

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(21) 202390748 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2023.05.04

(51) Int. Cl. G21B 1/05 (2006.01)
H05H 1/02 (2006.01)
H05H 1/03 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2021.09.02

(54) УСТРОЙСТВО ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА С ОРБИТАЛЬНЫМ УДЕРЖАНИЕМ

(31) 63/073,812

(71) Заявитель:
ЭВЕЛАНЧ ЭНЕРДЖИ ДИЗАЙНЗ,
ИНК. (US)

(32) 2020.09.02

(33) US

(86) PCT/US2021/048890

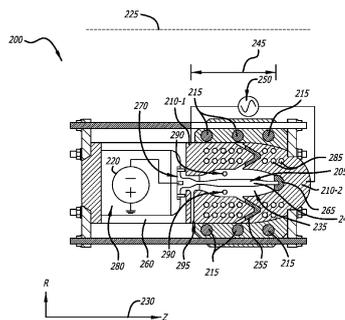
(72) Изобретатель:
Лэнгтри Робин, Райорден Брайан (US)

(87) WO 2022/051514 2022.03.10

(88) 2022.04.07

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

(57) Описываются системы, устройства и способы для генерирования реакции синтеза с орбитальным удержанием. Устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием может включать в себя катодный внутренний электрод, образующий продольную ось устройства. Внутренний электрод может включать в себя материал-эмиттер. Устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием может включать в себя анодный внешний электрод, концентрический с продольной осью и образующий камеру между внутренним электродом и внешним электродом. Устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием также может включать в себя множество генераторов магнитного поля, расположенных в коаксиальной компоновке относительно продольной оси. Множество генераторов магнитного поля могут быть выполнены с возможностью формировать в камере магнитное поле, параллельное продольной оси.



A1

202390748

202390748

A1

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-577446EA/23

УСТРОЙСТВО ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА С ОРБИТАЛЬНЫМ УДЕРЖАНИЕМ

Перекрестная ссылка на родственную заявку

Данная заявка притязает на приоритет предварительной заявки на патент США с № 63/073812, озаглавленной «Controlled Chain-Reaction Fusion Device» и поданной 2 сентября 2020 года, содержание которой полностью включено в данный документ по ссылке.

Предпосылки изобретения

Ядерный синтез представляет собой реакцию, в которой два или более легких атома объединяются с образованием одного или нескольких более тяжелых атомов. Вследствие дефекта массы при слиянии элементов легче железа-56 или никеля-62 высвобождается энергия, описываемая формулой $E=mc^2$. Слияние ядер начинается, когда два или более ядер преодолевают кулоновский барьер, созданный электростатической силой отталкивания между положительно заряженными ядрами, что приводит ядра в пространственную близость. Слияние происходит в результате квантового туннелирования, позволяющего ядрам связываться в продукт синтеза нуклидов, и сопровождается высвобождением энергии синтеза.

Один подход к генерированию реакции слияния ядер, называемый «термоядерным синтезом», включает в себя нагрев атомов топлива выше температур ионизации, увеличение плотности ионов и тепловой кинетической энергии ионов до такой степени, что ядра топлива будут сливаться. Напротив, ядерный синтез с орбитальным удержанием включает в себя ускорение ионов, чтобы вызывать слияние ядер, путем увеличения кинетических энергий ионов до такой степени, когда столкновения приводят к ядерному синтезу.

Ядерный синтез в течение длительного времени представляет собой привлекательный источник энергии, поскольку реакция не производит парниковых газов, отсутствуют долгоживущие радиоактивные отходы, возникает низкий риск пролиферации, отсутствует риск расплавления активной зоны, а требуемые элементы являются широко доступными и практически неисчерпаемыми. Являясь объектом большого объема научных исследований и инвестиций с момента теоретического формулирования лежащей в основе ядерного синтеза физики, способы инициирования, управления и поддержания реакций ядерного синтеза для производства полезной энергии остаются иллюзорными. Чтобы преодолеть ограничения, налагаемые потерями на столкновение электронов, исследования ядерного синтеза сфокусированы на термоядерном синтезе. Следовательно, разработка реакторов ядерного синтеза преимущественно обусловлена технологиями удержания плазмы, которые содержат «горячие» плазмы, описывающие плазму, в которой электроны и ионы находятся в тепловом равновесии при средних температурах порядка 100 миллионов градусов Кельвина. Управляемый термоядерный синтез предполагает поддержание горячих плазм

при плотностях и в течение времен удержания, достаточно больших для того, чтобы генерировать положительную чистую выходную энергию, что представляет собой фундаментальную проблему для успешной реализации ядерного синтеза.

В настоящее время магнитное удержание и инерционное удержание представляют собой основные цели научно-исследовательских работ для достижения управляемого термоядерного синтеза. Исследования способов как инерционного удержания, так и магнитного удержания обычно включают международные и многоинституциональные совместные научные усилия, что приводит к крупным установкам, большим капитальным инвестициям, превышающим миллиарды долларов США, и циклам проектирования длиной в десятилетия. На техническом уровне такие проекты по-прежнему борются с нестабильностью плазмы, ограничениями по материалам и низкими выходами энергии. Ни один термоядерный реактор еще достиг состояния безубыточности. Хотя бы по этим причинам существует потребность в плазменных устройствах ядерного синтеза, которые достигают чистого выигрыша энергии при меньших габаритах, которые могут быть построены и обслуживаться отдельными физическими или юридическими лицами, а не организациями в масштабе консорциумов или государства.

Сущность изобретения

Этот раздел «сущность изобретения» приведен для того, чтобы представить в упрощенной форме выбор концепций, которые дополнительно описаны ниже в подробном описании. Этот раздел «сущность изобретения» не предназначен идентифицировать ключевые признаки заявленного объекта изобретения, а также не предназначен для использования в качестве помощи при определении объема заявленного объекта изобретения.

Описаны системы, устройства и способы для генерирования реакции ядерного синтеза с орбитальным удержанием. Устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием может включать в себя катодный внутренний электрод, образующий продольную ось устройства. Внутренний электрод может включать в себя материал-эмиттер. Устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием может включать в себя анодный внешний электрод, концентрический с продольной осью и образующий камеру между внутренним электродом и внешним электродом. Устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием также может включать в себя множество генераторов магнитного поля, расположенных в коаксиальной компоновке относительно продольной оси. Множество генераторов магнитного поля может быть выполнено с возможностью формировать в камере магнитное поле, параллельное продольной оси.

В некоторых вариантах осуществления внутренний и внешний электроды представляют собой тела вращения, симметричные относительно продольной оси, и могут быть выполнены с формой, позволяющей формировать в камере практически логарифмическое электростатическое поле при подаче питания. Внутренний электрод может характеризоваться большим единицы соотношением размеров вдоль продольной оси. Внешний электрод может иметь длину вдоль продольной оси, большую наибольшего

диаметра внутреннего электрода. Внешний электрод может включать в себя первую анодную оболочку и вторую анодную оболочку, расположенные сбоку относительно продольной оси, и диэлектрический изолятор, расположенный между первой анодной оболочкой и второй анодной оболочкой и электрически изолирующий их.

В некоторых вариантах осуществления магнитное поле характеризуется напряженностью магнитного поля, превышающей условие отсечки Халла, чтобы улавливать (захватывать) электроны на орбитальном пути вокруг внутреннего электрода внутри камеры. Множество генераторов магнитного поля могут представлять собой или включать в себя постоянные магниты. Множество генераторов магнитного поля могут представлять собой или включать в себя электромагниты. Устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием также может включать в себя высоковольтный источник питания, электрически соединенный с внутренним электродом и работающий в диапазоне от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 4,0 МВ постоянного тока. Внутренний электрод может задавать первый конец и второй конец. Устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием может дополнительно включать в себя первый диэлектрический изолятор, механически соединенный с первым концом и изолирующий первый конец от внешнего электрода, и второй диэлектрический изолятор, расположенный в камере между вторым концом и внешним электродом и изолирующий второй конец от внешнего электрода. Первый диэлектрический изолятор может образовывать изоляционную полость и может электрически изолировать высоковольтный источник питания от внешнего электрода.

В некоторых вариантах осуществления внешний электрод образует отверстие, причем выставление отверстия задает траекторию инжекции, причем траектория инжекции соответствует углу наклона входа на стабильную эллиптическую орбиту иона с данным отношением массы к заряду относительно внутреннего электрода. Ион может представлять собой, но не ограничен ими, протон ($m/z=1$), ион дейтерия ($m/z=2$), ион трития ($m/z=3$), ион лития-6 ($m/z=6$) или ион бора-11 ($m/z=11$). Внешний электрод может дополнительно образовывать порт, проточно соединенный с камерой и внешней средой. Порт может быть выполнен с возможностью проточного соединения с вакуумной системой. Материал-эмиттер может быть расположен на внутреннем электроде или встроен во внутренний электрод. Материал-эмиттер может быть выполнен с возможностью инжектировать электроны в камеру при подаче питания на внутренний электрод. Материал-эмиттер может представлять собой или включать в себя материал-термоэлектронный эмиттер.

В некоторых вариантах осуществления устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием дополнительно включает в себя устройство зеркального тока, электрически соединенное с внешним электродом и выполненное с возможностью генерировать электрическую энергию из множества заряженных частиц, движущихся по орбите вокруг внутреннего электрода, причем упомянутое множество заряженных частиц проявляют гармоническое осевое движение, выставленное с продольной осью.

Устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием может дополнительно включать в себя канал для текучей среды, расположенный во внешнем электроде или внутреннем электроде. Устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием может характеризоваться физическими размерами порядка десятков сантиметров. В некоторых вариантах осуществления устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием электрически соединено с системой электрического питания, выполненной с возможностью принимать электрическое питание или нагретый теплоноситель из устройства.

Способ генерирования энергии ядерного синтеза с орбитальным удержанием в описанном выше устройстве ядерного синтеза может включать в себя запитывание внутреннего электрода до напряжения от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 4,0 МВ постоянного тока, с формированием тем самым логарифмического электростатического поля между внутренним электродом и внешним электродом и инжектированием множества электронов в камеру. Способ может включать в себя инжектирование пучка ионов топлива в камеру и под углом, тангенциальным к поверхности внутреннего электрода, заставляя ионы топлива взаимодействовать с электростатическим полем и входить на эллиптическую орбиту вокруг внутреннего электрода. Способ также может включать в себя генерирование магнитного поля, выставленного с продольной осью, с использованием упомянутого множества генераторов магнитного поля, причем магнитное поле характеризуется интенсивностью, соответствующей условию отсечки Халла, и перенаправление электронов обратно к внутреннему электроду.

В некоторых вариантах осуществления способ дополнительно включает в себя обеспечение протекания теплоносителя через канал для текучей среды, нагрев теплоносителя за счет контакта с внешним электродом и генерирование электричества с использованием нагретого теплоносителя. Способ может дополнительно включать в себя подачу радиочастотного (РЧ) сигнала напряжения на внешний электрод с использованием цепи зеркального заряда, при этом частота РЧ-сигнала напряжения соответствует колебанию заряженных частиц в камере вдоль направления, выставленного с продольной осью. Способ может дополнительно включать в себя генерирование РЧ-тока с использованием цепи зеркального заряда и генерирование постоянного тока из РЧ-тока с использованием схемы выпрямителя радиочастотного (РЧ) в постоянный ток.

Краткое описание чертежей

Указанные выше аспекты и многие из сопутствующих преимуществ данного изобретения станут более легко воспринимаемыми, а также более понятными при обращении к приведенному ниже подробному описанию, взятому в сочетании с прилагаемыми чертежами, на которых:

Фиг. 1 – схематичный рисунок, иллюстрирующий примерную систему для генерирования энергии с использованием реакторного устройства с орбитальным удержанием в соответствии с некоторыми вариантами осуществления по настоящему

раскрытию.

Фиг. 2А – схематичный рисунок, иллюстрирующий примерное реакторное устройство, включающее состоящий из двух частей внешний электрод, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления.

Фиг. 2В – схематичный рисунок, иллюстрирующий примерное реакторное устройство, включающее состоящий из одной части внешний анод, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления.

Фиг. 2С – схематичный рисунок, иллюстрирующий примерное реакторное устройство, включающее состоящий из двух частей внешний анод, в трехчетвертном разрезе, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления.

Фиг. 3 – схематичный рисунок, иллюстрирующий примерную систему инъекции ионов, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления.

Фиг. 4 – схематичный рисунок, иллюстрирующий примерную конструкцию реакторного устройства и генератора магнитного поля, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления.

Фиг. 5 – схематичный рисунок, иллюстрирующий представление на виде с торца взаимодействий эмитированных электронов и движущихся по орбите ионов, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления.

Фиг. 6 – график, иллюстрирующий скорость реакции (ордината) и плотность (абсцисса) для примерного реакторного устройства с орбитальным удержанием, при средней температуре электронов в 125 кэВ для трех ключевых расчетных точек, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления.

Фиг. 7 – блок-схема последовательности операций, иллюстрирующая примерный способ генерирования энергии или нейтронов с использованием реакторного устройства с орбитальным удержанием, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления.

Схожие ссылочные номера относятся к схожим частям на различных видах, если не указано иное. Не все экземпляры элемента обязательно помечены с тем, чтобы уменьшить перегруженность на чертежах там, где это необходимо. Чертежи не обязательно приведены в масштабе, а вместо этого акцент делается на иллюстрации описываемых принципов.

Подробное описание

Хотя проиллюстрированы и описаны иллюстративные варианты осуществления, следует принимать во внимание, что в них могут вноситься различные изменения без отступления от сущности и объема изобретения.

Введение

Понятие орбитального удержания ионов впервые предложено в 1923 году в ловушке Кингдона. Ловушка Кингдона состоит из тонкого центрального провода, внешнего цилиндрического электрода и изолированных торцевых электродов на обоих концах. Приложенное статическое напряжение между проводом и электродом приводит к радиальному логарифмическому потенциалу между ними. Ионы хранятся с конечным

угловым моментом вокруг центрального провода, а приложенное электрическое поле в устройстве обеспечивает стабильные траектории ионов на относительно длительные периоды времени. Ловушка Найта, разновидность ловушки Кингдона, модифицирует внешний электрод таким образом, чтобы удерживать ионы на орбите вокруг цилиндрической оси ловушки с помощью гармонического осевого движения. Гармоническое осевое движение представляет собой характеристику отношения заряда к массе (Z/m) удерживаемых ионов и может быть измерено через радиочастоту (РЧ) зеркального тока, при которой комбинация ионов различной массы генерирует свернутый РЧ-сигнал, который восстанавливается из свертки с использованием методов преобразования Фурье. Орбитальная ловушка – это усовершенствование геометрии ловушки Найта, которая исключает члены перекрестной связи между радиальным и осевым движением ионов, приводя к высокочувствительному масс-спектрометру.

Ловушка Кингдона, ловушка Найта и орбитальная ионная ловушка представляют собой чувствительные измерительные приборы для обнаружения и различения ионов по массе, но по своей сути не могут извлекать энергию или нейтроны из ядерного синтеза. Это ограничение, по меньшей мере частично, обусловлено рабочими параметрами, такими как давление, температура, напряженность электростатического поля, напряженность магнитного поля, плотность или пространственный заряд ионов, распределение энергии ионов и т.п. Дополнительно, датчики массы ионов изолируют ионы от источника ионов, который обычно представляет собой ионизирующую плазму, сформированную с использованием аналита, аналогично системам масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (например, ИСП-МС), в которых ионы не являются подходящими термоядерными топливами. Вместо этого пространство между электродами поддерживается свободным от электронов, что служит по меньшей мере частично для того, чтобы повысить чувствительность измерительного прибора за счет понижения плотности ионов и увеличения гармонического осевого движения для повышенного разрешения сигналов. Как таковое, устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием представляет собой значительное отклонение от конструкции и работы датчика массы типа орбитальной ионной ловушки, а не модификацию рабочих параметров или включение одного или более дискретных конструктивных элементов для добавления новой функциональности.

Устройства ядерного синтеза на основе орбитального удержания, например, генерируют энергию посредством стимулирования событий ядерного синтеза между легкими ионами с образованием более тяжелых ионов. При описании с точки зрения постоянной « k » скорости реакции синтеза, ядерный синтез с орбитальным удержанием включает в себя удержание ионов топлива и продукта реакции вместе в течение относительно длительных периодов времени приблизительно в одну секунду или более и на относительно больших расстояниях следа частиц порядка 1×10^8 см. Удержание ионов в силу этого служит увеличению числа событий рассеяния с переносом энергии до такой степени, когда реакции ядерного синтеза становятся более вероятными, что описывается

ниже с точки зрения сечений столкновения. Орбитальное удержание ионов может достигать таких времен удержания ионов, расстояний и энергий, которые вызывают ядерный синтез. По сравнению с ионными ловушками других конструкций датчики массы с ловушкой Кингдона/орбитальной ловушкой могут достигать относительно высоких пространственных зарядов, порядка 2×10^{10} атомов/см³, но не могут достигать пространственных зарядов, созданных в реакторном устройстве с орбитальным удержанием, порядка $1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{15}$ атомов/см³.

