



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G21C 1/00 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2015113440, 12.09.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.09.2013

Дата регистрации:
28.03.2018

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
12.09.2012 US 61/699,864

(43) Дата публикации заявки: 10.11.2016 Бюл. № 31

(45) Опубликовано: 28.03.2018 Бюл. № 10

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 13.04.2015

(86) Заявка РСТ:
US 2013/059445 (12.09.2013)

(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2014/043335 (20.03.2014)

Адрес для переписки:
129090, Москва, ул. Б. Спасская, 25, стр. 3, ООО
"Юридическая фирма Городисский и Партнеры"

(72) Автор(ы):

**ФИЛИППОУН Клаудио (US),
ВЕННЕРИ Франческо (US)**

(73) Патентообладатель(и):

ЛОГОС ТЕКНОЛОДЖИЗ ЭлЭлСи (US)

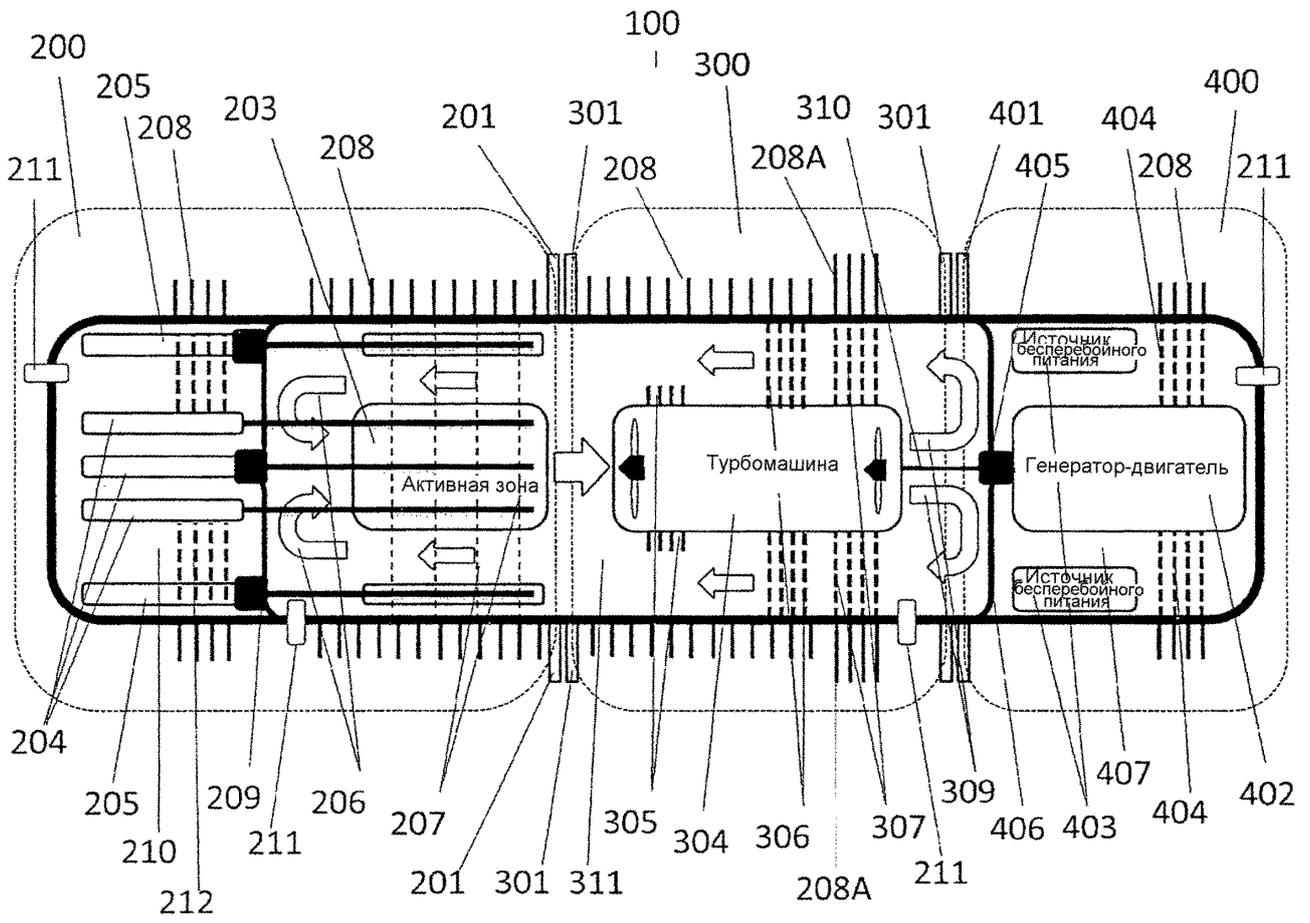
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 4088535 A1, 09.05.1978. US
5247553 A, 21.09.1993. US 2010290578 A1,
18.11.2010. RU 2222839 C2, 27.01.2004.

