



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015108677, 29.08.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
29.08.2013

Дата регистрации:
07.11.2017

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
29.08.2012 US 61/694,550

(43) Дата публикации заявки: 20.10.2016 Бюл. № 29

(45) Опубликовано: 07.11.2017 Бюл. № 31

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 30.03.2015

(86) Заявка РСТ:
CA 2013/050670 (29.08.2013)

(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2014/032186 (06.03.2014)

Адрес для переписки:
119019, Москва, Гоголевский б-р, 11, этаж 3,
"Гоулингз Интернэшнл Инк.", Гизатуллина
Евгения Михайловна

(72) Автор(ы):

ЛАБЕРЖЕ Мишель Дж. (СА),
РЕЙНОЛЬДС Меритт (СА)

(73) Патентообладатель(и):

ДЖЕНЕРАЛ ФЬЮЖН ИНК. (СА)

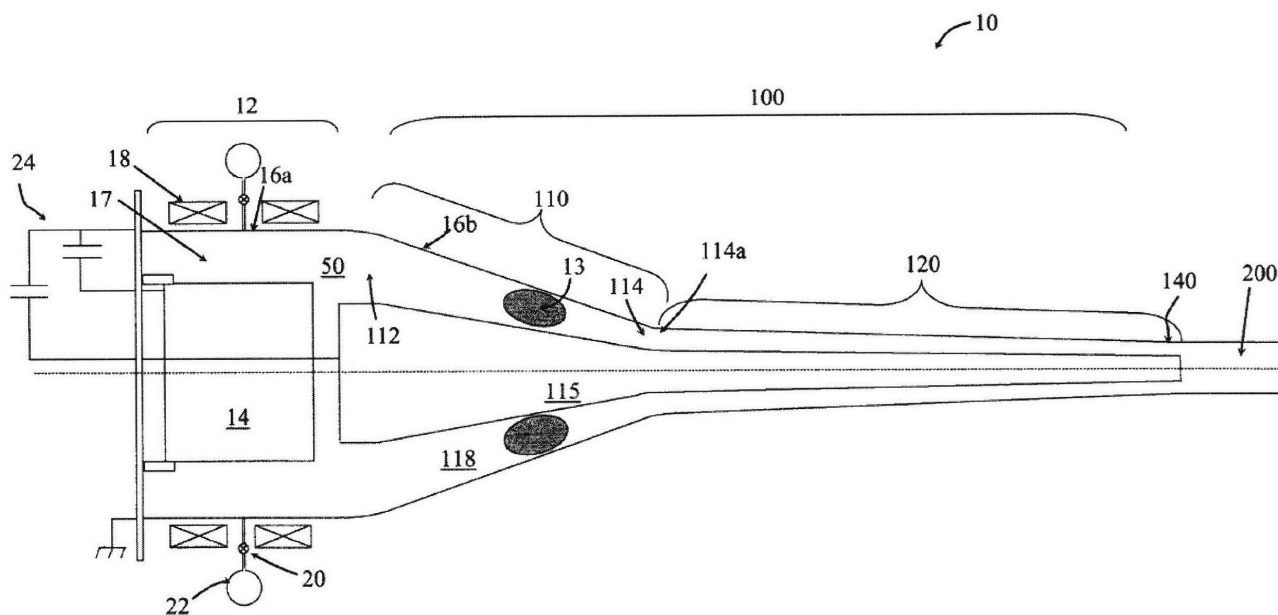
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 7679025 B1, 16.03.2010. US
2011026657 A1, 30.02.2011. US 2011026658 A1,
30.02.2011. US 2008251502 A1, 16.10.2008.

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ УСКОРЕНИЯ И СЖАТИЯ ПЛАЗМЫ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области плазменной техники. Устройство включает в себя ускоритель плазмы с воронкообразным участком высокой степени сжатия, отходящим от входа ускорителя, и вытянутым участком, соединенным с воронкообразным участком высокой степени сжатия, который может располагаться между концом воронкообразного участка и выходом ускорителя. Воронкообразный участок может иметь в продольном разрезе форму крутого конуса, тогда как вытянутый участок может обладать более пологой и плавной конусностью по всей своей длине в направлении выхода. Указанное устройство также включает в себя

источник питания для возбуждения импульса ускорения, генерирующего толкающий магнитный поток, который обеспечивает ускорение и сжатие тора плазмы по всей длине ускорителя. Импульс тока может иметь такую форму, чтобы его величина за тором плазмы на выходе вытянутого участка была значительно меньше величины импульса тока у первого конца вытянутого участка, а давление тора плазмы на выходе вытянутого участка превышало давление тора плазмы в начале вытянутого участка. Технический результат - расширение функциональных возможностей устройства. 2 н. и 11 з.п. ф-лы, 9 ил.



ФИГ. 2

RU 2634849 C2

RU 2634849 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2015108677, 29.08.2013**(24) Effective date for property rights:
29.08.2013Registration date:
07.11.2017

Priority:

(30) Convention priority:
29.08.2012 US 61/694,550(43) Application published: **20.10.2016** Bull. № **29**(45) Date of publication: **07.11.2017** Bull. № **31**(85) Commencement of national phase: **30.03.2015**(86) PCT application:
CA 2013/050670 (29.08.2013)(87) PCT publication:
WO 2014/032186 (06.03.2014)Mail address:
**119019, Moskva, Gogolevskij b-r, 11, etazh 3,
"Goulingz Interneshnl Ink.", Gizatullina Evgeniya
Mikhajlovna**

(72) Inventor(s):

**LABERGE Michel G. (CA),
REYNOLDS Meritt (CA)**

(73) Proprietor(s):

DZHENERAL FYUZHNI INK. (CA)(54) **DEVICE FOR PLASMA ACCELERATION AND COMPRESSION**

(57) Abstract:

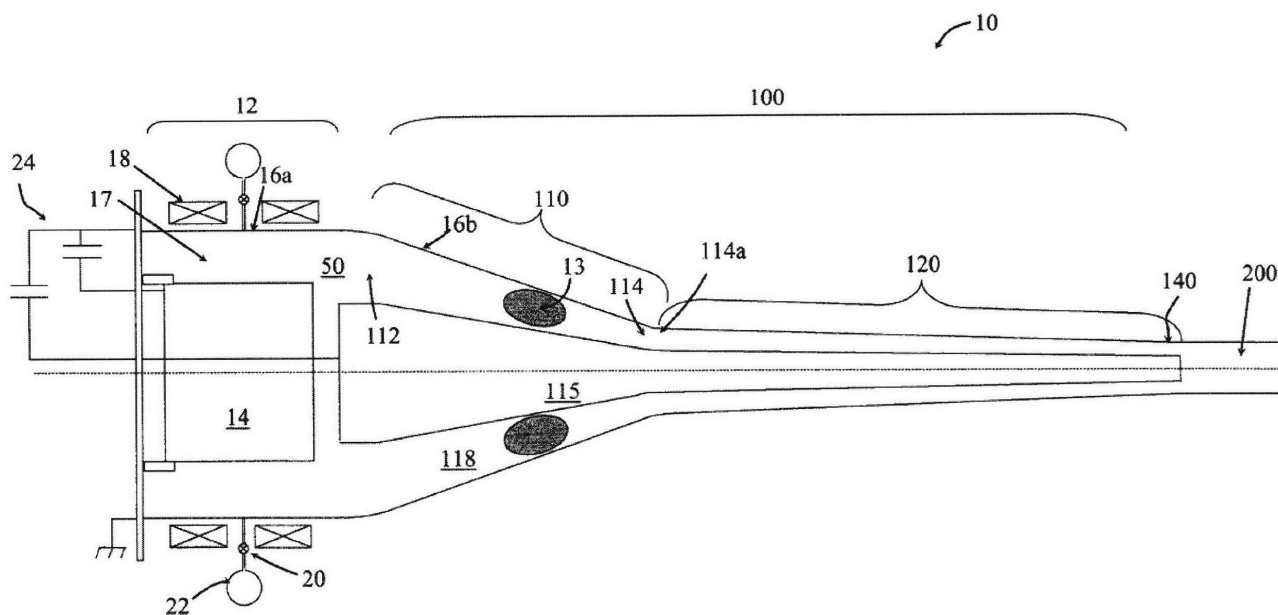
FIELD: machine engineering.

SUBSTANCE: device includes a plasma accelerator with a funnel-shaped portion of a high compression ratio extending from the accelerator input and an elongated portion connected to the funnel-shaped portion of a high compression ratio which can be located between the end of the funnel-shaped portion and the accelerator output. The funnel-shaped portion may have a steep taper shape in the longitudinal section, while the elongated portion may have a more flat and smooth taper angle along its entire length in the direction of the output. The device also includes a power source for driving an acceleration pulse generating a pushing

magnetic flux which accelerates and compresses the plasma torus over the entire length of the accelerator. The current pulse can be shaped so that its size behind the plasma torus at the output of the elongated portion is significantly smaller than the current pulse size at the first end of the elongated portion, and the pressure of the plasma torus at the output of the elongated portion exceeds the pressure of the plasma torus at the beginning of the elongated portion.

EFFECT: expanded operating capabilities of the device.

13 cl, 9 dwg



ФИГ. 2

RU 2 6 3 4 8 4 9 C 2

RU 2 6 3 4 8 4 9 C 2

Ссылка на родственную заявку

По настоящей заявке испрашивается приоритет согласно 35 U.S.C. §119(e) в соответствии с предварительной заявкой на выдачу патента США №61/694550 под названием «Высокопроизводительный ускоритель плазмы», поданной 29 августа 2012 года, содержание которой полностью включено в настоящий документ посредством ссылки.

Область техники, к которой относится настоящее изобретение

Изобретение относится к способу и системе ускорения и сжатия плазмы, в частности к высокопроизводительному ускорителю плазмы и способу ускорения плазмы.

Предшествующий уровень техники настоящего изобретения

Плазма представляет собой агрегатное состояние вещества, аналогичное газу, в котором, по меньшей мере, часть частиц ионизирована. Наличие заряженных частиц (например, положительных ионов и отрицательных электронов) делает плазму токопроводящей средой. Тором плазмы называется самоподдерживающаяся намагниченная плазма тороидальной конфигурации со связанными полоидальными и тороидальными (в некоторых случаях) замкнутыми магнитными потоками. Степень связанности полоидальных и тороидальных магнитных потоков определяет спиральность тора плазмы. Тор плазмы, содержащийся в односвязном объеме, называется компактным тороидом (КТ). Могут быть предусмотрены, например, следующие варианты конфигурации КТ: (i) конфигурация «сферомак», которая сохраняется при относительно устойчивом магнитогидродинамическом равновесии, с внутренним магнитным полем, имеющим как тороидальные, так и полоидальные компоненты; или (ii) обращенная магнитная конфигурация (FRC), которая также характеризуется тороидальной магнитной топологией, но с большим удлинением в осевом направлении и наружной поверхностью, напоминающей вытянутый эллипсоид, и преимущественно полоидальным магнитным полем. Плазма КТ может быть образована в диапазоне магнитных конфигураций, в том числе тех, которые сохраняются в состояниях, занимающих промежуточное положение между сферомаксом и FRC. Первоначальный тор плазмы может также видоизменяться и менять свою магнитную конфигурацию в динамике по времени.

Краткое раскрытие настоящего изобретения

Согласно одному из аспектов настоящего изобретения предложено устройство для ускорения и сжатия плазмы. Указанное устройство включает в себя ускоритель плазмы для ускорения и сжатия тора плазмы и источник питания, который подает в ускоритель электрический импульс ускорения, создающий ток, который протекает в ускорителе и генерирует магнитный толкающий поток за тором плазмы, достаточный для того, чтобы обеспечить ускорение и сжатие тора плазмы по всему ускорителю.

Ускоритель характеризуется наличием внешнего трубчатого электрода и внутреннего трубчатого электрода, расположенного внутри внешнего электрода; при этом внешний и внутренний электроды задают кольцевой канал распространения плазмы для ускорения и сжатия в нем тора плазмы. Канал распространения плазмы характеризуется наличием входного конца для приема тора плазмы из генератора плазмы и выходного конца для вывода тора плазмы, ускоренного и сжатого в кольцевом канале.

Канал распространения плазмы содержит продольно вытянутый участок с передним по ходу концом, сообщаемым по текучей среде с входом, и с задним по ходу концом, сообщаемым по текучей среде с выходом. Поперечный кольцевой зазор, определяемый как радиальное расстояние между внутренним и внешним электродами, уменьшается нелинейно в направлении движения вдоль вытянутого участка. Устройство

выполнено таким образом, чтобы перед вытянутым участком была обеспечена достаточная индуктивность для ускорения и сжатия тора плазмы по всей длине вытянутого участка за счет расширения магнитного толкающего потока. Размеры канала распространения плазмы подобраны так, чтобы для обеспечения выбранной индуктивности вытянутого участка и выбранной индуктивности перед вытянутым участком ток в заднем по ходу конце вытянутого участка был меньше тока на переднем по ходу конце вытянутого участка, а давление тора плазмы на заднем по ходу конце вытянутого участка превышало давление тора плазмы на переднем по ходу конце вытянутого участка. Вытянутый участок выполнен с возможностью обеспечивать коэффициент сжатия тора плазмы в радиальном направлении в пределах между 1 и 2.

