные и противоположные ионные и электронные осевые скорости являются такими, что равновесие  $E_r$  равно нулю. Таким образом,  $v_{iz} = -v_{ez} = j_z / (2en)$ , где варианты осуществления в настоящем документе предполагают однозарядные ионы с зарядом  $q_i = -q_e = e$ , где  $e$  представляет собой элементарный заряд. Поскольку  $j_z$  и  $n$  имеют одинаковую радиальную зависимость, эти скорости являются равномерными в радиальном направлении. Общий ток удовлетворяет выражению  $\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \nabla p$ , и сила Лоренца уравнивает радиальный градиент давления для каждой частицы. Чтобы установить равновесие с  $v_{iz} = 0$ , как обычно предполагается в статическом равновесии МГД, для удовлетворения закона Гаусса потребуется конечное  $E_r$  вместе с присутствующим разделением зарядов. В некоторых более ранних работах с использованием модели 5M2F используют равновесия с  $v_{iz} = 0$  и  $E_r = 0$ ; в таких случаях присутствуют колебания относительно состояния равновесия, хотя они предположительно благоприятны с точки зрения определения скорости роста.

[128] Сдвиговый поток добавляют в равновесие следующим образом. Осевая скорость ионов составляет  $v_{iz} = j_z / (2en) + v_{sf}$ . В настоящем документе рассматриваются скорости сдвигового потока, которые являются линейными или параболическими по радиусу, то есть  $v_{sf}(r) = v_{sf}^a r / a$  или  $v_{sf}(r) = v_{sf}^a (r/a)^2$ , где  $v_{sf}^a$  представляет собой скорость сдвигового потока при  $r = a$ . Требуемое электрическое поле определяется уравнением (29) с  $n_i = n$ , и не изменяется по сравнению с равновесием без сдвига. Закон Гаусса используют для нахождения  $n_e$ . Осевой ток не изменяется по сравнению с равновесием без сдвига, и  $v_{ez}$  задают соответствующим образом. Затем определяют давление электронов с помощью уравнения (30). Для  $v_{sf}$ , представляющего практический интерес ( $v_{sf}^a \lesssim v_A$ ), плотность электронов и давление только незначительно ( $\ll 1\%$ ) отличаются от значений без сдвига.

[129] Используемое здесь возмущение радиально локализуется с использованием известного подхода и содержит необязательный фазовый сдвиг. Благодаря содержанию фазового сдвига, возмущенные формы возмущенной моды могут близко соответствовать конечной структуре собственной моды, которая зависит от применяемого профиля сдвигового потока и других параметров плазмы. Возмущенная плотность и плотность тока представляют собой  $n + \delta n$  и  $j_z + \delta j_z$ , с

$$\delta n(r) = \epsilon n(r) \cos(kz - \phi_0 r^\zeta) e^{-(r-a)^2 / (2b^2)}, \quad (31)$$

и

$$\delta j_z(r) = -\frac{\epsilon}{2} j_z(r) \cos(kz - \phi_0 r^\zeta) e^{-(r-a)^2/(2b^2)}, \quad (32)$$

где  $k$  представляет собой волновое число возмущений. Фазовый сдвиг определяют посредством параметра  $\phi_0$  и коэффициента  $r^\zeta$ ;  $\zeta = 1$  и  $2$  используют в моделированиях с линейным и параболическим сдвиговым потоком, соответственно. При радиальной локализации используют параметр  $b = a/3$ . Возмущения, добавляемые к ионной и электронной скоростям, составляют  $\delta v_{iz} = -\delta v_{ez} = \delta j_z/(2en)$ . Равновесное магнитное поле остается неизменным, поэтому закон Фарадея не равновесен, так что в ответ на возмущение электрическое поле немедленно начинает развиваться.

[130] Вычислительная область является прямоугольной в плоскости  $r - z$ . Осевая длина соответствует возмущенной длине волны, то есть  $L_z = 2\pi/k$ . Радиальная протяженность области составляет  $4a$ . Такая настройка области соответствует предыдущей работе по анализу неустойчивости  $m = 0$ . Осевые границы являются периодическими. При  $r = 0$  используют стандартные осесимметричные граничные условия: радиальные и азимутальные компоненты векторных величин равны нулю, тогда как скалярные и осевые компоненты векторных величин не имеют радиального изменения. При  $r = 4a$  применяют граничные условия проводящей стенки идеального скольжения. То есть радиальная скорость, радиальное магнитное поле и осевое электрическое поле равны нулю. Плотность, давление, осевая скорость, радиальное электрическое поле и осевое магнитное поле не имеют радиального изменения.

[131] В анализе и обсуждении, представленных ниже, используют несколько характеристических величин. Характеристическая альфвеновская скорость составляет  $v_A = B_{\theta, pk}/(n_{pk} m_i \mu_0)^{1/2}$ , где  $B_{\theta, pk}$  и  $n_{pk}$  представляют собой пиковое магнитное поле и численные плотности. Характеристическое время определяют как  $\tau_A = a/v_A$ . Тепловая скорость ионов составляет  $v_{Ti} = (2k_B T/m_i)^{1/2}$ . Ларморовский радиус составляет  $r_{Li} = m_i v_{Ti}/(e B_{\theta, pk})$ . Тепловая скорость связана с альфвеновской скоростью как  $v_{Ti} = \sqrt{2} v_A$ . Предположим, что это ионы водорода.

[132] Для заданного выбора  $a$  и  $I_p$  определяют давление, но плотность и температура все еще не заданы. Плотность и температуру устанавливают путем задания отношения размера пинча к ларморовскому радиусу,  $a/r_{Li}$ . Используя определение  $v_{Ti}$ , решение для  $T_i$  дает

$$T = T_e = T_i = \frac{(ae B_{\theta, pk})^2}{2m_i k_B (a/r_{Li})^2}. \quad (33)$$

Ионная и электронная плотность следуют из соотношения  $n k_B T = p/2$ .

[133] В идеальной модели 5M2F нормированная динамика, такая как нормированная скорость  $\gamma \tau_A$  роста неустойчивости, зависит от выбора  $a/r_{Li}$ , но конкретный выбор  $a$  и  $I_p$



не является важным. Однако перенос Брагинского зависит от свойств плазмы (плотности, температуры и магнитного поля), в обсуждаемых ниже применениях для 5M2F с замыканием по Брагинскому,  $a$ ,  $I_p$ , и  $a/r_{Li}$  все они заданы.

[134] Сотников и др. [В. И. Сотников, И. Параскив, В. Махин, Б. С. Бауэр, Дж. Н. Лебеф и Дж. М. Доусон, «Линейный анализ стабилизации сдвиговым потоком глобальных магнитогидродинамических неустойчивостей на основе жидкостной модели Холла», *Физика Плазмы* 9, 913 (2002)] применяют линеаризованную модель холловской МГД для изучения ростанеустойчивостит  $= 0$  в равновесии Беннетта с различными значениями параметра Холла. Эффект Холла параметризуют с использованием  $\epsilon_{Sot.} = c/(\omega_{pi}R)$ , где  $\omega_{pi} = [n_{i0}e^2/(\epsilon_0m_i)]^{1/2}$  представляет собой ионную частоту плазмы, и  $R$  представляет собой радиус смоделированной области, и  $n_{i0}$  представляет собой плотность ионов при  $r = 0$ . Следует отметить, что для связи  $\epsilon_{Sot.}$  с параметром  $a/r_{Li}$  Сотников и др. используют  $R = 3a$ . При использовании  $r_{Li}$  и  $v_{Ti}$  введенных ранее отношения, обнаружено, что отношение будет составлять  $a/r_{Li} = (3\sqrt{2}\epsilon_{Sot.})^{-1}$ . Сотников и др. случаи с  $\epsilon_{Sot.} = 0,1$  и  $0,01$  используют в качестве показательных случаев; это соответствует  $a/r_{Li} = (3\sqrt{2}\epsilon_{Sot.})^{-1} \approx 2,357$  и  $23,57$ . Следует отметить, что характеристическое время, используемое Сотниковым и др,  $\tau_{Sot.} = R/v_{Ti}$ , связано с альфвеновским временем следующим образом:  

$$\tau_A = \tau_{Sot.}\sqrt{2}/3,$$

скорость роста при  $ka = 10/3$  без сдвигового потока для  $\epsilon_{Sot.} = 0,1$  составляет  $\gamma\tau_A = 1,27$ , и где  $\epsilon_{Sot.} = 0,01$ ,  $\gamma\tau_A = 0,80$ . При  $\epsilon_{Sot.} = 0$ , в этом случае модель холловской МГД уменьшается до идеальной МГД,  $\gamma\tau_A = 0,73$ .

[135] В идеальном моделировании 5M2F без сдвигового потока наблюдается близкое согласие с результатами МГД и холловской МГД. Линейные скорости роста для неустойчивости  $m = 0$  определяют из фазы линейного роста в нелинейных моделированиях. При нормированным осевом волновом числе  $ka = 10/3$  скорости роста в  $a/r_{Li}$  диапазоне от 4 до 200 показаны на фиг. 12А. Для этих моделирований массовое соотношение составляет  $m_e/m_i = 1/100$ , а уровень возмущения составляет  $\epsilon = 10^{-3}$ . Скорость роста определяют путем рассмотрения изменения интегрированной в объеме радиальной кинетической энергии ионной текучей среды ( $KE_{i,rad.} = \int_V dV m_i n_i v_{ir}^2/2$ ), где  $v_{ir}$  представляет собой радиальную скорость ионов, в течение периода экспоненциального роста от момента времени  $t_0$  до  $t_1$ . Скорость роста вычисляют следующим образом

$$\gamma = \frac{\ln \left[ \frac{KE_{i,rad.}(t_1)}{KE_{i,rad.}(t_0)} \right]}{2(t_1 - t_0)}. \quad (34)$$

[136] Примерные изменения по времени  $\ln(KE_{i,\text{rad.}}/ME_0)$ , где  $ME_0$  представляет собой начальную магнитную энергию, показаны на фиг. 12В.

[137] На фиг. 12А и 12В проиллюстрированы результаты идеальной 5M2F при  $ka = 10/3$ . На фиг. 12А показаны скорости роста для  $a/r_{Li}$  диапазоне от 4 до 200. При большом  $a/r_{Li}$  скорость роста 5M2F согласуется с результатом, обнаруженным Сотниковым и др. для чистого МГД (пунктирная линия). Для меньшего  $a/r_{Li}$  результаты 5M2F близки к соответствующим результатам Сотникова и др. На фиг. 12В показаны примерные изменения по времени интегрированной радиальной ионной кинетической энергии, нормированной к начальной магнитной энергии. Вертикальные пунктирные линии ограничивают период, в течение которого измеряют линейный рост, а пунктирная линия показывает измеряемый экспоненциальный рост.

[138] Результаты для режима относительно большого ларморовского радиуса показаны на фиг. 13А, снова для  $ka = 10/3$ . Для  $a/r_{Li} \lesssim 2$  результат с использованием  $m_e/m_i = 1/100$  аналогичен результату с реальным массовым соотношением  $m_e/m_i = 1/1836$ , отклоняющимся на величину до  $\approx 30\%$  при  $a/r_{Li} \approx 1,2$ . Быстрый рост появляется в области с  $a/r_{Li} \lesssim 1,3$ . Как дополнительно описано ниже, этот быстрый рост связан с неустойчивостью электронного дрейфа. Радиальный рост кинетической энергии ионов построен на фиг. 13В для  $a/r_{Li} = 1,2$ . Быстрый рост кинетической энергии наблюдается на  $t/\tau_A \approx 2$ , ближе к концу моделирования. Проверка решения показывает, что быстрый рост обусловлен развитием моды высокой мощности  $k$  с длиной волны, заданной вычислительной сеткой. Уточнение сетки приводит к более быстрой, более высокой  $k$  моде и, таким образом, противоречит цели идентификации скорости роста возмущенной  $ka = 10/3$  моды. Линейный период роста возмущенной моды является очень коротким для моделирования при  $a/r_{Li} \lesssim 1$ , что затрудняет точное определение смоделированной скорости роста; скорости роста, обнаруженные для случаев при  $a/r_{Li} \leq 1,3$ , имеют ошибки порядка 10%.

[139] На фиг. 13А и 13В проиллюстрированы результаты идеальной 5M2F при  $ka = 10/3$ , уделяющие основное внимание малому  $a/r_{Li}$ . На фиг. 13А проиллюстрированы скорости роста для  $a/r_{Li}$  в диапазоне от 0,75 до 4 для двух соотношений массы электронов и ионов. Для  $a/r_{Li}$  в диапазоне от 1,5 до 4 скорости роста изменяются медленно. Для  $a/r_{Li}$  менее чем приблизительно равного 1,1 наблюдают более быстрый рост. На фиг. 13В показаны примерные изменения по времени интегрированной радиальной ионной кинетической энергии, нормированной к начальной магнитной энергии.

[140] Дополнительные сканирования  $a/r_{Li}$  выполняют при  $ka = 20/3, 40/3, \text{ and } 80/3$ . Во всех этих моделированиях используют  $m_e/m_i = 1/1836$ . Результаты показаны на фиг.

14. Область с быстрым ростом вследствие неустойчивости электронного дрейфа сохраняется в области  $a/r_{Li} \lesssim 1,8$ . Область без роста появляется при  $a/r_{Li} \gtrsim 1,8$  и расширяется по мере увеличения возмущенного волнового числа. Для заданного  $ka$  рост падает до нуля по мере приближения  $r_{Li}$  к длине волны моды. В терминах  $ka$ , значение  $a/r_{Li}$ , ниже которого ожидается замедленный рост, может быть аппроксимировано как  $(a/r_{Li})_{\text{damp}} \approx ka/(2\pi)$ . При  $ka = 40/3$ , например,  $(a/r_{Li})_{\text{damp}} \approx 2,11$ , соответствует результату, показанному на фиг. 14. Область нулевого роста проходит от  $(a/r_{Li})_{\text{damp}}$  до  $a/r_{Li} \approx 1,8$ , где возникает неустойчивость электронного дрейфа.

[141] На фиг. 14 проиллюстрированы результаты идеальной 5M2F с несколькими возмущенными волновыми числами. Быстрорастущая мода сохраняется при  $a/r_{Li} \lesssim 1,8$ , но область без роста появляется и расширяется по мере увеличения возмущенного волнового числа.

[142] Для  $m_e/m_i = 1/100$  и  $ka = 10/3$  структуры плотности линейно растущих мод показаны на фиг. 15 для  $a/r_{Li} = 4, 10$  и  $50$ . При большом  $r_{Li}$  виден незначительный дрейф структуры моды в направлении  $+z$ ; при  $a/r_{Li} = 4$ , общий сдвиг составляет приблизительно  $1/8$  осевой длины волны. При больших  $r_{Li}$  наблюдают наклон, причем структура имеет больший радиус, смещенный в направлении  $+z$  больше, чем структура при меньших радиусах. Пространственное разрешение для результатов на фиг. 15 представляет собой  $64 \times 16$  (радиальные  $\times$  осевые) ячеек с пространственной точностью третьего порядка.

[143] На фиг. 15 проиллюстрированы структуры моды для идеальной 5M2F при  $a/r_{Li} = 4, 10$  и  $50$ . Логарифм по основанию 10 изменения плотности, нормированной к пиковой равновесной плотности, построен в плоскости  $r - z$ . При  $a/r_{Li} = 50$  (МГД-подобной) один выступ, обозначенный пунктирным овалом, выделяется над радиальной структурой. При меньшем  $a/r_{Li}$ , присутствуют два выступа, обозначенные пунктирными овалами в случае с  $a/r_{Li} = 4$ : меньший выступ присутствует вблизи оси и не выровнена с основным выступом.

[144] Значения скорости роста, показанные на фиг. 12А, имеют ошибки  $\lesssim 1\%$ . Считается, что к такому выводу можно прийти с помощью трех известных источников ошибок:

[145] *Пространственное разрешение:* При сканировании используют  $40 \times 10$  (радиальные  $\times$  осевые) ячеек с базовым пространственным разрешением и с пространственной точностью третьего порядка. При  $a/r_{Li} = 4, 10$  и  $50$  исследуют поведение сходимости в отношении пространственного разрешения. В каждом случае ошибка в базовом разрешении составляет  $< 0,1\%$ . Размер признака, как видно на фиг. 15, составляет половину осевой области и представлен пятью ячейками. При представлении третьего

порядка (в котором используются квадратные многочлены) точность является очень высокой. Радиальное представление мод является таким же хорошим или лучше, чем осевое представление.

[146] *Массовое соотношение*: При сканировании используют увеличенную массу электронов  $m_e/m_i = 1/100$ . Моделирование, в котором используют реальное массовое соотношение ( $m_e/m_i = 1/1836$ ), выполняют при  $a/r_{Li} = 4, 10, \text{ и } 50$  и используют для определения ошибки, связанной с увеличенной массой. Ошибки составляют 1,0%, 0,6% и 0,8% в  $a/r_{Li} = 4, 10 \text{ и } 50$ , соответственно. При  $m_e/m_i = 1/100$  объединенная плотность ион-электронной текучей среды в модели 5M2F будет на 1% больше, чем у текучей среды МГД, поэтому ожидается ошибка порядка 1%. В ситуациях с сильными двухжидкостными эффектами увеличенная масса электронов может вызывать большую ошибку, как видно на фиг. 13А.

[147] *Скорость света*: При сканировании скорость света задана как  $3v_{Te}$ . При  $a/r_{Li} = 4, 10, \text{ и } 50$  моделирования выполняют со скоростью света, удваиваемой и вторично удваиваемой до  $12v_{Te}$  в каждом случае. В этом диапазоне вариации измеряемой скорости роста составляют  $< 0,5\%$  при всех трех значениях  $a/r_{Li}$ , что указывает на то, что уменьшенная скорость электромагнитной волны оказывает лишь незначительное влияние на смоделированные неустойчивости.

[148] Идеальные модели 5M2F моды  $ka = 10/3$  с линейными и параболическими профилями сдвигового потока дают результаты, аналогичные предыдущей работе с использованием МГД и холловской МГД. На фиг. 16А и 16В показаны скорости роста  $m = 0$  при сканировании силы сдвигового потока,  $v_{sf}^a$ . Скорость роста, полученную на основании модели 5M2F при  $a/r_{Li} = 50$  сравнивают с результатами МГД, а 5M2F при  $a/r_{Li} = 2,357$  сравнивают с результатами холловской МГД, в которых использовали эквивалентный параметр Холла. Как показано, МГД-подобное моделирование 5M2F при  $a/r_{Li} = 50$  дает качественно сходные результаты с идеальным МГД моделированием с линейными и параболическими профилями сдвигового потока. Полная стабилизация происходит при скорости края пинча, составляющей  $v_{sf}^a \approx 0,4v_A$ . В плазме с  $a/r_{Li} = 2,357$ , моделирования 5M2F с линейным сдвиговым потоком указывают на то, что стабилизация требует  $v_{sf}^a/v_A > 0,6$ . (Следует отметить, что сопоставимые моделирования линейного сдвигового потока с помощью холловской МГД недоступны.) При параболическом сдвиговом потоке 5M2F моделирование позволяет предположить стабилизацию плазмы с  $a/r_{Li} = 2,357v_{sf}^a/v_A > 0,5$ , подобно случаю с линейным сдвиговым потоком. Моделирование 5M2F хорошо согласуется с результатами МГД и холловской МГД.

[149] На фиг. 16А и 16В проиллюстрированы результаты идеальной 5M2F со стабилизацией линейным и параболическим сдвиговыми потоками, соответственно. Все моделирования имеют  $ka = 10/3$ . Для сравнения показаны скорости роста, обнаруженные при моделировании МГД и холловской МГД. Сканирования, показанные на фиг. 16А содержат одно сканирование с обратным сдвиговым потоком, обозначенным «отрицательный  $v_{sf}^a$ »; все другие сканирования, показанные на фиг. 16А, имеют положительный  $v_{sf}^a$ .

[150] В предыдущей работе с холловской МГД (а также в результатах PIC, обсуждаемых в данном документе) использовали положительный сдвиговый поток, т. е. положительные значения  $v_{sf}^a$ . Предположим, что двухжидкостные эффекты будут зависеть от направления сдвигового потока, сканирование выполняется с отрицательным  $v_{sf}^a$ , то есть, с обратным сдвиговым потоком, как показано на фиг. 16А. Стабилизирующий эффект сдвигового потока уменьшается при обратном потоке, и для стабилизации требуется  $v_{sf}^a > v_A$ . По мере увеличения  $a/r_{Li}$  скорость роста, наблюдаемая при сдвиговом потоке, как положительном, так и отрицательном, будет приближаться к результатам МГД, которые не зависят от направления сдвигового потока.

[151] На фиг. 17 проиллюстрированы структуры моды при моделировании идеальной 5M2F со сдвиговым потоком. Результаты показаны для линейного (верхний ряд) и параболического (нижний ряд) сдвигового потока для МГД-подобной ( $a/r_{Li} = 50$ ) плазмы с большим ларморовским радиусом ( $a/r_{Li} = 2,357$ ), как указано. Во всех случаях используется положительный сдвиговый поток (в смысле, описанном в тексте), за исключением одного случая с отрицательным линейным сдвиговым потоком, обозначенным как «отрицательный». Во всех случаях скорость сдвигового потока сдвига на краю пинча составляет  $|v_{sf}^a| = 0,3v_A$ .

[152] Сдвиговый поток растягивает в осевом направлении экспоненциально растущую моду. На фиг. 17 показаны структуры моды для моделирований со скоростью  $|v_{sf}^a| = 0,3v_A$  сдвигового потока. Сравнение линейных и параболических результатов для заданного  $a/r_{Li}$  параболического сдвигового потока ограничивает структуру моды до меньшего радиуса. Для линейного сдвигового потока с  $a/r_{Li} = 2,357$  показаны результаты как для положительного, так и для отрицательного сдвигового потока. В случае с отрицательным сдвиговым потоком выравнивание ближнего к оси выступа структуры с основным выступом, по-видимому, способствует наблюдаемой более высокой скорости роста.