Реактор ядерного синтеза с орбитальным удержанием, в отличие от них, увеличивает ионный пространственный заряд за счет введения и удержания электронов на орбите с ионами вокруг центрального электрода. Инжекция пространственных зарядов посредством электронов служит смещению пространственного заряда положительных ионов, повышая достижимую плотность ионов, по меньшей мере частично посредством экранирования ионно-ионного отталкивания. Удержание электронов может упрощаться по иному физическому механизму, чем используемый для удержания ионов, в качестве подхода к обеспечению независимого управления орбитами ионов и электронов в устройстве и за счет этого улучшению управления реактором и повышению эффективности реактора. Например, магнитное поле может генерироваться параллельно продольной оси реактора с орбитальным удержанием, как и в генераторе магнитного поля магнетронного типа, который превышает условие отсечки Халла, изгибая траектории электронов в направлении, ортогональном направлению магнитного поля, и за счет этого индуцируя искривленное движение электронов магнетронного типа вокруг центрального электрода в том же направлении, как и у движущихся по орбите ионов, за счет этого уменьшая двухпоточковую нестабильность ионного пучка и/или термоядерной плазмы и уменьшая потери, обусловленные электрон-ионными столкновениями.

Рабочее окно реакторных устройств ядерного синтеза может определяться, по меньшей мере частично, тройным произведением плотности плазмы, температуры и времени удержания при ядерном синтезе ($nT\tau$). В качестве показателя качества это тройное произведение описывает условия для управляемого и воспроизводимого протекания реакций ядерного синтеза с генерированием чистой положительной энергии, называемые «критерием Лоусона». Плотностью, температурой и временем удержания можно управлять посредством рабочих параметров реакторного устройства. Например, увеличение ионного потока в реактор ядерного синтеза из источника ионов топлива может увеличивать плотность плазмы, тогда как увеличение напряженности электростатического поля может увеличивать температуру за счет ускорения ионов до более высоких средних скоростей. Параметры связаны между собой, так что увеличение одного параметра может влиять на другой параметр. Например, увеличение плотности плазмы может увеличивать потери на столкновение и может уменьшать время удержания, так как ионы ударяются о поверхности реактора. Тройное произведение может использоваться для того, чтобы вывести параметры напряженности электростатического поля, напряженности магнитного поля, ионного потока и электронного потока для реакторного устройства.

Таким образом, условия в реакторе могут приводить к такой точке, в которой ядерный синтез генерирует чистую положительную энергию. В иллюстративном примере ионы топлива инжектируются тангенциально (по касательной) между внутренним электродом и внешним электродом в электростатическое поле с достаточной энергией для того, чтобы занимать стабильные эллиптические орбиты вокруг внутреннего электрода. В ходе эллиптической орбиты положительно заряженные ионы топлива ускоряются к отрицательному внутреннему электроду, преобразуя потенциальную энергию в кинетическую энергию, до достижения точки перигея эллиптической орбиты. После достижения перигея ионы топлива замедляются, перемещаясь от отрицательного потенциала катода и запасая потенциальную энергию, до достижения точки апогея эллиптической орбиты. Ион топлива совершает миллионы таких орбит в реакторе за период времени порядка одной секунды. Дополнительно, эллиптическая орбита ионов может пересекать орбиты других ионов миллионы раз, увеличивая вероятность возникновения относительно маловероятного события ядерного синтеза. В конечном итоге, между ионами топлива на сталкивающихся орбитальных траекториях возникает событие ядерного синтеза, высвобождая продукты реакции ядерного синтеза, в том числе, но не ограничиваясь ими, заряженные частицы (альфа-частицы, гелий-3, протоны, тритий и т.д.), излучение и тепловую энергию.

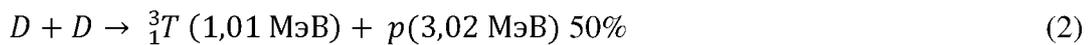
После события ядерного синтеза часть заряженных частиц реакции ядерного синтеза ударяется об электроды, преобразуя кинетическую энергию в тепло, которое рассеивается в устройстве. Дополнительно, непрореагировавшие ионы топлива в конечном итоге ударяются об отрицательно заряженный электрод, еще более нагревая устройство. Охлаждающие каналы в реакторе могут отводить тепло, которое может использоваться для выработки электричества посредством термодинамических циклов (например, с помощью зеебековских термоэлектрических генераторов либо систем теплообменников). Оставшиеся частицы продукта реакции ядерного синтеза занимают стабильные орбиты вокруг потенциальной ямы отрицательного катода. Продукты ядерного синтеза, движущиеся быстрее ионов топлива, также движущихся по орбите вокруг внутреннего электрода, могут передавать кинетическую энергию ионам топлива через взаимодействия резерфордского рассеяния с возрастанием энергии. После многократных ионно-ионных рассеивающих столкновений продукты ядерного синтеза сталкиваются с внутренними поверхностями реактора, генерируя дополнительное тепло. Рассеянные с возрастанием энергии ионы топлива следуют по круговым орбитам, что увеличивает эффективную температуру ионов, реактивность термоядерной плазмы и общую скорость реакции ядерного синтеза. Таким образом, реакторное устройство с орбитальным удержанием может поддерживать ядерный синтез с чистым положительным выходом энергии, которая может использоваться для выработки электричества, при компактных габаритах.

Физические принципы реакции ядерного синтеза

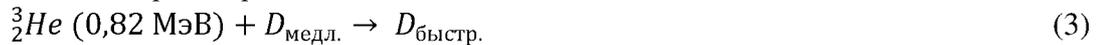
Последующее обсуждение принципов реакторного устройства с орбитальным

удержанием не предназначено ограничивать объем настоящего раскрытия. Например, хотя обсуждение реакций ядерного синтеза будет сосредоточено на слиянии дейтерия-дейтерия, предполагается, что эти принципы в равной степени применимы к другим реакциям ядерного синтеза, включая, но не ограничиваясь ими, слияние протона-бора-11 и слияние дейтерия-третия.

Кроме того, предполагается, что реакции ядерного синтеза дополнительно могут быть дополнены множественными этапами, при этом первая реакция синтеза служит в качестве источника ионов топлива непосредственно в устройстве, например, посредством нейтронной активации Li-6 на экзотермическом этапе, который генерирует энергетические альфа-частицы и тритий. Таким образом, слияние двух или более частиц, в том числе, но не ограничиваясь ими, нейтронов, протонов, дейтерия, трития, гелия-3, лития-6 или бора-11, генерирует продукты ядерного синтеза с повышенной кинетической энергией. Продукты ядерного синтеза могут сталкиваться с ионами топлива, передавая кинетическую энергию через рассеяние с возрастанием энергии, тем самым доводя ионы топлива до температур с потенциалом цепной реакции. В контексте дейтериево-дейтериевого (D-D-) синтеза, реакции с приблизительно одинаковой вероятностью протекают по любому из следующих путей:



Рассеяние с возрастанием энергии между продуктами ядерного синтеза в виде альфа-частиц и ионами топлива описывается следующей реакцией рассеяния с возрастанием энергии при столкновении:



Уравнение (3) представляет рассеяние с возрастанием энергии при столкновении дейтронов до энергий, при которых дейтроны могут индуцировать последующие реакции типа в уравнении (1).

Уравнение цепной реакции для D-D-синтеза с путем рассеяния гелий-3 -> дейтерий с возрастанием энергии описывается следующим образом, причем параметры определены в таблице 1:

$$I_D = I_{{}^3_2\text{He}} n_D \sigma_{{}^3_2\text{He} \rightarrow D} x_{{}^3_2\text{He}} \quad (4)$$

Распределение тока и энергии дейтерия после рассеяния с возрастанием энергии определяется уравнением (4). Число событий ядерного синтеза, получающихся в результате тока (I_D) дейтерия после рассеяния с возрастанием энергии, задается следующим образом:

$$I_{D-\text{Dfusion}} = n_D I_D \sigma_{D-Df} x_D \quad (5)$$

$$k_{D-\text{Dfusion}} = \frac{0,5 I_{D-\text{Dfusion}}}{I_{{}^3_2\text{He}}} \quad (6)$$

Таблица 1. Определения параметров для уравнений 4-6

$I_{\frac{3}{2}\text{He}}$	Начальный ток гелия-3, например, из-за термоядерных реакций (атомов/с)
n_D	Плотность дейтерия (атомов/см ³)
$\sigma_{\frac{3}{2}\text{He}-D}$	Сечение резерфордовского рассеяния с возрастанием энергии гелий-3 -> дейтерий (см ²)
$x_{\frac{3}{2}\text{He}}$	Длина взаимодействия атомов гелия-3/тормозное расстояние (см)
I_D	Распределение тока дейтерия после рассеяния с возрастанием энергии (атомов/с)
$I_{D-D\text{fusion}}$	Интегральная скорость реакции дейтериево-дейтериевого синтеза (реакций/с)
σ_{D-Df}	Сечения D-D-синтеза (см ²)
x_D	Длина взаимодействия дейтерия/тормозное расстояние (см)
$k_{D-D\text{fusion}}$	Коэффициент цепной реакции D-D-синтеза при столкновении

В некоторых вариантах осуществления реактор ядерного синтеза с орбитальным удержанием функционирует с коэффициентом реакций ядерного синтеза по току гелия-3 (либо альфа-частиц для альтернативных топлив) к положительному электроду выше единицы (например, $k_{D-D\text{fusion}} > 1$). Таким образом, может быть достигнут дополнительный выход энергии, с учетом механизмов потерь на столкновение и других потерь, таких как тормозное излучение и/или потери на удержание.

Хотя это раскрытие сосредоточено в описании процесса на дейтериево-дейтериевом синтезе, в качестве устройства электростатического удержания ионов реактор также способен работать с любым термоядерным топливом при наложении магнитных полей для удержания электронов. В общем, более высокая энергия ионов топлива и энергия продукта реакции подразумевает более высокую напряженность электрического поля для удержания положительно заряженных частиц, но следует понимать, что физические принципы инжекции электронов и резерфордовского рассеяния с возрастанием энергии в равной степени применимы для того, чтобы стимулировать дополнительный ядерный синтез во множестве различных типов ионов топлива как для выработки энергии, так и для производства нейтронов.

Дейтерий-дейтериевое и дейтерий-тритиевое могут использоваться в качестве термоядерных топлив для производства нейтронов с высокой плотностью потока и высвобождают нейтроны со средней энергией в 2,45 МэВ (50%-я вероятность разветвления). Дейтерий-тритиевые топлива дают сильнопроникающий нейтрон со средней энергией в 14,1 МэВ. Слияние дейтерия-гелия-3 дает альфа-частицу с 4 МэВ и энергетический протон (14 МэВ), который имеет применения в качестве источника высокоэнергетического пучка протонов. Слияние протона-бора-11 дает три альфа-частицы со средней энергией в 2,9 МэВ. Такие альфа-частицы могут удерживаться в реакторе с орбитальным удержанием, рассеивать дополнительные ионы с возрастанием энергии до энергий ядерного синтеза и служить для увеличения выхода ядерного синтеза.

Любое из вышеуказанных термоядерных топлив может использоваться для генерации энергии или в качестве нейтронного источника для визуализации, или наработки ценных изотопов.

В некоторых вариантах осуществления реактор с орбитальным удержанием генерирует плазму, в которой частицы характеризуются тормозными расстояниями, большими, чем $1E8$ см, и средними временами генерации (Δ) порядка ~ 1 с. Принципы тормозного расстояния и среднего времени генерации подробнее описываются в следующих абзацах.

В контексте настоящего раскрытия тормозное расстояние описывает то расстояние, за которое частица теряет энергию на взаимодействия с веществом, к примеру, из-за столкновений с другими частицами в плазме. Тормозное расстояние ионов в плазме вкратце обобщается следующим образом:

$$S = -\frac{dE}{\rho dx} = \frac{K}{AE} [(Z - Z^*)L_{be} + Z^*L_{fe}] \quad (7)$$

$$K = \frac{2\pi N_a m_a}{m_e}, E = \frac{m_a v_a^2}{2} \quad (8)$$

$$L_{be} = \ln\left(\frac{2m_e v_a^2}{\bar{I}}\right) \quad (9)$$

$$L_{fe} = G(x) \ln\left(\frac{2m_e v_{ae}^2}{hw_{pe}}\right) \quad (10)$$

где $x = \frac{v_a}{\sqrt{\frac{2kT_e}{m_e}}}$, $G(x) = \text{erf}(x) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} x \exp(-x^2)$, $hw_{pe} = 3,71 \times 10^{-11} \sqrt{n_e (\text{cm}^{-3})} eV$

Таблица 2. Определения параметров для уравнений 7-10

S	Тормозное расстояние в МэВ-см ² /мг
N _a	Число Авогадро
E	Кинетическая энергия ионов, причем подстрочный индекс а означает быстрый атом, например, m _a – масса протона (a=1) в 1,66e-27 кг, v _a – скорость протона (м/с)
Z	Атомное число плазмы (протон=1, альфа-частица=2 и т.д.)
Z*	Средняя степень ионизации плазменной среды, через которую проходит ион
A	Массовое число элемента для плазменной среды
m _e	Подстрочный индекс e означает электрон, в этом случае – массу электрона (m _e)
\bar{I}	Средняя энергия возбуждения в 9 эВ для протона
x	Отношение скорости быстрых ионов (v _a) к тепловой скорости электронов
hw _{pe}	Энергия плазмонов в эВ
v _{ae}	Средняя относительная скорость между быстрым ионом и электронами плазмы

На тормозные расстояния оказывают сильное влияние число присутствующих в

плазме электронов (n_e) и температура электронов плазмы (T_e), что отражено в определениях параметров x и hw_{pe} . Температура электронов прямо пропорциональна квадрату скорости электронов (V_e) для эмитированных из эмиссионного покрытия электронов, деленному на постоянную Больцмана K_b :

$$T_e = \frac{mV^2}{K_b} \quad (11)$$

При температурах электронов выше 10000 эВ тормозная способность значительно уменьшается, особенно для энергий ионов ниже 500 кэВ.

Как описано выше, устройство с орбитальным удержанием может работать, по меньшей мере частично, путем ускорения ионов за счет переноса энергии столкновения. Вероятность конкретного столкновения описывается сечением столкновения, как это должно быть понятно специалисту в данной области техники. Сечение рассеяния с возрастанием энергии иона дейтерия из частицы гелия-3 определяется дифференциальным уравнением Резерфордского рассеяния:

$$\sigma_{\frac{3}{2}He \rightarrow D} = \frac{Z_D^2 Z_{\frac{3}{2}He}^2 \left(\frac{a\hbar c}{E_{\frac{3}{2}He}} \right)^2}{16 \sin^4(\theta/2)} 0,01 \text{ (барн)} \quad (12)$$

Таблица 3. Определения параметров в уравнении 12

a	Тормозное расстояние в МэВ-см ² /мг
$\hbar c$	197,3 МэВ, fm
$\sigma_{\frac{3}{2}He \rightarrow D}$	Дифференциальное сечение (в барнах) рассеяния дейтрона до уровня энергии, соответствующего данному углу рассеяния θ
$E_{\frac{3}{2}He}$	Энергия частицы гелия-3 в МэВ
$Z_{\frac{3}{2}He}$	Заряд частицы гелия-3 (+2)
Z_D	Заряд иона после рассеяния с возрастанием энергии (+1 для дейтерия)

Энергия столкновения переносится от гелия-3 к иону дейтерия методом полного рассеяния (FAS), обобщенного следующими уравнениями:

Параметр ударного воздействия определяется следующим образом:

$$b_{\perp} = \frac{|q_i q_j|}{4\pi \epsilon_0 m_{ij} v_{ij}^2} \quad (13)$$

где q – заряд частицы, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, m_{ij} – приведенная масса, и $v_{ij} = |v_i - v_j|$ – относительная скорость между двумя частицами. Максимальный параметр ударного воздействия задается равным дебаевской длине следующим образом:

$$b_{max} = \lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B / q_e^2}{\frac{n_e}{T_e} + \sum_j z_j^2 n_j / T_i}} \quad (14)$$

где k_B – постоянная Больцмана, q_e – заряд электрона, n_e и n_j – численная плотность электронов и ионов сорта (j), T_e и T_i – температура электронов и сортов ионов, и z_j – заряд

сортов ионов.

Полное сечение резерфордовского рассеяния определяется следующим образом:

$$\sigma_R = \pi b_{max}^2 \quad (15)$$

а число событий резерфордовского рассеяния может быть определено так:

$$N = \sigma_R v_{ij} n_j dt \ln \Lambda \quad (16)$$

где dt – временной шаг, и $\ln \Lambda$ – хорошо известный кулоновский логарифм, заданный следующим образом:

$$\ln \Lambda = \ln \sqrt{(b_{max}^2 + b_{\perp}^2)/b_{\perp}^2} \quad (17)$$

Вероятность одного события резерфордовского рассеяния определяется следующим образом:

$$P_R = \sigma_R v_{ij} n_j dt \quad (18)$$

Оператор столкновения функционирует, оценивая безразмерную длину пути, s , определяемую следующим образом:

$$s = 4 \pi b_{\perp}^2 v_{ij} n_j dt \ln \Lambda \quad (19)$$

Исходя из дифференциального уравнения резерфордовского рассеяния и оператора столкновения, абсолютное большинство событий рассеяния с возрастанием энергии носит малоугловой характер (<1 кэВ). Как результат, рассеяние иона дейтерия топлива с возрастанием энергии до энергий ядерного синтеза включает в себя множественные столкновения за некоторый период времени.