Канал распространения плазмы может также содержать воронкообразный участок, обеспечивающий высокую степень сжатия, который расположен между входом и передним по ходу концом вытянутого участка. Воронкообразный участок содержит передний по ходу конец, сообщающийся по текучей среде с входом, и задний по ходу конец, сообщающийся по текучей среде с выходом вытянутого участка. Поперечный кольцевой зазор в воронке, определяемый как радиальное расстояние между внутренним и внешним электродами, уменьшается в направлении движения вдоль воронкообразного участка. Кроме того, воронкообразный участок может быть выполнен с возможностью обеспечивать коэффициент сжатия в радиальном направлении в пределах между 3 и 10.

Вытянутый участок может характеризоваться постоянным соотношением между радиусом внешнего электрода и радиусом внутреннего электрода. Радиус $r(z)$ одного из электродов (внешнего или внутреннего) в продольном положении z вытянутого участка может быть определен следующим уравнением:

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1 + c(z - z_0)}$$

где z_0 обозначает продольное положение вытянутого участка на переднем по ходу конце; c обозначает соотношение между индуктивностью L' на единицу длины вытянутого участка и индуктивностью L_0 перед вытянутым участком; a и b представляют собой постоянные величины, определяемые следующим образом:

$$a = b + 1/r_0$$

где r_0 обозначает радиус внутреннего или внешнего электрода на переднем по ходу конце; и

$$b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1 + c(z_1 - z_0)}}$$

где r_1 и z_1 обозначают, соответственно, радиус внутреннего или внешнего электрода и продольное положение вытянутого участка на заднем по ходу конце.

В альтернативном варианте радиусы внутреннего и внешнего электродов не находятся в постоянном соотношении друг с другом. В таких случаях радиус $r(z)$ каждого из электродов (внутреннего и внешнего) в продольном положении z вытянутого участка определяется отдельно следующей формулой:

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1 + c(z - z_0)}$$

где z_0 обозначает продольное положение вытянутого участка на переднем по ходу конце; c обозначает соотношение между индуктивностью L' на единицу длины вытянутого участка и индуктивностью L_0 перед вытянутым участком; a и b представляют собой постоянные величины, определяемые следующим образом:

$$a = b + 1/\Gamma_0$$

где Γ_0 обозначает радиус внутреннего или внешнего электрода на переднем по ходу конце; и

$$b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1 + c(z_1 - z_0)}}$$

где r_1 и z_1 обозначают, соответственно, радиус внутреннего или внешнего электрода и продольное положение вытянутого участка на заднем по ходу конце.

Источник питания может быть выполнен с возможностью генерирования электрических импульсов ускорения, подача которых прекращается после вхождения тора плазмы внутрь вытянутого участка. Источник питания может быть также выполнен с возможностью генерирования электрических импульсов ускорения с периодом повторения, продолжительностью и амплитудой тока, обеспечивающих постоянный толкающий поток при перемещении тора плазмы вдоль вытянутого участка.

Согласно другому аспекту настоящего изобретения предложена система, включающая в себя устройство для ускорения и сжатия плазмы, описанное выше; и генератор плазмы, включающий в себя трубчатый внешний электрод и трубчатый внутренний электрод, расположенный внутри внешнего электрода, между которыми проходит кольцевой плазмообразующий канал. Внешний электрод ускорителя физически соединен с внешним электродом генератора плазмы, а кольцевой плазмообразующий канал смыкается с кольцевым каналом распространения плазмы по одной линии и сообщается с ним по текучей среде. Система может также включать в себя область релаксации тора плазмы, заданную внутренней стенкой внешнего электрода и пространством между передним по ходу концом внутреннего электрода ускорителя и задним по ходу концом внутреннего электрода генератора плазмы. Область релаксации сообщается по текучей среде с плазмообразующим каналом и каналом распространения плазмы. Область релаксации может включать в себя зону расширения внутрь, образованную на переднем по ходу конце внутреннего электрода ускорителя. В альтернативном варианте область релаксации может включать в себя зону расширения наружу, образованную у переднего по ходу конца ускорителя на внешнем электроде.

Краткое описание чертежей

Размеры и относительное положение элементов на чертежах не обязательно вычерчены в масштабе. Например, в масштабе не вычерчены формы различных элементов и углы, а некоторые из этих элементов произвольно увеличены и перемещены в целях улучшения удобочитаемости чертежей.

На фиг. 1А (предшествующий уровень техники) представлены графики смоделированных вариантов реализации известной системы ускорения и сжатия плазмы,

характеризующейся наличием канала распространения плазмы в форме равномерного конуса. На верхнем графике показана геометрия (отношение радиуса к осевой длине) кольцевого продольного канала распространения плазмы ускорителя; при этом верхняя кривая отображает геометрию внешнего электрода, а нижняя кривая - геометрию
 5 внутреннего электрода. На нижнем графике представлена кривая уравнивающего тока I_{bal} (сплошная линия) и кривая порогового тока I_{lift} (штрихпунктирная линия) по длине канала распространения плазмы в ускорителе.

На фиг. 1В (предшествующий уровень техники) представлен график зависимости толкающего тока (в мегамперах, МА) от величины λ (наинизшего энергетического
 10 состояния) тора плазмы по длине кольцевого канала ускорителя по фиг. 1А; при этом сплошной линией обозначен уравнивающий ток, а штрихпунктирной линией - пороговый ток.

На фиг. 2 представлено схематическое изображение в продольном разрезе одного из вариантов реализации системы ускорения и сжатия плазмы, не носящего
 15 ограничительного характера, которая включает в себя источник питания, генератор плазмы и ускоритель с кольцевым каналом распространения плазмы, содержащим вытянутый участок с нелинейным сужающимся кольцевым зазором и областью релаксации с зоной расширения внутрь.

На фиг. 3А представлены типовые кривые напряжения (в кВ), подаваемого
 20 источником питания на генератор и ускоритель плазмы по фиг. 2; при этом сплошной линией обозначено напряжение плазмообразующего импульса, поданного в плазмообразующую область генератора плазмы, а пунктирной линией обозначена зависимость напряжения импульса ускорения, поданного в ускоритель, от времени (в мкс).

На фиг. 3В показаны кривые тока (в МА), подаваемого на генератор плазмы
 25 (сплошная линия) и ускоритель (пунктирная линия) по фиг. 3А.

На фиг. 4А представлено схематическое изображение в продольном разрезе одного из приемлемых вариантов геометрии канала распространения плазмы в ускорителе по
 30 фиг. 2.

На фиг. 4В представлены кривые зависимости порогового тока, уравнивающего
 тока и рабочего тока от продольно-осевого положения в ускорителе по фиг. 4А; при этом сплошной линией обозначен уравнивающий ток I_{bal} , штрихпунктирной линией обозначен пороговый ток I_{lift} , а пунктирной линией обозначен рабочий ток.

На фиг. 5 представлены кривые зависимости порогового тока, уравнивающего
 35 тока и рабочего тока от величины λ (наинизшего энергетического состояния) тора плазмы в ускорителе по фиг. 4А; при этом сплошной линией обозначен уравнивающий ток, штрихпунктирной линией обозначен пороговый ток, а пунктирной линией обозначен рабочий ток.

На фиг. 6А представлено изображение в продольном разрезе контуров
 40 смоделированного полоидального потока при $t=62$ мкс в ускорителе по фиг. 4А.

На фиг. 6В представлено изображение в продольном разрезе контуров смоделированного полоидального потока при $t=70$ мкс в ускорителе по фиг. 4А.

На фиг. 7 представлено изображение в продольном разрезе контуров смоделированного полоидального потока в ускорителе с геометрическим профилем
 45 согласно другому варианту осуществления настоящего изобретения.

На фиг. 8 представлено схематическое изображение в продольном разрезе другого варианта реализации системы ускорения и сжатия плазмы, не носящего ограничительный

характер, которая включает в себя источник питания, генератор плазмы и ускоритель с кольцевым каналом распространения плазмы, содержащим вытянутый участок с нелинейным сужающимся кольцевым зазором без области релаксации.

На фиг. 9А представлено изображение в продольном разрезе контуров полоидального потока при $t=35$ мкс во время смоделированной работы ускорителя по фиг. 8.

На фиг. 9В представлены типовые кривые напряжения (в кВ) и тока (в МА), подаваемого источником питания на генератор и ускоритель плазмы по фиг. 8; при этом сплошной линией обозначено напряжение (верхний график) и ток (нижний график) плазмообразующего импульса, поданного в плазмообразующую область генератора плазмы, а пунктирной линией обозначена зависимость напряжения (верхний график) и тока (нижний график) импульса ускорения, поданного в ускоритель, от времени (в мкс).

Подробное раскрытие настоящего изобретения

Одним из примеров известной системы ускорения и сжатия плазмы служит двухступенчатый коаксиальный инжектор намагниченной плазмы. На первой стадии может быть сформирован тор плазмы путем разрядки конденсаторной батареи на паре коаксиальных электродов; при этом радиальное магнитное поле обеспечивает первоначальное намагничивание плазмы. На второй стадии конденсаторная батарея разряжается в конусный коаксиальный ускоритель с тором плазмы в качестве обкладки; при этом ускоритель характеризуется наличием пары коаксиально отцентрированных трубчатых электродов (внешнего и внутреннего), которые задают кольцевой канал в форме равномерного конуса, т.е. указанный канал имеет кольцевой зазор (расстояние между радиусами внутреннего и внешнего электродов), линейно сужающийся по длине канала. Ток J взаимодействует с магнитным полем B , сгенерированным током, и сила действия магнитного поля (сила Лоренца) $J \times B$ ускоряет и сжимает тор плазмы по мере его прохождения по кольцевому каналу ускорения.

Другим примером известной системы ускорения и сжатия плазмы служит система RACE (экспериментальный кольцевой ускоритель, разработанный в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса), в которой использована геометрия инжектора плазмы, где за коаксиальной цилиндрической областью ускорения большой длины с постоянным кольцевым зазором (в которой не происходит сжатие) расположен суживающийся фокусирующий участок в форме равномерного конуса, в котором осуществляется сжатие плазмы. В большинстве сфер применения устройств этого класса конечная кинематическая энергия тора плазмы быстро преобразуется в импульс излучения по мере торможения тора плазмы в области завершающего динамического воздействия.

Еще одним примером известной системы ускорения и сжатия плазмы служит система MARAUDER (магнитно-ускоренные кольца для получения сверхвысокой направленной энергии и излучения, разработанные в лаборатории BBC США им. Филиппа, г. Альбукерке, штат Нью-Мексико). Устройство MARAUDER включает в себя конус предварительного сжатия с постоянной конусностью, за которым расположен ускоритель с постоянным зазором большой длины.

В определенных системах, где плазма может быть ускорена и одновременно сжата с использованием коаксиального ускорителя с кольцевым каналом, характеризующимся постоянной конусностью, импульс ускорения, подаваемый в ускоритель источником питания, должен обеспечивать возможность создания толкающего тока в ускорителе, который возрастает вдоль канала и достигает максимального значения, когда тор плазмы достигает заднего по ходу конца ускорителя плазмы, поскольку для

проталкивания тора плазмы через линейно сужающийся кольцевой зазор канала и его сжатия в этом зазоре толкающий ток должен преодолеть возрастающее магнитное давление тора (противодействующую силу). После выхода тора плазмы из ускорителя и его попадания в камеру сохранения потока (например, в камеру мишени) значительная часть тока может остаться в ускорителе в качестве блуждающего тока. Эксперименты с определенными прототипами ускорителя плазмы, которые разрабатываются компанией General Fusion, Inc. (Бернаби, Канада), показали, что этот блуждающий ток может влиять на жизненный цикл тора плазмы в камере мишени. Некоторая доля этого блуждающего тока может протекать по открытым силовым линиям, которые проходят через центр тора плазмы. Приток магнитной энергии из ускорителя в камеру мишени обычно сопровождается притоком относительно холодных частиц плазмы, которые охлаждают относительно горячие частицы плазмы. Динамика этого взаимодействия между током и тором плазмы была описана Р.К. Даком (R.C. Duck) с соавторами в работе { .Structure of the n=1 mode responsible for relaxation and current drive during sustainment of the SPHEX spheromak», журнал Plasma Physics and Controlled Fusion, том 39, с. 715-736, май 1997 года.

Эксперименты, проведенные компанией General Fusion Inc., также показали, что устранение магнитного толкающего потока после его введения в ускоритель плазмы в некоторых случаях может оказаться непростой задачей. Известно, что приложенное напряжение отражает скорость изменения полного магнитного потока в ускорителе; однако приложение напряжения обратной полярности не меняет направление потока на обратное, а отрицательная намагниченность - как было замечено - не сразу устраняет положительную намагниченность. Вместо этого внутри плазмы может возникнуть слой тока, что приведет к образованию разделенных между собой областей положительной и отрицательной намагниченности. В итоге результирующий поток будет уменьшен; однако толкающий ток фактически возрастет.