[153] Чтобы точно уловить устойчивый экспоненциальный рост при наличии такого растяжения, тщательно выбирают разрешение, размер и форму возмущения. Полная разработка структуры моды занимает приблизительно  $5\tau_A$  или больше времени, в

зависимости от параметров плазмы и деталей сдвигового потока. Если уровень возмущения составляет  $\epsilon = 10^{-3}$ , как используется в моделированиях без сдвига, то нелинейности могут влиять на рост моды до полной разработки. Следовательно, в этих моделированиях со сдвиговым потоком используют меньшее возмущение. В этих случаях также используют более высокое разрешение, как для ограничения шума, который может затруднять рост небольших возмущений, так и для минимизации непреднамеренного зарождения коротковолновых мод, которые могут быстро расти и нарушать развитие при возмущенном осевом волновом числе. Коротковолновые моды являются менее проблематичными в случаях с  $a/r_{Li} = 2,357$ , поскольку сильные двухжидкостные эффекты подавляют высокий рост  $k$ . Для дополнительного снижения трудностей с высоким ростом  $k$  и нелинейностями, вводят фазовый сдвиг, как обсуждается в другом месте данного документа. Соответствующее значение параметра фазового сдвига,  $\phi_0$ , определяют путем выполнения предварительного моделирования с помощью  $\phi_0 = 0$ , наблюдая растяжение моды на поздних стадиях моделирования до прерывания роста вследствие нелинейностей или роста высокой моды  $k$ . Для второго и окончательного моделирования  $\phi_0$  выбирают таким образом, чтобы форма исходного условия приблизительно соответствовала растянутой моде, наблюдаемой в предварительном моделировании. На фиг. 18A-18D проиллюстрирован пример роста моды с начальным условием фазового сдвига и без него. Без фазового сдвига результаты растяжения моды приводит к постепенному уменьшению скорости роста до конечного прерывания моделирования высоким ростом  $k$ , наблюдаемым при  $t \approx 18\tau_A$ . Благодаря содержанию фазового сдвига моделирование быстро переходит в период линейного роста. Линии на фиг. 18A и 18C представляют данные, вычисленные с  $\tau_A/10$  интервалами. На фиг. 18B и 18D, значения  $\gamma\tau_A$  в моменты времени  $t$  вычисляют с использованием уравнения  $(34)t_1 = t$  и  $t_0 = t - 2\tau_A$ .

[154] Все моделирования МГД-подобной 5M2F ( $a/r_{Li} = 50$ ) используют  $64 \times 16$  (радиальные  $\times$  осевые) ячеек с элементами пятого порядка и  $\epsilon = 1 \times 10^{-5}$ . Моделирования с большими  $r_{Li}$  ( $a/r_{Li} = 2,357$ ) используют  $64 \times 16$  (радиальные  $\times$  осевые) ячеек с элементами четвертого порядка и  $\epsilon = 1 \times 10^{-7}$ . Фазовые сдвиги приведены в таблице I.

[155] Таблица I. Настройки, используемые для моделирования идеальной 5M2F со сдвиговым потоком. Параметры фазового сдвига  $\phi_0$  приведены для каждого цикла со сдвиговым потоком. Для линейного сдвигового потока общий сдвиг фазы составляет  $\phi_0 r$ , в то время как для параболического сдвигового потока он составляет  $\phi_0 r^2$ ; см. уравнения (31) и (32).

$a/r_{Li}$	тип сдвигового потока	$v_{sf}^a/v_A$	$\phi_0$
50	нет	0	0
·	линейный	0,1	$\pi/2$
·	·	0,2	$\pi$
·	·	0,3	$2\pi$
·	·	0,35	3
2,357	нет	0	0
·	линейный	0,1	$\pi/2$
·	·	0,2	$3\pi/4$
·	·	0,3	$\pi$
·	·	0,4	$3\pi/2$
·	·	0,5	$7\pi/4$
·	·	0,6	2
2,357	линейный	-0,1	0
·	·	-0,2	$-\pi/4$
·	·	-0,3	$-\pi/2$
·	·	-0,4	$-3\pi/4$
·	·	-0,6	$-\pi$
·	·	-0,8	$-3/2$
50	параболический	0,1	$\pi/2$
·	·	0,2	$3\pi/4$
·	·	0,3	$3\pi/2$
·	·	0,35	$2\pi$
2.357	параболический	0,1	$\pi/4$
·	·	0,2	$\pi/2$
·	·	0,3	$3\pi/4$
·	·	0,4	$7\pi/8$
·	·	0,5	$\pi$

[156] Отклонение от точной линейной скорости роста в этих моделированиях оценивают как не более 10% и, как правило, составляет несколько процентов или меньше. Этот уровень ошибки выше, чем для результатов без сдвига, главным образом, вследствие проблем, связанных с одновременным избеганием высоких  $k$  мод и нелинейностей.

[157] На фиг. 18А-18D проиллюстрировано поведение роста моды в модели 5М2F с начальным фазовым сдвигом (эффективным наклоном) и без него в возмущении. Результаты приведены для моделирований в МГД-подобном режиме ( $a/r_{Li} = 50$ ), включая линейный сдвиговой поток со скоростью края пинча  $v_{sf}^a = 0,3v_A$ . На фиг. 18А показано изменение радиальной ионной кинетической энергии, нормированной к исходной магнитной энергии. На фиг. 18В показана нормированная скорость роста,  $\gamma\tau_A$ , полученная из роста кинетической энергии с  $0,1\tau_A$  интервалами. Подход, используемый для поиска каждого построенного на графике значения ( $\times$ ), обсуждается в основном тексте. Красная линия показывает  $1 - \tau_A$  скользящее среднее для отдельных значений. Фиг. 18С и 18D аналогичны фиг. 18А и 18В, но для случая с возмущенным фазовым сдвигом  $\phi_0 r$  с  $\phi_0 = 2\pi$ .

[158] В недавнем исследовании с использованием моделирования PIC неустойчивость  $m = 0$  рассматривалась в FuZE-подобном равновесии. В приведенном ниже обсуждении представлено равновесие, и подробности, относящиеся к обеспечению переноса Брагинского в этом равновесии, приведены ниже. Также ниже показано сравнение моделирования 5М2F с переносом Брагинского с результатами PIC.

[159] Равновесие Беннета используют для представления типичной плазмы FuZE. Как подробно обсуждалось выше, нормированные профили на фиг. 11 могут быть заданы размеры путем выбора  $I_p$ ,  $a$  и  $a/r_{Li}$ . После предыдущей работы FuZE-подобное равновесие имеет  $a/r_{Li} = 5,825$ ,  $a = 0,91$  мм и  $I_p = 300$  кА. Такой выбор дает  $B_{\theta, pk} = 33,0$  Т,  $n_{pk} = 4,25 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$  и  $T = 1,27$  keV. Соответствующие характеристическое время и альфвеновская скорость составляют  $\tau_A = 2,61$  нс и  $v_A = 3,49 \times 10^5$  м/с.

[160] В данном документе представлена модель замыкания по Брагинскому, включающая кинетические коррекции. Здесь коэффициенты переноса до и после коррекции рассматривают конкретно в FuZE-подобном равновесии. На фиг. 19 показаны скорректированные и не скорректированные коэффициенты диффузии вязкости. Корректировки осуществляют в соответствии с уравнениями (23), (24) и (25). В уравнении (23),  $\hat{\tau}_i$  представляет собой  $\tau_i$ , вычисляемое при пиковой плотности, и  $\tau_{dyn} = \tau_A$ . В уравнении (24),  $\hat{r}_{Li}$  представляет собой  $r_{Li}$ , характеристический ларморовский радиус иона, обсуждаемый в данном документе, и  $\ell$  выбирают равным  $0,2a$ , соответствующему  $k^{-1}$ , при  $ka = 5$ . В уравнении (25),  $r_{crit} = 0,5a$ , что сравнимо с местоположением  $r = 0,31a$  в котором ларморовский радиус иона соответствует самому радиусу. Коэффициенты диффузии находят путем деления коэффициентов вязкости на массовую плотность ( $\rho = m_i n_i$ ). Коэффициенты переноса Брагинского, обсуждаемые ниже, для упрощения сравнения



также выражают как коэффициенты диффузии. Скорректированный коэффициент  $\eta_0^*/\rho$  находят как  $\eta_0^*/\rho = f_{\text{согг}}^r f_{\text{согг}}^L \eta_0/\rho$ . Также используют предел коэффициента диффузии  $D_{\text{lim}}$ , причем  $D_{\text{lim}}$  равен  $\eta_0^*/\rho$  при  $r = a$ . Предел коэффициента диффузии налагают по чисто численным причинам: диффузия, связанная с  $\eta_0^*/\rho$ , как правило, задает максимальный временной шаг, который могут использовать в моделированиях. Благодаря применению  $D_{\text{lim}}$ , интересующая динамика сохраняется, но временной шаг могут значительно увеличивать. Скорректированный коэффициент  $\eta_3^*/\rho$  находят как  $\eta_3^*/\rho = f_{\text{согг}}^L f_{\text{согг}}^r \eta_0/\rho$ . Скорректированный коэффициент  $\eta_1^*/\rho$  находят как  $\eta_1^*/\rho = \max(\eta_0^*/\rho, \eta_1/\rho)$ .

[161] На фиг. 19 проиллюстрированы значения коэффициента диффузии импульса в FuZE-подобном равновесии. Нескорректированные значения коэффициента диффузии (коэффициенты без \*) имеют свойства, которые являются нефизическими и/или численно сложными. Для решения этих проблем коэффициенты диффузии корректируют (коэффициенты с \*), как описано в основном тексте. Корректировки осуществляют в соответствии с уравнениями (23), (24) и (25) при  $\ell = 0,2a$  и  $r_{\text{crit}} = 0,5a$ .

[162] На фиг. 20 показаны скорректированные и не скорректированные коэффициенты температуропроводности ионов. Корректировки осуществляют с использованием  $\ell = 0,2a$  и  $r_{\text{crit}} = 0,5a$ , как и для коэффициентов диффузии импульса. Также применяют предел коэффициента диффузии, используемый для коэффициента диффузии импульса, хотя он влияет на  $\kappa_{\perp}^i$  только небольшую область вблизи  $r = 0$ . Коэффициенты температуропроводности электронов не показаны; из членов электронного переноса Брагинского сохраняется только член диамагнитного теплового потока, и связанный с ним коэффициент практически  $\kappa_{\perp}^e$  идентичен его ионному аналогу, за исключением очень близкого  $r = 0$ . В этой области радиальное изменение  $\kappa_{\perp}^e$  более высокое, чем  $\kappa_{\perp}^i$ . Коэффициент коррекции, аналогичный  $f_{\text{согг}}^L$  уравнения (24), не применяют, поскольку характеристический ларморовский радиус электронов является относительно малым по сравнению с  $\ell$ . Местоположение, в котором ларморовский радиус электронов соответствует самому радиусу, составляет  $0,09a$ , поэтому использование  $r_{\text{crit}} = 0,2a$  будет разумным. Использование этого небольшого  $r_{\text{crit}}$  и применение  $f_{\text{согг}}^r$  по Eq. (25) дает  $\kappa_{\perp}^{e*}/(n_e e)$  с пиком вблизи  $300 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  at  $r = 0,15$ .  $r_{\text{crit}} = 0,5a$  выбирают для получения более поддающегося численному анализу профиля  $\kappa_{\perp}^{e*}/(n_e e)$ , с пиком вблизи  $120 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  при  $r = 0,4$ . При  $r = 0,4$  и дальше,  $\kappa_{\perp}^{e*}/(n_e e)$  почти идентично нескорректированному  $\kappa_{\perp}^i/(n_i e)$ , показанному на фиг. 20.

[163] На фиг. 20 проиллюстрированы значения коэффициенты температуропроводности ионов в FuZE-подобном равновесии. Нескорректированные значения коэффициентов диффузии (коэффициенты без  $*$ ) имеют свойства, которые являются нефизическими и/или численно сложными. Для решения этих проблем коэффициенты диффузии корректируют (коэффициенты с  $*$ ), как описано в основном тексте. Корректировки осуществляют в соответствии с уравнениями (24) и (25) с  $\ell = 0,2a$  и  $r_{\text{crit}} = 0,5a$ .

[164] Моделирование указывает на то, что из всех членов переноса Брагинского поперечное напряжение, регулируемое посредством  $\eta_0$  оказывает наибольшее влияние на рост неустойчивости  $m = 0$ . Для изучения эффекта  $\eta_0$  по сравнению с гировязкостью и диамагнитным тепловым потоком выполняют три серии моделирований при фиксированном волновом числе  $ka = 5$ . Результаты представлены на фиг. 21. Для целей сканирования силы  $\eta_0$ , произведение двух глобальных коэффициентов коррекции, описанных выше, то есть,  $f_{\text{согг}}^{\tau} f_{\text{согг}}^L$ , заменяют одним множителем,  $f_{\eta_0}$ , который используют для расчета модифицированной ненамагниченной вязкости:  $\eta_0^* = f_{\eta_0} \eta_0$ . В первой серии применяют полную модель Брагинского, отмеченную выше, с коррекциями на основе  $r_{\text{crit}}$ , применяемыми к гировязкости и коэффициентам диамагнитного теплового потока, но для этих коэффициентов не используют коррекцию большого ларморовского радиуса. Во второй серии гировязкость опущена, но диамагнитный тепловой поток сохраняется. В третьей серии диамагнитный тепловой поток опущен, но гировязкость сохраняется. Используя полную модель Брагинского по мере приближения  $f_{\eta_0}$  к 0,1, смоделированная скорость роста приближается к результату PIC. При малом  $f_{\eta_0}$ , каждый из вкладов гировязкости и диамагнитного теплового потока обеспечивает умеренное ( $\approx 10\%$ ) снижение скорости роста от значения идеальной 5M2F. По мере приближения  $f_{\eta_0}$  к 0,1 роль гировязкости снижается (то есть, результат «без гировязкости» приближается к результату «полная модель Брагинского», представленному на фиг. 21), но роль диамагнитного теплового потока остается умеренной (то есть, результат «без теплового потока» остается  $\approx 10\%$  выше, чем результат «полная модель Брагинского» на фиг. 21). В результатах 5M2F, показанных на фиг. 21  $\epsilon = 10^{-3}$ , используют реальную массу электронов ( $m_i/m_e = 1836$ ), размер возмущения и  $40 \times 10$  (радиальные  $\times$  осевые) ячеек третьего порядка.

[165] На фиг. 21 проиллюстрированы скорости роста неустойчивости  $m = 0$  5M2F при  $ka = 5$  зависимости от общего множителя,  $f_{\eta_0}$ , от ненамагниченного коэффициента вязкости,  $\eta_0$ . Результаты показаны для полной модели Брагинского, полной модели минус член гировязкости и полной модели минус диамагнитные термины теплового потока. Результат при  $ka = 5$  из моделирования PIC Таммела и др. [К. Таммел, Д. П. Хиггинсон, А.

Дж. Линк, А. Э. В. Шмидт, Д. Т. Офферманн, Д. Р. Уэлч, Р. Е. Кларк, У. Шумлак, Б. А. Нельсон, Р. П. Голинго и Х. С. МакЛин, «Кинетическое моделирование стабилизации сдвиговым потоком в высокотемпературной плазме Z-пинча», *Физика Плазмы* **26**, 062506 (2019)] включен для сравнения.

[166] Изучение зависимости скорости роста от  $k$  показывает, что применение модели 5M2F с скорректированным переносом Брагинского может дать результаты, которые имеют некоторые общие признаки с результатами PIC. Как показано на фиг. 21, полная модель Брагинского с  $f_{\eta 0} = 0.06$  дают скорость роста, подобную PIC. (Следует отметить, что общий коэффициент  $f_{\text{corr}}^{\tau} f_{\text{corr}}^L = 0,018$  используют для скорректированного коэффициента диффузии,  $\eta_0^*/\rho$  показанного на фиг. 19.) Сканирование  $ka$  с фиксированным  $f_{\eta 0} = 0,06$ ,  $\gamma\tau_A$  возрастает с  $ka$  и не показывает признаков достижения пика даже при  $ka = 23$ , как показано на фиг. 22. При этом сканировании с  $f_{\eta 0} = 0,06$  коррекцию для большого ларморовского радиуса не используют. Причина возрастания  $\gamma\tau_A$  при большом  $ka$  является непонятной. Дополнительные моделирования показывают, что повышение на высоком  $k$  сохраняется даже в том случае, если гировязкость и диамагнитные тепловые потоки отсутствуют. Результат демонстрирует, что использование большого  $\eta_0$  — нефизически большого, как обсуждалось выше, не является подходящим подходом для воспроизведения результатов PIC в широком диапазоне  $ka$ . Результаты также показаны для сканирования с использованием полной модели коррекции на основе размера, обсуждаемой выше. При этом сканировании  $f_{\eta 0} = f_{\text{corr}}^{\tau} f_{\text{corr}}^L$ , с  $\ell = k^{-1}$ , и  $f_{\text{corr}}^L$  применяется к  $\eta_3$  и  $\kappa_{\perp}^i$ . С помощью модели на основе размера восстанавливают уменьшение роста при высоком  $k$ . Однако следует отметить, что результат подобен результату идеальной 5M2F, который показан для сравнения. Наконец, сканирование выполняют с коррекцией переноса, предназначенной для нелинейного моделирования; см. обсуждение обоснования в данном документе. При нелинейной установке  $\ell = 0,1a$  и минимальном коэффициенте диффузии  $D_{\min} = 0,01av_A$  применяют к  $\eta_1$  и  $\kappa_{\perp}^{i,e}$ . Также включена изотропная вязкость электрона на основе  $D_{\min}$ . Корректировки включены в соответствии с уравнениями (24) и (25) с  $r_{\text{crit}} = 0,5a$  и с фиксированным размером признака  $\ell = 0,1a$ . При такой нелинейной настройке скорость роста снижается, что дает результат, более сходный с результатом PIC, чем при использовании реальной электронной массы, итакже используют  $D_{\min} = 0$ . Массовые соотношения, использованные для моделирования, на фиг. 22 показаны в легенде. Возмущение снова составляет  $\epsilon = 10^{-3}$ , а разрешение будет  $40 \times 10$  ячеек третьего порядка.

[167] На фиг. 22 проиллюстрированы скорости роста неустойчивости  $\gamma = 0$  модели 5M2F при волновых числах моды, находящихся в диапазоне от  $ka = 5$  до 23. Результаты моделирования PIC Таммела и др. включены для сравнения. При использовании постоянного коэффициента коррекции вязкости  $f_{\eta 0} = 0,06$  скорости роста нефизически увеличиваются при высоком  $k$ . При вычислении  $f_{\eta 0}$  с помощью модели на основе размера с использованием  $\ell = k^{-1}$  пиковая скорость роста наблюдается при  $ka \approx 12$ , и скорость роста уменьшается с увеличением  $k$  как в идеальном случае. Также показан результат с использованием для нелинейного моделирования скорректированной модели переноса: увеличенная масса электронов ( $m_i/m_e = 1/100$ ) на  $f_{\eta 0}$  основе фиксированного размера  $\ell = 0,1a$  и минимальный коэффициент диффузии  $D_{\min} = 0,01av_A$ . Нелинейная установка дает скорости роста, которые наиболее схожи с результатами PIC.

[168] Описанная выше модель является более строго нелинейной, но представленные до сих пор результаты рассматривали только линейный режим роста неустойчивости, то есть, рост, приводящий к небольшим отклонениям от равновесного состояния. В этом разделе рассматривают моделирование, которые отслеживают развитие плазмы в нелинейном режиме. Для обеспечения такого нелинейного моделирования используют сочетание высокого разрешения и искусственно большого перпендикулярного переноса. Численные методы, доступные с помощью структуры WARPXM, по существу не обеспечивают сильного численного рассеяния, когда градиенты становятся крутыми, а полиномиальное представление подвержено нефизическим колебаниям (аналогичным явлению Гиббса), которые могут прекращать моделирование. Искусственная перпендикулярная вязкость и теплопроводность помогают смягчить крутые градиенты, а высокое разрешение помогает их устранить.

[169] В представленных здесь моделированиях минимальный коэффициент диффузии  $D_{\min} = 0,01av_A \approx 3,2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  применяют к  $\eta_1$  и  $\kappa_{\perp}^{i,e}$ , и используют для изотропной электронной вязкости:  $\eta_0^e/\rho_e = \eta_1^e/\rho_e = D_{\min}av_A$ , с  $\rho_e = m_e n_e$ . Как видно на фиг. 19 и 20,  $\eta_1/\rho$  и  $\kappa_{\perp}^i/(n_i e)$  составляют приблизительно 0,04 и  $0,27 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , соответственно, при  $r = a$ . Они соответствуют числам Рейнольдса и Пекле  $\text{Re}_{\perp}^a \equiv av_A/0,04 \approx 7900$  и  $\text{Pe}_{\perp}^a \equiv av_A/0,27 \approx 1200$ , соответственно. Искусственный минимальный коэффициент диффузии уменьшает их до  $\text{Re}_{\perp}^{a*} = \text{Pe}_{\perp}^{a*} = 100$ . Кинетические корректировки по уравнениям (25) выполняют с характеристическим временем и размером признака, заданным  $\tau_{\text{dyn}} = \tau_A$  и  $\ell = 0,1a$ . Для предотвращения ложного численного поведения вблизи внешней радиальной границы, связанного с членами диамагнитного теплового потока и импульса вносят дополнительную коррекцию, характерную для этого нелинейного моделирования.

Коэффициент  $f_{\text{trunc}}$  применяют для усечения  $\eta_3$  и  $\kappa_{\Lambda}^{i,e}$  во внешней области плазмы. В частности,

$$f_{\text{trunc}} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{\pi(r-r_{\text{trunc}})}{r_{\text{max}}-r_{\text{trunc}}} \right] \right\} \text{ где } r > r_{\text{trunc}} \text{ и}$$

$$f_{\text{trunc}} = 1 \text{ в других местах,}$$

$$(35)$$

где  $r_{\text{max}} = 4a$  и  $r_{\text{trunc}} = 2a$ . Трудность с диамагнитным потоком связана с граничными условиями на производных переменных 5M2F. В принципе возможны граничные условия с регулярным поведением; однако приведенное выше усечение обеспечивает возможность точного моделирования нелинейной динамики плазмы в интересующей области,  $r \lesssim 2a$ .