Скорость самоподдерживающейся цепной реакции синтеза с рассеянием с возрастанием энергии при столкновении следует экспоненциальному закону масштабирования $e^{(k-1)t/\lambda}$ с коэффициентом умножения цепной реакции $k \geq 1$, t – истекшее время, и λ – среднее время генерации:

$$e^{(k-1)t/\lambda} \quad (20)$$

Когда $k < 1$, реакция считается подкритической и скорость реакции со временем снижается. Когда $k > 1$, реакция считается надкритической, и скорость реакции со временем увеличивается. Когда $k = 1$, реакция считается критической, и скорость реакции является установившейся во времени. Среднее время генерации λ определяет то, насколько быстро протекает реакция, но не значение в установившемся состоянии, когда $k = 1$. Среднее время генерации зависит от тормозного расстояния гелия-3 в плазме.

Для ионов дейтерия в тепловом равновесии со свободными электронами в плазме ($T_i = T_e$) увеличение температуры электронов и/или плотности электронов увеличивает коэффициент переноса энергии между электронами и ионами до тех пор, пока скорости ионов дейтерия не начинают совпадать со скоростью гелия-3, выше которой коэффициент переноса энергии снижается.

Работа реактора с орбитальным удержанием

В отличие от термоядерного синтеза, реакторы ядерного синтеза с орбитальным удержанием удерживают ионы на орбитах при определенных энергиях с

немаксвелловскими распределениями энергии. По сути, скорость реакции ядерного синтеза (обозначаемая как « dn/dt ») в единицах реакций в секунду регулируется физикой ядерного синтеза с рециркулирующим пучком, описываемой следующим выражением:

$$\frac{dn}{dt} = \sigma \frac{N^2}{S} f_{recirculation} \quad (21)$$

где σ – сечение дейтериевого пучка при данном уровне энергии, S – площадь взаимодействия, $f_{recirculation}$ – частота рециркуляции, и N – число ионов топлива в реакторе. Для цилиндрической конфигурации типа ловушки Кингдона/орбитальной ловушки ключевыми параметрами являются r_i , внутренний радиус основания катода, и r_o , радиус внутренней поверхности внешнего анода, и, наконец, l , длина реактора. Площадь взаимодействия (S) и частота рециркуляции ($f_{recirculation}$) определяются следующим образом:

$$S = (r_o - r_i)l \quad (22)$$

$$f_{recirculation} = \frac{v_i}{2\pi(0,5r_o + 0,5r_i)} \quad (23)$$

где v_i – скорость ионов дейтерия при данной энергии. Полный пространственный заряд в реакторе составляет фиксированный предел. Следовательно, по мере того, как число удерживаемых заряженных частиц реакции ядерного синтеза, таких как гелий-3, увеличивается, общее число ионов топлива снижается, чтобы компенсировать и поддерживать предел пространственного заряда. В некоторых вариантах осуществления концентрацией ионов топлива управляют посредством потока ионов топлива в реактор. Число ионов дейтерия, которые могут участвовать в реакциях ядерного синтеза, определяется следующим образом:

$$N = N_{ion} - N_{Helium3} \quad (24)$$

$$N_{ion} = V n_i \quad (25)$$

$$N_{Helium3} = 0,5 Z_{Helium3} \frac{dn}{dt} \Lambda \quad (26)$$

где N_{ion} – ограниченное пространственным зарядом число ионов в реакторе, полученное из объема реактора (V) и предельной численной плотности n_i ионов. Число присутствующих в реакторе ионов гелия определяется как $N_{Helium3}$, где dn/dt – скорость реакции, $0,5$ представляет 50%-ую вероятность реакции DD-синтеза для гелия-3, при заряде $Z_{Helium3} +2$ и среднем времени генерации ~ 1 с.

Продукты реакции гелия-3 могут передавать кинетическую энергию ионам дейтерия топлива, тем самым увеличивая сечение синтеза, представляющее вероятность реакции. Это смещается тем фактом, что по мере того, как число ионов гелия-3 в реакторе растет, общее число ионов дейтерия должно снижаться для сохранения пределов пространственного заряда. В контексте цепной реакции коэффициент k в уравнении (20) может быть оценен на основе градиентов как реактивности ядерного синтеза, так и общего числа ионов топлива следующим образом:

$$k = \frac{\sigma_2 N_2^2}{\sigma_1 N_1^2} \quad (27),$$

где числитель $\sigma_2 N_2^2$ описывает сечение синтеза и общее число ионов топлива после данного временного интервала с рассеянием гелия-3 с возрастанием энергии. Первоначально, во время запуска реактора, число реакций ядерного синтеза и ионов гелия-3 является низким, как и уменьшения в N. С другой стороны, градиент сечения синтеза является высоким по мере того, как ионы дейтерия приращивают энергию, и реактивность увеличивается. В зависимости от начальной плотности ионов, коэффициент k может начинаться как большое значение, и по мере того, как ионы топлива приращивают энергию, скорость реакции увеличивается. В конечном итоге, по мере того, как число гелия-3 увеличивается в ходе работы, будут достигаться условия установившегося состояния ($k=1$), когда увеличения сечения синтеза смещаются из-за уменьшения доступных ионов топлива. Условие установившегося состояния в реакторе представляет собой комплексную функцию реактивности термоядерного топлива по мере того, как энергия ионов увеличивается вследствие рассеяния с возрастанием энергии, ионного потока топлива в устройство и нескольких механизмов потерь, которые переносят энергию из плазмы и заставляют ионы терять энергию (рассеяние с понижением энергии, удары о стенку, удары о центральный электрод, излучение и т.д.). При коэффициентах k, приблизительно равных единице («критический» режим работы), скорость реакции и выходная мощность являются практически стабильными во времени. Стабильная работа может поддерживаться посредством регулирования работы реактора таким образом, что, если выходная мощность реактора опускается ниже целевой мощности, то рабочие параметры перенастраиваются, чтобы обеспечить коэффициент k выше единицы («надкритический» режим работы), тогда как, если реактор превышает целевую мощность, то рабочие параметры перенастраиваются, чтобы обеспечить коэффициент k ниже единицы («подкритический» режим работы).

Что касается инъекции электронов, то понятно, что магнитное поле может загнать эмитированные электроны обратно к катоду, тем самым исключая дугу между электродами, если напряженность магнитного поля превышает условие отсечки Халла. При данном электрическом напряжении напряженность магнитного поля, удовлетворяющая условию отсечки Халла, определяется следующим выражением:

$$B_c = \frac{mc}{ed^*} \sqrt{\frac{2eV}{mc^2} + \left(\frac{eV}{mc^2}\right)^2} \quad (28)$$

где B_c – критическое магнитное поле, m – масса электрона, e – заряд электрона (абсолютное значение), V – напряжение, приложенное к зазору, c – скорость света, и d^* – геометрический коэффициент, заданным следующим образом:

$$d^* = \frac{r_o^2 - r_i^2}{2r_o} \quad (29)$$

Что касается прямого извлечения энергии из гармонического осевого движения

ионов, то события рассеяния между удерживаемыми продуктами реакции синтеза и ионами топлива придают осевую кинетическую энергию и гармоническое осевое движение ионов в реакторе. Частота осевого движения является характеристикой отношения заряда к массе (Z/m) иона. Радиочастотная (РЧ) энергия может подаваться к внешним электродам на специальных частотах для того, чтобы избирательно извлекать энергию осевого движения через зарядный зеркальный ток, в обратном процессе, при котором датчики массы обнаруживают специфичные для массы РЧ-сигналы, сгенерированные гармоническим осевым движением ионов.

Подача несинфазных РЧ-сигналов на внешние электроды позволяет снять возбуждение гармонического осевого движения ионов. Когда возникают столкновения между продуктами ядерного синтеза и ионами топлива, часть энергии столкновения передается осевому движению. Подводимая к внешним электродам РЧ-энергия может использоваться для выборочного извлечения энергии из ионов топлива, продуктов реакции либо и того, и другого, поскольку они колеблются аксиально между двумя половинами внешнего электрода. Сигнал зеркального заряда переменного тока также может выпрямляться в постоянный ток, чтобы заряжать устройства накопления энергии, такие как аккумуляторы, или запитывать электрическую нагрузку.

Частота осевого колебания представляет собой характеристику отношения массы иона к заряду и определяется из следующего уравнения:

$$\omega = \sqrt{\frac{kq}{m}} \quad (30)$$

где ω – частота в радианах в секунду, q – заряд иона, и m – масса иона. Сигнал зеркального тока (I), индуцированный осевым движением ионов, определяется следующим выражением:

$$I(t, r) \approx -qN\omega \frac{\Delta z}{\lambda(r)} \sin(\omega t) \quad (31)$$

где N – число ионов, Δz – величина осевого движения, и $\lambda(r)$ зависит от геометрии ловушки ($\lambda(r) \approx$ *внешний радиус*) и является функцией радиуса ловушки.

Обсуждение реакторных систем с орбитальным удержанием

Здесь описываются варианты осуществления системы и способа генерирования энергии и/или радиоизотопов с использованием реакций ядерного синтеза с орбитальным удержанием. В нижеприведенном описании изложены многочисленные конкретные подробности для того, чтобы обеспечить полное понимание вариантов осуществления. Тем не менее, специалисты в данной области техники признают, что описанные в данном документе технологии могут быть осуществлены на практике без одной или более из конкретных подробностей либо с помощью других способов, компонентов, материалов и т.д. В других случаях общеизвестные конструкции, материалы или операции не показаны или описаны подробно, чтобы исключить затруднение понимания определенных аспектов.

Ссылка в описании данного изобретения на «один вариант осуществления» или «вариант осуществления» означает то, что конкретные признаки, конструкция или

характеристика, описанные в связи с вариантом осуществления, включены в по меньшей мере один вариант осуществления настоящего изобретения. Таким образом, появления фраз «в одном варианте осуществления» или «в варианте осуществления» в различных местах по всему описанию данного изобретения не обязательно относятся к одному и тому же варианту осуществления. Кроме того, конкретные признаки, конструкции или характеристики могут комбинироваться любым подходящим образом в одном или более вариантах осуществления.

Фиг. 1 – схематичный рисунок, иллюстрирующий примерную систему 100 для генерирования энергии с использованием реакторного устройства 105 с орбитальным удержанием в соответствии с некоторыми вариантами осуществления по настоящему раскрытию. Примерная система 100 включает в себя множество реакторных устройств 105, снабжаемых ионами топлива от источника(ов) 110 ионов топлива и питанием от источника(ов) 115 питания, термически связанных с теплогенератором(ами) 120 и электрически связанных с электрогенератором(ами) 125, каждый из которых соединен с распределительной системой 130. Следует понимать, что, хотя примерная система 100 описывает многореакторную систему, предполагаются варианты применения с использованием одного реакторного устройства 105 с орбитальным удержанием, например, для портативных и/или мобильных систем выработки электроэнергии. Как описано в предыдущих разделах, примерная система 100 может применяться для выработки изотопов, тепла и/или электричества в качестве безуглеродной электроэнергии для питания больших гражданских электрических летательных аппаратов с вертикальными взлётом и посадкой (эСВВП) и электрических самолетов, для питания военных эСВВП, для выработки бортовой электроэнергии и электрической тяги для судов с размерами от небольших лодок до больших кораблей.

Источник(и) 110 ионов топлива может представлять собой или включать в себя различные типы источников ионов, способных генерировать ион топлива и подавать его в примерную систему 100 при энергиях для орбитального захвата и последующего синтеза. Примерная система 100 также может использоваться, в качестве неограничивающих примеров, для портативной выработки электроэнергии, выработки электроэнергии для роботизированных шасси и/или экзоскелетов, мобильной выработки электроэнергии, выработки электроэнергии вспомогательной силовой установки (ВСУ), распределенной выработки электроэнергии в удаленных местоположениях и/или электроэнергии для телекоммуникационных вышек связи в удаленных местоположениях. Примерная система 100 также может использоваться, в качестве неограничивающих примеров, для увеличения дальности действия электротранспортных средств (электромобилей), небольших эСВВП и электрических воздушных транспортных средств, местных или региональных электросетей, подключенных к сети накопителей, выработки электроэнергии на удаленных и передовых оперативных базах, контейнерной мобильной выработки электроэнергии и резервного электроснабжения центров обработки и хранения данных. По сути, примерная система 100 может выполнять роль в пределах от генератора

базовой нагрузки до генератора пиковой нагрузки, в зависимости от типа системы, в которую она интегрирована.

Примерная система 100 может инициировать и/или поддерживать ядерный синтез и может усиливать синтез посредством описанных ранее механизмов рассеяния с возрастанием энергии при столкновении. Инициирование самоподдерживающихся реакций ядерного синтеза может включать в себя период подкритической (например, $k < 1$) работы, в котором одно или более реакторных устройств 105 с орбитальным удержанием потребляют энергию из источника(ов) 115 питания. В некоторых вариантах осуществления каждое реакторное устройство 105 с орбитальным удержанием электронно связано с источником(ами) 115 питания. В некоторых вариантах осуществления подмножество реакторных устройств 105 с орбитальным удержанием электронно связано с источником(ами) 115 питания, и запуск может включать в себя каскадный или поэтапный подход. С этой целью примерная система 100 может включать в себя силовую электронику и системы взаимосвязи, так что первое реакторное устройство 105-1 с орбитальным удержанием электрически связано с источником(ами) 115 питания, от которых потребляется питание во время запуска. Когда первое реакторное устройство 105-1 с орбитальным удержанием достигает критичности ($k=1$) и производит чистую положительную энергию, одно или более реакторных устройств 105 с орбитальным удержанием примерной системы 100, которые электрически связаны с первым реакторным устройством 105-1 с орбитальным удержанием, могут потреблять питание для инициирования запуска. Таким образом, потребляемое из внешних источников питание может уменьшаться, упрощая развертывание примерной системы 100 в областях без установленной генерирующей мощности. С учетом сказанного выше, в тех применениях, где важно время отклика, каждое реакторное устройство 105 с орбитальным удержанием может быть отдельно подключено к источнику(ам) 115 питания и может включать в себя системы управления для запуска параллельно или практически одновременно.

Источник(и) 110 ионов топлива могут включать в себя один или более типов источников ионов, в зависимости по меньшей мере частично от применения примерной системы 100. Как подробнее описано в предыдущих разделах, примерная система 100 может применяться при выработке изотопов, выработке электроэнергии и/или выработке тепла, помимо других прогнозируемых назначений. Таким образом, источник(и) 110 ионов топлива может (могут) представлять собой или включать в себя, но не ограничиваясь ими, источники протонов, дейтерия, трития, гелия-3, лития-6 или бора-11. Поскольку каждое реакторное устройство 105 с орбитальным удержанием работает с использованием источника ионов топлива, которые инжектируются в термоядерную плазму в ходе работы, примерная система 100 включает в себя каждое реакторное устройство 105 с орбитальным удержанием, функционально связанное с источником(ами) 110 ионов топлива. Способы генерирования ионов включают в себя, но не ограничиваясь ими, электромагнитную ионизацию источника ионов, ядерные реакции, такие как захват нейтронов, термоионная эмиссия, полевая эмиссия и т.п., как будет понятно специалисту в

данной области техники.

Как подробнее описано со ссылкой на фиг. 2-4, каждое реакторное устройство 105 с орбитальным удержанием в примерной системе 100 может поддерживать критическую реакцию ядерного синтеза (например, $k \approx 1$) и может извлекать энергию из термоядерной плазмы. Энергия может быть извлечена в виде тепловой энергии, получающейся в результате удара ионов и электронов о внутренние поверхности, подвергающиеся воздействию плазм. Такая тепловая энергия может переноситься посредством проточного соединения реакторных(ого) устройств(а) 105 с орбитальным удержанием с системой теплообмена и применения одного или более методов сбора электроэнергии из собранного таким образом тепла. Например, в случае, когда рабочие температуры реактора могут поддерживаться на уровне порядка 1000 К, можно осуществлять циркуляцию теплоносителя через один или более компонентов реакторных(ого) устройств(а) 105 с орбитальным удержанием, используя тепло для производства работы. Таким образом, теплогенераторы 120 могут представлять собой или включать в себя системы, включая, но не ограничиваясь ими, компрессоры, турбины, турбомашинное оборудование и/или термоэлектрические генераторы, а также системы жидкостной теплопередачи для отведения тепла от реакторных(ого) устройств(а) 105 с орбитальным удержанием к теплогенератору(ам) 120. Дополнительно и/или альтернативно, теплогенератор(ы) 120 также может (могут) включать в себя нагревательные системы, которые используют по меньшей мере часть тепловой энергии в качестве источника тепла.

В некоторых вариантах осуществления примерная система 100 включает в себя электрогенератор(ы) 125, чтобы непосредственно захватывать электрическую энергию из реакторных(ого) устройств(а) 105 с орбитальным удержанием. Как описано в предыдущих разделах, перенос энергии столкновения в рециркулирующей ионной плазме индуцирует осевое гармоническое движение ионов, ортогональное прикладываемому электрическому полю между электродами. Частота осевого движения может быть в радиочастотном (РЧ) диапазоне и может характеризовать отношение массы к заряду ионов. По сути, каждое реакторное(ые) устройство(а) 105 с орбитальным удержанием может извлекать электричество посредством активного демпфирования осевого гармонического движения ионов, и генерируемая за счет этого электроэнергия может преобразовываться в полезное электричество силовой электроникой, включенной в состав электрогенераторов 125 в качестве их части. В некоторых вариантах осуществления электрогенераторы 125 включают в себя одну или более компонентных систем для вывода электроэнергии постоянного и/или переменного тока из РЧ-мощности, отводимой от реакторных(ого) устройств(а) 105 с орбитальным удержанием. Например, электрогенераторы 125 могут включать в себя системы выпрямителей радиочастотного (РЧ) в постоянный ток, так что примерная система 100 может использоваться для хранения электричества в сетевом накопителе с использованием многоэлементных батарей, жидкометаллических батарей или т.п.