Соответственно, желательно создать такую систему и/или способ управления системой, чтобы было обеспечено сжатие и ускорение тора плазмы вне ускорителя с уменьшенной величиной толкающего тока на выходном конце ускорителя; в частности, толкающий ток на выходном конце должен быть меньше толкающего тока на входном конце ускорителя.

Перед описанием конкретных вариантов реализации таких усовершенствованных систем и/или способов целесообразно рассмотреть следующие принципы, определяющие сжатие и ускорение тора плазмы. Упрощенная модель сжатия в ускорителе основана на приближении, что динамические характеристики энергии тора плазмы схожи с динамическими характеристиками тейлоровского состояния. Тейлоровское состояние представляет собой конфигурацию плазмы, не испытывающую воздействия внешних сил, которая описывается следующим образом:

$$\nabla \times \underline{B} = \lambda \underline{B} \quad (1)$$

где $\underline{B}$ - магнитное поле тора плазмы, а λ - характеристическое число, которое описывает тор плазмы в его наименьшем энергетическом состоянии. В случае ускорения тора плазмы в коаксиальной рельсовой пушке величина λ зависит от продольного положения z тора плазмы в канале распространения плазмы рельсовой пушки.

Энергия $\underline{U}$ тейлоровского состояния выражается следующим образом:

$$U = \frac{K\lambda}{2\mu_0} \quad (2)$$

где μ_0 - магнитная проницаемость вакуума ($4\pi \times 10^{-7}$ Н/А²), а К - магнитная спиральность тора плазмы, где К определяется следующей формулой:

$$K \equiv \int dV \underline{A} \cdot \underline{B} \quad (3)$$

где $\underline{A}$ - магнитный векторный потенциал, который является функцией положения тора плазмы, а V - объем тора плазмы.

Из тейлоровского состояния можно предположить, что энергия тора плазмы пропорциональна величине λ для тора плазмы в положении z:

$$U \propto \lambda(z) \quad (4)$$

где $\lambda = \frac{\pi}{\Delta r(z)}$, а спиральность тора плазмы является сохраняющейся величиной.

Для коаксиального ускорителя с кольцевым каналом распространения плазмы, заданным парой коаксиально отцентрированных трубчатых электродов, т.е. внешним электродом с внешним радиусом r_{outer} и внутренним электродом с внутренним радиусом r_{inner} , изменение кольцевого зазора Δr в кольцевом канале распространения плазмы в зависимости от осевого положения z в канале распространения плазмы определяется как $\Delta r(z) = r_{outer} - r_{inner}$. Сила, которая уравнивает тор плазмы в заданном продольно-осевом положении в канале распространения плазмы, пропорциональна величине $d\lambda/dz$, где $\lambda(z)$ - характеристическое число, которое описывает тор плазмы в момент его нахождения в продольно-осевом положении z в канале.

Когда источник питания, электрически связанный с ускорителем, подает в ускоритель электрический импульс, это приводит к тому, что толкающий ток проходит по электродам ускорителя, в частности, по одному из электродов, по кольцевому зазору через тор плазмы, по другому электроду и обратно в источник питания. Прикладываемая толкающая сила (F_{push}), необходимая для проталкивания тора плазмы к выходу ускорителя, может быть определена путем суммирования магнитного давления от толкающего тока на задней стороне (стороне впуска) тора плазмы, и может быть выражена следующим уравнением:

$$F_{push} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL(z)}{dz} \quad (5)$$

где I - толкающий ток (сзади тора плазмы), а L(z) - индуктивность контура толкающего тока (токового пути вдоль электродов и на зазоре), когда тор плазмы находится в продольном положении z в канале. Следовательно, для коаксиального ускорителя с внешним радиусом r_{outer} и внутренним радиусом r_{inner} , которые при наличии конусности зависят от положения z тора плазмы, индуктивность в расчете на единицу длины $L' = dL(z)/dz$ канала может быть описана следующим образом:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{outer}}{r_{inner}} \quad (6)$$

«Конусность» относится к коаксиальному ускорителю с кольцевым каналом распространения плазмы с кольцевым зазором, который сужается в направлении

движения тора плазмы по каналу. Для кольцевого канала распространения плазмы с постоянным отношением внешнего радиуса r_{outer} к внутреннему радиусу r_{inner} индуктивность L' на единицу длины является постоянной величиной.

Для стимулирования проталкивания тора плазмы толкающая сила должна преодолевать воздействие на тор плазмы противоположно направленной силы, которая обусловлена сходящими на конус стенками канала распространения плазмы в ускорителе. Величину противоположно направленной силы можно вывести из принципа виртуальных перемещений, определяемого следующим образом:

$$F_{wall}(z) = -\frac{dU(z)}{dz} \quad (7)$$

Противоположно направленная сила $F_{wall}(Z)$ пропорциональна величине $d\lambda/dz$, исходя

из того допущения, что энергия тора плазмы выражена как $U = \frac{K\lambda}{2\mu_0}$, где K является постоянной величиной.

Уравнительный ток I_{bal} определяется как ток в ускорителе, который создает толкающую силу, равную противоположно направленной силе F_{wall} , в результате чего равнодействующая сила равна нулю ($F_{push} + F_{wall} = 0$). Уравнительный ток определяется следующим уравнением:

$$I_{bal}(z) = \frac{1}{\mu_0} \sqrt{\frac{2\pi K}{\ln\left(\frac{r_{outer}}{r_{inner}}\right)} \frac{d\lambda}{dz}} \quad (8)$$

Таким образом, для ускорения перемещения тора плазмы по каналу распространения плазмы в направлении выхода ускорителя приложенный ток, обусловленный импульсом ускорения, должен превышать уравнительный ток ($I > I_{bal}$).

Кроме того, источник питания может быть выполнен с параметрами, обеспечивающими генерирование импульса ускорения, который уменьшает вероятность возникновения эффекта «просачивания» в канале распространения плазмы или исключает такую возможность. Просачивание может произойти, когда магнитное давление толкающего тока снимает тор плазмы с внутреннего электрода, в результате чего происходит расширение потока перед тором плазмы. Этот эффект называется «статическим просачиванием» и отличается от неустойчивости Рэлея-Тейлора, которая может иметь место, когда тору плазмы пытаются придать слишком большое ускорение. Если тор плазмы не ускоряется, он снимается с внутреннего электрода, когда

$$\frac{B_{push}^2}{2\mu_0} > \frac{B_{max}^2}{2\mu_0}, \text{ где } B_{push} - \text{магнитное поле толкающего тока на внутреннем проводнике}$$

(внутреннем электроде ускорителя), а B_{max} - максимальное магнитное поле тора плазмы на внутреннем проводнике.

Величина B_{push} зависит от радиуса внутреннего электрода, являющего функцией продольного положения z тора плазмы в канале и приложенного тока.

$$B_{push}(z) = \frac{\mu_0}{2\pi r_{inner}(z)} I \quad (9)$$

Максимальное магнитное поле тора плазмы на внутреннем электроде определяется
 следующим образом: $B_{max}(r_{inner}) = \frac{\psi}{\mu_0(\bar{r}^2 - r_{inner}^2)}$ (10)

где ψ - полоидальный поток тора плазмы, а $\bar{r} = \frac{(r_{outer} + r_{inner})}{2}$.

Толкающее поле достигает своего максимума на внутреннем проводнике и описывается уравнением $2\pi r_{inner} B_{push} = \mu_0 I$. Таким образом, пороговый ток просачивания может быть выражен как $I_{lift} = 2\pi r_{inner} B_{push} / \mu_0$. Пороговый ток просачивания I_{lift} определяется, когда $B_{push} = B_{max}$, и выражается следующим уравнением:

$$I_{lift} = \frac{2\pi\psi r_{inner}}{\mu_0(\bar{r}^2 - r_{inner}^2)} \quad (11)$$

Таким образом, в статике, для уменьшения вероятности возникновения просачивания или для исключения такой возможности величина толкающего тока должна быть меньше величины порогового тока ($I < I_{lift}$). На верхнем графике, представленном на фиг. 1А (предшествующий уровень техники), проиллюстрирован пример реализации известной системы ускорения и сжатия плазмы, характеризующейся наличием канала распространения плазмы в форме равномерного конуса (т.е. канала с кольцевым зазором, который линейно сужается в направлении движения тора плазмы по каналу); при этом верхняя кривая отображает геометрию внешнего электрода, а нижняя кривая - геометрию внутреннего электрода. На нижнем графике, представленном на фиг. 1А, приведен пример тока, протекающего в системе по фиг. 1А, в частности, изображена кривая зависимости уравнивающего тока I_{bal} в ускорителе от продольно-осевого положения тора плазмы в канале распространения плазмы (сплошная линия), и кривая зависимости порогового тока статического просачивания I_{lift} в ускорителе от продольно-осевого положения тора плазмы в канале распространения плазмы (штрихпунктирная линия). Как можно видеть, в известной системе с постоянной конусностью ток, потребный для проталкивания тора плазмы вперед, достигнет своего максимума, когда тор плазмы приблизится к заднему по ходу концу системы.

На фиг. 1В представлен пример уравнивающего тока (сплошная линия) и порогового тока (штрихпунктирная линия) в зависимости от величины λ (где $\lambda = 2\pi/\Delta r(z)$) тора плазмы в ускорителе по фиг. 1А. Как можно заметить, по мере ускорения тора в канале распространения плазмы ускорителя с постоянной конусностью величина минимального тока, потребного для проталкивания тора плазмы (I_{bal}), возрастает по длине канала таким образом, что толкающий ток достигает своего максимума на заднем по ходу конце ускорителя, когда тор плазмы достигает максимального (наивысшего) сжатия.

Описанные в настоящем документе варианты реализации системы ускорения и сжатия обладают такой конструкцией, что тор плазмы может подойти к выходу ускорителя с относительно небольшим толкающим током позади него и максимальной степенью сжатия. Величина толкающего тока на выходе ускорителя должен быть меньше его величины на входе ускорителя, но обеспечивать при этом ускорение и сжатие тора плазмы по всей длине ускорителя.

Ниже представлено описание различных вариантов реализации усовершенствованной системы сжатия плазмы в привязке к фиг. 2-9. Эти варианты осуществления настоящего изобретения включают в себя ускоритель с коаксиально отцентрированными электродами (внешним и внутренним), которые задают кольцевой канал распространения плазмы, состоящий из участка высокой степени сжатия и вытянутого участка умеренного сжатия, расположенного за участком высокой степени сжатия; при этом указанный канал характеризуется геометрией, которая способствует уменьшению величины толкающего тока, потребного для выполнения ускорения и сжатия тора плазмы по длине ускорителя. В частности, вытянутый участок кольцевого канала распространения плазмы характеризуется наличием поперечного кольцевого зазора (определяемого как радиальное расстояние между внутренним и внешним электродами), который нелинейно сужается в направлении движения тора плазмы в канале. Система также включает в себя генератор плазмы и источник питания, электрически связанный с генератором плазмы и ускорителем, который подает электрический плазмообразующий импульс в генератор плазмы и электрический импульс ускорения в ускоритель. Источник питания выполнен с возможностью генерирования импульса ускорения, который будет проталкивать тор плазмы к концу участка умеренного сжатия так, что толкающий ток на заднем по ходу конце вытянутого участка будет меньше тока на переднем по ходу конце вытянутого участка. Например, в некоторых вариантах осуществления настоящего изобретения источник питания выполнен таким образом, чтобы при захождении тора плазмы внутрь вытянутого участка система не использовала какой-либо дополнительный толкающий поток после прохождения плазмой определенной точки внутри вытянутого участка. В других вариантах осуществления настоящего изобретения источник питания выполнен с возможностью возбуждения импульса ускорения, который обеспечивает дополнительный толкающий поток для завершения ускорения и сжатия тора плазмы, и этот дополнительный толкающий поток может составлять, например, менее 5%, менее 10% или менее 25% полного толкающего потока, используемого для первоначального ускорения и сжатия тора плазмы в различных вариантах реализации заявленного изобретения. Дополнительный толкающий поток, если таковой применяется, может быть использован для ускорения движения тора плазмы в некоторых таких вариантах осуществления настоящего изобретения.