[170] Используя такое же начальное условие, которое используется для сравнения PIC при  $ka = 5$ , но с применением параболического сдвигового потока, моделирование выполняют с разрешением, увеличенным до  $96 \times 24$  (радиальные  $\times$  осевые) ячеек с элементами четвертого порядка. В возмущении фазовый сдвиг не используют. Изучают диапазон силы параболического сдвигового потока, с  $v_{\text{sf}}^a/v_A = 0, 0,25, 0,5$  и  $0,75$ . Для случаев с  $v_{\text{sf}}^a/v_A = 0$  и  $0,5$ , развитие двухмерных профилей плотности изображены на фиг. 1 и 3, соответственно. По мере увеличения скорости сдвигового потока радиальный выброс плазмы ограничен. Это дополнительно проиллюстрировано на фиг. 23, где нормированные запасы ионов пинча и общая тепловая энергия построены в зависимости от времени. Запасы ионов пинча и тепловую энергию определяют следующим образом

$$N(t) = \int_0^a dr \int_0^{Lz} dz n_i 2\pi, \quad (36)$$

и

$$W(t) = \int_0^a dr \int_0^{Lz} dz \frac{1}{\gamma-1} (p_i + p_e) 2\pi r. \quad (37)$$

Нормированные количества составляют  $N(t)/N(t=0)$  и  $W(t)/W(t=0)$ . В случае без сдвига пинч потерял свыше 50% из исходных запасов к концу моделирования, в то время как в случае с  $v_{\text{sf}}^a/v_A = 0,5 \approx 30\%$  потеряно. Потеря тепловой энергии составляет  $\approx 20\%$  в случае отсутствия сдвига и  $\approx 10\%$  в случае  $v_{\text{sf}}^a/v_A = 0,5$ .

[171] На фиг. 23 проиллюстрированы профили плотности ионов для нелинейных моделирований, начиная с FuZE-подобных равновесий с зарождающейся модой  $ka = 5$ . Профили повторяют три раза в осевом направлении и отражают в  $r = 0$ . В случае с нулевым сдвиговым потоком (верхний ряд) к  $t = 10\tau_A$ , были разработаны радиальные струйные структуры. С  $v_{\text{sf}}^a/v_A = 0,5$  (нижний ряд) рост задерживается, структуры неустойчивости

сдвигаются и ограничиваются в радиальном направлении сдвигом, и расслабленное почти равновесное состояние устанавливается посредством  $t = 35\tau_A$ .

[172] На фиг. 24 проиллюстрированы нормированные запасы ионов и тепловая энергия в  $r = a$ , нормированные к исходным запасам и энергии, для FuZE-подобных нелинейных моделирований с  $v_{Si}^a/v_A = 0, 0,25, 0,5$  и  $0,75$ . Во всех случаях  $ka = 5$ . Включение сдвигового потока улучшает удержание частиц и энергии.

[173] Результаты, представленные здесь, демонстрируют быстрорастущую неустойчивость при малой  $a/r_{Li}$ . Неустойчивость идентифицируют как моду электронного дрейфа, как также наблюдается в более раннем моделировании 5M2F. Существуют две важные неустойчивости электронного дрейфа (иногда называемые микронеустойчивостями), когда скорость электронного дрейфа поперек силовых линий поля ( $v_{dr} = |\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_i|$ ) приближается к  $v_{Ti}$  или превышает его: неустойчивость низкогибридного дрейфа (LHDI, lower-hybrid drift instability) и ионно-звуковая неустойчивость. В используемом здесь равновесии 5M2F радиально равномерная скорость электронного дрейфа составляет  $v_{dr} = j_z/(en)$ . Использование равновесных выражений для  $j_z$  и  $n$  дает

$$v_{dr} = 2v_{Ti} \left( \frac{a}{r_{Li}} \right)^{-1}, \quad (38)$$

где уравнение (26), оцениваемое при  $r = a$ , используют для замены  $I_p$  на пик  $B_\theta$ , и применяют определение  $r_{Li}$ . Таким образом, ожидают нестабильность в области с  $a/r_{Li} < 2$ , такой что  $v_{dr} > v_{Ti}$ . Это ожидание согласуется с наличием быстрорастущей моды, показанной на фиг. 13A-14 при  $a/r_{Li} \lesssim 1,8$ . Наиболее вероятно, что наблюдаемая неустойчивость не является неустойчивостью LHDI, поскольку LHDI возникает на длинах волн меньших, чем  $r_{Le}$ . При  $a/r_{Li} = 1,8$ ,  $r_{Le}/a \approx 0,013$  ( $cm_i/m_e = 1836$ ). Рассматриваемая самая короткая возмущенная длина волны имеет  $ka = 80/3$  и связанную с ней длину волны ( $\lambda/a = 2\pi/ka \approx 0,24$ ) которая в  $\approx 18$  раз больше  $r_{Le}$ . Вместо неустойчивости LHDI, неустойчивость может представлять собой ионно-звуковую неустойчивость. Как обсуждалось, эту неустойчивость ожидают в однократно ионизованной плазме только в том случае, когда  $T_e \gg T_i$ . При  $T_e = T_i$ , как в рассматриваемой здесь плазме, звуковая скорость сравнима с тепловой скоростью ионов, а звуковые волны затухают по Лаундау. Поскольку модель 5M2F не учитывает затухание Ландау, она может допускать ионно-звуковую неустойчивость в режимах с  $T_i \approx T_e$ . В дальнейшей работе поведение ионно-звуковой моды и неустойчивости LHDI в модели 5M2F может быть рассмотрено более подробно.

[174] Моделирование линейного роста в присутствии положительного сдвигового потока с использованием модели 5M2F при  $a/r_{Li} = 2,357$  дает результаты, практически

идентичные модели холловской МГД. При линейном или параболическом профилях сдвигового потока ожидается, что полная стабилизация будет происходить для  $v_{sf}^a/v_A \approx 0,8$ . Этот результат согласуется с результатами PIC для стабилизации сдвиговым потоком, что указывало на стабилизацию FuZE-подобной плазмы при  $v_{sf}^a/v_A = 0,75$ . При отрицательном сдвиговом потоке (то есть, нулевом потоке ионов при  $r = 0$  в направлении тока и противоположном направлении тока для  $r > 0$ ) стабилизационный эффект будет слабее, и ожидается, что стабилизация будет происходить для  $v_{sf}^a/v_A > 1$ . В экспериментах SFS Z-пинча наблюдаемые скорости сдвигового потока на краю пинча в течение стабильной работы плазмы, как правило, составляют  $v_{sf}^a/v_A \approx 0,5$ . Иногда наблюдают, что градиент скорости возле края пинча является более крутым, чем даже параболический профиль, поэтому возможно, что такие концентрированные градиенты смогут играть роль в наблюдаемой устойчивости. Но еще одна возможность заключается в том, что экспериментальный сдвиговый поток не стабилизирует профиль Беннетта; напротив, может возникать наблюдаемая  $m = 0$  устойчивость, поскольку профили ослаблены, так что они устойчивы ( $m = 0$ ) при более низких уровнях сдвига.

[175] Модель 5M2F с реальным массовым соотношением ионов и электронов с скорректированным переносом Брагинского или без него дает результаты, которые отличаются от результатов PIC, как показано на фиг. 22. В частности, пик скорости роста 5M2F в два раза выше, а в результатах PIC пик возникает при  $ka \approx 10$  против  $ka \approx 5$ . Результаты 5M2F воспроизводят продление скорости роста при высоком  $k$  и имеют качественное сходство с результатами PIC. Понимание конкретных причин более высокого и смещенного пика в моделировании 5M2F потребует дальнейшего исследования, но, представляется, что играют роль кинетические эффекты. Гирокинетическое моделирование показывает близкое согласие с PIC, даже с электростатической моделью и упрощенным гирокинетическим уравнением Пуассона, которое отражает некоторые, но не все большие  $r_{Li}$  эффекты (например, не включено усреднение по гирокинетической орбите). Интересно сравнить эти результаты с анализом неустойчивости Кельвина-Гельмольца (КНИ, Kelvin-Helmholtz instability) с холловской МГД, идеальной 5M2F и непрерывным кинетическим моделированием. В этой работе скорости роста неустойчивости КНИ при холловской МГД выше, чем кинетические результаты. Скорость роста 5M2F выше, чем у кинетического моделирования, но намного ниже, чем результаты холловской МГД.

[176] Результаты нелинейного моделирования, показанные на фиг. 3, указывают на то, что при умеренном сдвиговом потоке (параболическом с  $v_{sf}^a/v_A = 0,5$ ) после начальной неустойчивости плазма устанавливает квазиустойчивую конфигурацию с более чем половиной исходной массы пинча и больше 80% начальной энергии пинча. Для понимания,

может ли такой самоорганизационный характер напоминать реальное экспериментальное поведение, необходимы дальнейшие исследования.

[177] Предыдущее моделирование МГД указало на то, что сдвиговый поток более эффективно стабилизирует коротковолновые  $m = 0$  моды, чем длинноволновые. Используя те же настройки, что и для вышеописанных  $ka = 5$  нелинейных моделирований, моделирование с  $ka = 5/3$  и умеренным параболическим сдвиговым потоком ( $v_{st}^a/v_A = 0,5$ ) проводят для изучения нелинейного поведения удержания более длинноволновой неустойчивости. Неустойчивость растет быстрее, масса и энергия теряются раньше, но общие потери являются сопоставимыми. Кроме того, для представления более реалистичной плазмы Z-пинча с шумами выполняют «многомодовый» случай с  $ka \leq 25$ . То есть, длина области является такой, что  $L_z/a = 6\pi/5$  (фиксация одной длины волны  $ka = 5/3$ ); возмущается каждая доступная мода до  $ka = 25$  (для которого фиксируются 15 длины волн). Для каждой моды фазу в уравнениях (31) and (32) задают с помощью  $\phi_0$ , выбранного случайным образом, аи с отсутствием радиальной зависимости ( $\zeta = 0$ ). В результате потери массы и энергии увеличиваются, возможно, вследствие взаимодействия мод. Однако во всех случаях потеря массы составляет  $< 50\%$ , а потери энергии составляют  $< 20\%$ . Общая картина остается той же, что и для случая  $ka = 5$  умеренный сдвиговый поток, по-видимому, способствует развитию квазиустойчивой плазмы с ограниченными потерями.

[178] Представленное здесь моделирование было сосредоточено на равновесии Z-пинча с использованием профилей Беннета с однородной начальной температурой. Исследование, в котором рассматриваются другие профили, содержит профили, которые соответствуют наилучшим доступным экспериментальным данным и может обеспечивать различное поведение устойчивости  $m = 0$ , включая стабилизирующий эффект, обусловленный направляющими дрейфами центра, даже при нулевом объемном потоке. Также хорошо известно, что профили, удовлетворяющие критерию Кадомцева, являются устойчивыми в отношении МГД. Устойчивость устойчивых в отношении МГД профилей в моделях, не являющихся МГД, например, в модели 5M2F, могут учитывать в дальнейшей работе. Другое соображение состоит в том, что даже устойчивые по Кадомцеву профили могут быть неустойчивыми по отношению к так называемым энтропийным модам, но для газов с реалистичным адиабатическим коэффициентом ( $\Gamma \leq 5/3$  для реальных газов с тремя и более степенями свободы) неустойчивость энтропийных мод возникает только в том случае, когда температурные профили являются неоднородными. В недавнем моделировании энтропийные моды рассматриваются в особом случае с  $\Gamma > 2$  однородной температурой в профилях Беннета. Представляет интерес моделирование 5M2F поведения



энтропийных мод в устойчивых в отношении МГД профилях с неоднородной температурой и  $\Gamma \leq 5/3$ .

[179] Представлена модель 5M2F, и эта идеальная модель расширена с включением замыкания по Брагинскому. Модель применяли для изучения неустойчивости  $m = 0$  Z-пинча, фокусируясь на исходных условиях на основании равновесия Беннета.

[180] Результаты моделирования идеальной 5M2F сравниваются с предыдущими результатами для МГД и холловской МГД. Скорость роста близко соответствует предыдущим результатам со сдвиговым потоком и без него. Полная стабилизация происходит при скоростях потока края  $\lesssim 0,8v_A$ . Выходя за пределы предыдущей работы, исследовали обратный линейный сдвиговый поток, демонстрирующий относительно медленное снижение скорости роста при увеличении скорости потока и прогнозируемую полную стабилизацию при скорости потока края, составляющей  $\approx 1,5v_A$ . Другая интригующая особенность результатов 5M2F состоит в том, что при  $a/r_{Li} \lesssim 1,8$  наблюдают неустойчивость электронного дрейфа, которую предварительно идентифицируют как ионно-звуковую моду.

[181] Модель 5M2F также сравнивают с недавним моделированием PIC, инициализированным с помощью FuZE-подобного равновесия Беннета. Пиковый рост результатов 5M2F приблизительно в два раза быстрее, чем для PIC ( $\gamma\tau_A \approx 1,5$  по сравнению с 0,77), и пики при  $k$  значениях приблизительно в два раза больше ( $ka \approx 10$  по сравнению с 5). Результаты 5M2F напоминают результаты PIC в том смысле, что пик скорости роста происходит при умеренном  $k$ , а затем падает при более высоком  $k$ . Применение модели переноса по Брагинскому не изменяет это поведение. В более общем смысле, изучение переноса Брагинского в структуре 5M2F позволило получить представление о связанной физике, включая гировязкость, диамагнитный тепловой поток и ионные гирорелаксационные эффекты. Электронную гирорелаксацию отмечают как потенциально важный эффект для будущего рассмотрения. Кинетическая физика, помимо модели 5M2F даже с переносом Брагинского, по-видимому, отвечает за наблюдаемые различия устойчивости в  $m = 0$ , наблюдаемые при моделировании PIC.

[182] Нелинейное моделирование неустойчивости  $m = 0$  в FuZE-подобной плазме проводят с использованием модели 5M2F по Брагинскому. Моделирование скорости сдвигового потока края  $0,5v_A$  показывает неустойчивость с последующим нелинейным смешиванием вследствие сдвига и расслаблением до квазистационарного состояния. Потери запаса ионов пинча и тепловой энергии ионов пинча ограничены  $\approx 30\%$  и  $\approx 10\%$ , соответственно.

[183] Модель 5M2F обеспечивает мощную платформу для высокоточных вычислительных исследований Z-пинча. В будущей работе помимо профиля Беннета могут быть рассмотрены различные профили равновесия; особый интерес представляет устойчивые в отношении МГД профиль Кадомцева с температурными градиентами, которые могут активировать энтропийные моды. Также в пределах рассмотрения находятся моделирование линейной и нелинейной трехмерной динамики Z-пинча, включая  $m = 1$  неустойчивость. Наконец, следует исследовать способность моделирования 5M2F улавливать неустойчивости электронного дрейфа; точное и эффективное моделирование связанной с ней микротурбулентности может дать важную информацию, относящуюся к профилям тока и осевому тепловому переносу в плазме Z-пинча ядерного класса.

[184] Для равновесий со сдвиговым потоком получают истинные двухжидкостные равновесия. Общую осевую скорость ионов определяют как  $v_{iz} = v_{izo} + v_{sf}$ , где  $v_{sf}(r) = v_{sf}^a r/a$  (линейный) или  $v_{sf}(r) = v_{sf}^a r^2/a^2$  (параболический). Здесь  $v_{izo} = j_z/(2en_i)$  представляет собой скорость ионов без сдвига, которая обеспечивает половину равновесного тока. Профили магнитного поля и тока не изменяются по сравнению с равновесными профилями без сдвига уравнений (26) и (27). Ионное давление и плотность также не изменяются. В частности, давление ионов составляет половину общего давления, данного в уравнении (28). Ионная температура является однородной и представляет собой свободный параметр; здесь  $T_i$  задают в терминах  $a/r_{Li}$  как показано в уравнении (33). Затем  $n_i = p_i/(k_B T_i)$ . Радиальное электрическое поле определяют из уравнения (29) для баланса ионного импульса. Результаты для линейного и параболического сдвиговых потоков представляют собой:

$$E_r^{\text{linear}} = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi} \frac{v_{sf}^a r^2}{a^3 + ar^2}, \quad (39)$$

$$E_r^{\text{parabolic}} = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi} \frac{v_{sf}^a r^3}{a^4 + a^2 r^2}. \quad (40)$$

Закон Гауса, уравнение (7), используют для определения  $n_e$ ,

$$n_e^{\text{linear}} = n_i - \frac{\mu_0 \epsilon_0 I_p}{\pi q_i} \frac{v_{sf}^a (3a^2 r^2 + r^4)}{2ar(a^2 + r^2)^2}, \quad (41)$$

$$n_e^{\text{parabolic}} = n_i - \frac{\mu_0 \epsilon_0 I_p}{\pi q_i} \frac{v_{sf}^a (2a^2 r^3 + r^5)}{a^2 r(a^2 + r^2)^2}. \quad (42)$$

[185] Затем определяют давление электронов из уравнения (30). Результаты предоставляют собой

$$p_e^{\text{linear}} = p_i - \frac{\mu_0 I_p^2}{8\pi^2} (v_{sf}^a)^2 \epsilon_0 \mu_0 \times \frac{a^2 r^2 + (a^2 + r^2)^2 \ln\left(\frac{a^2}{a^2 + r^2}\right)}{a^2 (a^2 + r^2)^2}, \quad (43)$$

$$p_e^{\text{parabolic}} = p_i + \frac{\mu_0 I_p^2}{4\pi^2} (v_{st}^a)^2 \epsilon_0 \mu_0$$

$$\times \frac{r^2 \left( a^4 + \frac{3}{2} a^2 r^2 + r^4 \right) + a^2 (a^2 + r^2)^2 \ln \left( \frac{a^2}{a^2 + r^2} \right)}{a^4 (a^2 + r^2)^2}. \quad (44)$$

[186] Эти давления соответствуют отсутствию сдвига  $p_e$  при  $r = 0$ , и незначительно отклоняются в других местах. Электронную температуру определяют как  $p_e / (n_e k_B)$ . Осевую скорость электронов определяют благодаря требованию удовлетворения  $j_z = v_{ez} n_e q_e + v_{iz} n_i q_i$ .

[187] Варианты осуществления настоящего изобретения могут быть описаны с учетом следующих пунктов:

1. Устройство, содержащее:

первый электрод, расположенный с определением внешней границы объема ускорения;

второй электрод, расположенный с определением внутренней границы объема ускорения;

по меньшей мере один источник питания для возбуждения электрического тока вдоль плазменного столба Z-пинча между первым и вторым электродами;

набор клапанов, содержащий по меньшей мере один газоструйный клапан, для обеспечения нейтрального газа в объем ускорения для питания плазменного столба Z-пинча; и

формовочную часть, соединенную с возможностью обеспечения проводимости со вторым электродом для вызывания в присутствии нейтрального газа, обеспечиваемого указанным по меньшей мере одним газоструйным клапаном, газового пробоя нейтрального газа для создания профиля скорости сдвигового потока.

2. Устройство по пункту 1, в котором поток электронов электрического тока проходит от второго электрода к первому электроду.

3. Устройство по любому из пунктов 1 и 2, в котором формовочная часть содержит по меньшей мере одно проводящее кольцо, содержащее по меньшей мере одну контактную поверхность, которая электрически соединена с внешней поверхностью второго электрода.

4. Устройство по пункту 3, в котором указанное по меньшей мере одно проводящее кольцо содержит проводящие материалы, химически и термомеханически совместимые с проводниками второго электрода, а обращенная к плазме часть указанной

по меньшей мере одной формовочной части содержит по меньшей мере один тугоплавкий металл.

5. Устройство по пункту 4, в котором указанный по меньшей мере один тугоплавкий металл содержит одно или более из W, Ta, Nb, Mo, Re, Ti, V, Cr, Mn, Zr, Tc, Ru, Rh, Hf, Os, Ir, или сплава любого одного или более предыдущих металлов.

6. Устройство по любому из пунктов 4 и 5, в котором указанная обращенная к плазме часть содержит по меньшей мере одну проводящую форму углерода, содержащую одно или более из графита, спеченных углеродных порошков, прессованных углеродных порошков, углеродного волокна или структур, содержащих углеродные нанотрубки.

7. Устройство по любому из пунктов 4—6, в котором указанная обращенная к плазме часть содержит по меньшей мере одну текстурированную поверхность, образованную с возможностью включения в себя множества локализованных вогнутых элементов, образующих структурированные группы для усиления локальных электрических полей и способствования электронной эмиссии.

8. Устройство по пункту 7, в котором указанная по меньшей мере одна текстурированная поверхность была образована посредством механической обработки, содержащей одно или более из резания, царапания, шлифования, пескоструйной обработки, выполнения канавок, насечек, штампования, тиснения или рифления.

9. Устройство по любому из пунктов 7 и 8, в котором указанная по меньшей мере одна текстурированная поверхность была образована посредством химической обработки, содержащей одно или более из травления, химического осаждения, распыления, напыления, ионной и нейтральной имплантации или эпитаксиального выращивания.

10. Устройство по любому из пунктов 1—9, в котором набор клапанов дополнительно содержит по меньшей мере один плазменный инжектор для обеспечения ионизированного газа в объем ускорения для дополнительного питания плазменного столба Z-пинча.

11. Устройство по любому из пунктов 1—10, в котором второй электрод содержит коническую электродную поверхность, выполненную с возможностью улучшения переноса импульса на ионы и нейтральные частицы в осевом направлении первого и второго электродов.

12. Устройство по любому из пунктов 1—11, дополнительно содержащее третий электрод, расположенный между первым и вторым электродами и соосно с ними, причем третий электрод демонстрирует конфигурацию сужающегося электрода и содержит коническую электродную поверхность, выполненную с возможностью улучшения переноса импульса на ионы и нейтральные частицы в осевом направлении первого, второго и третьего электродов.

13. Способ, включающий:

активацию одного или более газоструйных клапанов для введения осесимметричного объема нейтрального газа в объем ускорения;

создание радиального электрического поля для поддержания первого тока посредством способствования пробоем нейтрального газа, причем первый ток протекает через введенный нейтральный газ между внутренним электродом и внешним электродом;

и

образование плазменного столба *Z*-пинча из введенного нейтрального газа для поддержания второго тока, протекающего между внутренним электродом и внешним электродом,

причем плазменный столб *Z*-пинча окружен и стабилизирован скоростью сдвигового потока плазмы, по меньшей мере частично образованного из нейтрального газа.

14. Способ по пункту 13, включающий активацию одного или более плазменных инжекторов для введения осесимметричного объема ионизированного газа в объем ускорения.

15. Способ по пункту 14, в котором осесимметричный объем ионизированного газа вводят для восполнения осесимметричного объема нейтрального газа после образования плазменного столба *Z*-пинча.

16. Способ по любому из пунктов 13—15, в котором внутренний электрод представляет собой анод, а внешний электрод представляет собой катод.

17. Система для удержания плазмы, содержащая:

внешний электрод;

внутренний электрод;

по меньшей мере один источник питания, соединенный с возможностью обеспечения проводимости с каждым из внутреннего и внешнего электродов, причем выводы указанного по меньшей мере одного источника питания выполнены с

возможностью создания разности потенциалов между внутренним и внешним электродами;  
и

один или более первых клапанов, соединенных по текучей среде с подачей топливного газа и выполненных с возможностью направления достаточного нейтрального газа, поступающего от подачи топливного газа, для поддержания локализованного пути пробоя между внутренним и внешним электродами и для установления скорости сдвигового потока плазмы в течение разряда  $Z$ -пинча между внутренним и внешним электродами.