Дополнительно и/или альтернативно, примерная система 100 работает для

генерации нейтронов по одному или более назначений посредством выбора источника(ов) и/или рабочих параметров. Таким образом, примерная система 100 может быть функционально связана с системами для использования нейтронов в приложениях, включая, но не ограничиваясь ими, образование радиоизотопов, производство водорода, переработку ядерных отходов, изготовление трития нейтронной бомбардировкой лития, размножение ядерного топлива для деления ядер, анализ материалов, включая нейтронную спектроскопию и/или нейтронную визуализацию, и/или нейтронно-активационный анализ, обработку материалов нейтронным облучением, обнаружение материалов, медицинскую визуализацию, медицинскую терапию, включая нейтронозахватную терапию и/или нейтронно-лучевую терапию, тестирование материалов и компонентов, либо другие варианты использования в научных исследованиях, как будет понятно специалисту в данной области техники.

В некоторых вариантах осуществления примерная система 100 включает в себя одну или более групп реакторных устройств 105 с орбитальным удержанием, применяемых для одного из нескольких применений. Например, одно или более реакторных устройств 105 с орбитальным удержанием могут использоваться для выработки тепла, одно или более реакторных устройств 105 с орбитальным удержанием могут использоваться для выработки электричества, и одно или более реакторных устройств 105 с орбитальным удержанием могут использоваться для выработки нейтронов. В некоторых вариантах осуществления одно единственное реакторное устройство 105 с орбитальным удержанием может использоваться для выработки тепла и электричества, тепла и нейтронов, либо их комбинаций. Такой универсальности в применении способствует выбор рабочих параметров, источника(ов) ионов топлива и внутренних конструкций реакторных(ого) устройств(а) 105 с орбитальным удержанием, описанных ниже со ссылкой на фиг. 2А-6.

Фиг. 2А-2С иллюстрируют примерное реакторное устройство 200, включающее в себя внутренние конструкции для генерирования и поддержания ядерного синтеза и для извлечения энергии, как описано со ссылкой на фиг. 1, фиг. 2А и фиг. 2В, которые описывают примерное реакторное устройство 200 в разрезе и акцентируют внимание на различных внутренних конструкциях, чтобы упростить описание и прояснить визуальную иллюстрацию. Тем не менее, следует понимать, что примерное реакторное устройство 200 включает в себя конструкции, описанные на фиг. 2А, фиг. 2В и/или фиг. 2С, за исключением случаев, когда включение является физически невозможным.

Фиг. 2А – схематичный рисунок, иллюстрирующий примерное реакторное устройство 200, включающее состоящий из двух частей внешний электрод 210, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления. Примерное реакторное устройство 200 представляет собой пример реакторных(ого) устройств(а) 105 с орбитальным удержанием по фиг. 2, выполненных(ого) с возможностью извлекать электрическую энергию посредством демпфирования гармонического осевого движения ионов в термоядерной плазме. Примерное реакторное устройство 200 включает в себя

катодный внутренний электрод (205), анодный внешний электрод (210), генератор(ы) (215) магнитного поля, высоковольтный источник (220) питания и экран (225) для защиты от излучения.

Примерное реакторное устройство 200 выполнено с возможностью генерировать энергию с использованием термоядерной плазмы, генерируемой между внутренним электродом 205 и внешним электродом 210. С этой целью внутренний электрод 205 задает (образует) продольную ось 230 примерного реакторного устройства 200. Внешний электрод 210, в свою очередь, расположен концентрически с продольной осью 230, с внутренним диаметром, большим внешнего диаметра внутреннего электрода 205, задавая смещение между внутренним электродом 205 и внешним электродом 210. Таким образом, компоновка электродов задает камеру 235 между внутренним электродом 205 и внешним электродом 210. В ходе работы в камере 235 генерируется термоядерная плазма, которая поддерживается на уровне или вблизи критичности посредством комбинированного приложения электрических и магнитных полей.

В некоторых вариантах осуществления внутренний электрод 205 электрически соединен с высоковольтным источником 220 питания и выполнен с возможностью создавать электростатическое поле между внутренним электродом 205 и внешним электродом 210. Внутренний электрод 205 может представлять собой или включать в себя материал-эмиттер 240, так что внутренний электрод 205 выступает в качестве источника свободных электронов. Материал-эмиттер 240 может располагаться в виде эмиссионного покрытия на проводящем сердечнике. Таким образом, материал-эмиттер 240 выполнен с возможностью инжектировать электроны в камеру 235, когда внутренний электрод 205 запитывается и/или нагревается. Материал-эмиттер 240 может представлять собой или включать в себя огнеупорный материал, характеризуемый свойствами термоэлектронной эмиссии при температурах, характерных для реакций ядерного синтеза. Материал-эмиттер 240 может характеризоваться высокими свойствами эмиссии электронов посредством фотоэмиссии, термоэлектронной эмиссии или полевой эмиссии. Материал-эмиттер 240 может представлять собой или включать в себя вольфрам, торированный вольфрам, оксиды бария (например, Ва-О), гексаборид лантана (LaB_6), гексаборид церия (CeB_6), а также их смеси, сплавы, композиты или комбинации. В контексте примерного реактора 200 фотоэмиссия относится к материалу, который испускает электроны в камеру 235 в ответ на облучение энергетическими фотонами, такими как фотоны, генерируемые термоядерной плазмой.

Материал-эмиттер 240 выполнен с возможностью испускать электроны приблизительно нормально по отношению к продольной оси 230, по меньшей мере частично вследствие ориентации внутреннего электрода 205 относительно внешнего электрода 210. По сути, внутренний электрод 205 ориентирован так, чтобы минимизировать потери энергии тормозной способности вследствие столкновений с движущимися по орбите ионами, как подробнее описано со ссылкой на фиг. 5. Преимущественно, инжекция электронов нормально от внутреннего электрода 205 и

искривление траекторий электронов в том же направлении, что и у движущихся по орбите ионов, за счет силы Лоренца, создаваемой генераторами 215 магнитного поля, позволяет увеличить длины взаимодействия между электронами и ионами до расстояний порядка 1×10^8 см и может увеличивать вероятность реакции ядерного синтеза (например, как описано сечениями для конкретного взаимодействия и/или конкретной реакции). Преимущественно, инжекция электронов таким способом уменьшает эффекты пространственного заряда и позволяет термоядерной плазме становиться более плотной, чем при одном только электростатическом удержании ионов.

Например, при повышенных температурах, больших приблизительно 1000 К, материал-эмиттер 240 испускает электроны в камеру 235, уменьшая эффекты пространственного заряда и уплотняя плазму выше плотности, обеспечиваемой электростатическим удержанием ионов. Внутренний электрод 205 может быть функционально связан с одной или более системами нагрева для того, чтобы повышать температуру материала-эмиттера 240. Повышенная температура может быть получена с помощью нескольких способов и систем, включая, но не ограничиваясь ими, резистивный нагрев, индукционный нагрев и/или посредством электронной и ионной бомбардировки в ходе работы. Следует понимать, что материал-эмиттер 240 может генерировать значительный электронный ток при температурах ниже 1000 К, к примеру, при рабочих температурах примерного реакторного устройства 200.

Как описано выше, плотность ионов, а значит и мощность, доступная от примерного реакторного устройства 200, регулируется числом ионов, движущихся по орбите вокруг внутреннего электрода 205 (N). Число ионов может быть увеличено посредством эмиссии электронов из внутреннего электрода 205, чтобы сместить пределы пространственного заряда. Электроны могут удерживаться в реакторе в течение периодов времени за счет приложения осевого магнитного поля, соответствующего или превышающего условие отсечки Халла и работающего аналогично магнетрону для удержания электронов. При удержании электроны движутся на скоростях, которые уменьшают увлечение электронов и тормозную способность ионов топлива и продуктов реакции, за счет этого уменьшая потери кинетической энергии ионов к электронам и увеличивая скорость реакции ядерного синтеза и мощность в реакторе.

Генератор(ы) 215 магнитного поля могут быть расположены в коаксиальной компоновке относительно продольной оси 230. Таким образом, генератор(ы) 215 магнитного поля выполнены с возможностью формировать в камере 235 магнитное поле, практически параллельное продольной оси 230. Генератор(ы) 215 магнитного поля могут представлять собой или включать в себя электромагниты, постоянные магниты либо их комбинацию. Генератор(ы) 215 магнитного поля могут прикладывать магнитное поле с напряженностью в пределах от 0,01 Тесла до 10 Тесла. Генератор(ы) 215 магнитного поля могут поэтому служить в качестве магнетрона, генерирующего магнитное поле с напряженностью, превышающей условие отсечки Халла для данной реакции ядерного синтеза. Как описано выше, напряженность поля, а значит, и рабочие параметры

генератора(ов) 215 магнитного поля, используемых для того, чтобы превысить условие отсечки Халла, являются специфичными для каждого типа реакции ядерного синтеза. Помимо этого, напряженность магнитного поля может использоваться в качестве управляющей переменной для регулировки коэффициента k примерного реакторного устройства 200 при работе, как подробнее описано со ссылкой на фиг. 4.

В некоторых вариантах осуществления внутренний электрод 205 и внешний электрод 210 представляют собой тела вращения и выполнены по форме симметричными относительно продольной оси 230. В этом контексте «тело вращения» описывает форму, которая является симметричной относительно одной или более осей вращения, например, определяемую двумерной формой, которая является симметричной относительно оси в плоскости, пересекающей эту ось. В некоторых вариантах осуществления электроды 205 и 210 представляют собой тела вращения, которые имеют проемы, отверстия, каналы или другие признаки, которые не являются вращательно-симметричными относительно продольной оси 230, как подробнее описано ниже.

Таким образом, электродам 205 и 210 придана форма, позволяющая формировать в камере практически логарифмическое электростатическое поле при подаче питания. Логарифмическое электростатическое поле, как описано выше, означает электрическое поле, генерируемое между электродами 205-210, при этом внутренний электрод 205 служит отрицательным катодом, а внешний электрод 210 служит положительным анодом, причем напряженность электрического поля увеличивается логарифмически между внешним электродом 210 и внутренним электродом 205, что относится к условию «от положительного к отрицательному» для электрических полей.

В некоторых вариантах осуществления внутренний электрод 205 характеризуется большим единицы соотношением размеров вдоль продольной оси 230. В этом контексте термин «соотношение размеров» описывает соотношение первого характеристического размера, выставленного (совмещенного) с продольной осью 230, и второго характеристического размера, выставленного по нормали к продольной оси 230. Например, в том случае, когда внутренний электрод 205 представляет собой тело вращения, которое характеризуется радиальным размером, зависящим от осевого положения (например, $r=f(z)$), большее единицы соотношение размеров описывает конструкцию, в которой длина внутреннего электрода 205 больше самого широкого места внутреннего электрода 205. По сути, внутренний электрод 205 может образовывать осевой профиль вдоль продольной оси 230, который включает в себя одну или более областей большей ширины и одну или более областей меньшей ширины. Например, внутренний электрод 205 может образовывать поперечный профиль, выставленный с продольной осью 230, который включает в себя сужение на каждом конце, так что ширина внутреннего электрода 205 между его концами больше, чем на его концах.

В некоторых вариантах осуществления внешний электрод 210 имеет длину 245 вдоль продольной оси 230, большую наибольшего диаметра внутреннего электрода 205. Например, внешний электрод 210 может представлять собой тело вращения вокруг

продольной оси 230 и может образовывать отрицательное пространство относительно продольной оси 230, которое вместе со внутренним электродом 205 образует камеру 235. В этом примере внешний электрод 210 не контактирует с внутренним электродом 205 по длине 245, как проиллюстрировано на фиг. 2А-3.

Внешний электрод 210 может включать в себя одну, две или более оболочек, которые могут использоваться для возбуждения или демпфирования гармонического осевого движения ионов, параллельного продольной оси 230. В некоторых вариантах осуществления внешний электрод включает в себя две анодные оболочки 210-1 и 210-2, расположенные сбоку относительно продольной оси 230. Как описано выше, анодные оболочки 210-1 и 210-2 могут представлять собой тела вращения, симметричные относительно продольной оси 230. В этом контексте фраза «расположенные сбоку» относится к анодным оболочкам 210-1 и 210-2, располагающимся в примерном реакторном устройстве 200 в разных и/или неперекрывающихся положениях вдоль продольной оси 230. В некоторых вариантах осуществления анодные оболочки 210-1 и 210-2 соединены цепью 250 зеркального тока. В некоторых вариантах осуществления между анодными оболочками 210-1 и 210-2 расположен диэлектрический изолятор 255, который электрически изолирует их.

В некоторых вариантах осуществления внутренний электрод 205 и внешний электрод 210 электрически изолированы друг от друга первым диэлектрическим изолятором 260 и вторым диэлектрическим изолятором 265. Первый диэлектрический изолятор 260 может быть механически соединен с первым концом 270 внутреннего электрода 205 и может электрически изолировать высоковольтный источник 220 питания от внешнего электрода 210. Второй диэлектрический изолятор 265 может быть расположен в камере 235 между вторым концом 275 внутреннего электрода 205 и внешним электродом 210 и может электрически изолировать второй конец 275 от внешнего электрода 210. Первый диэлектрический изолятор 260 может образовывать изолированную полость 280. Высоковольтный источник 220 питания может по меньшей мере частично располагаться в изолированной полости 280.

Высоковольтный источник 220 питания может представлять собой или включать в себя источник постоянного напряжения, в том числе, но не ограничиваясь этим, источник Ван-де-Граафа, источник-пеллетрон либо твердотельный генератор с переключением питания. В некоторых вариантах осуществления высоковольтный источник 220 питания электрически соединен с внутренним электродом 205 и работает в диапазоне от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 4,0 МВ постоянного тока. Поскольку внутренний электрод 205 функционирует как в качестве источника электронов, инжектируемых в полость 235, так и в качестве источника электростатического поля, служащего для улавливания ионов на орбите вокруг внутреннего электрода 205, напряжение, прикладываемое к внутреннему электроду 205 высоковольтным источником 220 питания, может быть динамическим в течение одной или более стадий работы примерного реакторного устройства 200. Например, поток электронов и сила, прикладываемая к

движущимся по орбите ионам, могут масштабироваться пропорционально приложенному напряжению. По сути, приложенное напряжение может быть параметром управления для примерного реакторного устройства 200. Кроме того, приложенное напряжение может варьироваться в зависимости, по меньшей мере частично, от типа ионов, инжектированных в камеру 235. Как описано выше, сила, прикладываемая к ионам на орбите вокруг внутреннего электрода 205, является функцией отношения заряда к массе, так что приложенное напряжение может варьироваться в зависимости от массы ионов топлива, заряда ионов топлива или их комбинации.

Таким образом, высоковольтный источник 220 питания может работать от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 4,0 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 3,9 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 3,8 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 3,7 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 3,6 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 3,5 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 3,4 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 3,3 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 3,2 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 3,1 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 3,0 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 2,9 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 2,8 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 2,7 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 2,6 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 2,5 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 2,4 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 2,3 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 2,1 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 2,1 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 2,0 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 1,9 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 1,8 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 1,7 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 1,6 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 1,5 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 1,4 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 1,3 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 1,2 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 1,1 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 1,0 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 0,9 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 0,8 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 0,7 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 0,6 МВ постоянного

тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 0,5 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 0,4 МВ постоянного тока, от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 0,3 МВ постоянного тока, либо от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 0,2 МВ постоянного тока, включая их доли или интерполяции. Например, в некоторых вариантах осуществления высоковольтный источник 220 питания прикладывает отрицательное напряжение в примерно 650 кВ постоянного тока к внутреннему электроду 205. В этом контексте термин «примерно» используется для указания значения в пределах 10% от приведенного значения. Например, приведенное значение в примерно 650 кВ используется для указания значения от 585 кВ постоянного тока до 715 кВ постоянного тока. Следует понимать, что эти значения даны как абсолютные величины независимо от полярности. Например, на внутренний электрод 205 может подаваться отрицательное напряжение смещения относительно внешнего электрода 210, так что приложенное напряжение, подаваемое высоковольтным источником 220 питания на внутренний электрод 205, является отрицательным.

Экран 225 для защиты от излучения может представлять собой или включать в себя конструктивные элементы примерного реакторного устройства 200 либо дополнительный материал, в том числе, но не ограничиваясь ими, свинцовое или вольфрамовое экранирование, бассейны с водой и т.п. Примерный реактор 200 может быть по меньшей мере частично окружен экраном 225 для защиты от излучения, так что экран 225 для защиты от излучения может использоваться для поглощения и снижения потенциально вредного излучения. Хотя ядерный синтез практически не производит долгоживущих радиоактивных побочных продуктов, энергетические частицы могут производиться и могут проходить через физическую оболочку примерного реакторного устройства 200. По сути, экран 225 для защиты от излучения может представлять собой или включать в себя материалы, подобранные поглощать прогнозируемые энергетические частицы, исходя по меньшей мере частично из режима работы примерного реакторного устройства 200. Например, если примерное реакторное устройство 200 выполнено с возможностью выработки радиоизотопов для медицинского применения, экран 225 для защиты от излучения может быть сконструирован с возможностью поглощать энергетические нейтроны.