Как показано на фиг. 2, и согласно одному из вариантов осуществления настоящего изобретения, не носящего ограничительного характера, система (10) ускорения и сжатия плазмы включает в себя ускоритель (100) с входом (112) и выходом (140), расположенным за входом (112), и кольцевым каналом (118) распространения плазмы, расположенным между входом (112) и выходом (140). Канал (118) распространения плазмы состоит из участка (110) высокой степени сжатия с передним по ходу концом, сообщаемым по текучей среде с входом (112), и вытянутого участка (120) умеренного сжатия с передним по ходу концом (114а), сообщаемым по текучей среде с задним по ходу концом (114) воронкообразного участка (110), и с задним по ходу концом, сообщаемым по текучей среде с выходом (140). Воронкообразный участок (110) обладает относительной крутой конусностью в направлении движения тора плазмы от входа (112); при этом он обеспечивает относительно высокую скорость сжатия проходящего через него тора (12) намагниченной плазмы. В этом варианте осуществления настоящего изобретения воронкообразный участок (110) характеризуется постоянной конусностью, т.е. имеет кольцевой зазор, нелинейно сужающийся по длине воронкообразного участка; однако в альтернативном варианте воронкообразный участок может обладать изменяющейся конусностью. Форма вытянутого участка (120)

характеризуется относительно плавной конусностью в сравнении с воронкообразным участком (110). Внутренний участок (120) сходит на конус относительно плавно с тем, чтобы обеспечить относительно небольшое сжатие тора плазмы на относительно длинном участке ускорителя (100) в сравнении с воронкообразным участком (110).

5 Выбрана такая форма вытянутого участка (120), чтобы обеспечить постепенный переход от крутой конусности воронкообразного участка (110). Передний по ходу конец (114a) вытянутого участка (120) может иметь форму плавного угла для уменьшения неадиабатического нагрева тора плазмы, которое может иметь место при более резком переходе. Кроме того, вытянутый участок (120) характеризуется меняющейся
10 конусностью, т.е. поперечное сечение кольцевого зазора в канале на вытянутом участке (120) нелинейно сужается в направлении движения тора плазмы по длине вытянутого участка (120). Эта геометрия - при заданной индуктивности вытянутого участка и индуктивности перед вытянутым участком («предварительной индуктивности») - способствует тому, что на выходе (140) вытянутого участка (120) величина толкающего
15 тока, сгенерированного импульсом ускорения, будет меньше, чем на входе (114a).

Система (10) также включает в себя генератор (12) плазмы и систему (200) сохранения потока (например, камеру мишени). Генератор (12) выполнен с возможностью возбуждения намагниченной тороидальной плазмы (13), и содержит трубчатый
внутренний плазмообразующий электрод (14) и трубчатый внешний электрод (16a),
20 расположенный коаксиально внутреннему плазмообразующему электроду (14) и охватывающий его, в результате чего между указанными электродами образуется кольцевой плазмообразующий канал (17).

Генератор (12) также содержит ряд магнитных катушек (18), расположенных по кругу на наружной поверхности внешнего электрода (16a). Инжектор газа сообщается
25 по газообразной среде с кольцевым плазмообразующим каналом (17); при этом указанный инжектор выполнен с возможностью впрыска точного количества газа в канал (17) через ряд быстродействующих струйных клапанов (20) инжектора, которые расположены вокруг камеры (только два из которых показаны на фиг. 2).

Каждый из быстродействующих струйных клапанов (20) сообщается по текучей
30 среде с коллектором (22) газа и выполнен с возможностью обеспечивать практически симметричное введение газа в генератор (12) плазмы. Система (10) также включает в себя источник (24) питания, который содержит, по меньшей мере, одну конденсаторную батарею, а в предпочтительном варианте - две и более конденсаторных батарей; при этом указанный источник питания выполнен с возможностью подачи тока в генератор
35 (12) плазмы и ускоритель (100). Катушки (18) выполнены с возможностью создания радиального выравнивающего магнитного поля с целью формирования полоидального поля плазмы. Система (10) может быть также разрезана, по меньшей мере, частично с помощью насосной системы (не показана).

Форма кольцевого канала (118) распространения плазмы, его воронкообразного
40 участка (110) и вытянутого участка (120) задана трубчатым внутренним электродом (115), а трубчатый внешний электрод (16b) расположен коаксиально внутреннему электроду (115) и охватывает его. Задний по ходу конец генератора (12) сообщается по текучей среде с входом (112) ускорителя, т.е. с передним по ходу концом воронкообразного участка (110). Граница раздела между внешними электродами
45 генератора и ускорителя (16a и 16b), а также между задним по ходу концом внутреннего электрода (14) генератора плазмы и передним по ходу концом внутреннего электрода (115) ускорителя, вместе задают открытое пространство, которое служит областью (50) релаксации тора плазмы. На примере, проиллюстрированном на фиг. 2, диаметр

внутреннего электрода генератора превышает диаметр внутреннего электрода ускорителя на входе (112), за счет чего область (50) релаксации образует зону расширения внутрь. Когда тор (13) плазмы, образованный в генераторе (12), покидает плазмобразующий канал (17) и заходит в область (50) релаксации, он немного расширяется, а магнитные силовые линии восстанавливаются с тем, чтобы тор плазмы мог стабилизироваться перед тем, как конденсаторная батарея источника (24) питания подаст на ускоритель (100) импульс для ускорения и сжатия тора (13) плазмы от входа (112) ускорителя, по длине ускорителя (100) и в направлении выхода (140) ускорителя. В альтернативном варианте, и как это показано на фиг. 7, область релаксации может быть выполнена с зоной расширения наружу, что подробнее описано ниже.

Как было отмечено выше, и согласно представленному ниже описанию, ускоритель (100) выполнен с возможностью обеспечивать одновременное ускорение и сжатие тора (13) плазмы таким образом, чтобы тора плазмы мог достичь выхода (140) с максимальной энергией (максимальным сжатием) и минимальным толкающим током за тором.

В одном из вариантов реализации заявленного изобретения источник (24) питания активируется для подачи на ускоритель электрического импульса ускорения; при этом толкающий ток поступает из источника (24) питания на внутренний электрод (115) ускорителя («электрод ускорения»), проходит через кольцевой зазор между электродами (115) и (16b), а также через тор (13) плазмы, после чего возвращается в источник (24) питания через внешние электроды (16a) и (16b). Этот толкающий ток создает азимутальное магнитное поле в области между электродами (115) и (16b). Магнитное поле воздействует на ток для создания электромагнитной толкающей силы $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ (силы Лоренца), ускоряющей тор (13) плазмы по коническому воронкообразному участку (110).

Выбирается такой толкающий ток, чтобы создаваемая им толкающая сила превышала противоположно направленную силу (противодавление), которая определяется геометрией канала (119) распространения плазмы с тем, чтобы тор (13) плазмы мог ускоряться, проходя через ускоритель (100) до выхода (140). Поскольку конусность канала распространения плазмы характеризуется максимальной крутизной на воронкообразном участке (110), в этой части ускорителя (100) будет фиксироваться наивысшее противодавление; соответственно, источник (24) питания выполнен с возможностью возбуждения импульса ускорения, толкающий ток которого создает толкающую силу на воронкообразном участке (110), достаточно высокую для преодоления противодавления, как на указанном участке, так и на вытянутом участке (120). Поскольку конусность канала (119) распространения плазмы существенно уменьшается на вытянутом участке (120), источник (24) питания выполнен с возможностью генерирования максимального толкающего тока I_{critical} , когда тор (13) плазмы заходит на вытянутый участок (120). На переднем по ходу конце (114a) вытянутого участка (120) сгенерированный толкающий поток Φ определяется величиной I_{critical} и индуктивностью L_0 системы (10) перед вытянутым участком (120) (на переднем по ходу конце (114a)). Таким образом, своего максимума толкающий ток достигает на заднем по ходу конце (114) конического воронкообразного участка (110) и на переднем по ходу конце (114a) вытянутого участка (120). После того, как тор (13) плазмы заходит внутрь вытянутого участка (120) и начинает свой путь по нему, в ускоритель необходимо ввести небольшой или дополнительный толкающий поток. После разрядки источника (24) питания он может быть развязан (замкнут накоротко внутренней дугой или изоляторами, ставшими токопроводящими) с системой (10), а ток может протекать в

системе (10) по замкнутому контуру.

Кольцевая геометрия канала вытянутого участка (120) может быть определена математически, исходя из следующих принципов. Внутри вытянутого участка (120) ускорителя (100) тор (13) плазмы сжимается за счет расширения толкающего потока.

5 Толкающий ток, протекающий в ускорителе (100), уменьшается по мере приближения тора плазмы к выходному концу (140) ускорителя (100) в результате возрастания индуктивности на вытянутом участке (120). Однако величина толкающего тока за тором (13) плазмы по-прежнему должна быть достаточно высокой для преодоления
10 противодействия (обратной силы), возрастающего вследствие сжатия тора плазмы в сужающемся поперечном сечении кольцевого канала (118) распространения плазмы.

Для ускорения тора (13) плазмы с помощью толкающего потока Φ , когда тор (13) плазмы находится в состоянии равновесия сил, независимо от его продольного положения z в канале (118) распространения плазмы, функция $\lambda(z)$ может быть определена как линейная функция $1/L(z)$:

15

$$\frac{d\lambda}{dz} = \frac{dL^{-1}}{dz} \quad (12)$$

Условие линейности позволяет обеспечить независимость полной энергии $K\lambda(z)$

20 $2\mu_0 + \Phi^2/2L(z)$ от положения (z) тора плазмы при величине спиральности $K=K_0$. Величина K_0 является критическим значением спиральности, и может устанавливать различие между тором плазмы в состоянии покоя, который будет ускорен вперед, если $K < K_0$, и тором плазмы, который будет ускорен назад, если $K > K_0$.

25 Определив приложенный ток $J(z)$ в продольном положении z в канале как $I(z)=\Phi/L(z)$, где символом Φ обозначен толкающий поток за тором плазмы, а символом L - индуктивность на вытянутом участке (120) канала (118), можно вывести математическое выражение для определения формы (кривой) вытянутого участка (120), что позволяет обеспечивать ускорение и сжатие тора (13) плазмы по всей длине вытянутого участка
30 до его заднего по ходу конца (до выхода (140)) без введения в ускоритель (100) какого-либо дополнительного потока.

При постоянной индуктивности L' на единицу длины ускоряющего электрода на участке (120) (т.е. когда она не зависит от продольного положения z в канале), индуктивность ускорителя (100) описывается следующим образом:

35

$$L(z) = L_0 + (z - z_0)L' \quad (13)$$

где L_0 - индуктивность (предварительная индуктивность) контура толкающего тока перед вытянутым участком (120) (когда тор плазмы находится у первого конца (114а) вытянутого участка (120)). Величина L_0 может включать в себя индуктивность
40 предшествующего конического воронкообразного участка (110) и любую иную дополнительную индуктивность, которая должна быть включена в нее как часть контура толкающего тока перед вытянутым участком (120).

При постоянном соотношении радиусов внешнего и внутреннего электродов (r_{inner} и r_{outer}) ускорителя (100) индуктивность L' на единицу длины на вытянутом участке (120) также будет постоянной, а тор плазмы, заходящий на участок (120), может двигаться к выходу (140) ускорителя (100) с помощью постоянного толкающего потока $\Phi=I(z)L(z)$. Форма вытянутого участка (120) может быть задана радиусом внутреннего

электрода (115) или радиусом внешнего электрода (16b) на переднем по ходу конце (114a) (r_0, z_0) вытянутого участка (120), радиусом внутреннего и внешнего электродов (115 и 16b) на выходе (140) (r_1, z_1), индуктивностью L' на единицу длины вытянутого участка (120) и индуктивностью L_0 перед вытянутым участком (120); и описана

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1+c(z-z_0)} \quad (14)$$

где $c=L/L_0$, $r(z)$ - радиус внутреннего или внешнего электрода в продольно-осевом положении z на вытянутом участке (120); величина z_0 - осевое положение вытянутого участка (120) на переднем по ходу конце (114a) вытянутого участка (120); а величины a и b - константы, которые могут быть определены путем решения уравнения (14) на переднем и заднем по ходу концах $z=z_0$ и $z=z_1$ (при этом величины r_0 и r_1 в нижеследующих уравнениях обозначают радиус внутреннего и внешнего электродов, соответственно, на переднем и заднем по ходу концах):

$$\frac{1}{r_0} = a - b; \quad a = b + \frac{1}{r_0}; \quad b = a - \frac{1}{r_0} \quad (15)$$

$$\frac{1}{r_1} = b + \frac{1}{r_0} - \frac{b}{1+c(z_1-z_0)} \quad (16)$$

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0} = b \left[1 - \frac{1}{1+c(z_1-z_0)} \right] \Rightarrow b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1+c(z_1-z_0)}} \quad (17)$$