18. Система для удержания плазмы по пункту 17, в которой внутренний и внешний электроды ограничивают объем ускорения, в который обеспечено направление нейтрального газа посредством указанного одного или более первых клапанов.

19. Система для удержания плазмы по пункту 17, дополнительно содержащая промежуточный электрод,

причем внутренний и промежуточный электроды ограничивают объем ускорения, в который обеспечено направление нейтрального газа посредством указанного одного или более первых клапанов.

20. Система для удержания плазмы по любому из пунктов 17—19, дополнительно содержащая один или более вторых клапанов, соединенных по текучей среде с подачей топливного газа и выполненных с возможностью направления достаточного ионизированного газа, поступающего от подачи топливного газа, для поддержания скорости сдвигового потока плазмы в течение разряда  $Z$ -пинча.

21. Устройство, содержащее:

первый электрод, расположенный с определением внешней границы объема ускорения;

второй электрод, установленный соосно с первым электродом и расположенный с определением внутренней границы объема ускорения;

по меньшей мере один источник питания для возбуждения электрического тока вдоль плазменного столба  $Z$ -пинча между первым и вторым электродами; и

набор клапанов для обеспечения газа в объем ускорения для питания плазменного столба  $Z$ -пинча,

причем поток электронов электрического тока проходит в первом направлении от второго электрода к первому электроду.

22. Устройство по пункту 21, в котором газ содержит нейтральный газ, и при этом устройство дополнительно содержит формовочную часть, соединенную с возможностью обеспечения проводимости со вторым электродом для вызывания в присутствии нейтрального газа, обеспечиваемого набором клапанов, газового пробоя нейтрального газа для создания профиля скорости сдвигового потока во втором направлении, противоположном первому направлению.

23. Устройство по пункту 22, в котором формовочная часть содержит по меньшей мере одно проводящее кольцо, содержащее по меньшей мере одну контактную поверхность, которая электрически соединена с внешней поверхностью второго электрода.

24. Устройство по пункту 23, в котором указанное по меньшей мере одно проводящее кольцо содержит проводящие материалы, химически и термомеханически совместимые с проводниками второго электрода, а обращенная к плазме часть указанной по меньшей мере одной формовочной части содержит по меньшей мере один тугоплавкий металл.

25. Устройство по пункту 24, в котором указанный по меньшей мере один тугоплавкий металл содержит одно или более из W, Ta, Nb, Mo, Re, Ti, V, Cr, Mn, Zr, Tc, Ru, Rh, Hf, Os, Ir или сплава любого одного или более предыдущих металлов.

26. Устройство по любому из пунктов 24 и 25, в котором указанная обращенная к плазме часть содержит по меньшей мере одну проводящую форму углерода, содержащую одно или более из графита, спеченных углеродных порошков, прессованных углеродных порошков, углеродного волокна или структур, содержащих углеродные нанотрубки.

27. Устройство по любому из пунктов 24—26, в котором указанная обращенная к плазме часть содержит по меньшей мере одну текстурированную поверхность, образованную с возможностью включения в нее множества локализованных вогнутых элементов, образующих структурированные группы для усиления локальных электрических полей и способствования электронной эмиссии.

28. Устройство по пункту 27, в котором указанная по меньшей мере одна текстурированная поверхность была образована посредством механической обработки, содержащей одно или более из резания, царапания, шлифования, пескоструйной обработки, выполнения канавок, насечек, штампования, тиснения или рифления.

29. Устройство по любому из пунктов 27 и 28, в котором указанная по меньшей мере одна текстурированная поверхность была образована посредством химической обработки, содержащей одно или более из травления, химического осаждения, распыления, напыления, ионной и нейтральной имплантации или эпитаксиального выращивания.

30. Устройство по пункту 21, в котором газ выполнен с возможностью обеспечения в объеме ускорения в виде ионизированного газа.

31. Устройство по любому из пунктов 21—30, в котором второй электрод содержит коническую электродную поверхность, выполненную с возможностью улучшения переноса импульса на ионы и нейтральные частицы в осевом направлении первого и второго электродов.

32. Устройство по любому из пунктов 21—31, дополнительно содержащее третий электрод, установленный между первым и вторым электродами и соосно с ними, причем третий электрод демонстрирует конфигурацию сужающегося электрода и содержит коническую электродную поверхность, выполненную с возможностью улучшения переноса импульса на ионы и нейтральные частицы в осевом направлении первого, второго и третьего электродов.

33. Способ, включающий:

активацию одного или более клапанов для введения осесимметричного объема топливного газа в объем ускорения; и

образование плазменного столба  $Z$ -пинча из введенного топливного газа для поддержания тока  $Z$ -пинча, протекающего между внутренним анодом и внешним катодом, окружающим неподдерживаемый конец внутреннего анода,

причем плазменный столб  $Z$ -пинча окружен и стабилизирован скоростью сдвигового потока плазмы, образованного из топливного газа.

34. Способ согласно пункту 33, дополнительно включающий, до образования плазменного столба  $Z$ -пинча, создание радиального электрического поля для поддержания начального тока, протекающего через введенный топливный газ между внутренним анодом и внешним катодом.

35. Способ по пункту 34, согласно которому топливный газ содержит нейтральный газ, и согласно которому радиальное электрическое поле поддерживает исходный ток по меньшей мере за счет способствования пробоем нейтрального газа.



36. Способ по любому из пунктов 33—35, в котором вводят топливный газ в объем ускорения, причем топливный газ содержит ионизированный газ.

37. Система для удержания плазмы, содержащая:  
внешний электрод;  
внутренний электрод, концентрически расположенный внутри внешнего электрода;

по меньшей мере один источник питания, соединенный с возможностью обеспечения проводимости с каждым из внутреннего и внешнего электродов, причем выводы указанного по меньшей мере одного источника питания выполнены с возможностью создания разности потенциалов между внутренним и внешним электродами для возбуждения перемещения электронов от внутреннего электрода к внешнему электроду; и

один или более клапанов, соединенных по текучей среде с подачей топливного газа и выполненных с возможностью направления достаточного топливного газа, поступающего от подачи топливного газа, для возбуждения скорости сдвигового потока плазмы в течение разряда Z-пинча между внутренним и внешним электродами.

38. Система для удержания плазмы по пункту 37, в которой внутренний и внешний электроды ограничивают объем ускорения, в который обеспечено направление топливного газа посредством указанного одного или более клапанов.

39. Система для удержания плазмы по пункту 37, дополнительно содержащая промежуточный электрод, концентрически расположенный между внутренним и внешним электродами,

причем внутренний и промежуточный электроды ограничивают объем ускорения, в который обеспечено направление топливного газа посредством указанного одного или более клапанов.

40. Система для удержания плазмы по любому из пунктов 37—39, в которой топливный газ содержит одно или оба из нейтрального газа и ионизированного газа.

[188] Хотя для целей описания концепций настоящего изобретения были изложены конкретные значения, взаимосвязи, материалы и компоненты, специалистам в данной области техники следует понимать, что в настоящее изобретение могут быть внесены многочисленные изменения и/или модификации, как показано в конкретных вариантах осуществления, без отклонения от сущности или объема основных концепций и принципов работы настоящего изобретения, как они широко описаны. Следует понимать, что в свете

вышеизложенных идей специалисты в данной области техники могут модифицировать эти особенности без отклонения от настоящего изобретения, описанного в данном документе. Например, приведенные в данном документе числовые диапазоны, являются иллюстративными и могут быть изменены на основе режима работы данной системы для удержания плазмы или на основе модификаций размера, функции, конфигурации и т. д. данной системы для удержания плазмы. Например, при увеличении размера данной системы для удержания плазмы такие диапазоны могут пропорционально (например, линейно, экспоненциально и т. д.) масштабировать.

[189] После полного изложения вариантов осуществления и некоторых модификаций концепций, лежащих в основе настоящего изобретения, различные другие варианты осуществления, а также некоторые вариации и модификации показанных и описанных здесь вариантов осуществления могут возникнуть у специалистов в данной области техники после ознакомления с такими базовыми концепциями. Предполагается включение всех таких модификаций, альтернатив и других вариантов осуществления в той же степени, насколько они входят в объем прилагаемой формулы изобретения или ее эквивалентов. Таким образом, следует понимать, что настоящее изобретение может быть реализовано на практике иначе, чем конкретно изложено в данном документе. Следовательно, настоящие варианты осуществления должны рассматриваться во всех отношениях как иллюстративные и не ограничивающие.

[190] Соответственно, описание и чертежи следует рассматривать в иллюстративном, а не ограничительном смысле. Однако будет очевидно, что в них могут быть выполнены различные модификации и изменения без отступления от более широкой сущности и объема предмета, изложенного в формуле изобретения.

[191] Другие вариации находятся в пределах сущности настоящего изобретения. Таким образом, хотя раскрытые методики подвержены различным модификациям и альтернативным конструкциям, некоторые проиллюстрированные варианты осуществления показаны на чертежах и были подробно описаны выше. Однако следует понимать, что нет намерения ограничить предмет, изложенный в формуле изобретения, конкретной раскрытой формой или формами, напротив, намерение состоит в том, чтобы охватывать все модификации, альтернативные конструкции и эквиваленты, находящиеся в пределах сущности и объема настоящего изобретения, как определено в прилагаемой формуле изобретения.

[192] Использование грамматических показателей единственного числа в контексте описания раскрытых вариантов осуществления (особенно в контексте последующей формулы изобретения) следует истолковывать как охватывающее как единственное, так и

множественное число, если в данном документе не указано иное или явно не противоречит контексту. Аналогично, использование термина «или» следует истолковывать как означающее «и/или», если это не противоречит явно или по контексту. Термины «содержащий», «имеющий», «включающий» и «имеющий в своем составе» следует истолковывать как неограничивающие термины (то есть, подразумевающие «включающий в себя среди прочего»), если не указано иное. Термин «соединенный», если он немодифицирован и относится к физическим соединениям, следует истолковывать как частично или полностью содержащийся в, присоединенный к или соединенный вместе, даже если присутствует что-нибудь промежуточное. Перечисление диапазонов значений в данном документе предназначено только для использования в качестве сокращенного способа индивидуальной ссылки на каждое отдельное значение, находящееся в пределах этого диапазона, если в данном документе не указано иное, и каждое отдельное значение включено в описание, как если бы оно было указано здесь индивидуально. Использование термина «набор» (например, «набор элементов») или «поднабор», если не указано иное или не противоречит контексту, должно истолковываться как непустая совокупность, состоящая из одного или нескольких элементов. Кроме того, если не указано иное или не противоречит контексту, термин «поднабор» соответствующего набора не обязательно обозначает правильный поднабор соответствующего набора, но поднабор и соответствующий набор могут быть равными. Использование фразы «на основе», если явно не указано иное или не ясно из контекста, означает «по меньшей мере частично на основе» и не ограничивается «только на основе».

[193] Соединительная лексика, такая как фразы в виде «по меньшей мере один из А, В, и С» или «по меньшей мере один из А, В и С» (то есть, одинаковая фраза с оксфордской запятой или без нее), если специально не указано иное или иным образом явно противоречит контексту, иначе понимается в контексте как используемый в целом для представления того, что элемент, термин и т. д. может быть либо А, либо В, либо С, любым непустым поднабором набора А и В и С или любой набор, не противоречащий контексту или иным образом не исключенный, который содержит по меньшей мере один А, по меньшей мере один В или по меньшей мере один С. Например, в иллюстративном примере набора, имеющего три элемента, соединительные фразы «по меньшей мере один из А, В, и С» и «по меньшей мере один из А, В и С» относятся к любому из следующих наборов: {А}, {В}, {С}, {А, В}, {А, С}, {В, С}, {А, В, С} и, если это не противоречит явно или по контексту, любой набор, имеющий {А}, {В} и/или {С} в качестве поднабора (например, наборы с множеством «А»). Таким образом, такая соединительная лексика, как правило, не подразумевает, что в некоторых вариантах осуществления требуется присутствие каждого

из следующего: по меньшей мере один из А, по меньшей мере один из В и по меньшей мере один из С. Подобным образом, такие фразы, как «по меньшей мере один из А, В, или С» и «по меньшей мере один из А, В или С» относятся к тому же, что и «по меньшей мере один из А, В, и С», и «по меньшей мере один из А, В и С» относятся к любому из следующих наборов: {А}, {В}, {С}, {А, В}, {А, С}, {В, С}, {А, В, С}, если иное значение явно не указано или не ясно из контекста. Кроме того, если не указано иное или не противоречит контексту, термин «множество» указывает на состояние множественного числа (например, термин «множество элементов» указывает на множество элементов). Количество элементов во множестве составляет по меньшей мере два, но может быть больше, если это указано либо явно, либо по контексту.

[194] Операции процессов, описанных в данном документе, могут выполнять в любом подходящем порядке, если в данном документе не указано иное или иное явно не противоречит контексту. В одном варианте осуществления процесс, такой как описанные в данном документе процессы (или их варианты и/или комбинации), выполняют под управлением одной или более компьютерных систем, сконфигурированных исполняемыми инструкциями, и реализуют в виде кода (например, исполняемых инструкций, одной или более компьютерных программ или одного или более приложений), исполняемого совместно на одном или более процессоров, при помощи аппаратного обеспечения или их комбинациями. В одном варианте осуществления код хранится на машиночитаемом носителе данных, например, в виде компьютерной программы, содержащей множество инструкций, исполняемых одним или более процессоров. В одном варианте осуществления машиночитаемый носитель данных представляет собой энергонезависимый машиночитаемый носитель данных, который исключает временные сигналы (например, распространяющуюся кратковременную электрическую или электромагнитную передачу), но содержит схемы для энергонезависимого хранения данных (например, буферы, кэш и очереди) в приемопередатчиках временных сигналов. В одном варианте осуществления код (например, исполняемый код или исходный код) хранится на наборе из одного или более энергонезависимых машиночитаемых носителей данных, содержащих сохраненные на нем исполняемые инструкции, которые при исполнении (то есть, в результате исполнения) одним или более процессоров компьютерной системы вызывают выполнение компьютерной системой операций, описанных в данном документе. В одном варианте осуществления набор энергонезависимых машиночитаемых носителей данных содержит множество энергонезависимых машиночитаемых носителей данных, причем один или более отдельных энергонезависимых носителей данных из указанного множества энергонезависимых машиночитаемых носителей данных не имеют всего кода, тогда как

указанное множество энергонезависимых машиночитаемых носителей данных совместно хранят весь код. В одном варианте осуществления исполняемые инструкции исполняют таким образом, что различные команды исполняют посредством различных процессоров, например, в одном варианте осуществления энергонезависимый машиночитаемый носитель данных хранит инструкции, и основной процессор исполняет некоторые из этих инструкций, тогда как графический процессорный блок исполняет другие инструкции. В другом варианте осуществления различные компоненты компьютерной системы имеют отдельные процессоры, и различные процессоры исполняют различные поднаборы этих инструкций.

[195] Соответственно, в одном варианте осуществления компьютерные системы выполнены с возможностью реализации одной или более служб, которые по отдельности или совместно выполняют операции процессов, описанных в данном документе, и такие компьютерные системы выполнены с применимым аппаратным и/или программным обеспечением, обеспечивающим возможность выполнения этих операций. Кроме того, в одном варианте осуществления настоящего изобретения компьютерная система представляет собой одно устройство, а в другом варианте осуществления представляет собой распределенную компьютерную систему, содержащую множество устройств, работающих различным образом, так что распределенная компьютерная система выполняет операции, описанные в данном документе, и так, что одно устройство не выполняет все операции.

[196] Использование любых и всех примеров или примерной лексики (например, термина «такой как»), предусмотренных в данном документе, предназначено только для лучшего освещения различных вариантов осуществления и не налагает ограничения на объем формулы изобретения, если не указано иное. Никакие формулировки в настоящем описании не должны быть истолкованы как указывающие на любой незаявленный элемент как существенный для осуществления настоящего изобретения, раскрытого в данном документе.

[197] Варианты осуществления настоящего изобретения описаны в данном документе, включая лучший способ, известный авторам изобретения, для осуществления концепций изобретения, описанных в данном документе. Вариации этих вариантов осуществления могут стать очевидными специалистам в данной области техники после прочтения вышеизложенного описания. Авторы изобретения ожидают, что специалисты в данной области техники будут использовать такие вариации при необходимости, а также авторы изобретения предполагают, что варианты осуществления настоящего изобретения будут применяться на практике иначе, чем конкретно описано в настоящем документе.

Соответственно, объем настоящего изобретения включает в себя все модификации и эквиваленты предмета изобретения, изложенные в формуле изобретения, прилагаемой к настоящему изобретению, в соответствии с применимым законодательством. Кроме того, любая комбинация вышеописанных элементов во всех ее возможных вариациях охватывается объемом настоящего изобретения, если в данном документе не указано иное или иное явно не противоречит контексту.

[198] Все ссылки, включая публикации, патентные заявки и патенты, цитируемые в данном документе, тем самым включены посредством ссылки в той же степени, как если бы каждая ссылка была отдельно и конкретно указана как включенная посредством ссылки и была изложена в данном документе во всей своей полноте.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство, содержащее:
  - первый электрод, расположенный с определением внешней границы объема ускорения;
  - второй электрод, установленный соосно с первым электродом и расположенный с определением внутренней границы объема ускорения;
  - по меньшей мере один источник питания для возбуждения электрического тока вдоль плазменного столба Z-пинча между первым и вторым электродами; и
  - набор клапанов для обеспечения газа в объем ускорения для питания плазменного столба Z-пинча,
  - причем поток электронов электрического тока проходит в первом направлении от второго электрода к первому электроду.
2. Устройство по п. 1, в котором газ содержит нейтральный газ, и при этом устройство дополнительно содержит формовочную часть, соединенную с возможностью обеспечения проводимости со вторым электродом для вызывания в присутствии нейтрального газа, обеспечиваемого набором клапанов, газового пробоя нейтрального газа для создания профиля скорости сдвигового потока во втором направлении, противоположном первому направлению.
3. Устройство по п. 2, в котором формовочная часть содержит по меньшей мере одно проводящее кольцо, содержащее по меньшей мере одну контактную поверхность, которая электрически соединена с внешней поверхностью второго электрода.
4. Устройство по п. 3, в котором указанное по меньшей мере одно проводящее кольцо содержит проводящие материалы, химически и термомеханически совместимые с проводниками второго электрода, а обращенная к плазме часть указанной по меньшей мере одной формовочной части содержит по меньшей мере один тугоплавкий металл.
5. Устройство по п. 4, в котором указанный по меньшей мере один тугоплавкий металл содержит одно или более из W, Ta, Nb, Mo, Re, Ti, V, Cr, Mn, Zr, Tc, Ru, Rh, Hf, Os, Ir или сплава любого одного или более предыдущих металлов.
6. Устройство по любому из п. 4 и п. 5, в котором указанная обращенная к плазме часть содержит по меньшей мере одну проводящую форму углерода, содержащую одно

или более из графита, спеченных углеродных порошков, прессованных углеродных порошков, углеродного волокна или структур, содержащих углеродные нанотрубки.

7. Устройство по любому из пп. 4—6, в котором указанная обращенная к плазме часть содержит по меньшей мере одну текстурированную поверхность, образованную с возможностью включения в себя множества локализованных вогнутых элементов, образующих структурированные группы для усиления локальных электрических полей и способствования электронной эмиссии.

8. Устройство по п. 7, в котором указанная по меньшей мере одна текстурированная поверхность была образована посредством механической обработки, содержащей одно или более из резания, царапания, шлифования, пескоструйной обработки, выполнения канавок, насечек, штампования, тиснения или рифления.

9. Устройство по любому из пп. 7 и 8, в котором указанная по меньшей мере одна текстурированная поверхность была образована посредством химической обработки, содержащей одно или более из травления, химического осаждения, распыления, напыления, ионной и нейтральной имплантации или эпитаксиального выращивания.

10. Устройство по любому из предыдущих пунктов, в котором в объеме ускорения обеспечен газ в виде ионизированного газа.

11. Устройство по любому из предыдущих пунктов, в котором второй электрод содержит коническую электродную поверхность, выполненную с возможностью улучшения переноса импульса на ионы и нейтральные частицы в осевом направлении первого и второго электродов.

12. Устройство по любому из предыдущих пунктов, дополнительно содержащее третий электрод, установленный между первым и вторым электродами и соосно с ними, причем третий электрод демонстрирует конфигурацию сужающегося электрода и содержит коническую электродную поверхность, выполненную с возможностью улучшения переноса импульса на ионы и нейтральные частицы в осевом направлении первого, второго и третьего электродов.

13. Способ, включающий:

активацию одного или более клапанов для введения осесимметричного объема топливного газа в объем ускорения; и



образование плазменного столба Z-пинча из введенного топливного газа для поддержания тока Z-пинча, протекающего между внутренним анодом и внешним катодом, окружающим неподдерживаемый конец внутреннего анода, причем плазменный столб Z-пинча окружен и стабилизирован скоростью сдвигового потока плазмы, образованного из топливного газа.