Фиг. 2В – схематичный рисунок, иллюстрирующий примерное реакторное устройство 200, включающее состоящий из одной части внешний анод 205, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления. Как проиллюстрировано на фиг. 2А, примерное реакторное устройство включает в себя внутренний электрод 205, внешний электрод 210, генераторы 215 магнитного поля, высоковольтный источник 220 питания и экран 225 для защиты от излучения. На фиг. 2В проиллюстрировано примерное реакторное устройство 200, включающее в себя канал(ы) 285 для текучей среды, отверстие(я) 290 и порт(ы) 295. Хотя обсуждение примерного реакторного устройства 200 сосредоточено на конструкции, включающей в себя состоящий из двух частей внешний электрод 210, примерное реакторное устройство 200 также может включать в себя

состоящий из одной части внешний электрод 210, как проиллюстрировано на фиг. 2В. Предполагается, что канал(ы) 285 для текучей среды, отверстие(я) 290 и/или порт(ы) 295 могут быть включены в любую конструкцию, а также в другие конструкции электродов с большим числом частей.

Канал(ы) 285 для текучей среды может (могут) быть встроен(ы) во внутренний электрод 205, внешний электрод 210, экран 225 для защиты от излучения или их комбинацию. Как показано, канал(ы) 285 для текучей среды образует(ют) один или более каналов во внешнем электроде 210. Таким образом, канал(ы) 285 для текучей среды может (могут) образовывать один или более контуров теплоносителя через внешний электрод 210, по которым может протекать теплоноситель. Теплоноситель, в свою очередь, может переносить тепло из примерного реакторного устройства 200 и может передавать тепло рабочему телу через теплообменник, внешний по отношению к примерному реакторному устройству 200, чтобы приводить в действие теплогенератор(ы) 120 по фиг. 1. Аналогично, канал(ы) для текучей среды может (могут) быть соединен(ы), непосредственно или через теплообменник, с термоэлектрическими генераторами, турбинами и/или турбомашинным оборудованием, так что тепло, генерируемое внутри по отношению к примерному реакторному устройству 200, может отводиться. Преимущественно, канал(ы) 285 для текучей среды может (могут) как извлекать полезную энергию из примерного реакторного устройства 200, так и служить для управления рабочими параметрами. В иллюстративном примере канал(ы) 285 для текучей среды, расположенный(ые) внутри внутреннего электрода 205, может (могут) использоваться для модуляции термоэлектронной эмиссии из материала-эмиттера 240, поскольку отвод тепла из внутреннего электрода 205 модулирует температуру, что, в свою очередь, влияет на термоэлектронную эмиссию.

Теплоноситель может представлять собой или включать в себя текучую жидкость, которая проявляет фазовый переход в газ при температурах выше рабочей температуры примерного реакторного устройства 200 и фазовый переход в твердое тело при температурах ниже рабочей температуры примерного реакторного устройства 200. Например, если рабочая температура термоядерной плазмы в камере 235 может составлять примерно 1000 К, канал(ы) 285 для текучей среды может (могут) быть выполнен(ы) с возможностью принимать теплоноситель, включая, но не ограничиваясь ими, солевой расплав, воду высокого давления, сверхкритический диоксид углерода или другие системы теплоносителей, как описано со ссылкой на фиг. 1.

Отверстие(я) 290 может (могут) быть образовано(ы) в одной или более точек во внешнем электроде 210, так что примерное реакторное устройство может быть функционально связано с источником ионов, как подробнее описано со ссылкой на фиг. 3. Отверстие(я) 290 может (могут) быть практически линейным(и) и может (могут) быть соединено(ы) с источником ионов посредством вакуумплотного механического соединения, например, с затвором, запорным клапаном и/или одной или более дифференциальных вакуумных стадий, размещенных между источником ионов и камерой

235, так что ионы могут управляемо инжектироваться в камеру 235 по точной траектории инъекции. С этой целью отверстие(я) 290 может (могут) задавать выставление относительно продольной оси 230, которое задает траекторию инъекции. Траектория инъекции, в свою очередь, может соответствовать углу наклона входа на стабильную эллиптическую орбиту иона с данным отношением массы к заряду вокруг внутреннего электрода 205. В этом контексте термин «угол наклона входа» описывает угол, принимаемый положительно заряженным ионом в трех измерениях вдоль выставления отверстия 290 относительно продольной оси 230, причем этот угол соответствует траектории, с большой вероятностью приводящей к улавливанию иона на эллиптической орбите вокруг внутреннего электрода 205. Как описано выше, точка инъекции, кинетическая энергия и угол наклона входа могут зависеть от отношения массы к заряду ионов топлива, так что параметры инъекции могут с точностью определяться на основе целевого применения с использованием компьютерного моделирования. В иллюстративном примере ионы могут включать протоны ($m/z=1$), ионы дейтерия ($m/z=2$), ионы трития ($m/z=3$), ионы лития-6 ($m/z=6$) или ионы бора-11 ($m/z=11$).

Внешний электрод 210 дополнительно образует порт(ы) 295, который(е) простираются через внешний электрод 210 в камеру 235. Порт(ы) 295 может (могут) быть проточно соединен(ы) с внешней по отношению к примерному реакторному устройству 200 вакуумной системой, которая может использоваться для того, чтобы создавать и поддерживать вакуумную среду между внутренним электродом 205 и внешним электродом 210. Посредством одного или более портов 295 может создаваться состояние значительного вакуума, например, при численных плотностях от 1×10^{10} до 1×10^{16} атомов/см³ (соответствующих приблизительно от 50 микроПа до 50 Па). Преимущественно, созданный таким образом вакуум может повышать эффективность реакции, уменьшая потери на столкновение с блуждающими атомами газа, которые диффундируют в камеру 235 в ходе работы.

С точки зрения тройного произведения – показателя качества, более высокие численные плотности влекут за собой более высокие магнитные поля в камере 235, позволяя более высокому потоку электронов смещать эффекты пространственного заряда, при поддержании температуры и времени удержания в диапазонах, соответствующих целевому значению для намеченного рабочего режима ядерного синтеза, как подробнее описано со ссылкой на фиг. 7. С этой целью примерное реакторное устройство 200 работает при численных плотностях от примерно 1×10^{11} до примерно 1×10^{18} атомов/см³, от примерно 1×10^{12} до примерно 1×10^{18} атомов/см³, от примерно 1×10^{13} до примерно 1×10^{18} атомов/см³, от примерно 1×10^{14} до примерно 1×10^{18} атомов/см³, от примерно 1×10^{15} до примерно 1×10^{18} атомов/см³, от примерно 1×10^{16} до примерно 1×10^{18} атомов/см³, от примерно 1×10^{17} до примерно 1×10^{18} атомов/см³, включая их доли или интерполяции. Например, примерное реакторное устройство 200 может работать от примерно 1×10^{13} до примерно 1×10^{15} атомов/см³, поддерживая чистый положительный выход энергии из примерного реакторного устройства 200.

Фиг. 2С – схематичный рисунок, иллюстрирующий примерное реакторное устройство 200, включающее состоящий из двух частей внешний анод 210, в трехчетвертном разрезе, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления. Вид в разрезе на фиг. 2С предназначен иллюстрировать вращательную симметрию примерного реакторного устройства 200 относительно продольной оси 230. Как описано со ссылкой на фиг. 2А и фиг. 2В, примерное реакторное устройство 200 и составляющие элементы, такие как внутренний электрод 205, внешний электрод 210, генераторы 215 магнитного поля и камера 235.

Фиг. 3 – схематичный рисунок, иллюстрирующий примерную систему 300 инъекции ионов, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления. Примерная система 300 инъекции ионов проиллюстрирована без других компонентов примерного реакторного устройства 200, но следует понимать, что описанные элементы представляют собой компоненты примерного источника 110 ионов топлива в сочетании с примерным реакторным устройством 200, выполненного с возможностью инжектировать ионы в камеру 235. Примерная система 300 инъекции ионов включает в себя источник 305 ионов и оптику 310 пучка для формирования и инъекции ионов 315 в камеру 235.

Источник 305 ионов проиллюстрирован в виде плазменного источника ионов, такого как дуоплазматрон, устройство электронного циклотронного резонанса, устройство с индуцированной микроволнами плазмой, источник ионов с индуктивно-связанной плазмой или устройство другой конструкции, которое генерирует обогащенную ионами плазму. В некоторых вариантах осуществления источник 305 ионов включает в себя дуоплазматрон. В иллюстративном примере дуоплазматрона пучок ионов получается из плазмы, удерживавшейся в полой камере между анодом и катодом. Ионы 315 ускоряют, коллимируют, формируют и/или фокусируют с использованием оптики 310 пучка, такой как линза Эйнцеля. Например, для того, чтобы сгенерировать пучок протонов, водородсодержащий исходный газ может диссоциироваться в плазме, и пучок ионов водорода может быть в дальнейшем извлечен посредством вытягивающей сетки, сформирован, коллимирован и направлен в отверстие 290. Аналогичный подход может применяться для формирования пучков более крупных ионов, исходя из выбора газа-источника ионов. В некоторых вариантах осуществления ионы 315 инжектируются в камеру 235 через отверстие 290, по траектории, вероятно приводящей к улавливанию иона 315 на орбите 320 вокруг внутреннего электрода 205, как подробнее описано со ссылкой на фиг. 2А и фиг. 2В. Траектория может соответствовать углу, тангенциальному (касательному) к поверхности внутреннего электрода. Тангенциальный угол может повышать эффективность улавливания и может «вливать» ионы 315 на орбиту 320.

Хотя используется термин «оптика», следует понимать, что компоненты оптики 310 пучка работают за счет приложения электрических полей для формирования ионов 315 в пучок и перенаправления этого пучка ионов 315 в камеру 235 через отверстие 290. Аналогично, хотя фиг. 3 иллюстрирует только часть разреза примерного реакторного устройства 200 вдоль продольной оси 230, следует понимать, что в проиллюстрированной

примерной конструкции внешний электрод 210 и внутренний электрод 205 представляют собой тела вращения, симметричные относительно продольной оси 230.

Фиг. 4 – схематичный рисунок, иллюстрирующий примерное реакторное устройство 200 и примерную конструкцию генератора 215 магнитного поля, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления. Примерная конструкция генератора 215 магнитного поля может быть реализована в примерном реакторном устройстве 200, как подробнее описано со ссылкой на фиг. 2А и фиг. 2В. Примерная конструкция генератора 215 магнитного поля включает в себя генераторы 215 магнитного поля, расположенные вокруг камеры 235, для создания в камере 235 магнитного поля 405, практически параллельного продольной оси 230.

Генераторы 215 магнитного поля могут быть размещены около камеры 235 таким образом, чтобы внутри камеры 235 полярность магнитного поля 405 совпадала с продольной осью 230. В некоторых вариантах осуществления магнитное поле 405 может быть ориентировано с первой полярностью так, что электроны, эмитированные из внутреннего электрода 205, вынуждены двигаться по орбите в том же направлении, что и положительные ионы, в соответствии с приложенной к электронам силой Лоренца. В некоторых вариантах осуществления магнитное поле 405 может быть ориентировано со второй полярностью, приблизительно противоположной первой полярности, так что электроны, эмитированные из внутреннего электрода 205, вынуждены двигаться по орбите в противоположном положительным ионам направлении.

Например, при более сильной напряженности магнитного поля, сверх условия отсечки Халла, эмитированные в камеру 235 электроны вынуждены быстро двигаться обратно к внутреннему электроду 205, исключая короткое замыкание между электродами 205 и 210 и уменьшая эффекты пространственного заряда, которые, в свою очередь, делают возможным уплотнение термоядерной плазмы. В отличие от этого, при более слабой напряженности магнитного поля, электроны могут испускаться без отклонения от внешнего электрода 210 и могут вызывать короткое замыкание или образование дуги в термоядерной плазме. Чтобы поддерживать термоядерную плазму в пределах целевого диапазона тройного произведения при ядерном синтезе, магнитное поле 405, используемое для захвата электронов на орбитальном пути вокруг внутреннего электрода 205 в камере 235, может быть приложено при от примерно 0,01 Тесла до примерно 10,0 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 9,0 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 8,0 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 7,0 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 6,0 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 5,0 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 4,0 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 3,0 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 2,0 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 1,9 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 1,8 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 1,7 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 1,6 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 1,5 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 1,4 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 1,3 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 1,2 Тесла, от

примерно 0,01 Тесла до примерно 1,1 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 1,0 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 0,9 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 0,8 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 0,7 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 0,6 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 0,5 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 0,4 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 0,3 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 0,2 Тесла, от примерно 0,01 Тесла до примерно 0,1 Тесла или от примерно 0,01 Тесла до примерно 0,05 Тесла, включая их доли или интерполяции.

Фиг. 5 – схематичный рисунок, иллюстрирующий представление на виде с торца примерного реакторного устройства 200 по фиг. 2, описывающее орбитальные пути эмитированных электронов 505 и движущихся по орбите ионов 510, в соответствии с некоторыми вариантами осуществления. Проиллюстрированные орбитальные пути нарисованы не в масштабе, а вместо этого предназначены иллюстрировать концепции работы примерного реакторного устройства 200. Следует понимать, что форма, относительные размеры и орбитальные пути, указываемые стрелками, являются иллюстративными и неограничивающими.

Как подробнее описано со ссылкой на фиг. 2, в ходе работы примерного реакторного устройства 200 ионы 510 инжектируют тангенциально между внутренним электродом 205 и внешним электродом 210 и в электростатическое поле с достаточной энергией для того, чтобы перейти на стабильные эллиптические орбиты вокруг внутреннего электрода 205. Во время движения по эллиптической орбите 520 ионы 510 ускоряются к отрицательно смещенному внутреннему электроду 205, преобразуя потенциальную энергию в кинетическую энергию, до достижения точки перигея эллиптической орбиты 520. После достижения перигея ионы 510 замедляются при перемещении от отрицательного потенциала катода и накоплении потенциальной энергии до достижения точки апогея эллиптической орбиты 520. Ионы 510 могут совершать миллионы эллиптических орбит 520 в реакторе в течение периода времени порядка одной секунды. Дополнительно, эллиптическая ионная орбита 520 может демонстрировать апсидальную прецессию вокруг центрального катода 205, так что эллиптические орбиты 520 ионов 510 могут пересекать эллиптические орбиты других ионов 510 вплоть до и превышая миллионы раз, увеличивая вероятность возникновения относительно маловероятного события 525 ядерного синтеза. В конечном итоге, столкновения между ионами 510 на перекрывающихся орбитальных траекториях приводят к событиям 525 ядерного синтеза, высвобождающим продукты реакции ядерного синтеза, в том числе, но не ограничиваясь ими, заряженные частицы (альфа-частицы, гелий-3, протоны, тритий и т.д.), излучение и тепловую энергию.

Внутренний электрод 205, включающий в себя материал-эмиттер 240, инжектирует электроны 505 в камеру 235. Посредством взаимодействия с магнитным полем 405 электроны 505 отклоняются на частичные орбиты вокруг внутреннего электрода 205, в конечном итоге возвращаясь к внутреннему электроду 205. В некоторых вариантах

осуществления материал-эмиттер 240 представляет собой изотропный эмиттер, так что электроны испускаются во всех радиальных направлениях практически одинаково, что демонстрируется множественными орбитальными путями 515 электронов. Как результат, влияние электронов 505 на плотность ионов 510 в камере 235 может быть практически однородным относительно внутреннего электрода 205. Преимущественно, поддержание практически симметричного распределения электронов 505 вокруг внутреннего электрода 205 позволяет уменьшить самоструктурирование в плазмах, которое может препятствовать ядерному синтезу, вызывать дуговой разгон или создавать другие эксплуатационные проблемы.

Фиг. 6 – график 600, иллюстрирующий скорость реакции (ордината) и плотность ионов (абсцисса) для примерного реакторного устройства 105 с орбитальным удержанием в соответствии с некоторыми вариантами осуществления. График 600 иллюстрирует различные рабочие режимы 605, характеризуемые различной плотностью ионов, измеряемой в атомах/см³, и скоростью реакции, измеряемой в событиях ядерного синтеза в секунду, нанесенные вдоль рабочей кривой 610, описывающей иллюстративное рабочее окно примерного устройства 105. Следует понимать, что подробности, описанные в отношении примерного реакторного устройства 200, такие как рабочие параметры, внутренние конструкции и конфигурации материалов, могут быть сконфигурированы таким образом, что примерная система 100 работает в одном или более из рабочих режимов 605. Рабочие режимы 605 соответствуют различным применениям, как подробнее описано со ссылкой на фиг. 1. Например, график 600 включает в себя первый режим 605-1, в котором примерное устройство 105 работает в качестве нейтронного генератора, применяемого, например, для нейтронной визуализации. Второй режим 605-2 описывает работу в качестве нейтронного генератора с высокой плотностью потока, например, при производстве изотопов для медицинского применения. Третий режим 605-3 описывает работу в качестве компактного источника питания, у которого скорость реакции и плотность ионов являются достаточно высокими для того, чтобы генерировать чистую положительную энергию из примерного устройства 105.

Как подробнее описано со ссылкой на фиг. 1-5, рабочие режимы 605 не являются дискретными, а скорее включаются в качестве примеров в пределы диапазона рабочей кривой 610, чтобы иллюстрировать зависимость скорости реакции от плотности ионов для данного набора условий. Например, рабочая кривая 610 может описывать взаимосвязь между плотностью ионов и скоростью реакции для данных температуры электронов, рабочего давления, напряженности магнитного поля и т.д. В случае графика 600, рабочая кривая 610 описывает значения скорости реакции и плотности ионов для примерного устройства 105, работающего при средней температуре электронов в 125 кэВ.