Всевозможные геометрические конфигурации вытянутого участка (120) ускорителя могут быть рассчитаны с использованием уравнений 14-17 и с помощью программных средств магнитогидродинамического моделирования Versatile Advection Code (VAC; разработка Мичиганского университета). Например, может быть выбрана такая геометрия вытянутого участка системы (10), которая характеризуется постоянным соотношением радиусов внешнего и внутреннего электродов со следующими параметрами: радиус внешнего электрода (16) составляет около 1 м на входе (112), на стыке (114)/(114a) (т.е. на стыке между задним по ходу концом воронкообразного участка (110) и передним по ходу концом вытянутого участка (120)) - около 0,3 м, а на выходе (140) - около 0,2 м; радиус ускоряющего (внутреннего) электрода (115) на входе (112) составляет около 0,5 м, на стыке (114)/(114a) - около 0,15 м, а на выходе (140) - около 0,1 м; длина конического воронкообразного участка (110) составляет около 1,5 м; а длина вытянутого участка (120) - около 2,5 м. Рассчитанная индуктивность на единицу длины участка (120) (при заданных параметрах) составляет около $L' \approx 128$ нГ/м, тогда как рассчитанная предварительная индуктивность L_0 составляет около 200 нГ. При моделировании системы (10) с указанными параметрами предварительная индуктивность рассеяния составляет около 50 нГ, тогда как ее предварительная индуктивность (индуктивность перед вытянутым участком) составляет 151 нГ, а это означает, что общая предварительная индуктивность в смоделированной системе (10) будет составлять около 201 нГ, что немного выше рассчитанной предварительной

индуктивности. На основе вышеуказанных параметров находим, что кривая меняющейся конусности вытянутого участка (120) может быть выведена из уравнения (14) для $a=11,1045 \text{ м}^{-1}$, $b=4,2174 \text{ м}^{-1}$ и $c=0,64 \text{ м}^{-1}$, чтобы тор плазмы мог ускоряться и сжиматься по всей длине этого участка вплоть до выхода (140), а толкающий ток на выходе (140) был меньше толкающего тока на первом конце (114а) вытянутого участка (120). Система с указанными параметрами может, например, осуществлять ускорение и сжатие тора плазмы со следующими характеристиками: масса тора плазмы около 10^{-6} кг (например, дейтронной плазмы с 3×10^{20} ионами на кубический метр), полоидальный магнитный поток около 0,18 Вб, тороидальный магнитный поток около 0,032 Вб и спиральность 0,0117 Вб². Размеры и параметры ускорителя и тора плазмы, указанные выше, представлены исключительно в качестве примера; при этом может быть спроектирована система с другими размерами/параметрами, обеспечивающими эффективное ускорение и сжатие тора плазмы различных конфигураций таким образом, чтобы толкающий ток на конце ускорителя был минимальным, а энергия плазмы - максимальной (максимальное сжатие тора плазмы).

В другом варианте осуществления настоящего изобретения индуктивность на вытянутом участке (120) меняется по его длине, и в этом случае геометрия, как внешнего электрода (16), так и электрода (115) ускорения (вдоль вытянутого участка (120)) определяется отдельно с помощью уравнений 14-17 путем вычисления радиуса внутреннего и внешнего электродов $r(z)_{\text{inner}}$ и $r(z)_{\text{outer}}$ в каждом продольном положении по длине вытянутого участка (120).

Источник (24) питания выполнен с возможностью подачи плазмообразующего импульса в генератор плазмы, который формирует в нем тор плазмы, и электрического импульса ускорения в ускоритель (100), который создает в нем толкающий ток и толкающий магнитный поток, проталкивающий тор плазмы через ускоритель (100) от входа (112) до выхода (140). На фиг. 3А и 3В показаны профили напряжения и тока соответствующих плазмообразующих импульсов (сплошные линии) и импульсов ускорения (пунктирные линии). В частности, на фиг. 3А приведен пример временной зависимости напряжения, поданного источником (24) питания на генератор (12) плазмы (сплошная линия) и ускоритель (100) (пунктирная линия). Как можно видеть на этих фигурах, импульс ускорения характеризуется напряжением около 16 кВ; длительностью около 20 мкс; выдержкой подачи, когда тор плазмы находится в области (50) релаксации у входа (112), около 50 мкс и прекращения подачи, когда тор (13) плазмы заходит в вытянутый участок, около 70 мкс. На фиг. 3В проиллюстрирован пример временной зависимости тока, подаваемого источником (24) питания в генератор (12) плазмы (сплошная линия) и ускоритель (100) (пунктирная линия). Во время подачи импульса ускорения (с интервалом $50 \text{ мкс} < t < 70 \text{ мкс}$) тор (13) плазмы начинает двигаться по коническому воронкообразному участку (110) с одновременным сжатием по мере возрастания тока в направлении своего максимального уровня I_{critical} . Таким образом, тор (13) плазмы сжимается до определенной степени, повышая тем самым давление магнитного поля плазмы и, соответственно, препятствуя снятию тора (13) плазмы толкающим магнитным полем с внутреннего электрода (115) (предотвращая возникновению просачивания). Импульс ускорения обеспечивает возможность генерирования толкающего тока достаточно большой величины для противодействия противоположно направленной силы с одновременным проталкиванием тора (13) плазмы вплоть до начала вытянутого участка (120). Своего максимума ток достигает

на стыке (114)/(114a) воронкообразного участка (110) и вытянутого участков (120), а не на выходе (140) ускорителя, как это имеет место в плазменных ускорителях предшествующего уровня техники, характеризующихся равномерной конусностью (см. фиг. 1А). В этом варианте реализации заявленного изобретения не предусмотрено

5 введения какого-либо дополнительного магнитного потока в ускоритель (100) после того, как тор (13) плазмы зайдет в вытянутый участок (120) и начнет движение по нему.

Форма вытянутого участка (120) обеспечивает более умеренное сжатие тора (13) плазмы по всему вытянутому участку (120) повышенной длины. По мере движения тора (13) плазмы через вытянутый участок (120) в направлении его выхода

10 индуктивность (L) на вытянутом участке возрастает, вследствие чего величина толкающего тока (I) уменьшается. Максимальное значение тока, как это показано на фиг. 3В, может составить около 1,44 МА, тогда как значение толкающего тока за тором плазмы у конца вытянутого участка (120) (на выходе (140)) уменьшится до около 0,5 МА за счет возросшей индуктивности на вытянутом участке (120). Следовательно, в

15 этом варианте осуществления настоящего изобретения толкающий ток достигает своего максимума, когда тор (13) плазмы находится у заднего по ходу конца (114) конического воронкообразного участка (110) ускорителя (100).

Заявитель применил МГД-моделирование (магнитогидродинамическое моделирование) с использованием программы VAS для оценки характеристик различных

20 вариантов конструкции системы (10) ускорения и сжатия плазмы, в частности, различных вариантов геометрии конического воронкообразного участка (110) и вытянутого участка (120) с целью прогнозирования эффективности ускорителя (100) в отношении ускорения и сжатия тора (13) плазмы до высокоэнергетического состояния. На фиг. 4А приведен пример смоделированной работы системы (10) ускорения и сжатия плазмы

25 по фиг. 2, на которой представлен воронкообразный участок (110) и вытянутый участок (120) ускорителя (100). Вертикальной пунктирной линией (500), проходящей через продольное положение z (2,5 м) в канале, обозначен стык (114)/(114a) воронкообразного участка (110) и вытянутого участка (120). Длина воронкообразного участка (110) составляет 1,5 м; а длина вытянутого участка (120) - 2,5 м.

На фиг. 4В представлены кривые порогового тока, уравнительного тока и рабочего тока смоделированной системы (10) по фиг. 4А; при этом уравнительный ток I_{bal} обозначен сплошной линией, пороговый ток I_{lift} статического просачивания обозначен

30 штрихпунктирной линией, а рабочий ток за тором плазмы - пунктирной линией. Все эти токи показаны в зависимости от положения тора плазмы в канале распространения плазмы. Кривая рабочего тока отображает толкающий ток, который должен быть сгенерирован источником питания, чтобы обеспечить проталкивание тора плазмы через ускоритель. На фиг. 4В показана кривая рабочего тока только для вытянутого участка, а кривая рабочего тока перед вытянутым участком (в пределах воронкообразного участка) для упрощения обзора не представлена. Рабочий ток

35 рассчитан таким образом, чтобы его величина была меньше величины порогового тока во избежание просачивания и больше величины уравнительного тока для учета различных потерь, таких как потери магнитного потока, потери на трение и т.п. Сравнив рабочий (толкающий) ток, представленный на фиг. 4В, с рабочим (толкающим) током, представленным на фиг. 1А (нижний график), можно заметить, что величина рабочего

40 тока на выходе системы (10) намного ниже величины толкающего тока на выходе ускорителя, обладающего равномерной конусностью.

На фиг. 5 приведен пример порогового тока, уравнительного тока и рабочего тока в системе с параметрами, представленными на фиг. 4А, в зависимости от величины λ .

Как можно видеть, значение величины λ , на стыке (114)/(144a) воронкообразного участка и вытянутого участка составляет около 24 м^{-1} , а значение уравнительного тока в этой точке достигает своего максимума в 1,2 МА, тогда как в конце вытянутого участка величина λ , возрастает до максимального значения около 33 м^{-1} , а значение уравнительного тока составляет около 0,4 МА, что значительно меньше, чем в конце воронкообразного участка (110). На этой фигуре показано, что максимально сжатый тор плазмы проталкивается к выходу (140) ускорителя (100) с минимальным толкающим током за указанным тором.

На фиг. 6А и 6В проиллюстрирована смоделированная работа системы (10) с параметрами, представленными на фиг. 4А; в частности, показаны контуры полоидального магнитного потока в канале (118) распространения плазмы при $t=62$ мкс (фиг. 6А), а также при $t=70$ мкс (фиг. 6В). На фиг. 6А показан тор (13) плазмы, сжимаемый на воронкообразном участке (110) по мере его приближения к заднему по ходу концу (114) воронкообразного участка. На фиг. 6В показан тор (13) плазмы в момент его захождения внутрь вытянутого участка (120). Тор (13) плазмы может проталкиваться вдоль сжимающего воронкообразного участка (110) до его конца со скоростью около 130 км/сек при $z=2,5$ м, после чего схема ускорения источника (24) питания устанавливает нулевое напряжение, когда тор (13) плазмы заходит внутрь вытянутого участка с начальной скоростью 30 км/с при $z \approx 2,5$ м. Моделирование показало, что тор (13) плазмы может достичь конца системы (10) (выходного конца (140)) при $t \approx 90$ мкс со скоростью около 118 км/сек.

Согласно другому варианту осуществления настоящего изобретения, и как показано на фиг. 7, предложена система (10), характеризующаяся наличием области релаксации с зоной расширения наружу. На фиг. 7 проиллюстрирована смоделированная работа системы (10) с воронкообразным участком длиной 2,5 м и вытянутым участком длиной 4,5 м. Расширение наружу с последующим сжатием внутрь может осуществляться за счет чрезмерно крутой конусности в пределах сжимающего воронкообразного участка (110), вследствие чего эта конфигурация может оказаться более уязвимой для просачивания.

Согласно еще одному из вариантов осуществления настоящего изобретения, и как показано на фиг. 8, предложена система (1000) ускорения и сжатия плазмы без области релаксации. Система (1000) включает в себя двухступенчатый ускоритель (1100) и источник (1024) питания. Эта система также содержит генератор (1012) плазмы и область (1200) сохранения магнитного потока (например, камеру мишени). Генератор (1012) содержит трубчатый внутренний (плазмообразующий) электрод (1014), расположенный внутри трубчатого внешнего электрода (1016), в результате чего между указанными электродами образуется кольцевой плазмообразующий канал, в который может быть введено точное количество газа. После заполнения газом плазмообразующего канала между электродами (1014) и (1016) источник (24) питания подает в генератор плазмы плазмообразующий импульс, содержащий ток, разряжаемый между электродами, который ионизирует газ и образует тор (1013) намагниченной плазмы.

Ускоритель (1100) содержит внешний (ускоряющий) электрод (1015), внутри которого расположен внутренний электрод (1014), за счет чего между указанными электродами образуется кольцевой канал (1118) распространения плазмы, через который движется тор (1013) плазмы в направлении камеры (1200) мишени. Ускоритель (1100) также содержит сжимающий воронкообразный участок (1110) и вытянутый участок (1120), сообщающийся по текучей среде с воронкообразным участком (1110) и расположенный за ним по ходу движения тора плазмы. Сжимающий воронкообразный участок (1110)

имеет конусообразную форму в продольном сечении и характеризуется наличием переднего по ходу конца, сообщающегося по текучей среде с входом (1112) ускорителя, и заднего по ходу конца (1114), сообщающегося по текучей среде с передним по ходу концом (1114a) вытянутого участка (1120).

5 Воронкообразный участок (1110) обладает относительно крутой конусностью, и может обеспечивать радиальное сжатие тора плазмы примерно в 3-10 раз. Вытянутый участок (1120) длиннее воронкообразного участка (1110); при этом он обладает намного более пологой конусностью в сравнении с воронкообразным участком (1110), благодаря
10 чему вдоль этого - более длинного - продольного участка обеспечивается меньшая степень сжатия. Например, тор плазмы по длине этого участка (1120) может быть сжат в радиальном направлении в 1-2 раза.