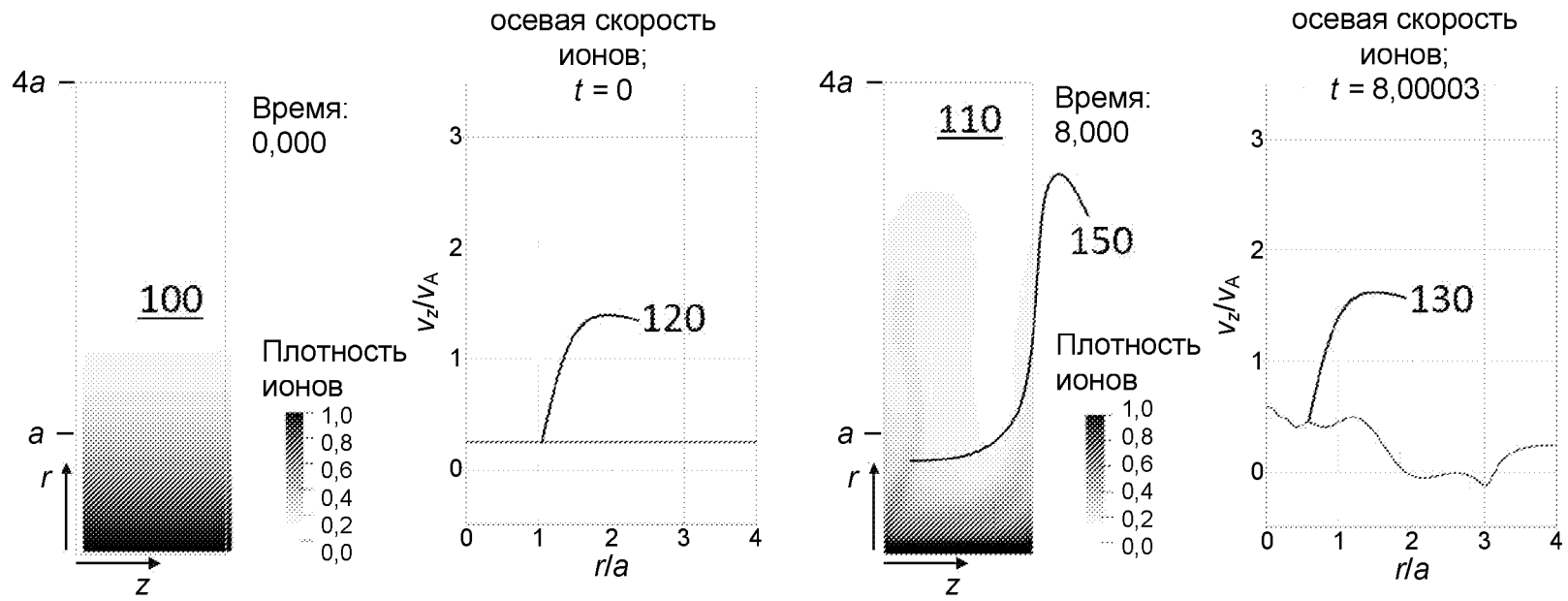
14. Способ по п. 13, дополнительно включающий до образования плазменного столба Z-пинча создание радиального электрического поля для поддержания начального тока, протекающего через введенный топливный газ между внутренним анодом и внешним катодом.
15. Способ по п. 14, согласно которому топливный газ содержит нейтральный газ, и согласно которому радиальное электрическое поле поддерживает исходный ток по меньшей мере за счет содействия пробоем нейтрального газа.
16. Способ по любому из пп. 13—15, в котором вводят топливный газ в объем ускорения, причем топливный газ содержит ионизированный газ.
17. Система для удержания плазмы, содержащая:
  - внешний электрод;
  - внутренний электрод, концентрически расположенный внутри внешнего электрода;
  - по меньшей мере один источник питания, соединенный с возможностью обеспечения проводимости с каждым из внутреннего и внешнего электродов, причем выводы указанного по меньшей мере одного источника питания ориентированы с обеспечением возможности создания разности потенциалов между внутренним и внешним электродами для возбуждения перемещения электронов от внутреннего электрода к внешнему электроду; и
  - один или более клапанов, соединенных по текучей среде с подачей топливного газа и выполненных с возможностью направления достаточного топливного газа, поступающего от подачи топливного газа, для возбуждения скорости сдвигового потока плазмы в течение разряда Z-пинча между внутренним и внешним электродами.
18. Система для удержания плазмы по п. 17, в которой внутренний и внешний электроды ограничивают объем ускорения, в который обеспечено направление топливного газа посредством указанного одного или более клапанов.

19. Система для удержания плазмы по п. 17, дополнительно содержащая промежуточный электрод, концентрически расположенный между внутренним и внешним электродами,

причем внутренний и промежуточный электроды ограничивают объем ускорения, в который обеспечено направление топливного газа посредством указанного одного или более клапанов.

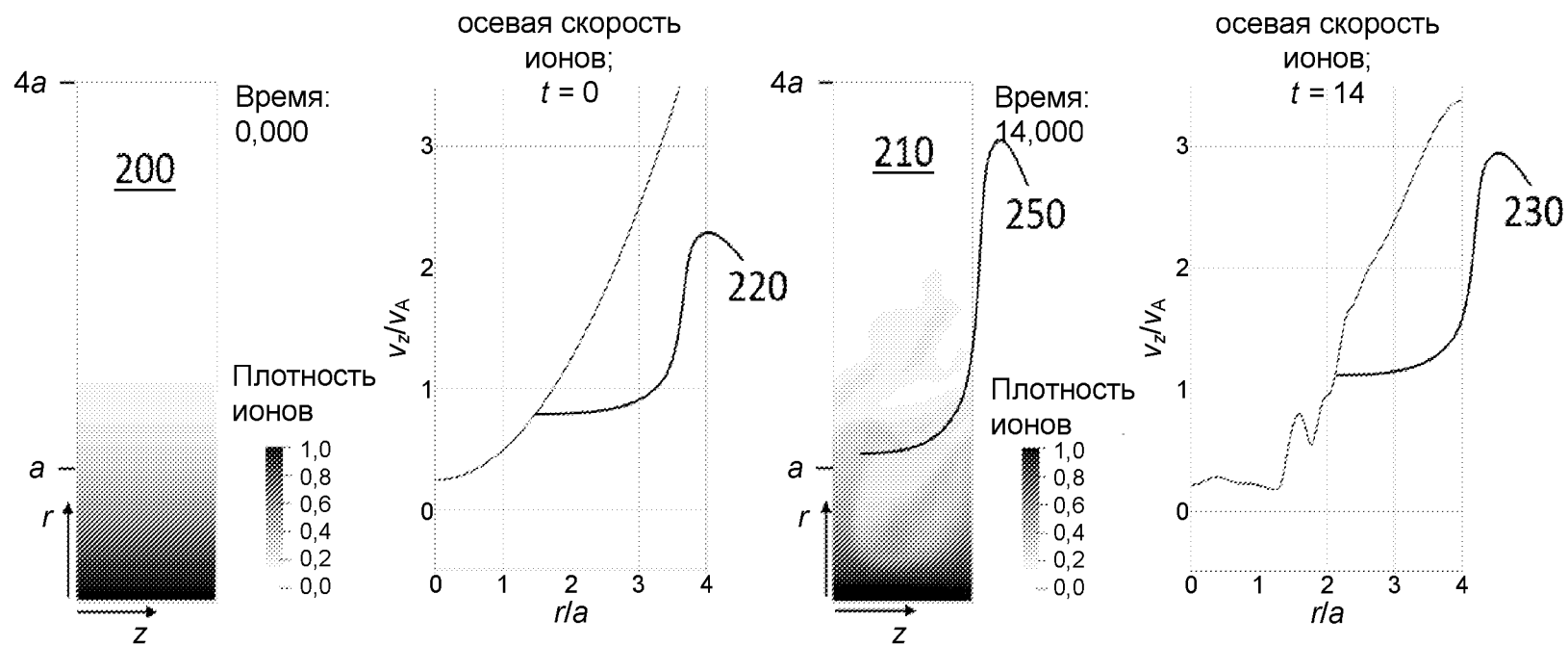
20. Система для удержания плазмы по любому из пп. 17—19, в которой топливный газ содержит одно или оба из нейтрального газа и ионизированного газа.