(54) МОДУЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЙ ЯДЕРНЫЙ ГЕНЕРАТОР

(57) Реферат:

Изобретение относится к производству электроэнергии и технологического тепла с использованием модульного, транспортируемого, упроченного ядерного генератора, быстро размещаемого и изымаемого, содержащего оборудование для преобразования энергии и производства электроэнергии, полностью встроенное внутри единого корпуса высокого давления, вмещающего активную зону ядерного генератора. Получаемый транспортируемый

ядерный генератор также содержит каналы для теплоносителя, ограниченные внутренними рёбрами с низким гидродинамическим сопротивлением, и внешние рёбра. Технический результат – обеспечение возможности работы ядерного генератора с устойчивой к плавлению проводящей керамической активной зоной, которая делает возможным отвод остаточного тепла даже при полной потере теплоносителя. 3 н. и 36 з.п. ф-лы, 24 ил.



ФИГ.1

RU 2648681 C2

RU 2648681 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G21C 1/00 (2006.01)

(21)(22) Application: **2015113440, 12.09.2013**

(24) Effective date for property rights:
12.09.2013

Registration date:
28.03.2018

Priority:

(30) Convention priority:
12.09.2012 US 61/699,864

(43) Application published: **10.11.2016 Bull. № 31**

(45) Date of publication: **28.03.2018 Bull. № 10**

(85) Commencement of national phase: **13.04.2015**

(86) PCT application:
US 2013/059445 (12.09.2013)

(87) PCT publication:
WO 2014/043335 (20.03.2014)

Mail address:
**129090, Moskva, ul. B. Spasskaya, 25, str. 3, OOO
"Yuridicheskaya firma Gorodisskij i Partnery"**

(72) Inventor(s):

**FILIPPOUN Klaudio (US),
VENNERI Franchesko (US)**

(73) Proprietor(s):

LOGOS TEKNOLODZHIZ EIEISi (US)

(54) **MODULAR TRANSPORTED NUCLEAR GENERATOR**

(57) Abstract:

FIELD: power engineering.

SUBSTANCE: invention relates to the electricity and process heat production using a modular, transportable, reinforced nuclear generator, quickly located and withdrawn, containing energy conversion and power generation equipment, completely integrated inside a single high-pressure housing that contains the core of a nuclear generator. Resulting transportable