Вытянутый участок (1120) характеризуется наличием переднего по ходу конца (1114a), соединенного с задним по ходу концом (1114) воронкообразного участка (1110) и сообщающегося с ним по текучей среде, и заднего по ходу конца, сообщающегося по
15 текучей среде с выходом (1140) ускорителя (1100). Как и в варианте реализации настоящего изобретения, который проиллюстрирован на фиг. 2, вытянутый участок обладает меняющейся конусностью, т.е. кольцевой зазор кольцевого канала (1118) распространения плазмы на вытянутом участке (1120) сужается нелинейно в направлении движения тора плазмы вдоль вытянутого участка (1120). Вытянутый участок (1120)
20 может быть выполнен с возможностью обеспечивать относительно плавный переход от крутой конусности воронкообразного участка (1110) к более пологой конусности по длине участка (1120). Например, участок (1120) может быть выполнен таким образом, чтобы его передний по ходу конец обладал радиусом с большим закруглением, обеспечивающим плавное спадание крутой конусности воронкообразного участка
25 (1110).

Система (1000) содержит внешний привод, т.е. источник питания указанной системы электрически связан с ускорителем (1100) так, что ток с источника (1024) питания поступает на внешний электрод (1015), проходит по кольцевому зазору через тор плазмы и через внутренний электрод (1014) возвращается в источник питания. После разрядки
30 источника (1024) питания он может быть развязан (замкнут накоротко) с системой (1000), а ток может протекать в системе (1000) по замкнутому контуру. В отличие от системы (10) релаксации, проиллюстрированной на фиг. 2, система (1000) не содержит область или зону расширения какого-либо иного рода. Источник питания выполнен с
35 возможностью генерирования импульса ускорения по мере выхода плазмы из генератора (1012) так, чтобы натяжение силовых линий толкающего магнитного потока способствовало восстановлению магнитных силовых линий, срезая растянутые силовые линии для формирования тора плазмы с одновременным проталкиванием этого тора плазмы по каналу ускорителя (1100).

В другом варианте осуществления настоящего изобретения система (1000) содержит
40 внутренний привод такого же типа, что и привод системы по фиг. 2.

Обратимся теперь к фиг. 9А, на которой показаны контуры полоидального магнитного потока при $t=35$ мкс, полученные по результатам моделирования работы системы (1000), представленной на фиг. 8. Как можно заметить, толкающий магнитный
45 поток ускоряет и сжимает тор плазмы по мере его прохождения по воронкообразному участку (1110) ускорителя (1100) в направлении его заднего по ходу конца (1114). Когда источник питания разряжает импульс ускорения, тор плазмы заходит в вытянутый участок (1120), где он подвергается дальнейшему ускорению и сжатию в направлении камеры (1200) мишени без необходимости введения в ускоритель (1100) какого-либо

дополнительного магнитного потока.

На фиг. 9В показаны профили напряжения и тока плазмообразующих импульсов и импульсов ускорения, возбужденных источником питания. Профиль напряжения представлен на верхнем графике, а профиль тока - на нижнем графике;

5 плазмообразующий импульс обозначен сплошной линией, а импульс ускорения - пунктирной линией; при этом оба эти параметра представлены в зависимости от времени. Как можно видеть на этой фигуре, импульс ускорения возбуждается, когда напряжение/ток плазмообразующего импульса еще не разряжено/не разряжен. Приложенное напряжение импульса ускорения в ускорителе (1100) составляет около 11 кВ. По мере
10 выхода из генератора (1012) плазмы для формирования тора плазмы запускается импульс ускорения, в результате чего ускоряющий (толкающий) ток инициирует восстановление магнитных силовых линий с целью образования тора плазмы и немедленно начинает ускорение этого тора плазмы в ускорителе. По мере нарастания толкающего тока происходит сжатие тора плазмы на воронкообразном участке (1110)
15 с его проталкиванием в направлении стыка (1114)/(1114a) воронкообразного участка (1110) и вытянутого участка (1120), благодаря чему отпадает необходимость во введении дополнительного магнитного потока, когда тор плазмы заходит на вытянутый участок (1120) и начинает движение вдоль него. В смоделированном режиме работы системы толкающий ток, протекающий в ускорителе, когда тор плазмы достигает камеры (1200),
20 уменьшается до около 0,25 МА за счет возрастания индуктивности на вытянутом участке (1120).

Хотя в некоторых описанных вариантах реализации ускорителя предусмотрено два участка, такая конфигурация представлена исключительно в качестве примера, и она не носит ограничительного или обязательного характера; в частности, ускоритель в
25 системах (10) и (1000) может характеризоваться наличием лишь одного вытянутого участка с меняющейся конусностью, такого как участок, заданный уравнением (14); при этом в ускорителе обеспечена достаточная индуктивность и предварительная индуктивность, позволяющая импульсу ускорения создавать толкающий магнитный поток, который проталкивает тор плазмы к выходу с толкающим током, величина
30 которого на выходе ниже, чем на входе вытянутого участка. В качестве альтернативы в других вариантах осуществления настоящего изобретения может быть предусмотрено три, четыре, пять и более вытянутых участков; при этом, по меньшей мере, один из этих участков обладает меняющейся конусностью. Например, в некоторых вариантах реализации заявленного изобретения может быть предусмотрена конусообразная форма
35 в виде раструба. В каждом таком варианте осуществления настоящего изобретения Соответствующие параметры конструкции (например, степени конусности, внутренние/внешние радиусы, длина участков, значения толкающего тока и т.д.) могут быть определены методами МГД-моделирования, описанными в настоящем документе.

Тор плазмы, полученный в любом из описанных вариантов реализации настоящего изобретения, может содержать высокоэнергетическую плазму и может быть использован
40 в следующих сферах: например, в производстве изотопов медицинского назначения, в источниках нейтронов, в источниках рентгеновского излучения, в устройствах ядерного синтеза и т.п. Варианты реализации вышеописанных систем и способов могут быть использованы для сжатия плазмы, которая содержит синтезное вещество. Синтезное
45 вещество может содержать, к примеру, один или несколько изотопов легких химических элементов, таких как дейтерий, тритий, гелий-3, литий-6, литий-7 и пр. Соответственно, определенные варианты реализации системы могут быть выполнены с возможностью функционирования в качестве генераторов нейтронов или источников нейтронов.

Полученные таким способом нейтроны характеризуются широким спектром возможностей применения в научно-исследовательских и промышленных целях. Например, источник нейтронов может быть использован для нейтронно-активационного анализа (НАА), который может обеспечить многоэлементный анализ главных элементов, микроэлементов, рассеянных и редких элементов в самых разных материалах и веществах (например, во взрывчатых веществах, в наркотических и лекарственных препаратах, расщепляющихся веществах, ядах и т.п.), и который может быть использован в самых разных сферах применения (например, для обнаружения взрывчатки, экологического мониторинга окружающей среды и т.п.). Варианты реализации системы, выполненные с возможностью применения в качестве источников нейтронов, могут быть также использованы в сфере исследования материалов (например, для анализа структуры, динамики, химического состава и химической однородности материалов), в сфере неразрушающих испытаний промышленных объектов (например, нейтронной радиографии и/или нейтронной томографии) и во многих других сферах промышленного и технического применения.

Варианты реализации описанных выше систем и способов сжатия плазмы также подходят для применения в сфере исследований плазмы с высокой плотностью энергии, в том числе в астрофизике и ядерной физике.

Хотя в настоящем документе были проиллюстрированы и описаны конкретные элементы, варианты реализации и сферы применения настоящего изобретения, следует понимать, что объем изобретения ими не ограничивается, поскольку специалисты в данной области техники могут внести в него определенные изменения без отступления от объема заявленного изобретения, в частности, с учетом вышеизложенных идей. Таким образом, например, в любом описанном здесь способе или процессе все действия или операции, составляющие способ/процесс, могут выполняться в любой приемлемой последовательности, не обязательно ограничиваясь какой-либо последовательностью, описанной в настоящем документе. Элементы и составные части системы могут быть сконфигурированы или размещены по-разному; при этом они могут быть объединены и/или исключены из схемы в различных вариантах реализации системы. Различные признаки и процессы, описанные выше, могут быть использованы по отдельности или в различных комбинациях. Предполагается, что все возможные комбинации и подкомбинации входят в объем настоящего изобретения. Ссылки на «некоторые варианты осуществления настоящего изобретения», «вариант осуществления настоящего изобретения» и т.п., содержащиеся по всему тексту настоящей заявки, означают, что конкретный признак, структура, стадия, процесс или характеристика, описанная в связи с каким-либо вариантом реализации настоящего изобретения, включена, по меньшей мере, в один из вариантов его осуществления. Таким образом, фразы «в некоторых вариантах осуществления настоящего изобретения», «в одном из вариантов осуществления настоящего изобретения» или иные фразы подобного рода, разбросанные по всему тексту настоящего документа, не обязательно относятся к одному и тому же варианту осуществления заявленного изобретения, а могут относиться к одному или нескольким одинаковым или разным вариантам реализации настоящего изобретения. В этой связи следует отметить, что новые способы и системы, описанные в настоящем документе, могут быть реализованы в самых разных формах; более того, различные пропуски, дополнения, замещения, эквиваленты, перестановки и изменения в вариантах реализации заявленного изобретения, описанных в этом документе, могут быть внесены или выполнены без отступления от существа описанного изобретения.

Различные аспекты и преимущества вариантов осуществления настоящего

изобретения описаны в требуемых случаях. Следует понимать, что необязательно все такие аспекты или преимущества могут быть реализованы в каждом отдельно взятом варианте реализации заявленного изобретения. Таким образом, например, следует понимать, что различные варианты осуществления настоящего изобретения могут
 5 быть реализованы таким образом, чтобы можно было получить или оптимизировать какое-либо одно преимущество или ряд преимуществ, описанных в настоящем документе, без необходимости достижения прочих аспектов или преимуществ, которые могут быть описаны или предложены в настоящем документе.

Если специально не оговорено иное, или если контекст не предполагает иного, то
 10 условные выражения, использованные в настоящем документе, такие как, помимо прочего, «может», «мог бы», «мог», «например» и прочие, обычно сообщают о том, что определенные варианты осуществления настоящего изобретения включают в себя определенные признаки, элементы и/или стадии, а прочие варианты - нет. Таким образом, эти условные выражения не указывают на то, что признаки, элементы и/или стадии в
 15 любом случае необходимы для одного или нескольких вариантов осуществления настоящего изобретения, или что один или несколько вариантов осуществления настоящего изобретения обязательно включают в себя логическое устройство, принимающее решение - с вводом или без ввода данных оператором, с подсказками оператору или без таковых - в отношении того, следует ли включить эти признаки,
 20 элементы и/или стадии в конкретный вариант осуществления настоящего изобретения, или следует ли их реализовать в конкретном варианте осуществления настоящего изобретения. Ни один единичный признак или ряд признаков не является необходимым или незаменимым для какого-либо из вариантов реализации заявленного изобретения. Термины «содержащий», «включающий в себя», «имеющий» и прочие термины
 25 подобного рода являются синонимами, и они используются во включительном смысле, в неограничивающей форме, и не исключают наличия других дополнительных элементов, признаков, действий, операций и т.п. Кроме того, термин «или» также используется во включительном (а не исключительном) смысле так, что при его использовании, например, для связывания списка элементов, термин «или» обозначает один, некоторые
 30 или все элементы, содержащиеся в списке.

Примеры расчетов, моделирования, результатов, графиков, значений и параметров вариантов осуществления заявленного изобретения, описанных в настоящем документе, носят исключительно иллюстративный характер, и никоим образом не ограничивают раскрытые варианты реализации настоящего изобретения. Другие варианты реализации
 35 заявленной системы могут характеризоваться конфигурацией и/или принципами управления, отличными от тех, которые описаны в иллюстративных примерах, представленных в настоящей заявке.

(57) Формула изобретения

40 1. Устройство ускорения и сжатия плазмы, причем оно включает в себя следующие элементы:

ускоритель плазмы, содержащий трубчатый внешний электрод и трубчатый внутренний электрод, расположенный внутри внешнего электрода таким образом, что между ними образуется кольцевой канал распространения плазмы для ускорения и
 45 сжатия проходящего по нему тора плазмы; при этом ускоритель содержит вход для приема тора плазмы из генератора плазмы, выход для разрядки ускоренного и сжатого тора плазмы и канал распространения плазмы с продольно вытянутым участком, который характеризуется наличием переднего по ходу конца, сообщаемого по

текучей среде с входом, а заднего по ходу конца, сообщающегося по текучей среде с выходом; при этом поперечный кольцевой зазор, определяемый как радиальное расстояние между внутренним и внешним электродами, сужается нелинейно в направлении движения тора плазмы вдоль вытянутого участка; и

5 источник питания, электрически связанный с ускорителем и выполненный с возможностью возбуждения электрического импульса ускорения, который генерирует ток, протекающий в ускорителе и создающий магнитный толкающий поток за тором плазмы, достаточный для проталкивания тора плазмы от переднего по ходу конца через вытянутый участок до заднего по ходу конца вплоть до выхода ускорителя;

10 при этом указанное устройство выполнено с возможностью обеспечивать индуктивность перед вытянутым участком, достаточную для ускорения и сжатия тора плазмы при его прохождении по всему указанному участку за счет расширения магнитного толкающего потока; при этом выбраны такие размеры канала распространения плазмы, чтобы при выбранной индуктивности в пределах вытянутого участка и выбранной индуктивности перед вытянутым участком величина тока, протекающего по вытянутому участку у заднего по ходу конца, была меньше величины тока у переднего по ходу конца вытянутого участка, а давление тора плазмы у заднего по ходу конца превышало давление тора плазмы у переднего по ходу конца вытянутого участка.