vsfa = 0,0



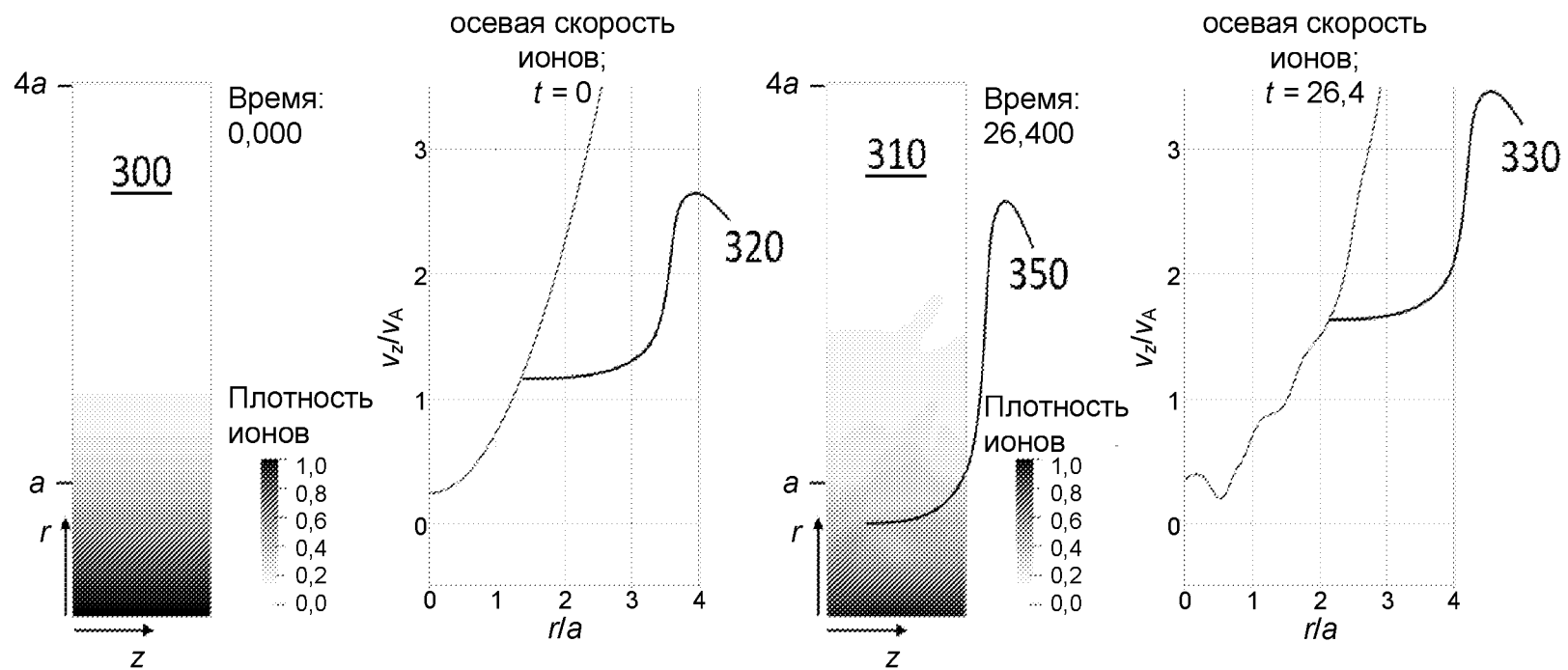
ФИГ. 1

vsfa = 0,25



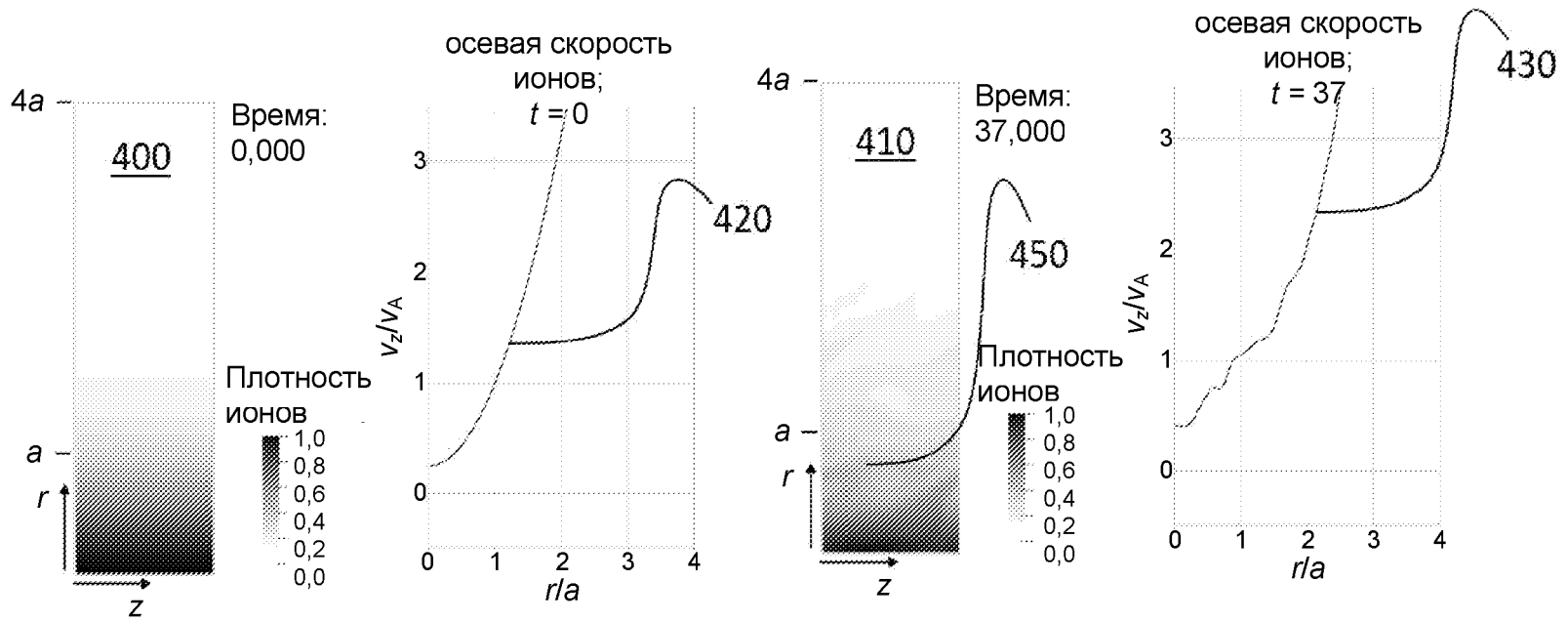
ФИГ. 2

vsfa = 0,5

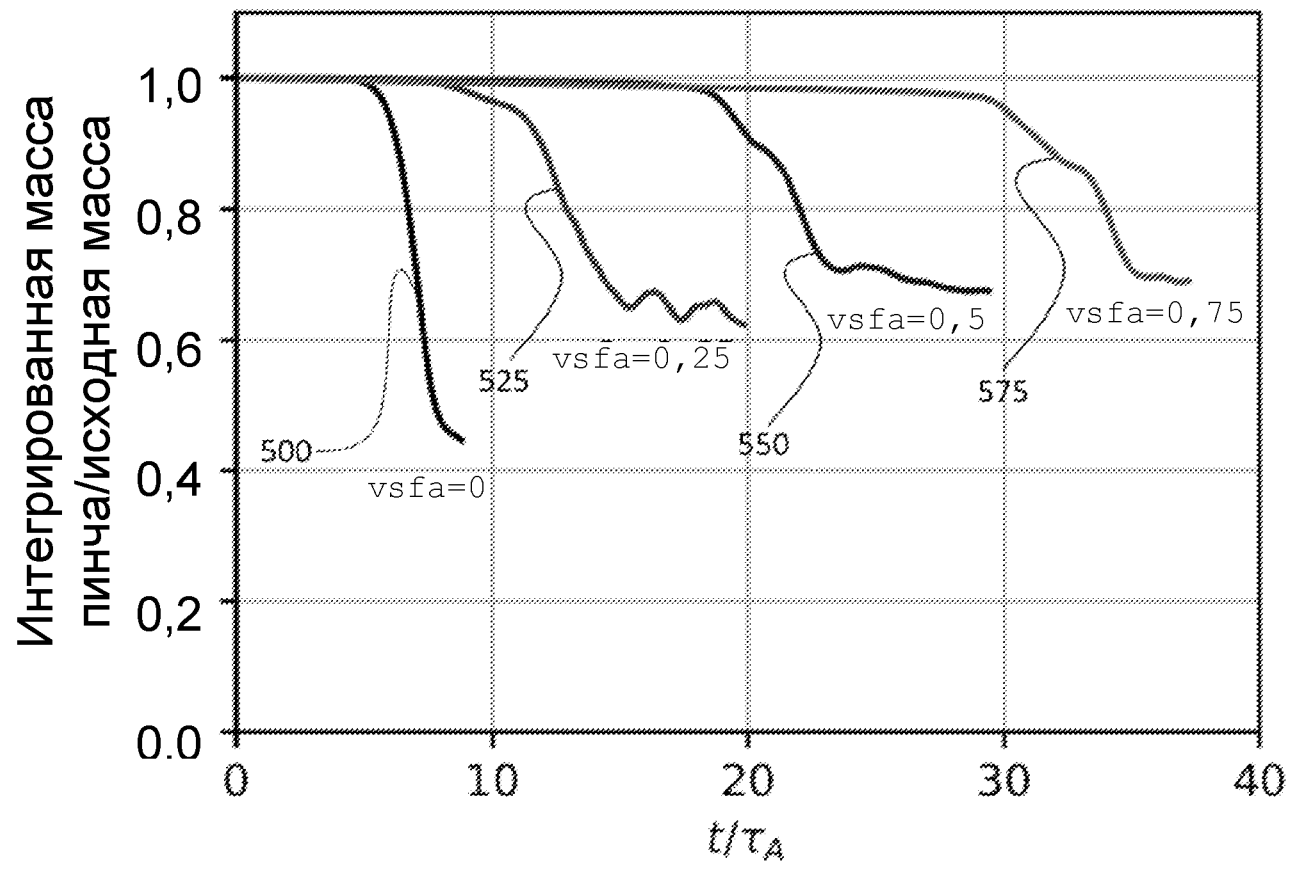


ФИГ. 3

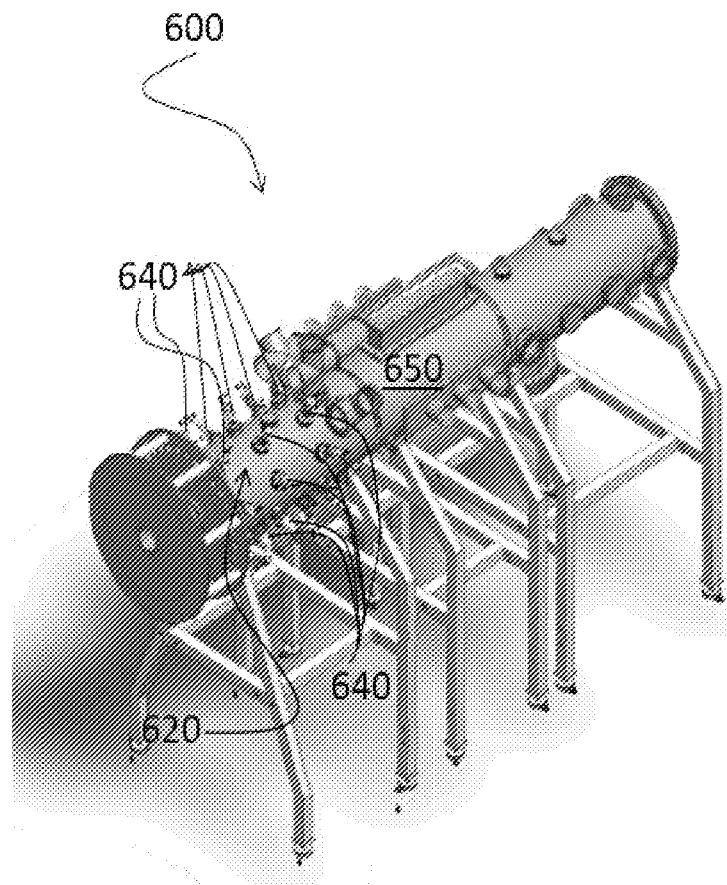
vsfa = 0,75



ФИГ. 4

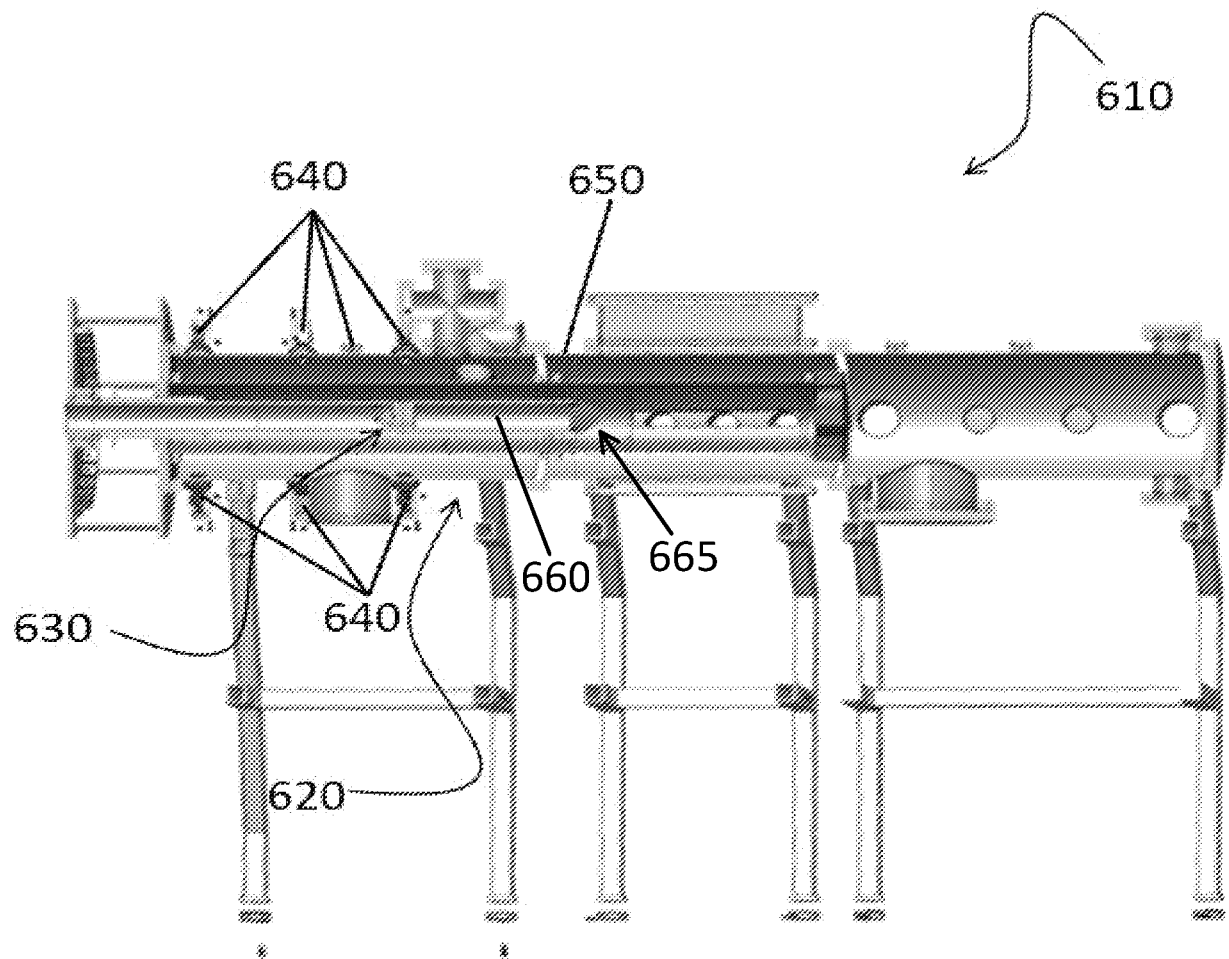


ФИГ. 5

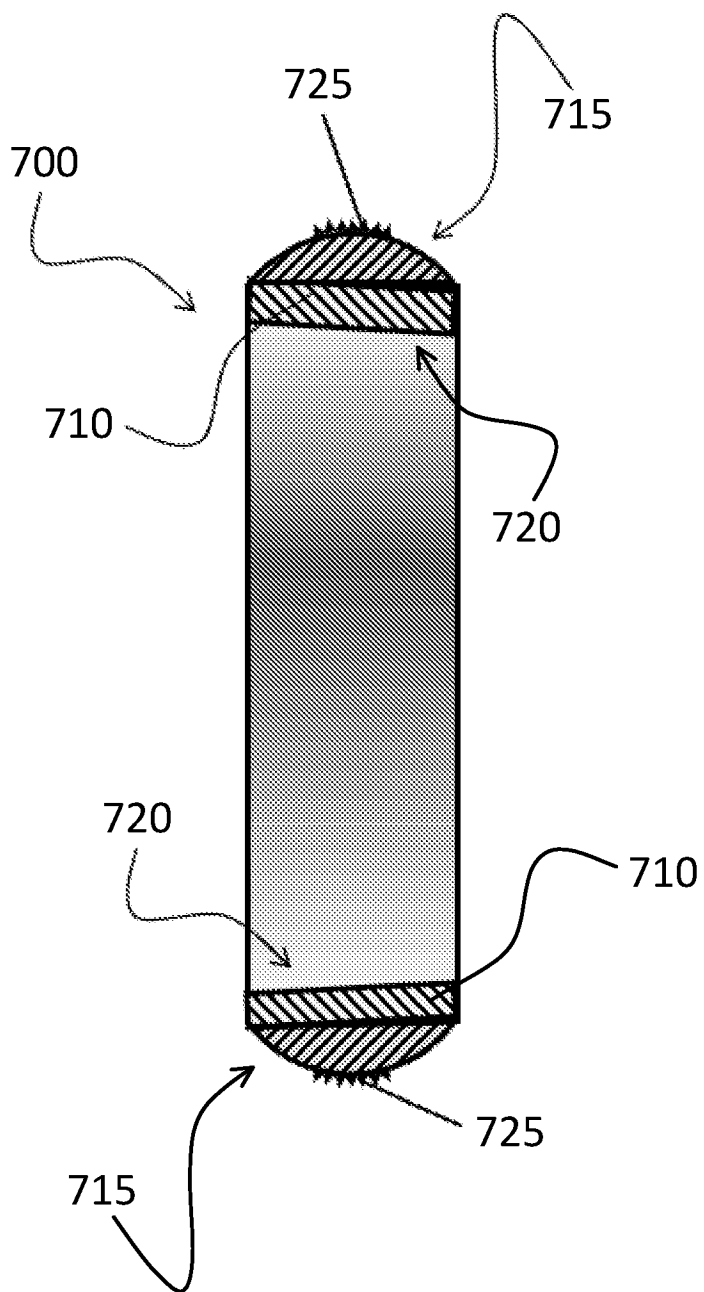


**ФИГ. 6А**

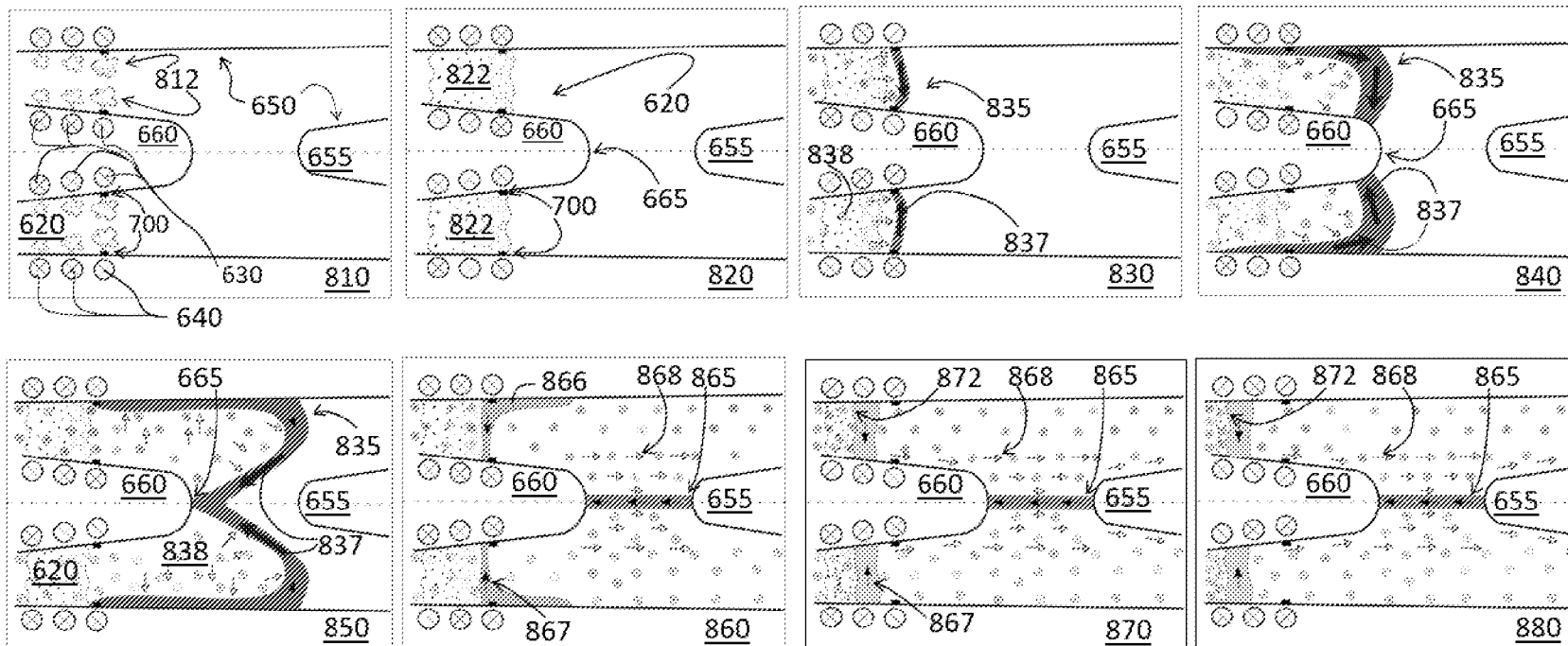




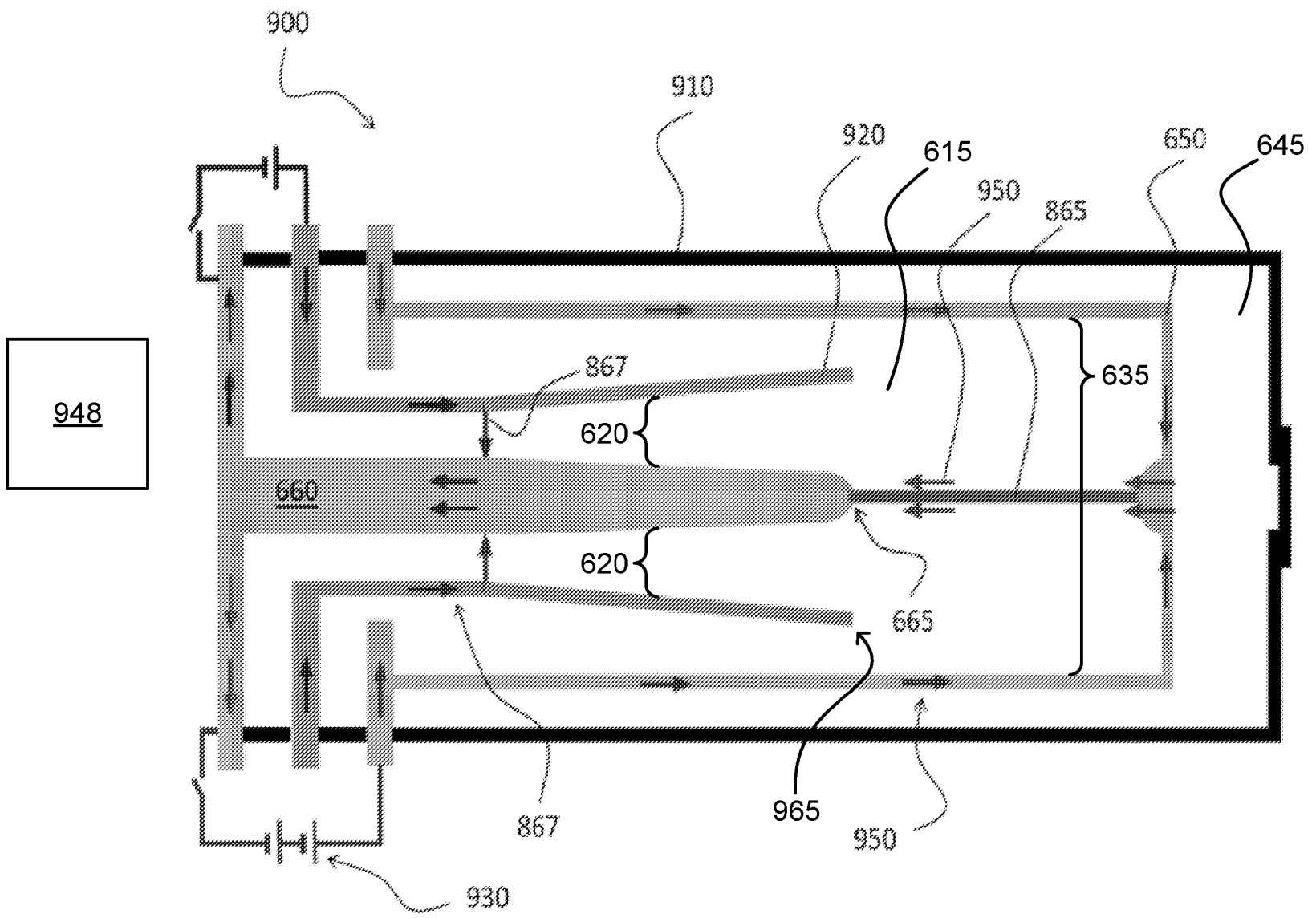
ФИГ. 6В



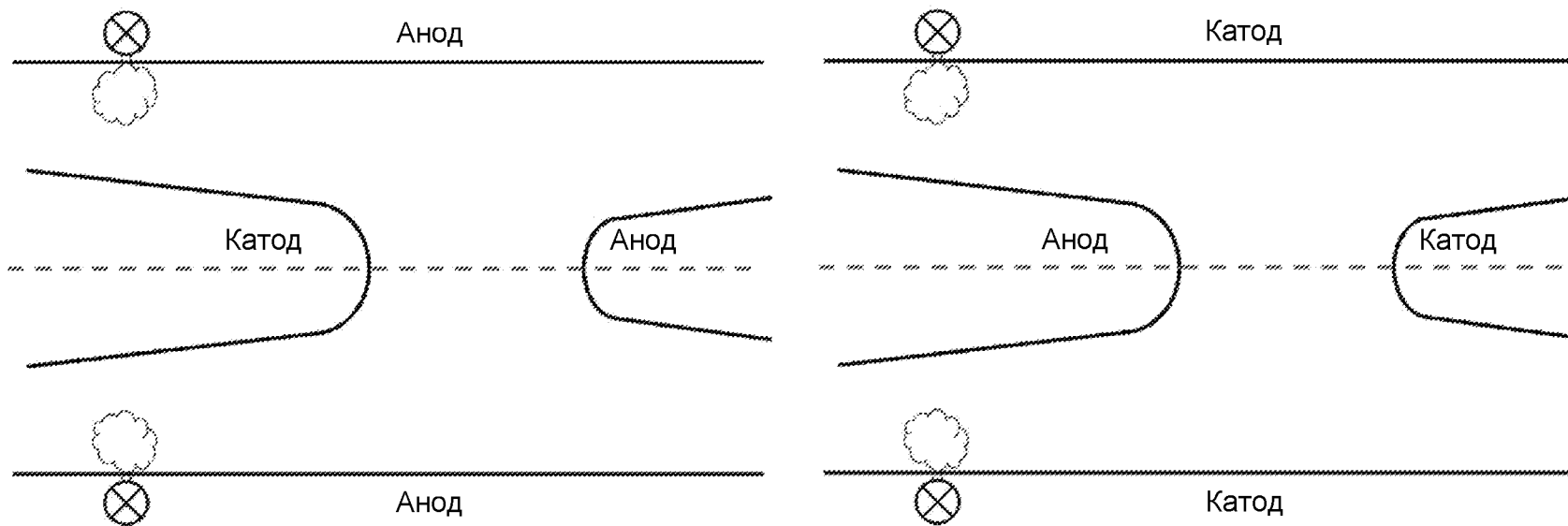
**ФИГ. 7**



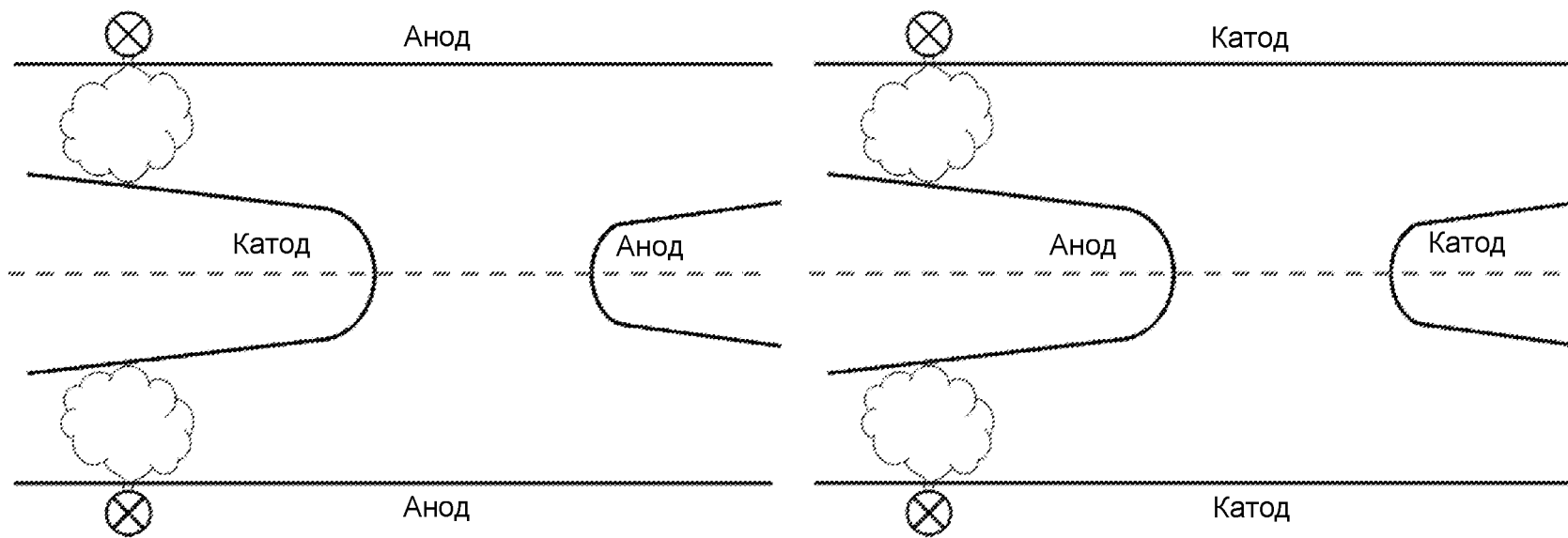
ФИГ. 8



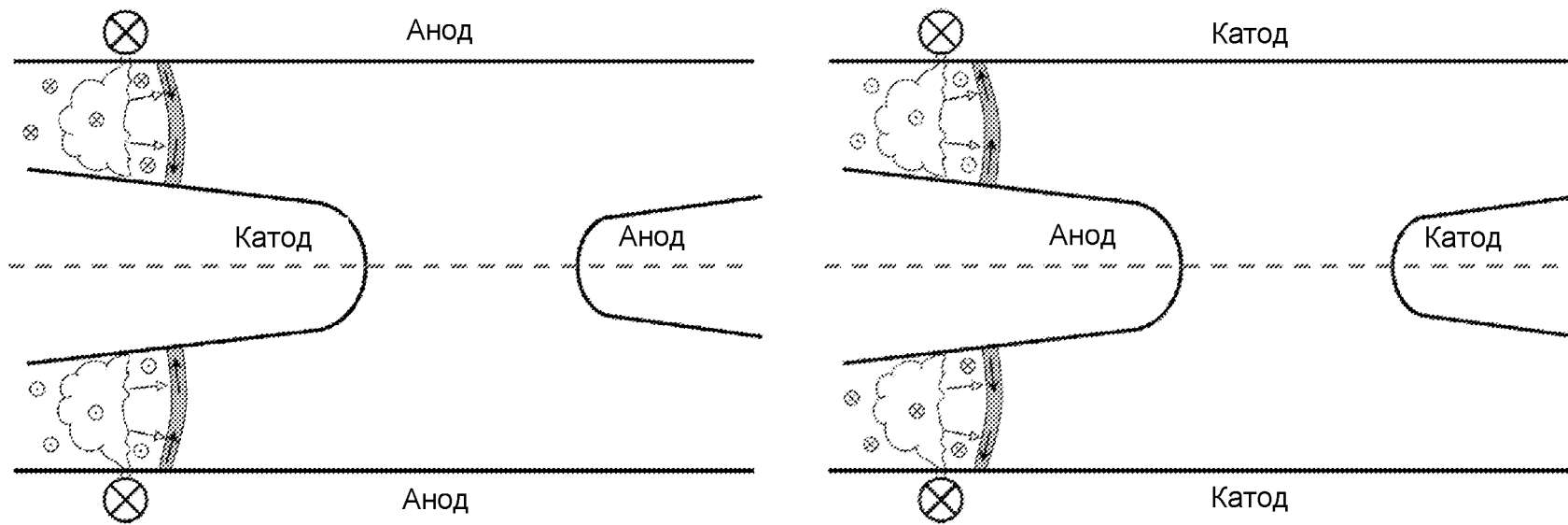
ФИГ. 9