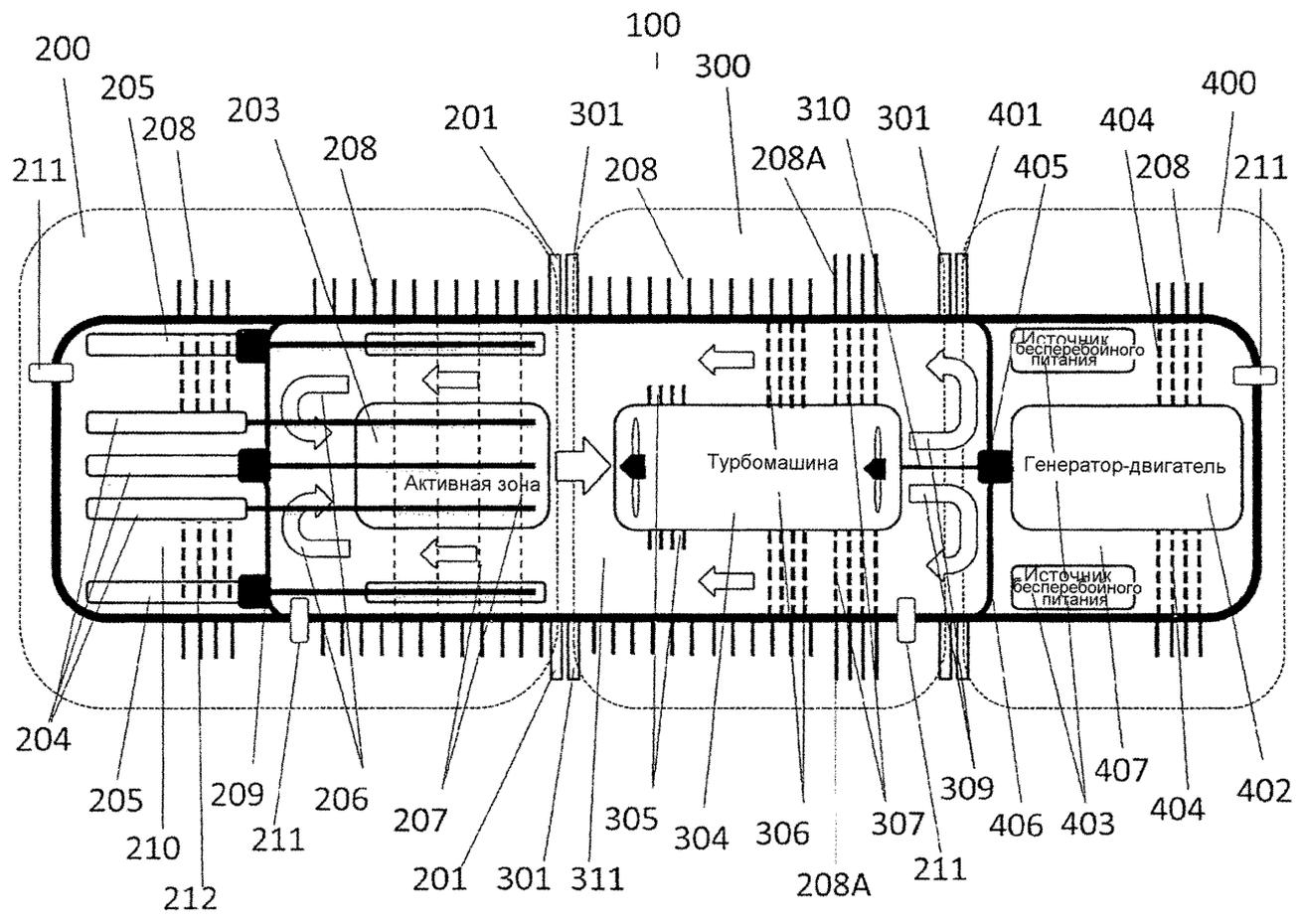
nuclear generator also contains coolant channels, limited by internal fins with low hydrodynamic resistance, and external fins.

EFFECT: ensuring the possibility of a nuclear generator operation with a fusion-resistant conductive ceramic core, which makes possible the residual heat removal even with a complete loss of the coolant.

39 cl, 24 dwg

RU 2 648 681 C 2

RU 2 648 681 C 2



ФИГ.1

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

[0001] Настоящее изобретение в основном относится к электроэнергии и процессу производства тепла с использованием модульного, компактного, транспортируемого, упрочненного ядерного генератора быстро размещаемого и изымаемого, содержащего оборудование для преобразования энергии и производства электроэнергии, полностью встроенное внутри единого корпуса высокого давления, вмещающего активную зону ядерного реактора.

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

[0002] Ядерные генераторы естественно включают в себя активные зоны ядерного реактора, которые производят остаточную тепловую энергию после остановки. В общем, среди нескольких факторов количество остаточной тепловой энергии, производимой после остановки, является пропорциональным истории производства энергии топлива и плотности энергии, характеризующей активную зону ядерного реактора. Чтобы избежать перегрева ядерного топлива в любом месте активной зоны, остаточная тепловая энергия должна быть передана из активной зоны с использованием резервных механизмов передачи тепла, обычно поддерживаемых внешними по отношению к корпусу системами и конструкциями, выполненными для содержания активной зоны. Эти резервные системы охлаждения содержат сложные сети трубопровода, теплогидравлически связывающие активную зону с теплообменниками, расположенными снаружи корпуса, содержащего активную зону, и предназначенными для передачи тепловой энергии из активной зоны в окружающую среду (т.е. конечный теплопоглотитель). Теплоноситель по этим теплообменникам может активно циркулировать с использованием рециркуляторов с электрическим приводом (т.е. насосов, воздуходувов), а резервы реализованы при использовании множества теплообменников, регулируемых клапанами, предназначенными для распределения или перераспределения теплоносителя через относительно сложные сети трубопровода. Альтернативно теплоноситель может пассивно циркулировать по подобным сложным сетям трубопровода, теплогидравлически связывающим активную зону с теплообменниками вне активной зоны, посредством механизмов естественной циркуляции под действием силы тяжести, основанных на том, что плотность теплоносителя изменяется при нагревании или охлаждении. Современные ядерные реакторы основываются на резервных системах отвода остаточного тепла активной зоны, которые могут работать пассивно, активно или в совокупности того и другого.