20 2. Устройство по п. 1, причем вытянутый участок обеспечивает сжатие тора плазмы в радиальном направлении в 1-2 раза.

3. Устройство по п. 1, причем источник питания выполнен с возможностью возбуждения импульса ускорения, который обеспечивает одновременное ускорение и сжатие тора плазмы в канале от входа ускорителя до выхода ускорителя.

25 4. Устройство по п. 1, причем канал распространения плазмы также включает в себя воронкообразный участок высокой степени сжатия, расположенный между входом и передним по ходу концом вытянутого участка; при этом воронкообразный участок содержит передний по ходу конец, сообщающийся по текучей среде с входом, и задний по ходу конец, сообщающийся по текучей среде с передним по ходу концом вытянутого участка; при этом поперечный кольцевой зазор в пределах воронкообразного участка, определяемый как радиальное расстояние между внутренним и внешним электродами, сужается в направлении движения тора плазмы по воронкообразному участку.

5. Устройство по п. 4, причем воронкообразный участок обеспечивает сжатие в 3-10 раз.

35 6. Устройство по п. 1, причем вытянутый участок может характеризоваться постоянным соотношением между радиусом внешнего электрода и радиусом внутреннего электрода, а радиус $r(z)$ одного из электродов (внешнего или внутреннего) в продольном положении z вытянутого участка может быть определен следующим образом:

40

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1 + c(z - z_0)}$$

где z_0 обозначает продольное положение вытянутого участка на переднем по ходу конце; c обозначает соотношение между индуктивностью L' на единицу длины вытянутого участка и индуктивностью L_0 перед вытянутым участком;

$$a = b + 1/r_0$$

где r_0 обозначает радиус внутреннего или внешнего электрода на переднем по ходу

конце; и

$$b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1 + c(z_1 - z_0)}}$$

где r_1 и z_1 обозначают, соответственно, радиус внутреннего и внешнего электрода и продольное положение вытянутого участка на заднем по ходу конце.

7. Устройство по п. 1, причем радиус $r(z)$ каждого из электродов (внутреннего и внешнего) в продольном положении z вытянутого участка определяется следующим образом:

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1 + c(z - z_0)}$$

где z_0 обозначает продольное положение вытянутого участка на переднем по ходу конце; c обозначает соотношение между индуктивностью L' на единицу длины вытянутого участка и индуктивностью L_0 перед вытянутым участком;

$$a = b + 1/r_0$$

где r_0 обозначает радиус внутреннего или внешнего электрода на переднем по ходу конце; и

$$b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1 + c(z_1 - z_0)}}$$

где r_1 и z_1 обозначают, соответственно, радиус внутреннего и внешнего электрода и продольное положение вытянутого участка на заднем по ходу конце.

8. Устройство по п. 1, причем источник питания выполнен с возможностью генерирования электрических импульсов ускорения, подача которых прекращается после захода тора плазмы в пределы вытянутого участка.

9. Устройство по п. 8, причем источник питания выполнен с возможностью генерирования электрического импульса ускорения с такими значениями интервала, длительности и амплитуды тока, которые обеспечивают постоянный толкающий магнитный поток при прохождении тора плазмы по вытянутому участку.

10. Система, причем она включает в себя следующие элементы:

устройство ускорения и сжатия плазмы по любому из предшествующих пп. 1-9; и

генератор плазмы, содержащий трубчатый внешний электрод и трубчатый внутренний электрод, расположенный внутри внешнего электрода; при этом такая конфигурация задает между указанными электродами кольцевой плазмообразующий канал;

при этом внешний электрод ускорителя физически соединен с внешним электродом генератора плазмы, а кольцевой плазмообразующий канал смыкается с кольцевым каналом распространения плазмы по одной линии и сообщается с ним по текучей среде.

11. Система по п. 10, причем она также включает в себя область релаксации тора плазмы, заданную внутренней стенкой внешнего электрода и пространством между передним по ходу концом внутреннего электрода ускорителя и задним по ходу концом внутреннего электрода генератора плазмы; при этом область релаксации сообщается по текучей среде с плазмообразующим каналом и каналом распространения плазмы.

12. Система по п. 11, причем область релаксации содержит зону расширения внутрь, образованную у переднего по ходу конца внутреннего электрода ускорителя.

13. Система по п. 11, причем область релаксации содержит зону расширения наружу, образованную у переднего по ходу конца внешнего электрода ускорителя.

5

10

15

20

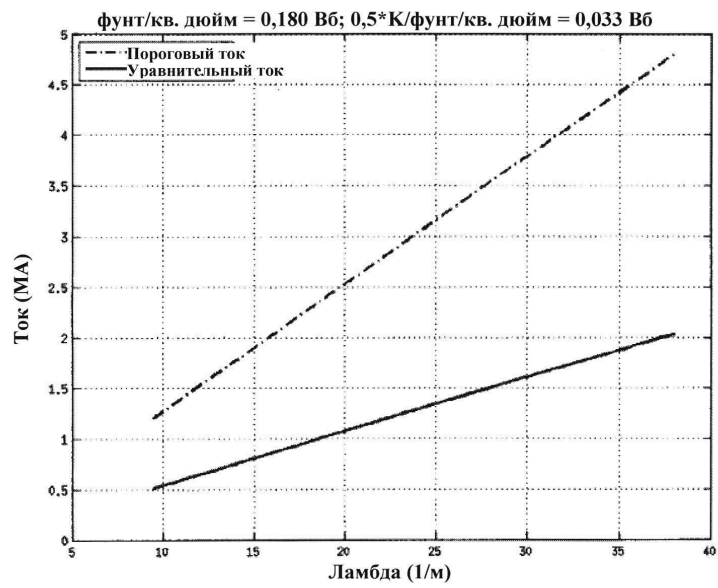
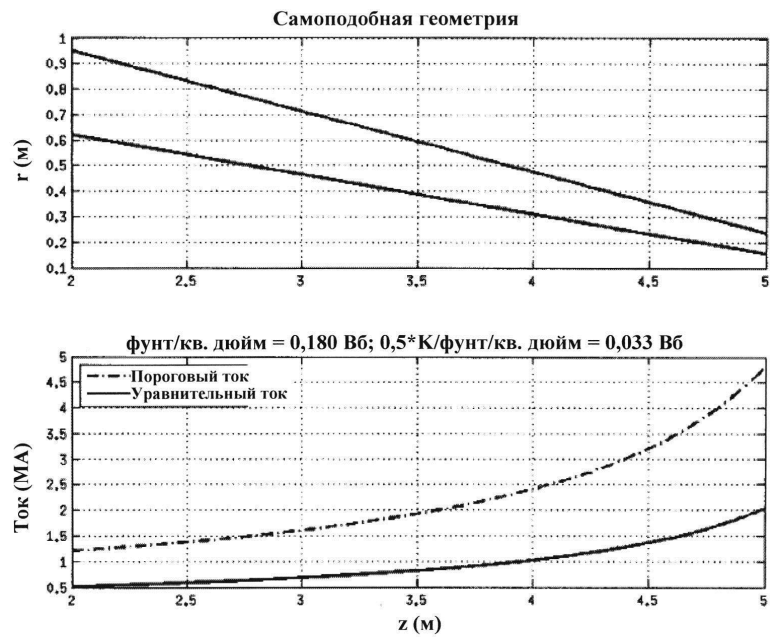
25