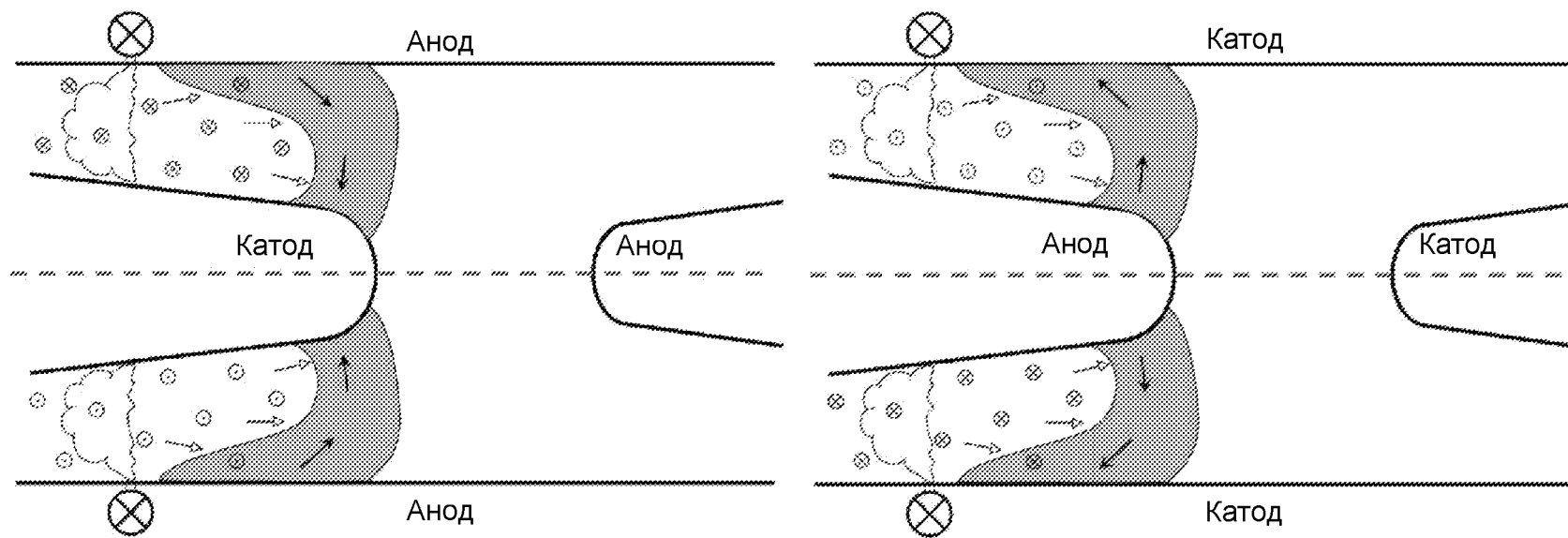
ФИГ. 10А



ФИГ. 10В

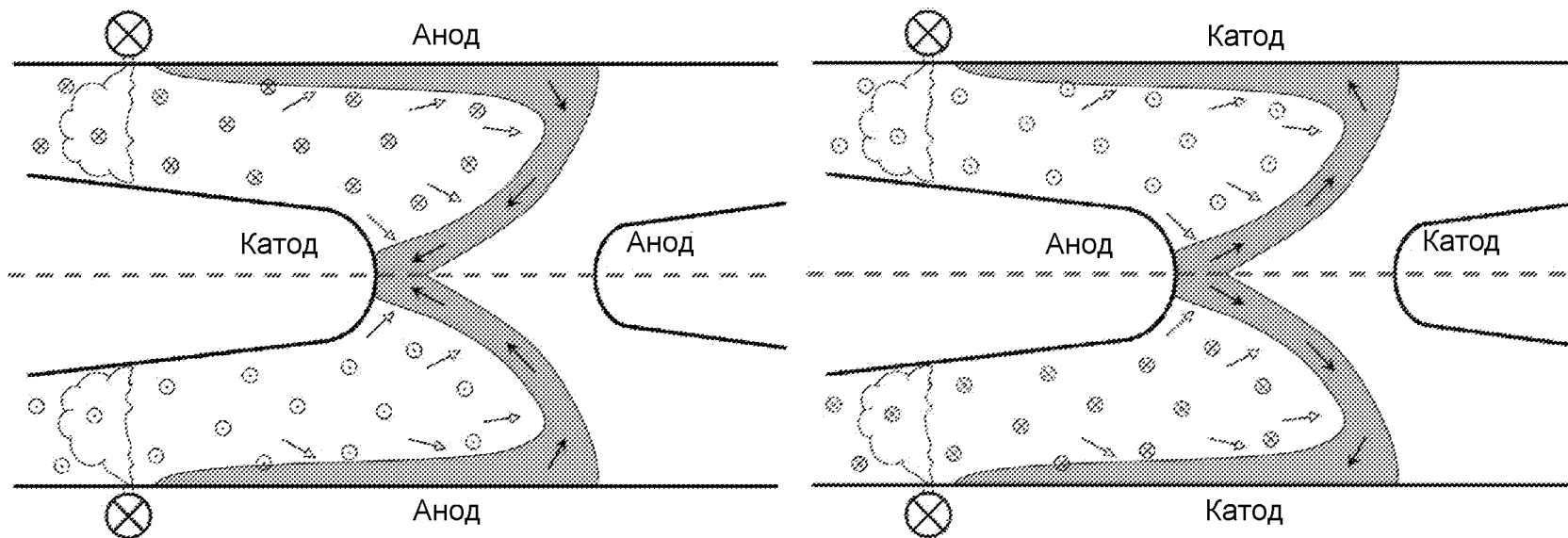


ФИГ. 10С

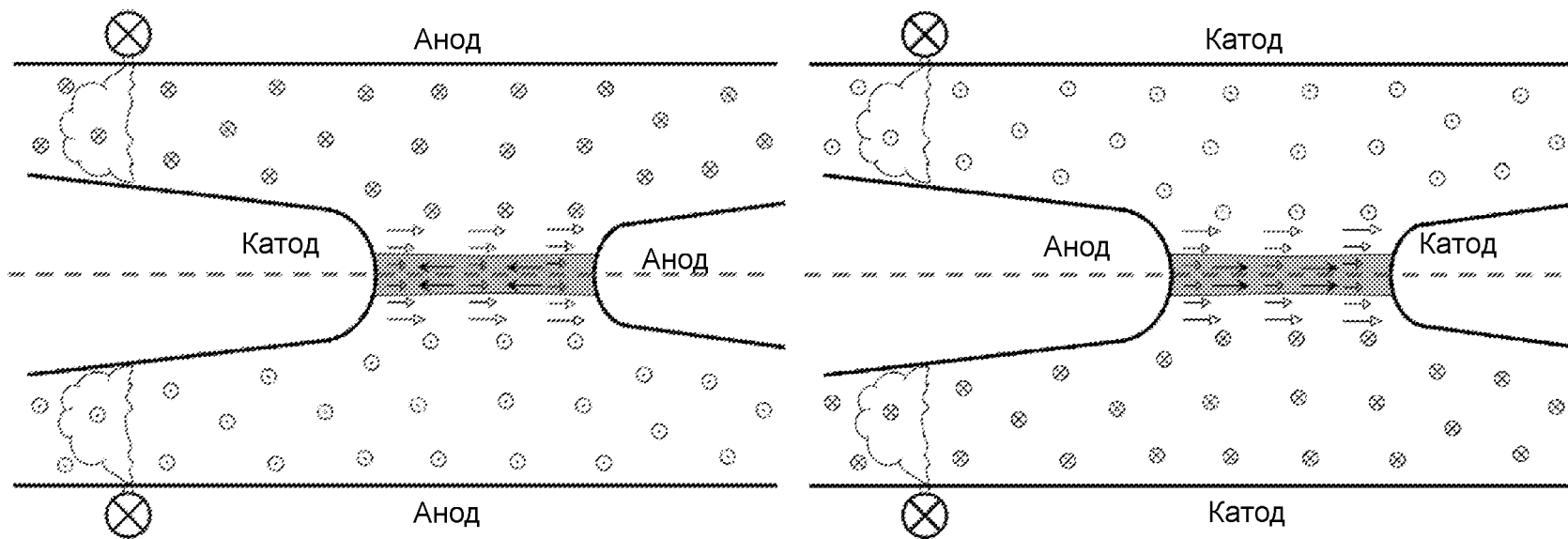


ФИГ. 10D

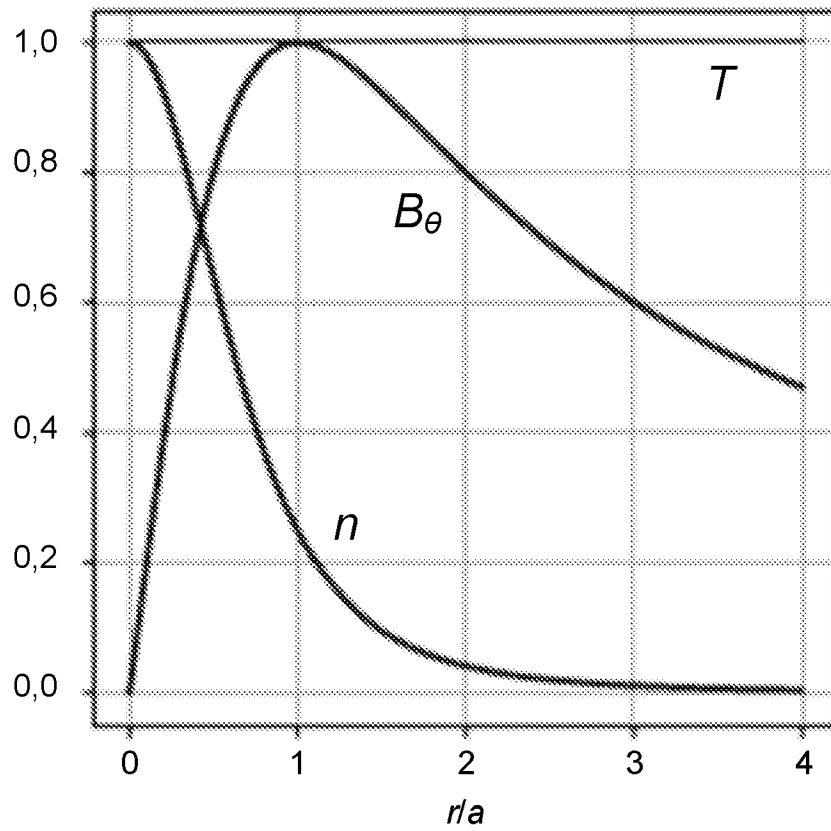




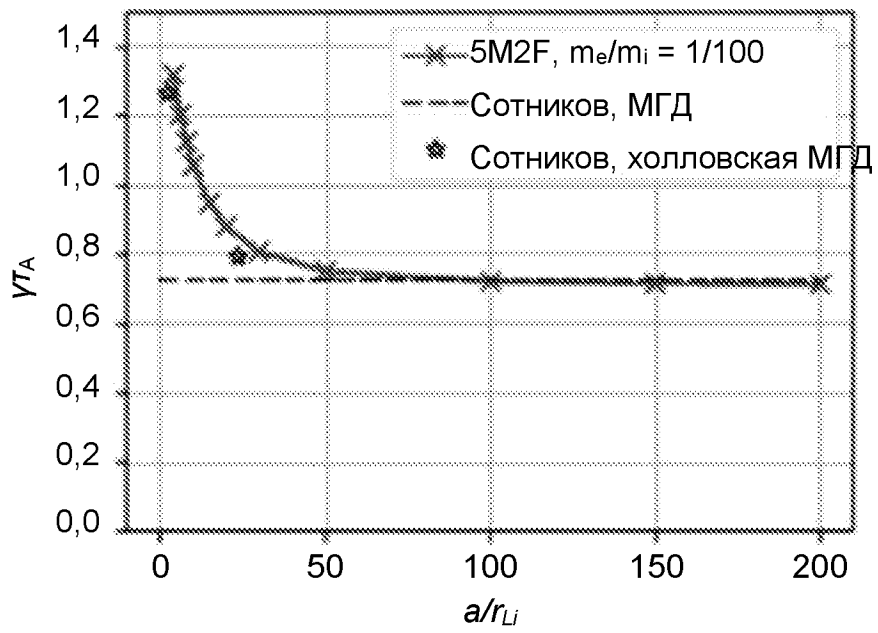
ФИГ. 10Е



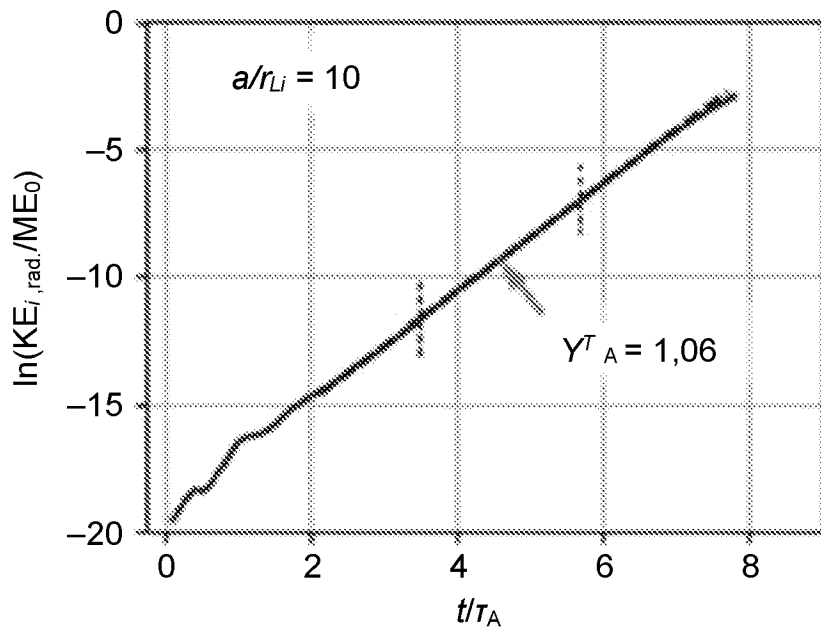
ФИГ. 10F



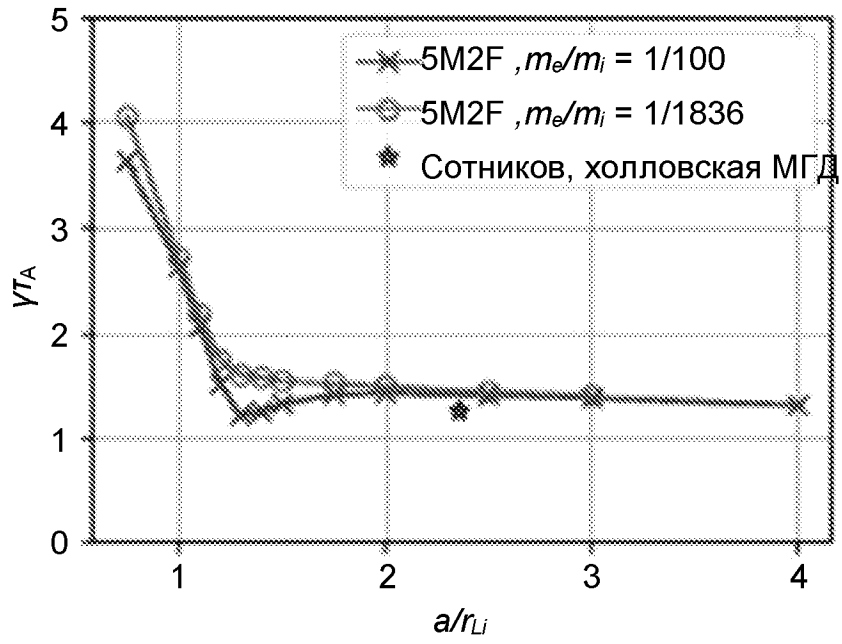
ФИГ. 11



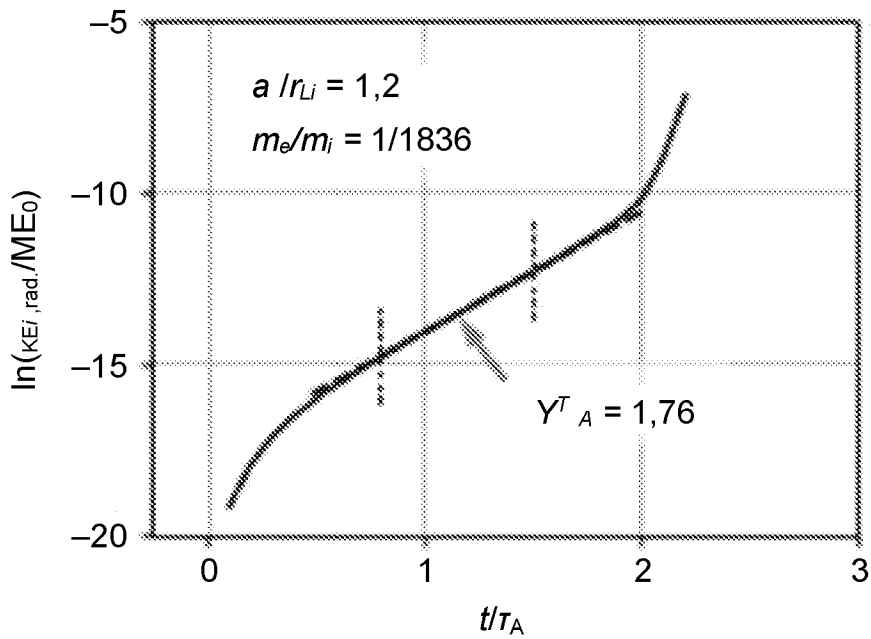
ФИГ. 12А



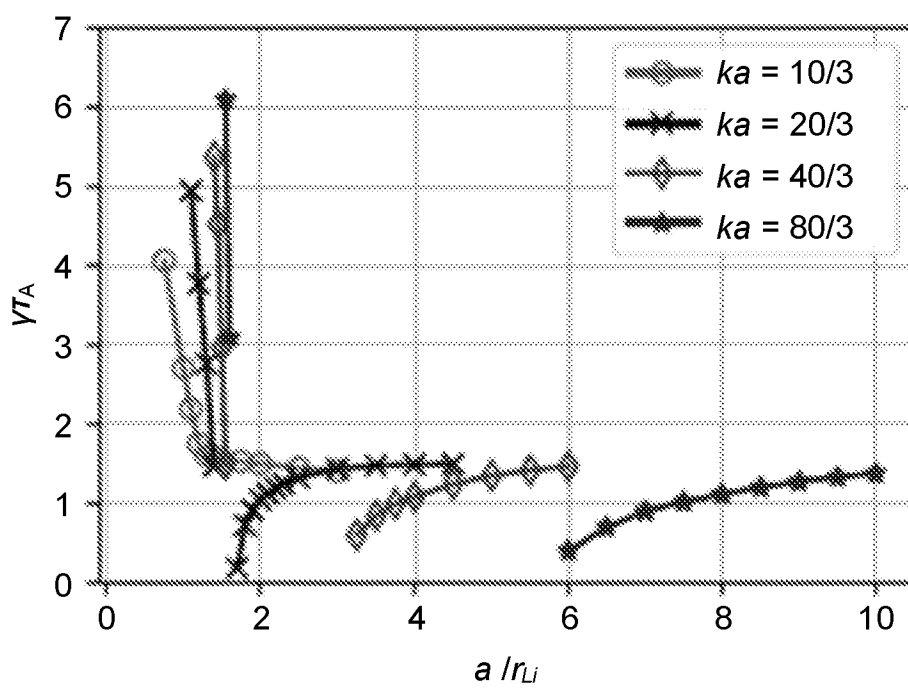
ФИГ. 12В



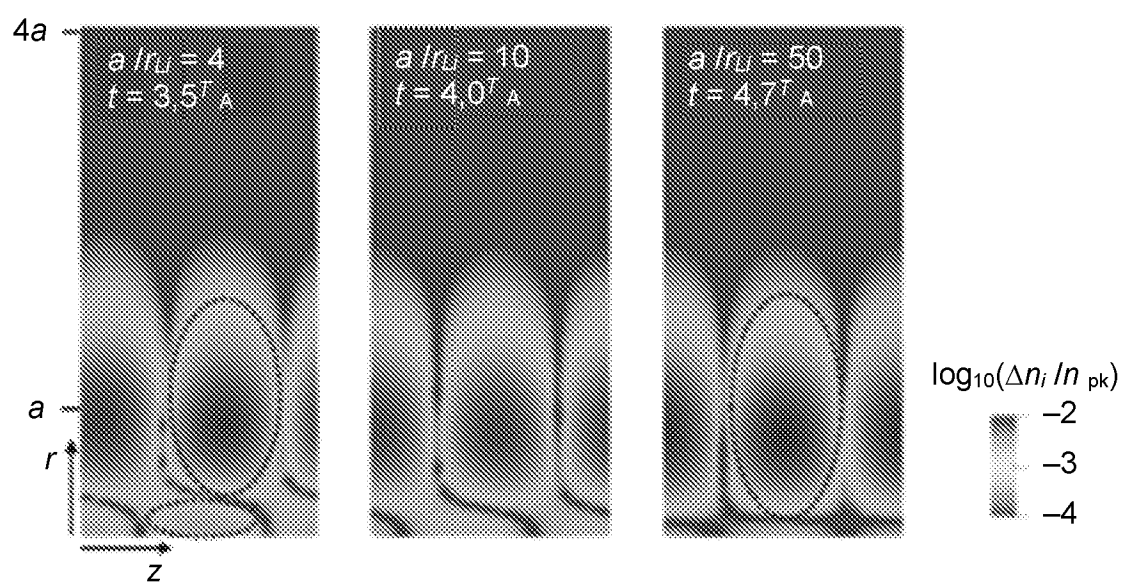
ФИГ. 13А

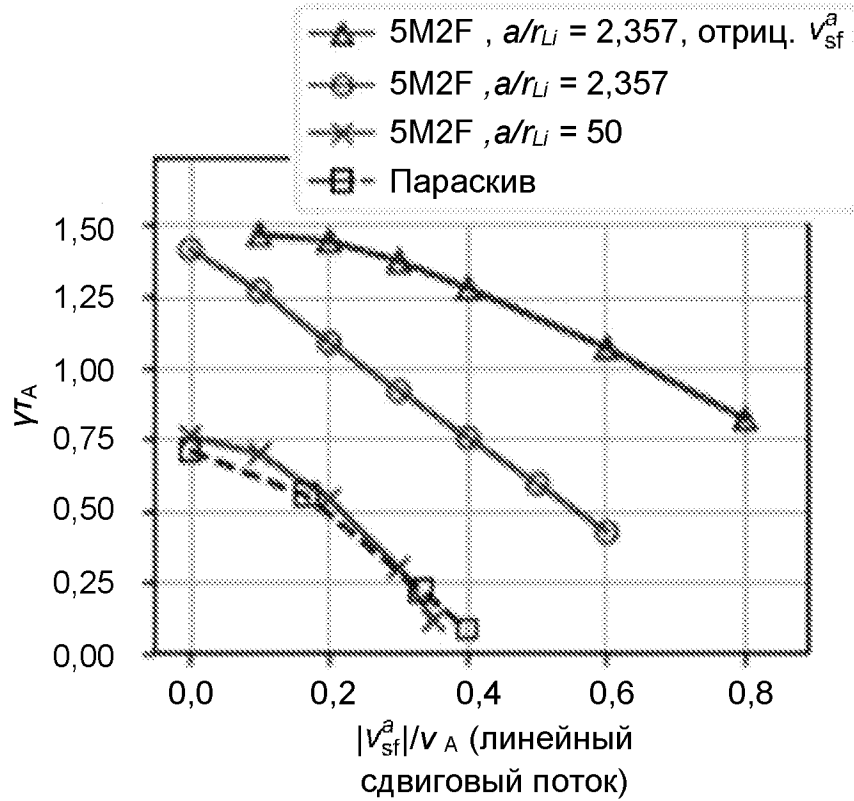


ФИГ. 13В

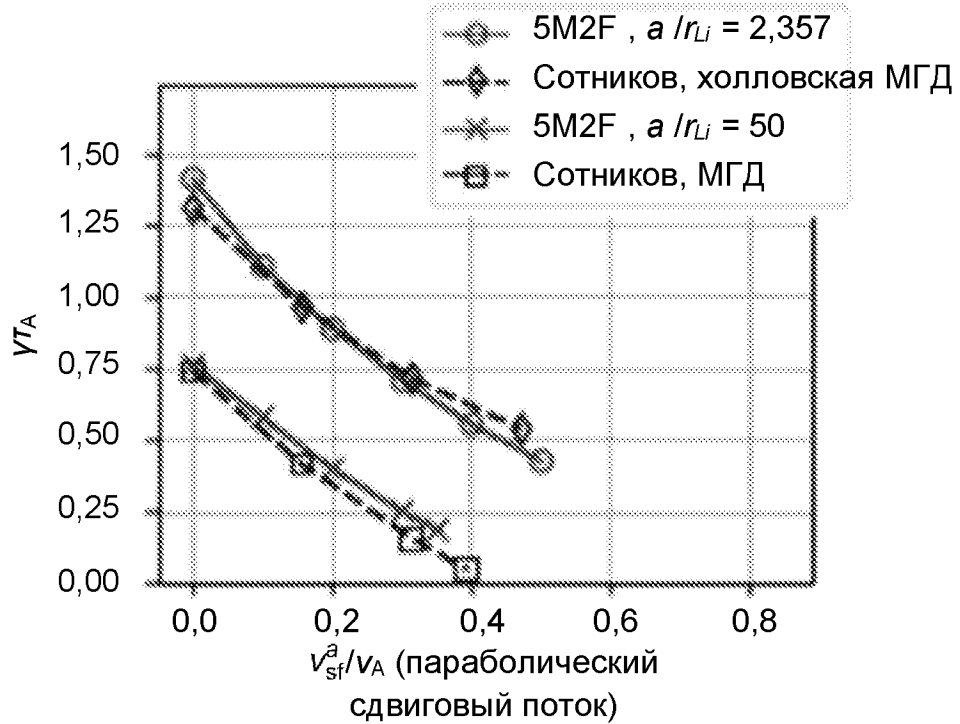