График 600 иллюстрирует то, что примерное устройство 105 может работать в качестве источника нейтронов и/или в качестве источника питания, но эти различные рабочие режимы 605 могут подразумевать различные рабочие параметры и конфигурации. Конструктивно, специализированное устройство-генератор нейтронов может не включать

в себя одного или более компонентов, используемых для извлечения мощности из термоядерной плазмы, в том числе, но не ограничиваясь ими, цепь 250 зеркального тока, диэлектрический изолятор 255 или составные внешние электродные оболочки 210-1 и 210-2. График 600 также иллюстрирует влияние плотности ионов на температуру ионов и то, как плотность ионов и температура ионов коррелируются с частотой рециркуляции и сечением синтеза (σ), как подробнее описано выше со ссылкой на теоретическое введение.

Преимущественно, чистая мощность ядерного синтеза, превышающая 1 кВт, соответствующая третьему рабочему режиму 605-3, может генерироваться примерным устройством 105 с размером камеры порядка 10 см. Размер камеры может быть описан диапазоном, в пределах которого работает примерное устройство 105, как описано со ссылкой на фиг. 6. Например, внутренний радиус, соответствующий радиусу внутреннего электрода, может составлять от примерно 0,1 см до примерно 40,0 см. Тем не менее, по мере того, как внутренний радиус снижается, электронный поток и/или число электронов, инжектированных из материала-эмиттера 240 в камеру 235, также может снижаться, так что конструктивное решение приближается к конструктивному решению ловушки Кингдона, которая становится ограниченной по своей электронной эмиссии вследствие уменьшенной площади поверхности, а значит, число событий ядерного синтеза, которые могут иметь место за данный период времени, не генерирует чистого положительного выхода энергии. Напротив, если расстояние между внутренним электродом 205 и внешним электродом 210 является относительно небольшим, механизмы потерь, такие как столкновение ионов с внутренним электродом 205, тормозные потери и дугообразование или закорачивание электронов с внешним электродом 210, становятся значительными, тем самым уменьшая скорость реакции ядерного синтеза. Таким образом, внутренний электрод может иметь радиус в пределах от примерно 0,1 см до примерно 40,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 30,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 20,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 15,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 10,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 9,5 см, от примерно 0,1 см до примерно 9,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 8,5 см, от примерно 0,1 см до примерно 8,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 7,5 см, от примерно 0,1 см до примерно 7,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 6,5 см, от примерно 0,1 см до примерно 6,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 5,5 см, от примерно 0,1 см до примерно 5,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 4,5 см, от примерно 0,1 см до примерно 4,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 3,5 см, от примерно 0,1 см до примерно 3,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 2,5 см, от примерно 0,1 см до примерно 2,0 см, от примерно 0,1 см до примерно 1,5 см, от примерно 0,1 см до примерно 1,0 см либо от примерно 0,1 см до примерно 0,5 см, включая их доли и интерполяции.

Аналогично, размеры внешнего электрода 210 аналогично характеризуются диапазоном, в пределах которого работает примерное устройство 105, как описано со ссылкой на фиг. 6. Например, внешний радиус, соответствующий радиусу внешнего электрода 210, обращенного к камере 235, может составлять от примерно 1 см до примерно 20 см. По мере того, как внешний радиус снижается, поток электронов во

внешний электрод 205 может увеличиваться, так что эффект инжекции электронов на пространственный заряд смягчается, уменьшая плотность ионов и сдвигая устройство влево на рабочей кривой 610. Аналогично, когда внешний радиус увеличивается, энергия, требуемая для поддержания компактных орбит ионов и электронов, увеличивается по мере увеличения расстояния между камерой 235 и генераторами 215 магнитного поля. Таким образом, внешний электрод может иметь радиус в пределах от примерно 1 см до примерно 100 см, от примерно 1 см до примерно 90 см, от примерно 1 см до примерно 80 см, от примерно 1 см до примерно 70 см, от примерно 1 см до примерно 60 см, от примерно 1 см до примерно 50 см, от примерно 1 см до примерно 40 см, от примерно 1 см до примерно 30 см, от примерно 1 см до примерно 20 см, от примерно 1 см до примерно 19 см, от примерно 1 см до примерно 18 см, от примерно 1 см до примерно 17 см, от примерно 1 см до примерно 16 см, от примерно 1 см до примерно 15 см, от примерно 1 см до примерно 14 см, от примерно 1 см до примерно 13 см, от примерно 1 см до примерно 12 см, от примерно 1 см до примерно 11 см, от примерно 1 см до примерно 10 см, от примерно 1 см до примерно 9 см, от примерно 1 см до примерно 8 см, от примерно 1 см до примерно 7 см, от примерно 1 см до примерно 6 см, от примерно 1 см до примерно 5 см, от примерно 1 см до примерно 4 см, от примерно 1 см до примерно 3 см либо от примерно 1 см до примерно 2 см, включая их доли и интерполяции.

Фиг. 7 является блок-схемой, иллюстрирующей примерный процесс 700 генерирования энергии или нейтронов с использованием реакторного устройства с орбитальным удержанием в соответствии с некоторыми вариантами осуществления. Этапы примерного процесса 700 представляют собой операции, которые могут быть реализованы автономно (например, без вмешательства человека) посредством вычислительного устройства. Вычислительное устройство может представлять собой или включать в себя схему управления, функционально связанную с компонентами реакторного устройства с орбитальным удержанием, такого как примерное реакторное устройство 200 по фиг. 2А, фиг. 2В и фиг. 2С, так что операциями примерного процесса 700 можно динамически управлять с точки зрения синхронизации, частоты и/или величины, в качестве части схемы управления для поддержания критичности (например, $k \approx 1$) ядерного синтеза в камере 235. В связи с этим, следует понимать, что некоторые из операций, проиллюстрированных на фиг. 7, можно опустить, переупорядочить и/или повторить, в зависимости, например, от целевого применения примерного реакторного устройства 200.

На этапе 705, примерный процесс 700 включает в себя подачу питания на внутренний электрод 205. Напряжение, прикладываемое к внутреннему электроду 205, например, высоковольтным источником 220 питания, может составлять от 50 кВ постоянного тока до примерно 4,0 МВ постоянного тока, включая их доли, как подробнее описано со ссылкой на фиг. 2А. Подача питания на внутренний электрод 205 служит для захвата ионов на эллиптические орбиты вокруг продольной оси 230, как подробнее описано со ссылкой на фиг. 5, а также служит для увеличения эмиссии электронов из

материала-эмиттера 240 посредством полевой эмиссии. Нагрев внутреннего электрода 205 может увеличивать эмиссию электронов из материала-эмиттера 240 посредством термоэлектронной эмиссии. Нагрев может быть активным, посредством резистивных нагревательных элементов или резистивного нагрева материала-эмиттера 240, либо может быть пассивным посредством столкновений ионов и электронов с внутренним электродом 205.

На этапе 710 примерный процесс 700 включает в себя инжектирование ионов в камеру 235. Как подробнее описано со ссылкой на фиг. 3, ионы 315 могут инжектироваться в камеру 235 под углом, тангенциальным к поверхности внутреннего электрода. Инжекция под тангенциальным углом может заставлять ионы взаимодействовать с электростатическим полем и входить на орбиту 320 вокруг внутреннего электрода 205. Инжекция ионов может представлять собой прерывистый или непрерывный процесс в качестве части поддержания критичности посредством управления параметрами энергии и популяции ионов в ходе работы примерного реакторного устройства 200. В некоторых вариантах осуществления инъекцией ионов можно управлять в качестве управляющей переменной как части системы управления с замкнутым контуром.

На этапе 715 примерный процесс 700 включает в себя создание магнитного поля 405 в камере 235. Магнитное поле 405 может быть создано генераторами 215 магнитного поля, выставленными с продольной осью 230, с использованием компоновки генераторов 215 магнитного поля, которая создает магнетрон в камере 235. В качестве части улавливания электронов в камере 235 магнитное поле 405 может характеризоваться интенсивностью, соответствующей условию отсечки Халла, которое перенаправляет электроны обратно к внутреннему электроду 205. Как подробнее описано со ссылкой на фиг. 5, электронные орбиты 515 могут быть частичными, так что электроны могут образовывать практически круговую орбиту, которая не замыкает цепь вокруг внутреннего электрода 205, хотя могут возникать и полные (замкнутые) орбиты электронов.

В некоторых вариантах осуществления примерный процесс 700 может необязательно включать в себя протекание теплоносителя через каналы 285. Если рассеяние мощности в примерном реакторном устройстве 200 генерирует тепло, протекание теплоносителя через каналы 285 может извлекать тепловую энергию из реакций ядерного синтеза и может служить параметром управления для поддержания стабильной работы реактора. Как подробнее описано со ссылкой на фиг. 1, тепло, отводимое из примерного реакторного устройства 200, может быть преобразовано в электричество с использованием термоэлектрических генераторов, турбин и т.п. или может использоваться для нагрева посредством соединения с теплообменниками. В некоторых вариантах осуществления теплоноситель может представлять собой или включать в себя материалы, которые являются жидкими при повышенных температуре и/или давлении, к примеру, вплоть до 1000 К включительно.

В качестве части выработки электроэнергии в контексте примерной системы 100 по фиг. 1 примерный процесс 700 может необязательно включать в себя подачу РЧ-сигнала напряжения на внешний электрод 210 на этапе 725. Осевое гармоническое движение движущихся по орбите ионов может демпфироваться посредством приложения РЧ-напряжения к цепи 250 зеркального тока. Таким образом, электричество может непосредственно извлекаться из термоядерных плазм и может преобразовываться в полезное электричество с помощью силовой электроники, в том числе инверторов или выпрямителей, но не ограничиваясь ими.

Таким образом, с использованием тепловой и электрической энергии, извлеченной из примерного устройства, примерный процесс 700 может необязательно включать в себя преобразование энергии в электричество на этапе 730. Например, в том случае, когда примерное реакторное устройство 200 работает в качестве источника питания (например, третий рабочий режим 605-3 по фиг. 6), чистая мощность ядерного синтеза из примерного устройства 200 может быть преобразована в электричество для распределения в энергосеть и/или для накопления в конденсаторах, аккумуляторах, наливном водохранилище, наполняемом насосной станцией, и т.п. Напротив, в том случае, когда примерное реакторное устройство 200 работает в качестве нейтронного источника, прямая выработка электроэнергии на этапе 725 может быть исключена, и примерное реакторное устройство 200 может работать без соединения с теплогенераторами 120.

Поясненные выше процессы описываются с точки зрения компьютерного программного обеспечения и аппаратных средств. Описанные методы могут составлять машиноисполняемые инструкции, воплощенные на материальном или невременном машиночитаемом (например, читаемом компьютером) носителе данных, которые, будучи исполняемыми машиной, заставляют машину выполнять описанные операции. Дополнительно, процессы могут быть реализованы в аппаратных средствах, таких как специализированная интегральная схема (ASIC), или иным образом.

Материальный машиночитаемый носитель данных включает в себя любой механизм, который обеспечивает (т.е. сохраняет) информацию в невременной форме, доступной машине (например, компьютеру, сетевому устройству, персональному цифровому помощнику, производственному инструменту, любому устройству с набором из одного или более процессоров и т.д.). Например, машиночитаемый носитель данных включает записываемые/незаписываемые носители (например, постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), носители данных на магнитных дисках, оптические носители данных, устройства флэш-памяти и т.д.).

Вышеприведенное описание проиллюстрированных вариантов осуществления изобретения, включая то, что описано в реферате, не предназначено быть исчерпывающим либо ограничивать изобретение точными раскрытыми формами. Хотя конкретные варианты осуществления изобретения и его примеры описаны здесь в качестве иллюстрации, возможны различные модификации в пределах объема изобретения, как будет понятно специалистам в данной области техники.

Эти модификации могут вноситься в изобретение в свете вышеприведенного подробного описания. Термины, используемые в нижеприведенной формуле изобретения, не должны истолковываться как ограничивающие изобретение конкретными вариантами осуществления, раскрытыми в описании изобретения. Наоборот, объем изобретения должен полностью определяться нижеследующей формулы изобретения, которая должна истолковываться в соответствии с установленными доктринами толкования формулы изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство ядерного синтеза с орбитальным удержанием, содержащее:
 - катодный внутренний электрод, образующий продольную ось устройства, причем внутренний электрод содержит материал-эмиттер;
 - анодный внешний электрод, концентрический с продольной осью и образующий камеру между внутренним электродом и внешним электродом; и
 - множество генераторов магнитного поля, расположенных в коаксиальной компоновке относительно продольной оси, причем упомянутое множество генераторов магнитного поля выполнены с возможностью формировать в камере магнитное поле, параллельное продольной оси.
2. Устройство по п. 1, причем внутренний и внешний электроды представляют собой тела вращения, симметричные относительно продольной оси, и выполнены с формой, позволяющей формировать в камере практически логарифмическое электростатическое поле при подаче питания.
3. Устройство по любому из предшествующих пунктов, причем внутренний электрод характеризуется большим единицы соотношением размеров вдоль продольной оси, и при этом внешний электрод имеет длину вдоль продольной оси, превышающую наибольший диаметр внутреннего электрода.
4. Устройство по любому из предшествующих пунктов, причем внешний электрод содержит:
 - первую анодную оболочку и вторую анодную оболочку, расположенные сбоку относительно продольной оси; и
 - диэлектрический изолятор, расположенный между первой анодной оболочкой и второй анодной оболочкой и электрически изолирующий их.
5. Устройство по любому из предшествующих пунктов, причем магнитное поле характеризуется напряженностью магнитного поля, превышающей условие отсечки Халла, для улавливания электронов на орбитальном пути вокруг внутреннего электрода в камере.
6. Устройство по любому из предшествующих пунктов, причем упомянутое множество генераторов магнитного поля содержит постоянные магниты.
7. Устройство по любому из предшествующих пунктов, причем упомянутое множество генераторов магнитного поля содержит электромагниты.
8. Устройство по любому из предшествующих пунктов, дополнительно содержащее высоковольтный источник питания, электрически соединенный с внутренним электродом и работающий в диапазоне от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 4,0 МВ постоянного тока.
9. Устройство по любому из предшествующих пунктов, причем внутренний электрод образует первый конец и второй конец, а устройство дополнительно содержит:
 - первый диэлектрический изолятор, механически соединенный с первым концом и изолирующий первый конец от внешнего электрода; и

второй диэлектрический изолятор, расположенный в камере между вторым концом и внешним электродом и изолирующий второй конец от внешнего электрода.

10. Устройство по п. 9, причем первый диэлектрический изолятор образует изоляционную полость и электрически изолирует высоковольтный источник питания от внешнего электрода.

11. Устройство по любому из предшествующих пунктов, причем внешний электрод образует отверстие, причем выставление отверстия задает траекторию инъекции, соответствующую углу наклона входа на стабильную эллиптическую орбиту иона с данным отношением массы к заряду вокруг внутреннего электрода.

12. Устройство по п. 11, причем ион представляет собой протон ($m/z=1$), ион дейтерия ($m/z=2$), ион трития ($m/z=3$), ион лития-6 ($m/z=6$) или ион бора-11 ($m/z=11$).

13. Устройство по любому из предшествующих пунктов, причем внешний электрод дополнительно образует порт, проточно соединенный с камерой и внешней средой, причем порт выполнен с возможностью проточного соединения с вакуумной системой.

14. Устройство по любому из предшествующих пунктов, причем материал-эмиттер размещен на внутреннем электроде или встроен во внутренний электрод, и при этом материал-эмиттер выполнен с возможностью инжектировать электроны в камеру при подаче питания на внутренний электрод.

15. Устройство по любому из предшествующих пунктов, причем материал-эмиттер представляет собой материал-термоэлектронный эмиттер.

16. Устройство по любому из предшествующих пунктов, дополнительно содержащее устройство зеркального тока, электрически соединенное с внешним электродом и выполненное с возможностью генерировать электрическую энергию из множества заряженных частиц, движущихся по орбите вокруг внутреннего электрода, причем упомянутое множество заряженных частиц проявляет гармоническое осевое движение, выставленное с продольной осью.

17. Устройство по любому из предшествующих пунктов, дополнительно содержащее канал для текучей среды, расположенный во внешнем электроде или внутреннем электроде.

18. Устройство по любому из предшествующих пунктов, при этом устройство характеризуется физическими размерами порядка десятков сантиметров.

19. Устройство по любому из предшествующих пунктов, при этом устройство электрически соединено с системой электропитания, выполненной с возможностью принимать электрическое питание или нагретый теплоноситель из устройства.

20. Способ генерирования энергии ядерного синтеза с орбитальным удержанием в устройстве ядерного синтеза, при этом устройство ядерного синтеза содержит:

катодный внутренний электрод, образующий продольную ось устройства, причем внутренний электрод содержит материал-эмиттер;

анодный внешний электрод, концентрический с продольной осью и образующий камеру между внутренним электродом и внешним электродом; и

множество генераторов магнитного поля, расположенных в коаксиальной компоновке относительно продольной оси устройства, причем упомянутое множество генераторов магнитного поля выполнены с образованием магнетрона; и

при этом способ включает:

подачу питания на внутренний электрод напряжением от примерно 50 кВ постоянного тока до примерно 4,0 МВ постоянного тока, с формированием тем самым логарифмического электростатического поля между внутренним электродом и внешним электродом и инжектированием множества электронов в камеру;

инжектирование в камеру пучка ионов топлива под углом, тангенциальным к поверхности внутреннего электрода, заставляя ионы топлива взаимодействовать с электростатическим полем и входить на эллиптическую орбиту вокруг внутреннего электрода; и

создание магнитного поля, выставленного с продольной осью, с использованием упомянутого множества генераторов магнитного поля, причем магнитное поле характеризуется интенсивностью, соответствующей условию отсечки Халла, и перенаправляет электроны обратно к внутреннему электроду.