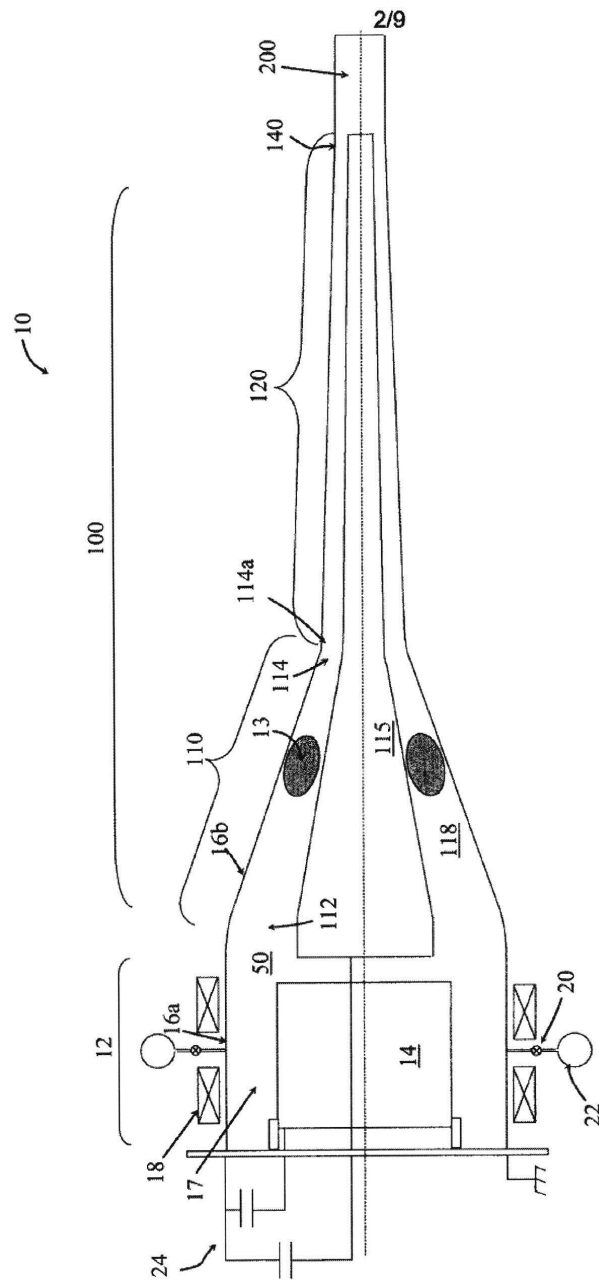
30

35

40

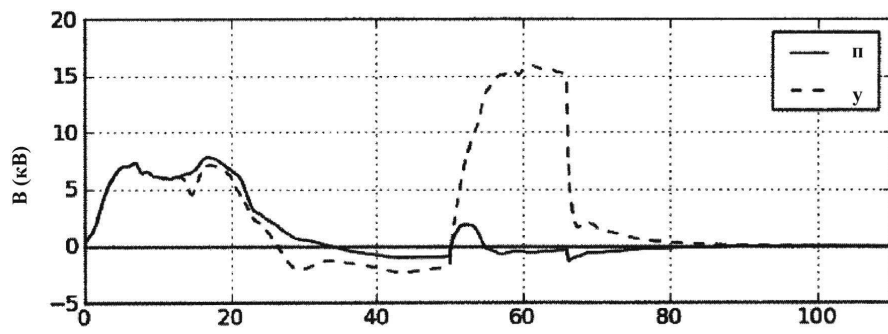
45



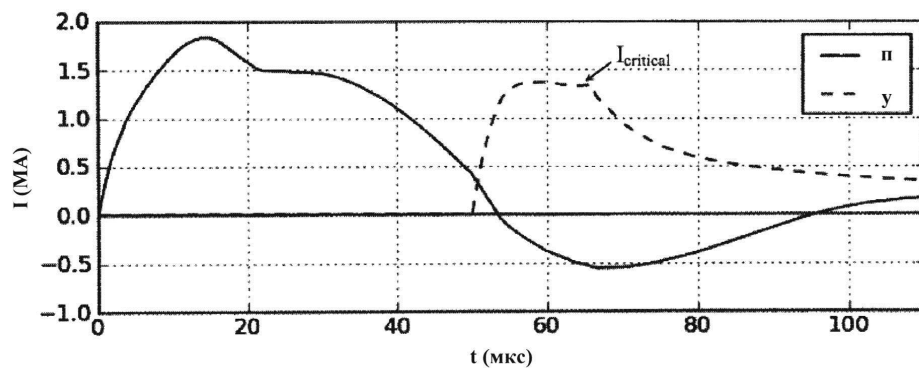


ФИГ. 2

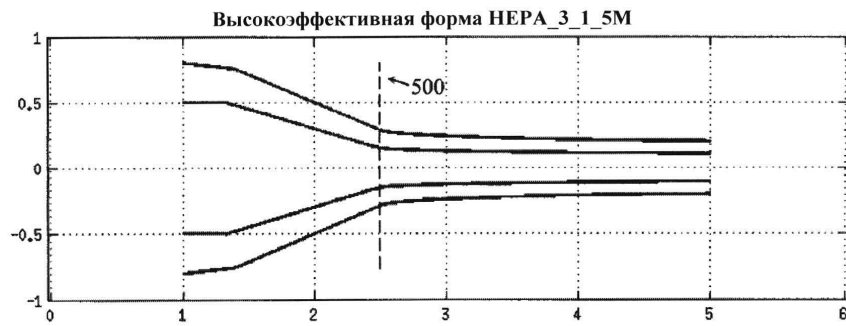
3/9



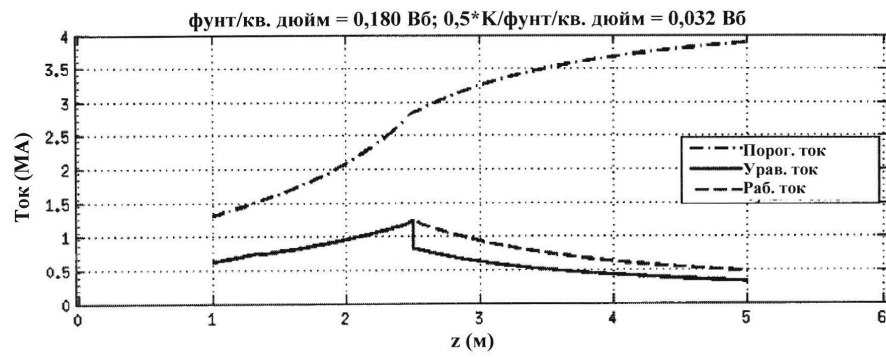
ФИГ. 3А



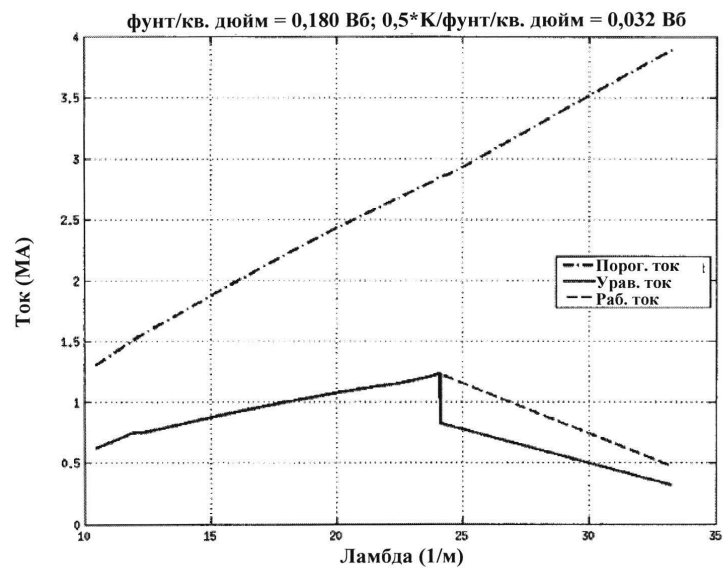
ФИГ. 3В



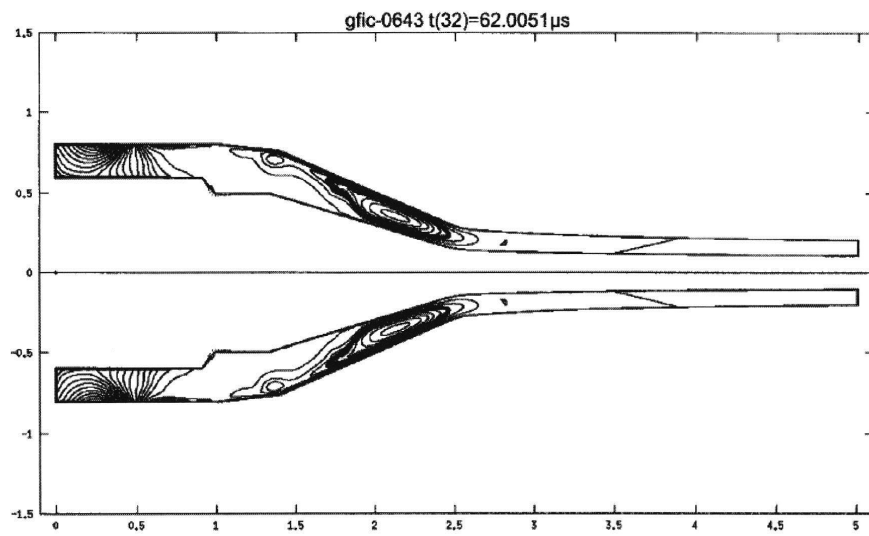
ФИГ. 4А



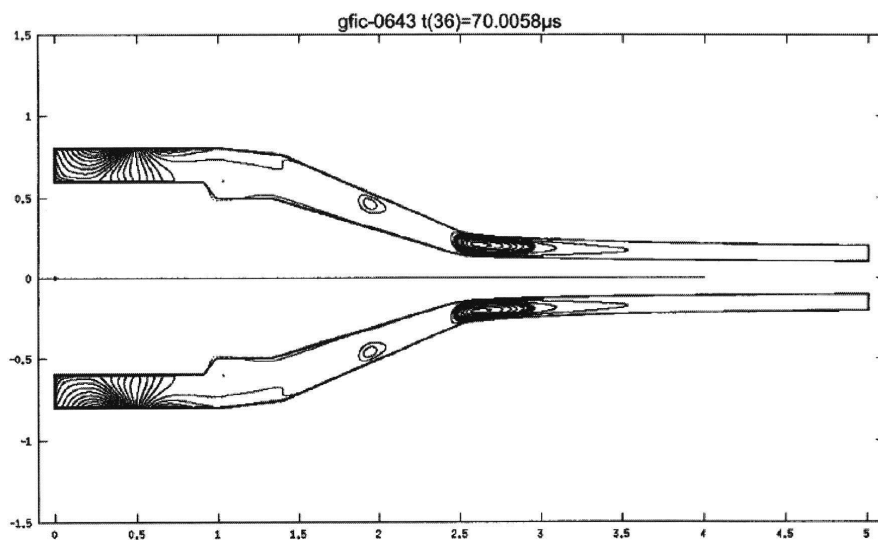
ФИГ. 4В



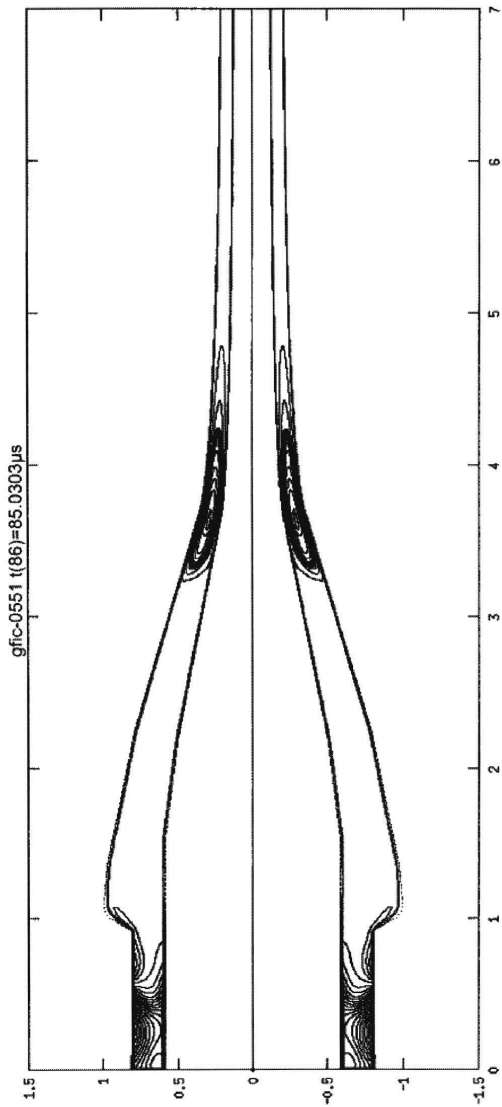
ФИГ. 5



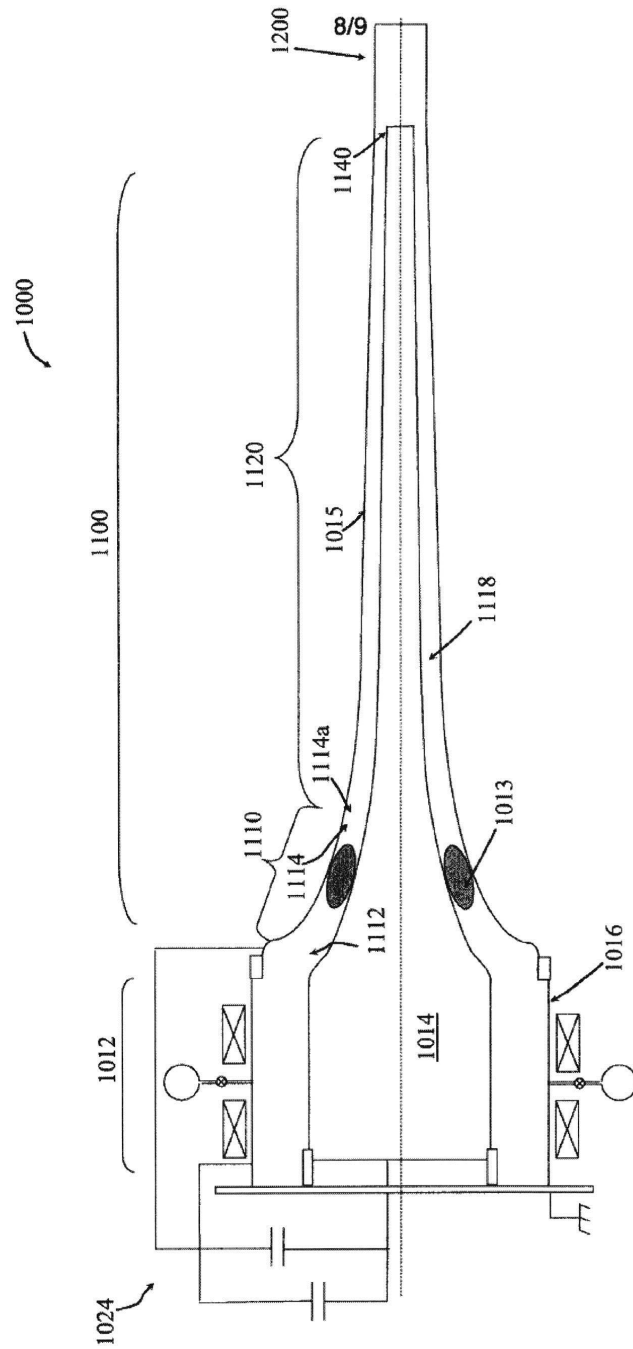
ФИГ. 6А



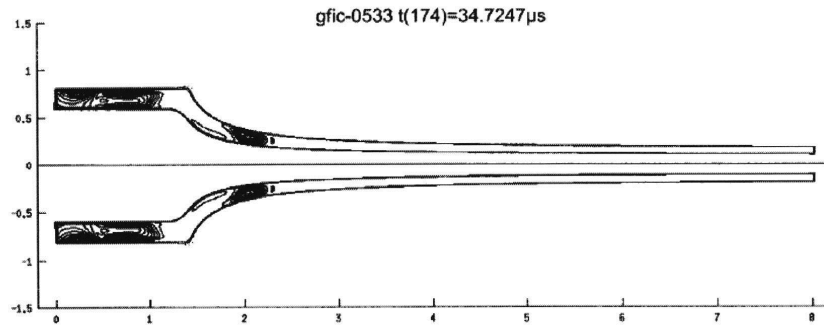
ФИГ. 6В



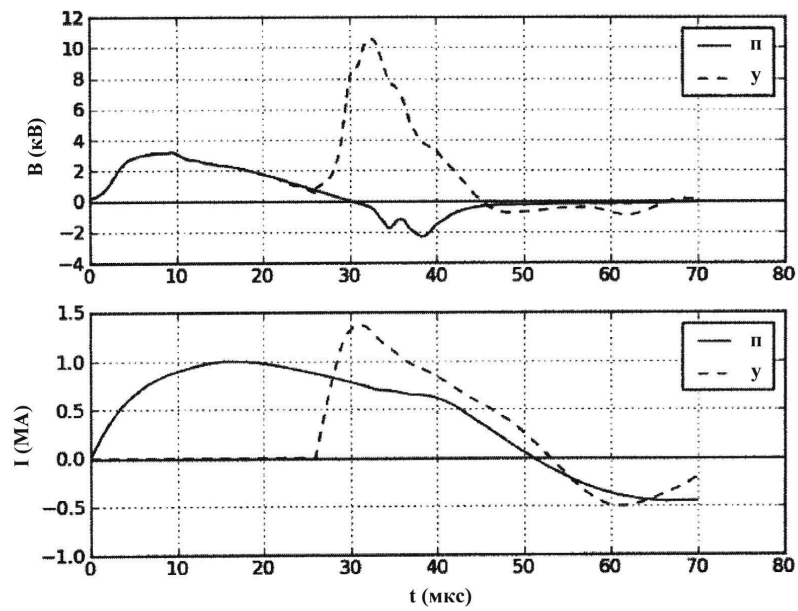
ФИГ. 7



ФИГ. 8



ФИГ. 9А



ФИГ. 9В