ФИГ. 14

**ФИГ. 15**

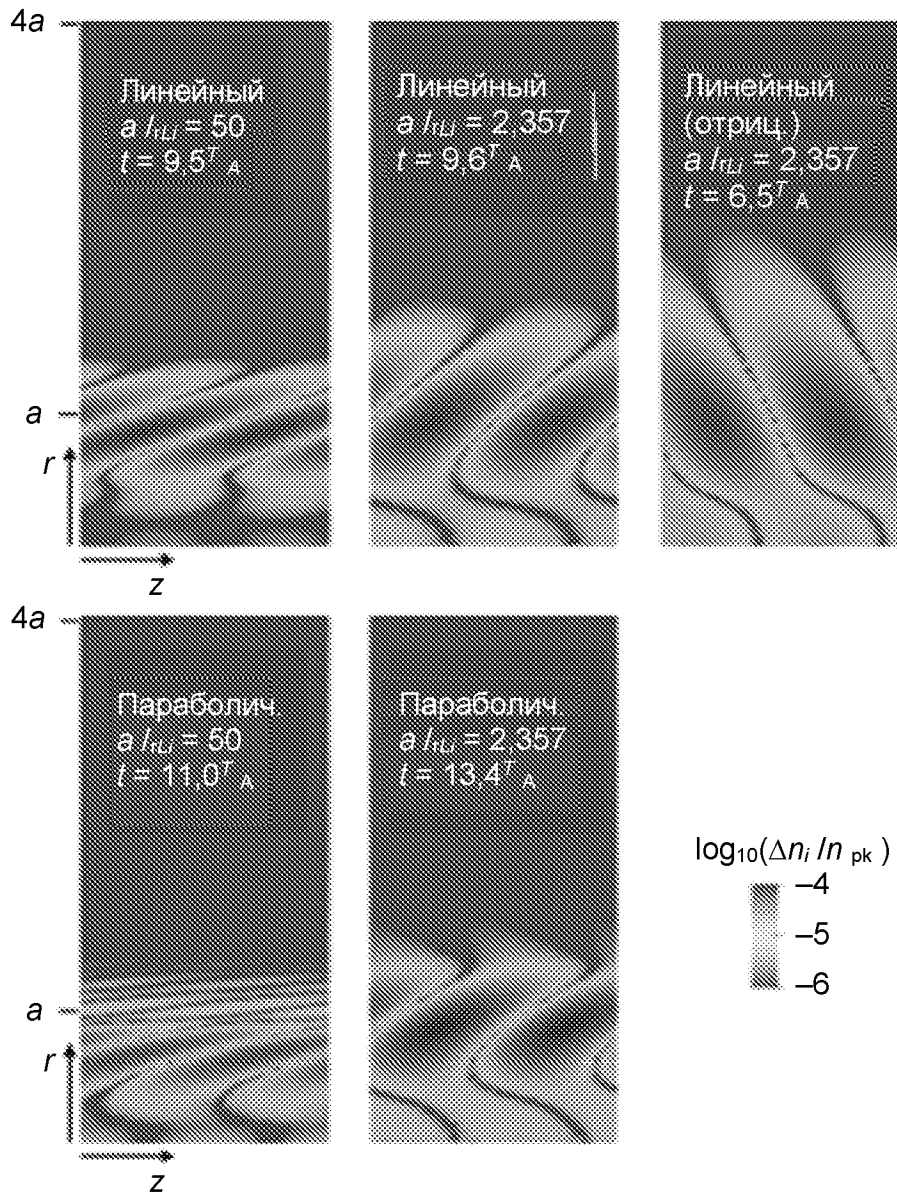


ФИГ. 16А

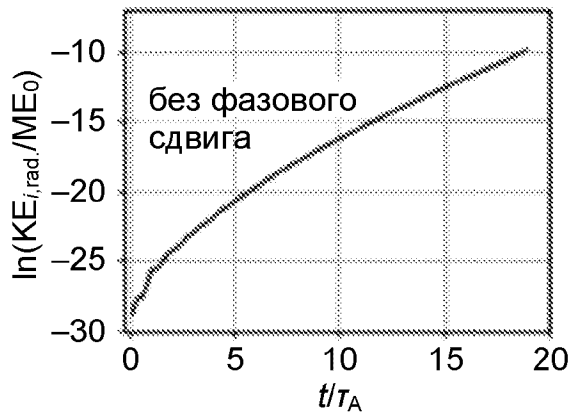


ФИГ. 16В

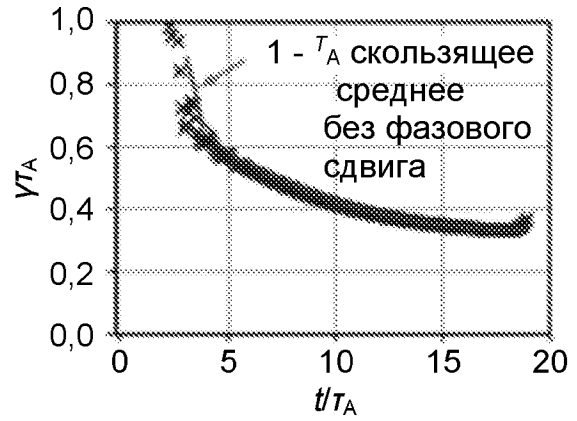




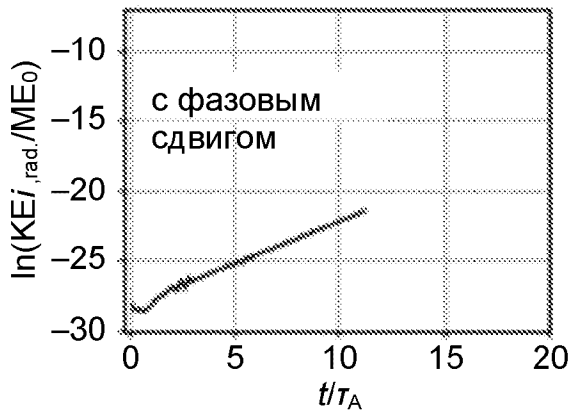
ФИГ. 17



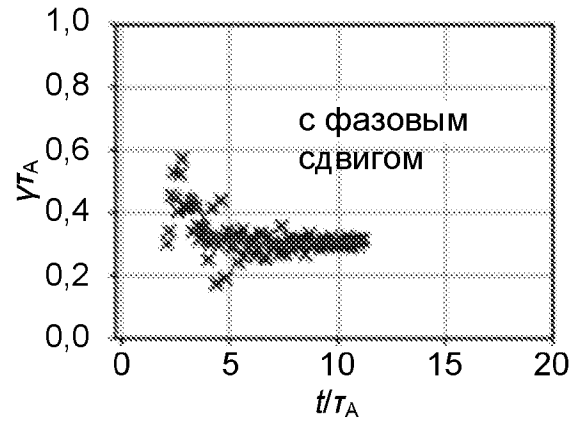
ФИГ. 18А



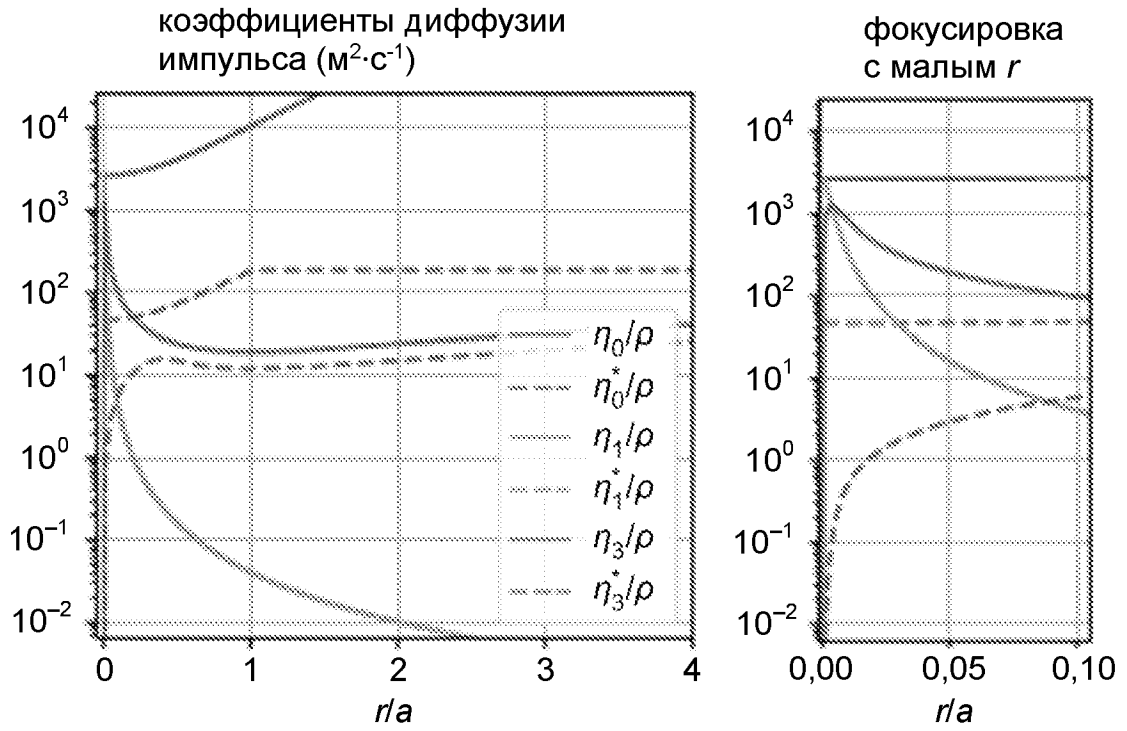
ФИГ. 18В



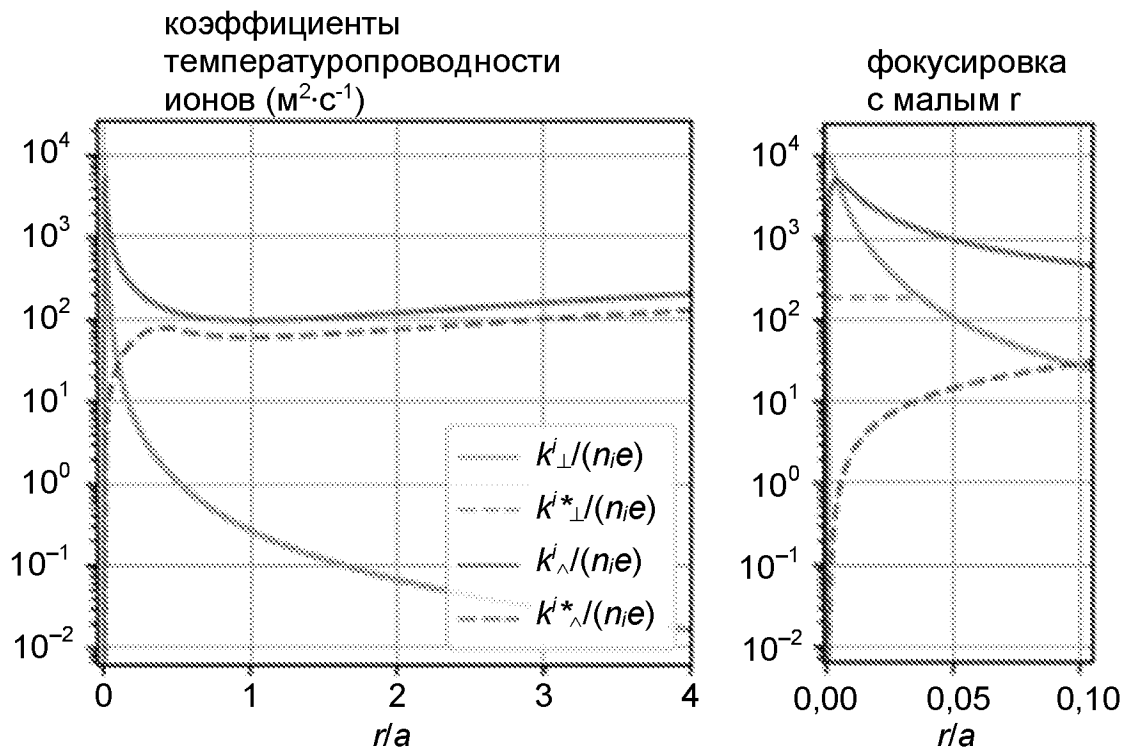
ФИГ. 18С



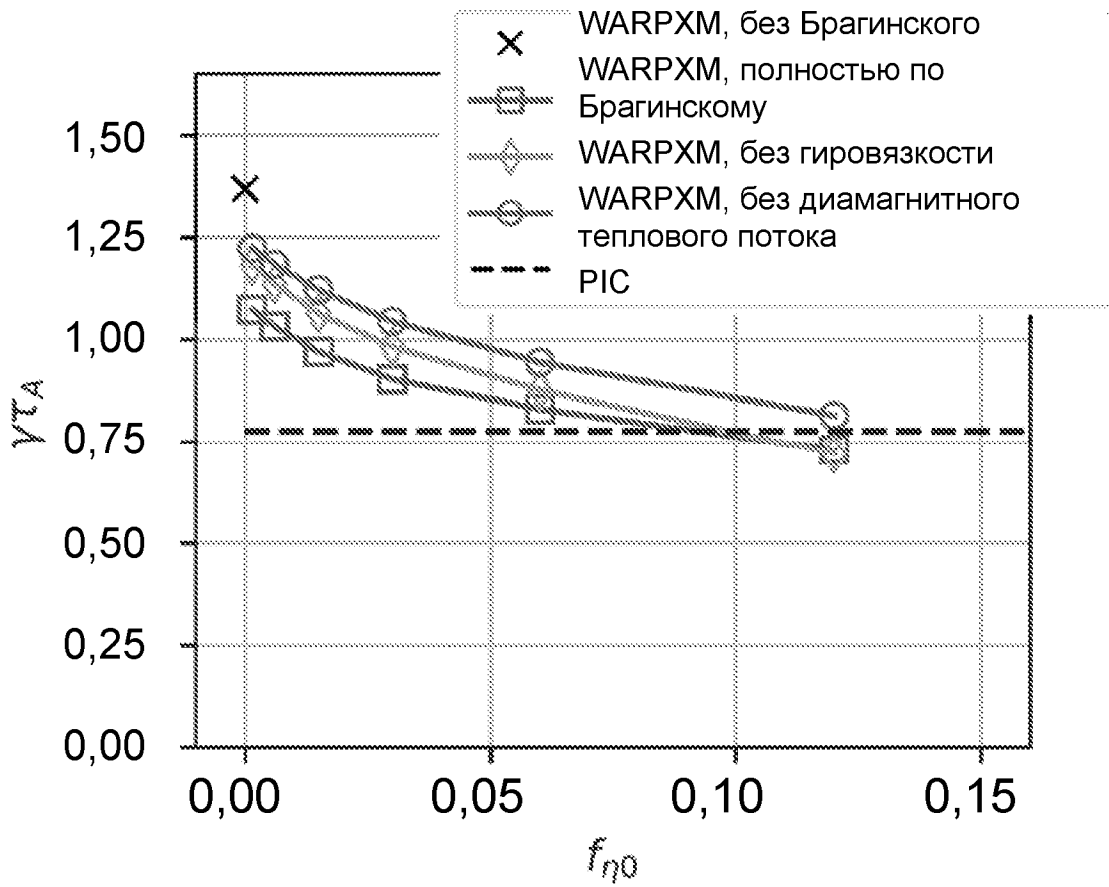
ФИГ. 18D



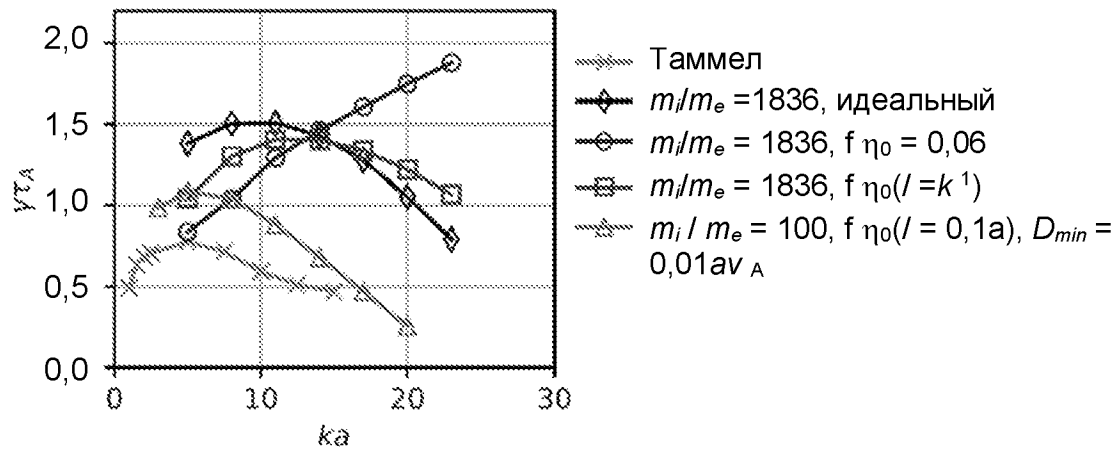
ФИГ. 19



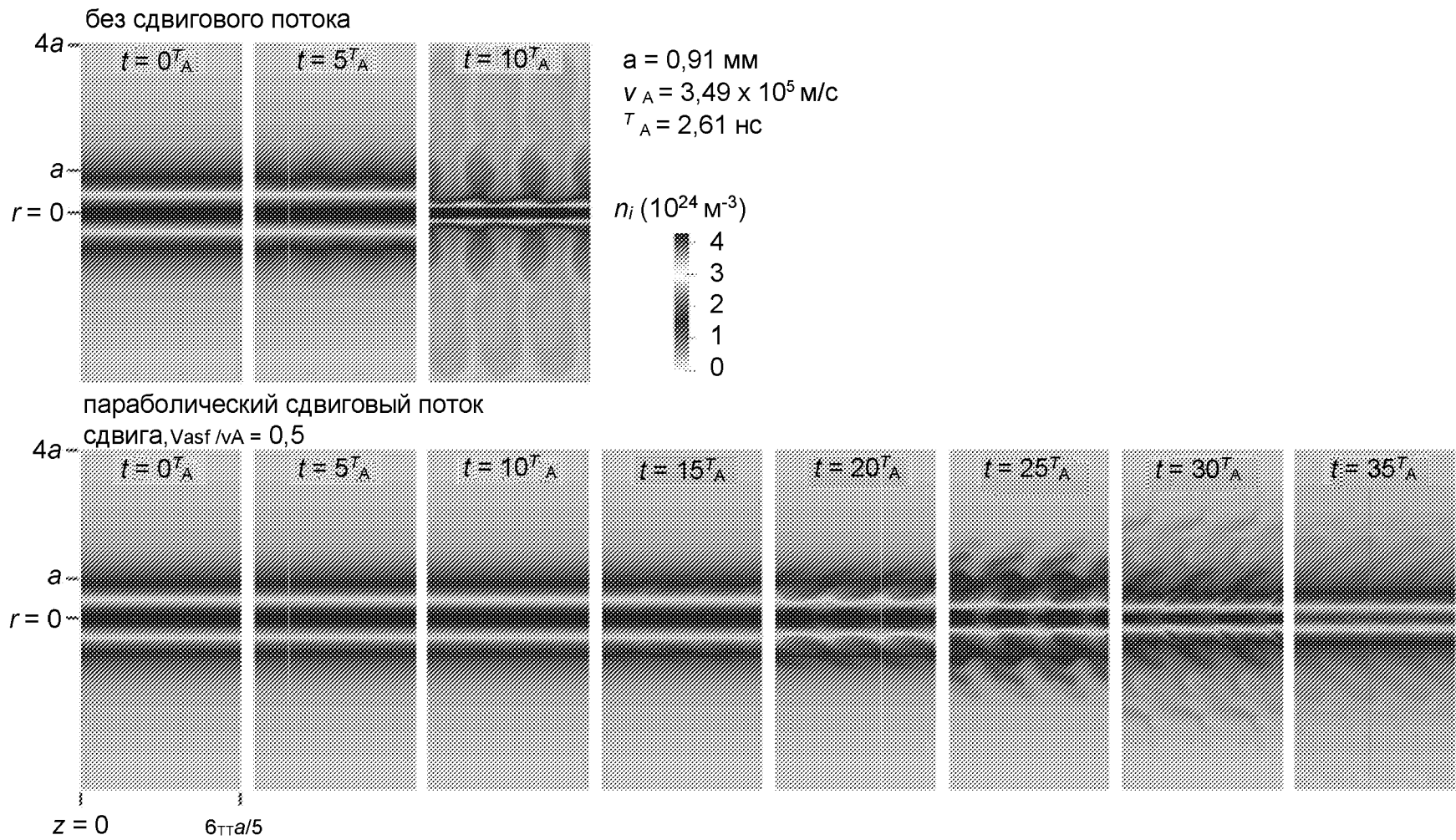
ФИГ. 20



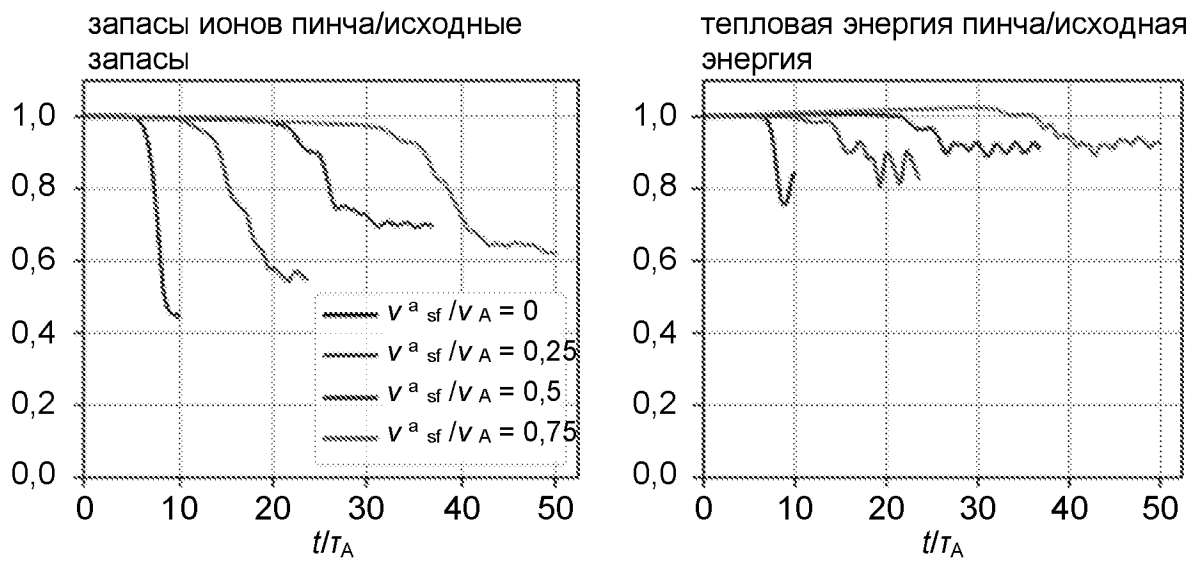
ФИГ. 21



ФИГ. 22



**ФИГ. 23**



ФИГ. 24