21. Способ по п. 20, причем устройство ядерного синтеза дополнительно содержит канал для текучей среды, образованный во внутреннем электроде или внешнем электроде, при этом способ дополнительно включает:

протекание теплоносителя через канал для текучей среды;

нагрев теплоносителя за счет контакта с внешним электродом; и

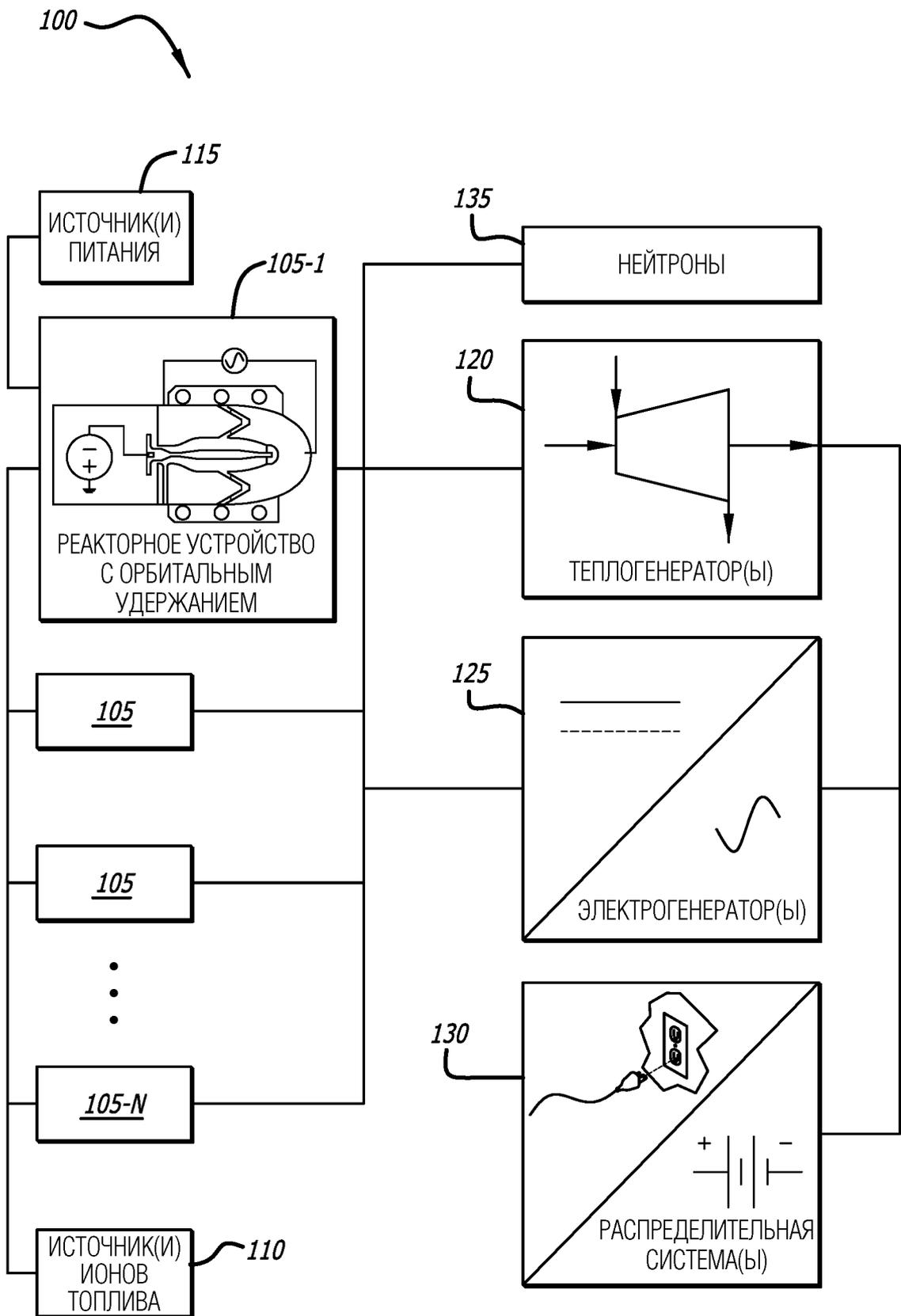
генерирование электричества с использованием нагретого теплоносителя.

22. Способ по пп. 20-21, дополнительно включающий:

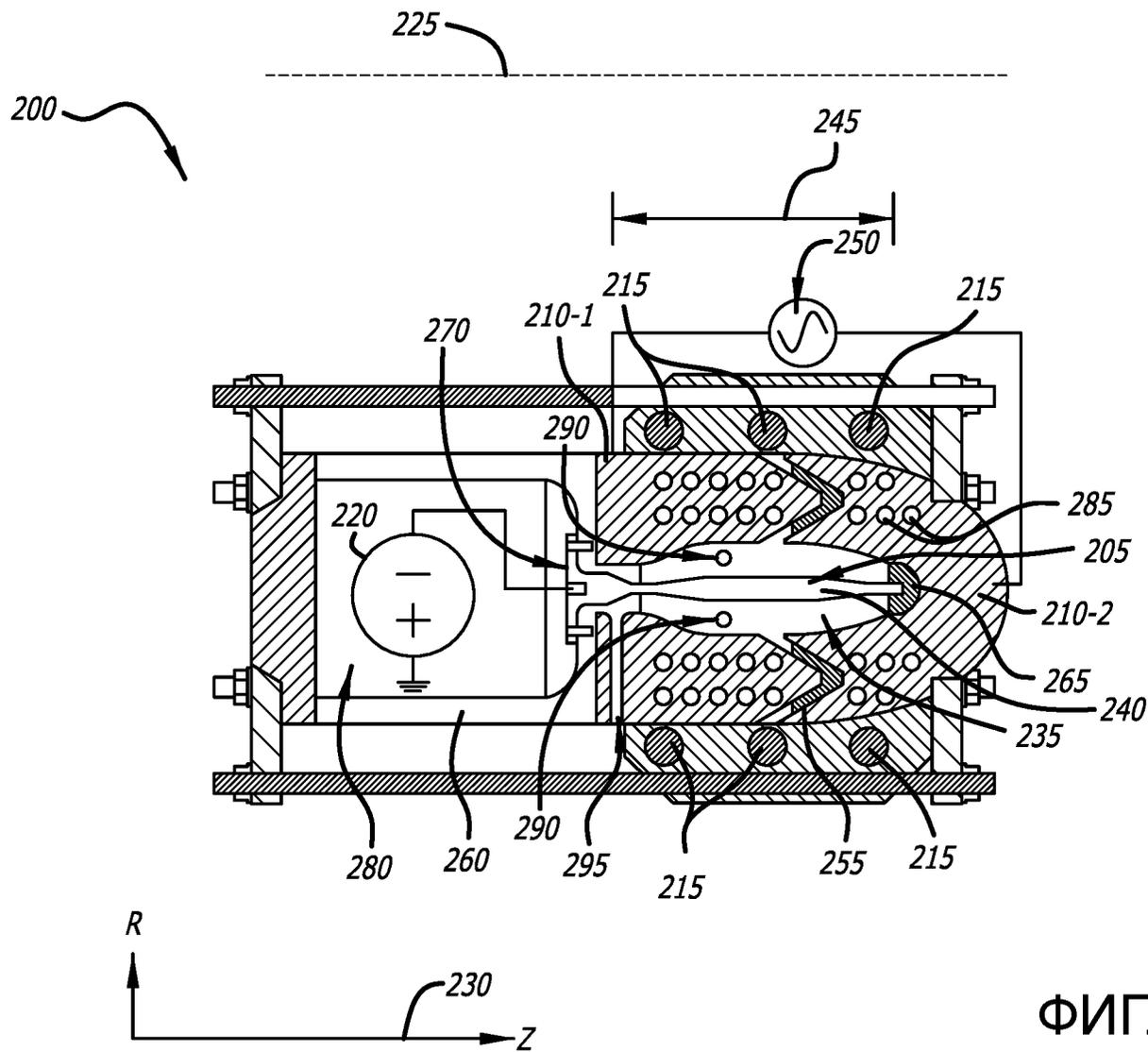
подачу радиочастотного (РЧ) сигнала напряжения на внешний электрод с использованием цепи зеркального заряда, при этом частота РЧ-сигнала напряжения соответствует колебанию заряженных частиц в камере вдоль направления, выставленного с продольной осью;

генерирование РЧ-тока с использованием цепи зеркального заряда; и

генерирование постоянного тока из РЧ-тока с использованием схемы выпрямителя РЧ в постоянный ток.

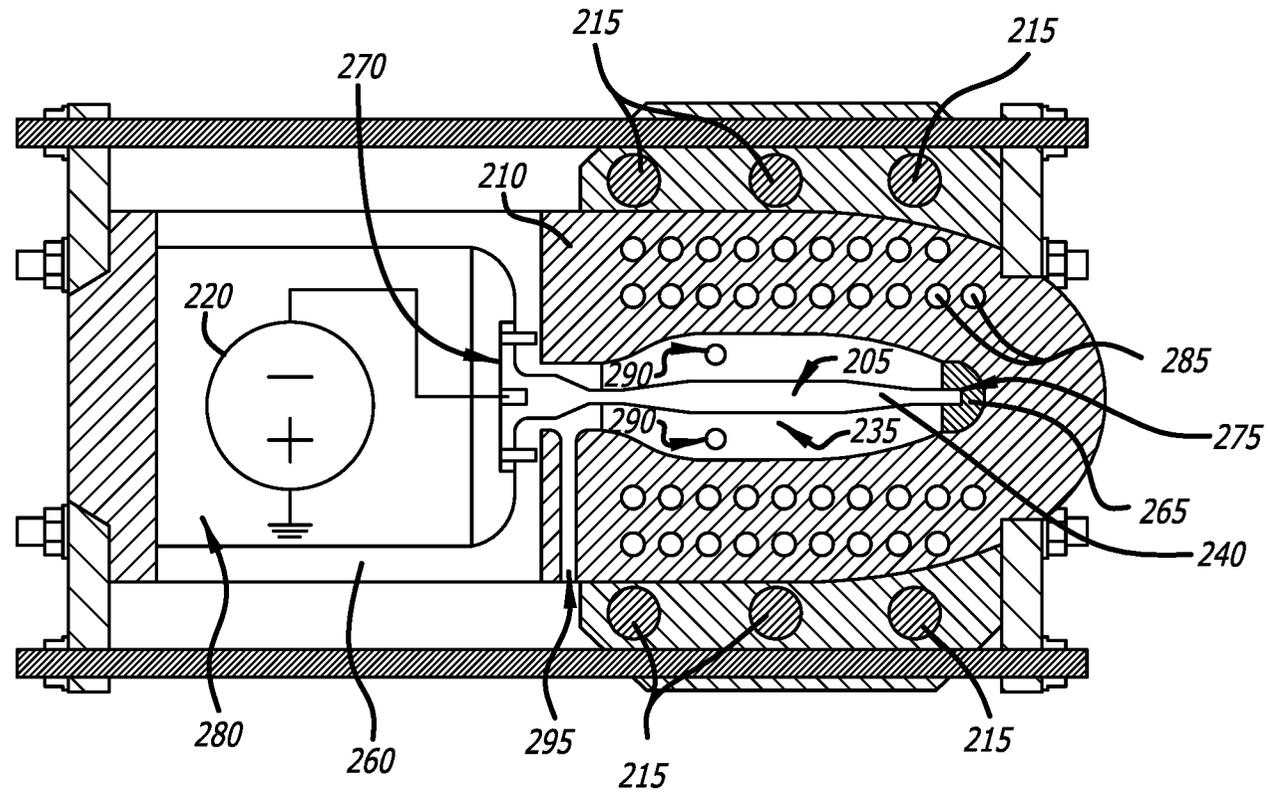


ФИГ. 1



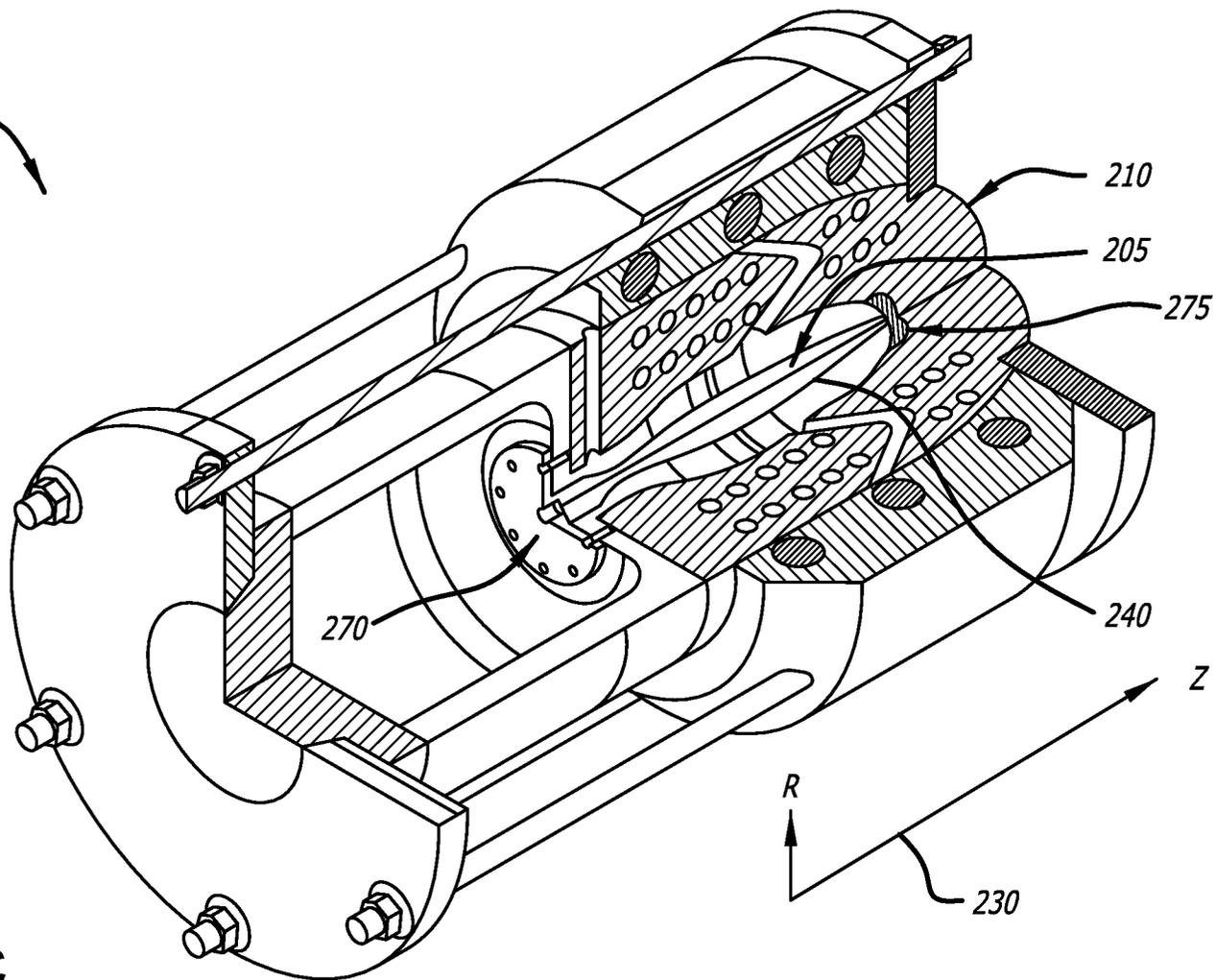
ФИГ. 2А

200

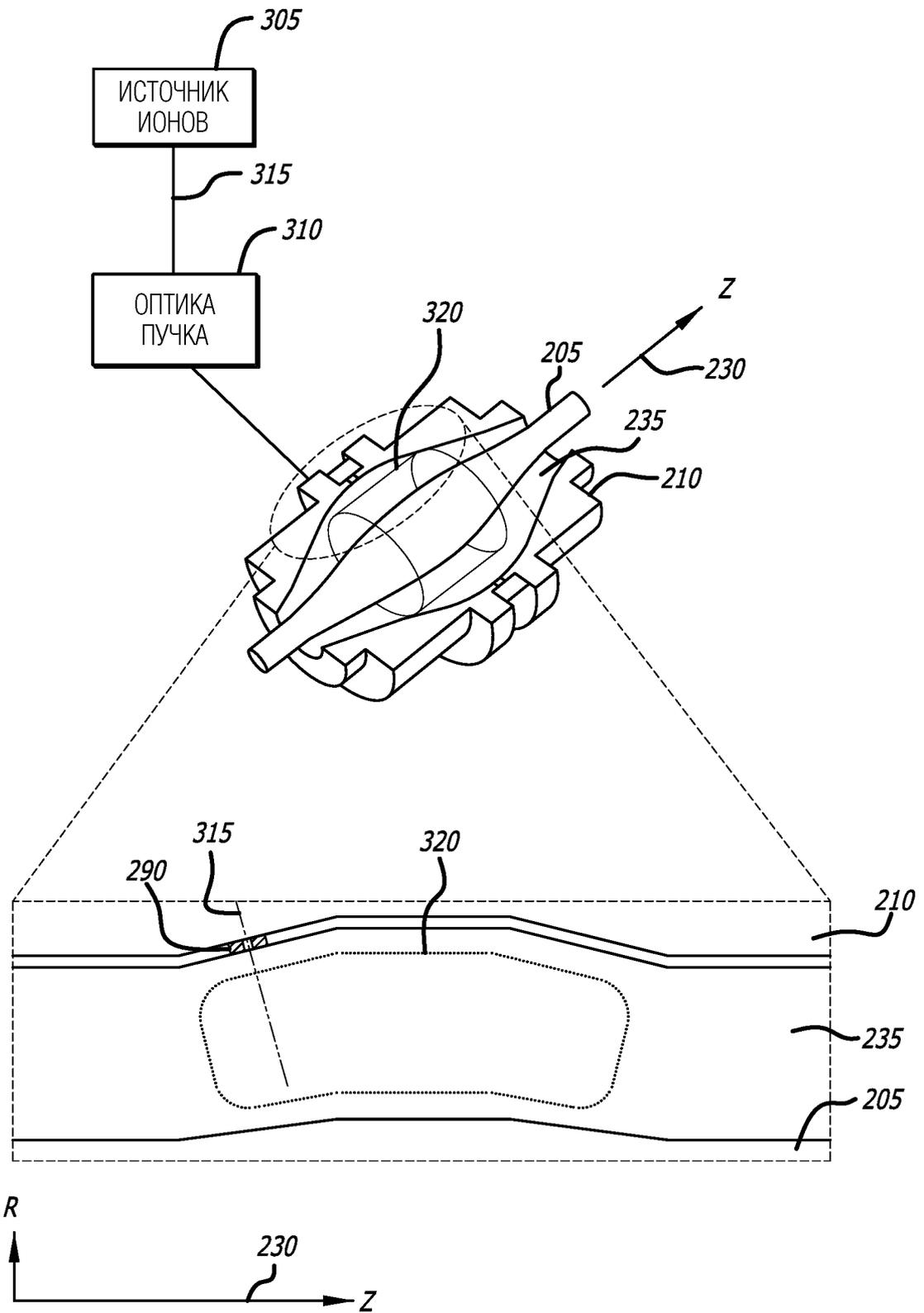


ФИГ. 2В

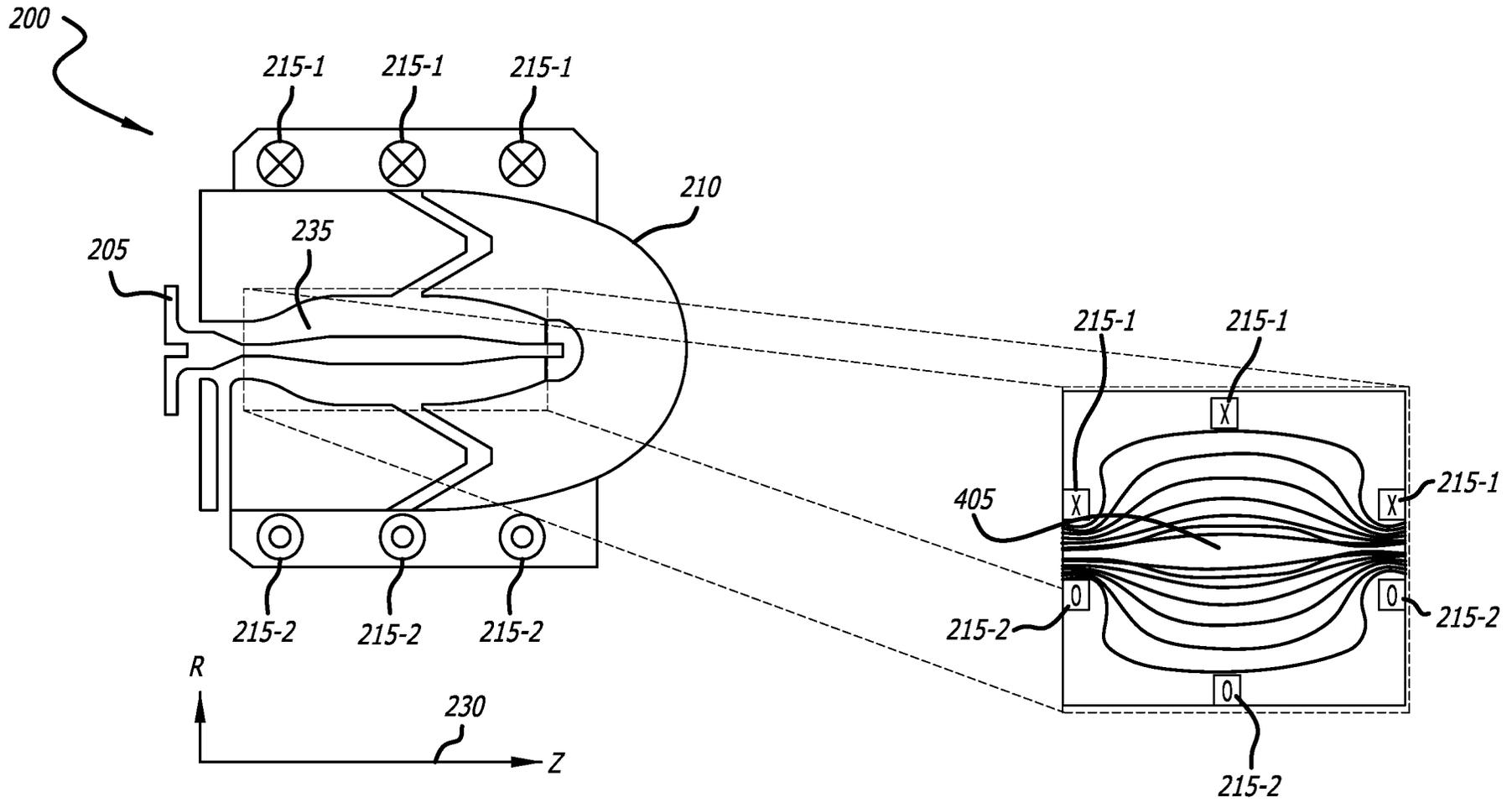
200



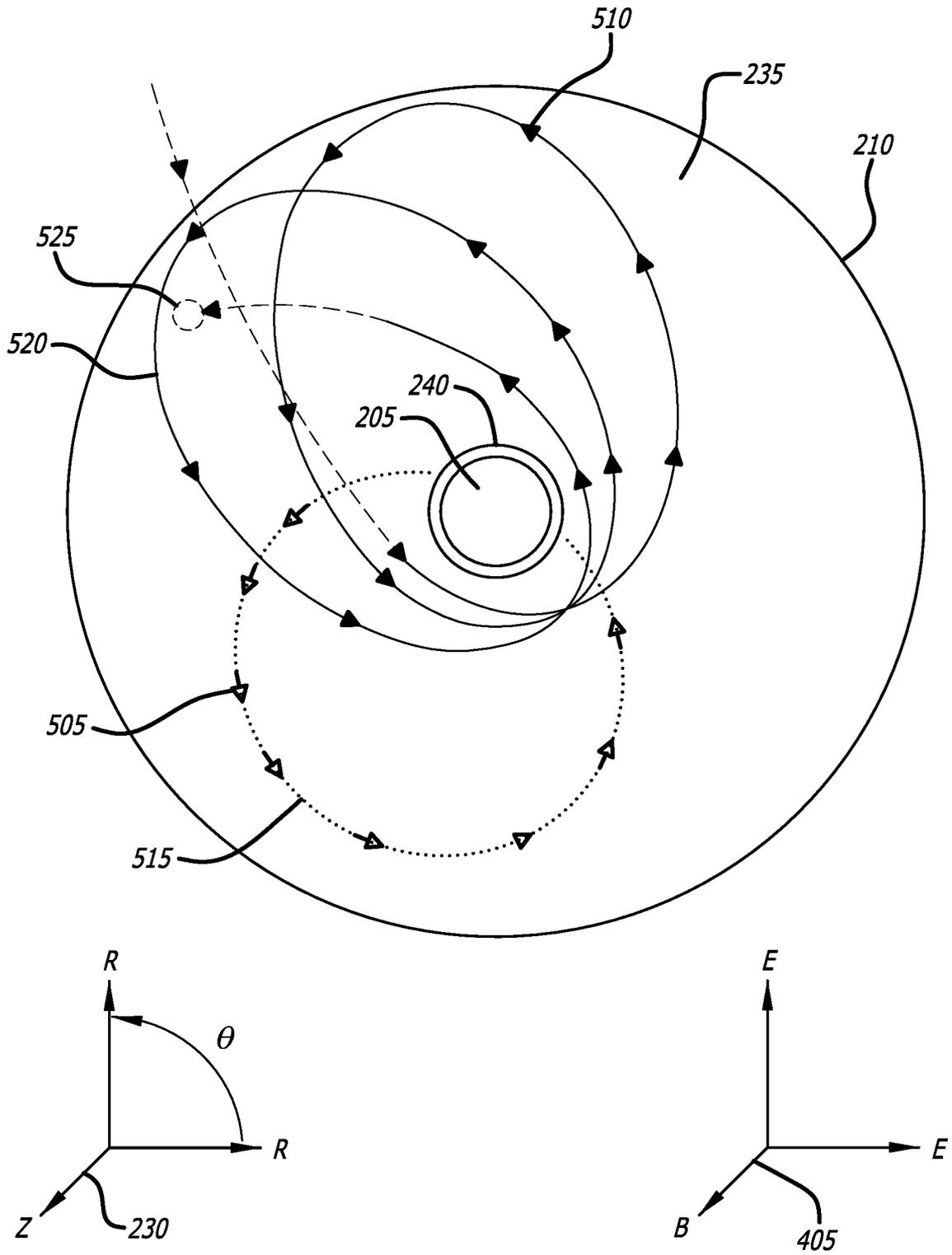
ФИГ. 2С



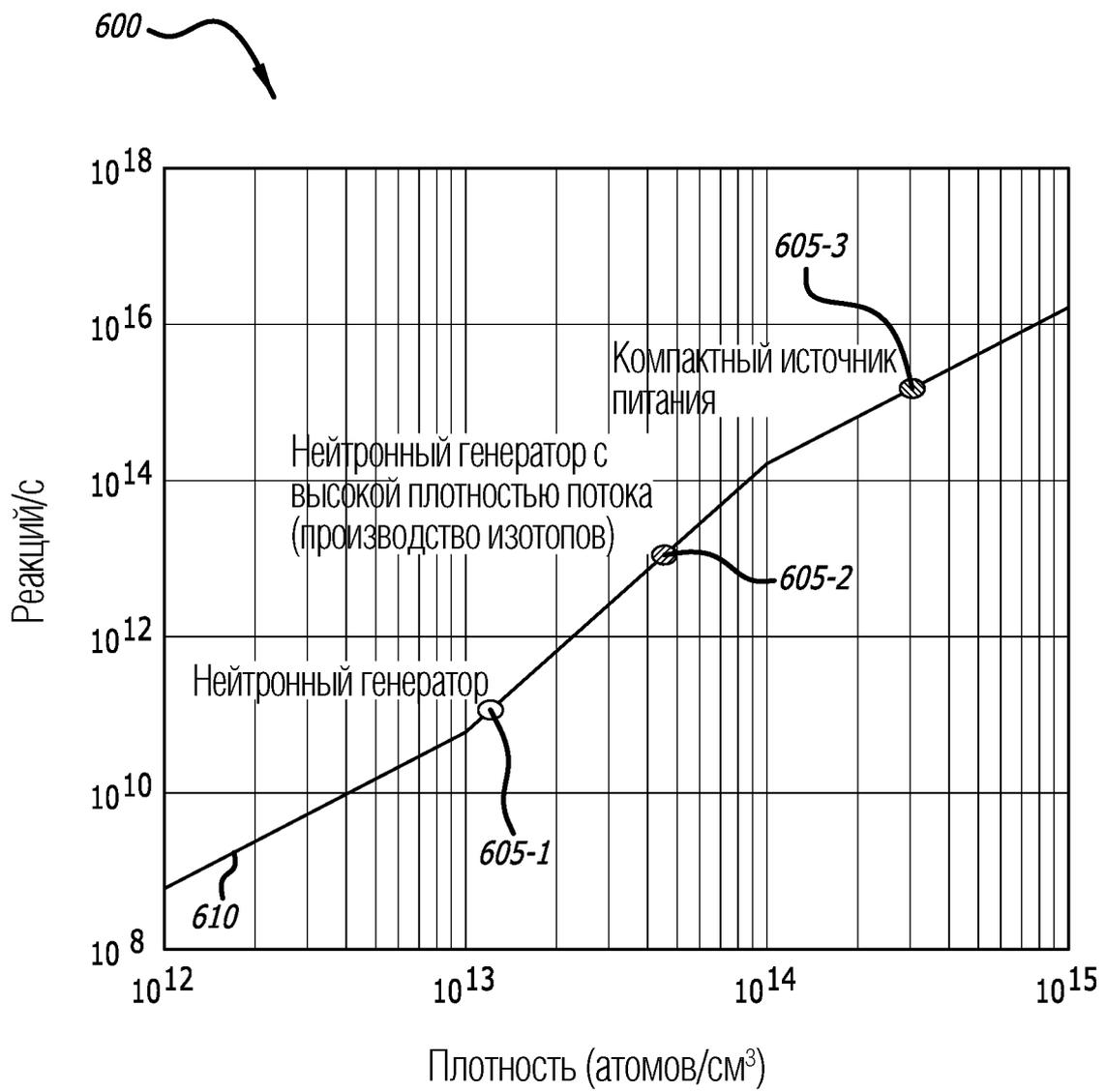
ФИГ. 3



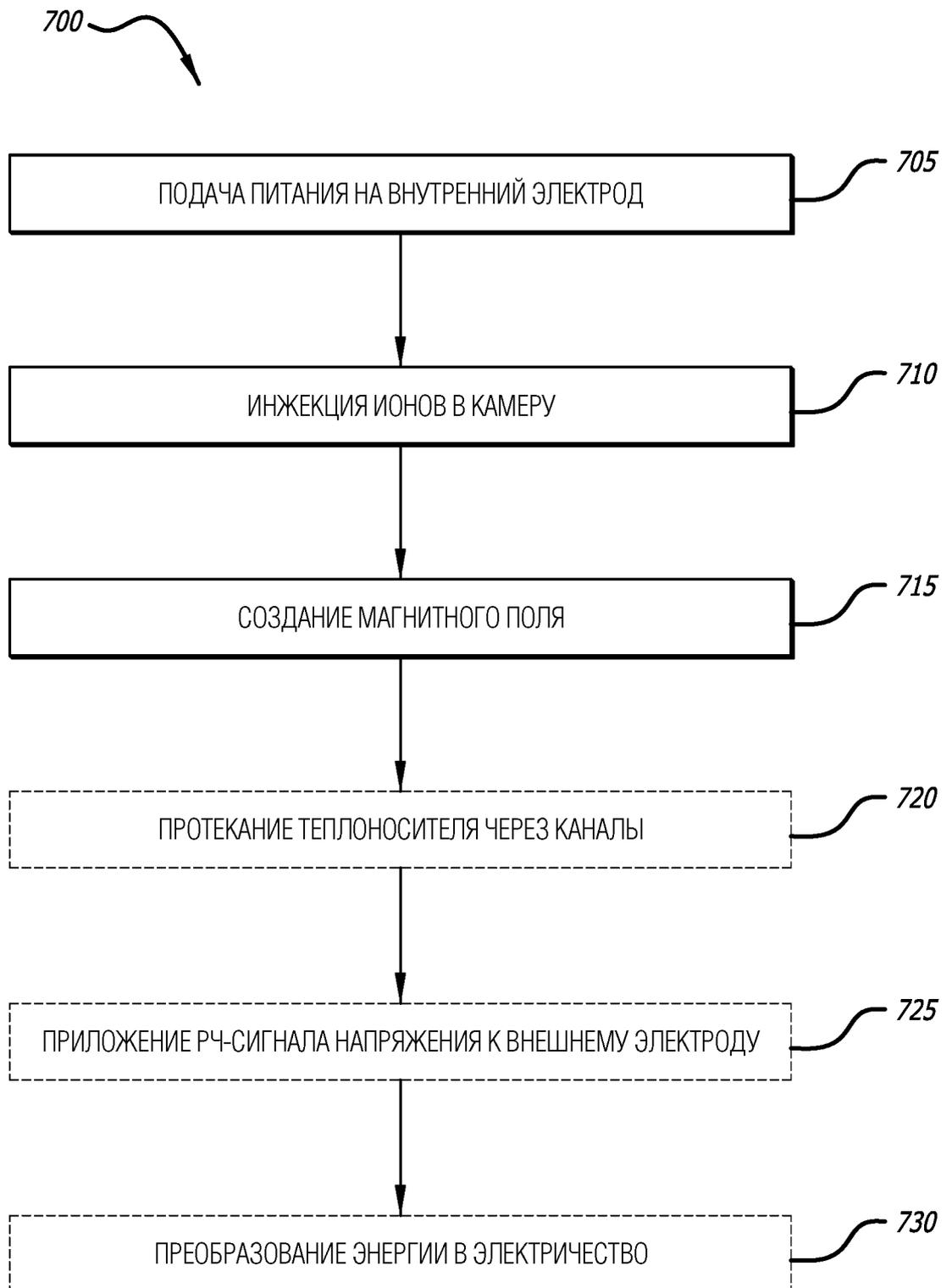
ФИГ. 4



ФИГ. 5



ФИГ. 6



ФИГ. 7