[0003] Для отвода остаточной тепловой энергии конструкции реактора, внедряющие «активные» меры безопасности, сильно зависят от электроэнергии для активной зоны для поддержания безопасной температуры после остановки. Для обеспечения безопасной работы и постоянного отвода остаточной тепловой энергии эти конструкции требуют электроэнергии, обеспеченной соединением минимум с двумя внешними энергосетями, и аварийной электроэнергии, производимой выделенными резервными аварийными дизель-генераторами (АДГ) на месте.

[0004] С другой стороны, некоторые типы пассивных мер безопасности основываются только на силе тяжести и большом запасе воды, обычно хранящейся в резервуарах или конструкциях для воды, размещенных на относительно больших высотах относительно активной зоны. Разница в высоте между активной зоной и конструкциями для хранения теплоносителя требуется для того, чтобы теплоноситель подвергался перекачиванию посредством естественной циркуляции, и остаточная тепловая энергия эффективно отводилась из активной зоны. Для пассивных мер безопасности, основанных на хранящемся теплоносителе, способность соответствующим образом обеспечивать

долгосрочный отвод остаточного тепла сильно зависит от запаса теплоносителя и эффективности механизма охлаждения активной зоны под действием силы тяжести при различных условиях температуры и влажности окружающей среды. В общем, когда температура окружающей среды увеличивается, способность пассивно производить конвективное охлаждение активной зоны постепенно ухудшается. В результате пассивный отвод остаточного тепла, основанный на хранящихся запасах теплоносителя, наилучшим образом подходит для ядерных генераторов, работающих в умеренном климате.

[0005] Так как пассивная и активная системы безопасности обычно выполнены снаружи корпуса, вмещающего активную зону, в результате получается сложная система резервного трубопровода, клапанов, теплообменников, а также насосов/воздуходувов и дополнительных кабельных сетей энергии и управления (т.е. требуемых для обеспечения приводящей в действие электроэнергии и управления для активных систем). Сложная система трубопровода и теплогидравлическое (т.е. теплообменники) и электрическое оборудование (т.е. насосы), предназначенное для отвода тепловой энергии из активной зоны, обычно определяется как неядерное оборудование. Неядерное оборудование большинства ядерных генераторов, больших и маленьких, обуславливает по существу большие площади, занимаемые объектом, устанавливает ограничения на места, в которых ядерные генераторы могут быть размещены, и значительно увеличивает капитальные затраты, характеризующие установки ядерного генератора.

[0006] Активные зоны коммерчески работающих реакторов обычно охлаждаются водой и загружаются элементами ядерного топлива, покрытыми материалами, которые окисляются в присутствии воды/пара высокой температуры. Так как активная зона может испытывать перегрев, например, из-за потери теплоносителя или отказа систем активного или пассивного отвода остаточного тепла активной зоны, химические реакции между материалами покрытия и водой/паром приводят к образованию водорода. Таким образом, водород накапливается и в итоге самовоспламеняется, тем самым создавая серьезные проблемы безопасности. В результате ядерные энергетические установки оборудованы резервным оборудованием для удаления водорода, например, для выполнения управляемых воспламенений и предотвращения накопления больших количеств водорода. Однако эта дополнительная мера безопасности дополнительно увеличивает сложность, увеличивает операционные затраты и может не быть управляемой, как показывают несколько ядерных аварий таких как, например, авария, которая произошла на атомной станции Fukushima Daiichi в Японии. Уровень резервов, используемых для обеспечения активной, пассивной или совокупности обеих систем безопасности, выполняющих их функции безопасности, обычно является результатом оценок вероятностного риска, основанных на постулированных сценариях проектных аварий. Рассматриваются не все возможные сценарии аварий, так как вероятность возникновения сценариев запроектных аварий является очень низкой. К сожалению, несмотря на резервы и множество искусственных барьеров для выхода радиоактивности из активной зоны в окружающую среду, расплавление активной зоны, взрывы водорода, нарушение оболочки и крупные радиоактивные осадки возникают даже на атомных электростанциях, соответствующих наиболее современному регулирующему руководству для безопасной работы (т.е. электростанция Fukushima Daiichi), таким образом, демонстрируя, что катастрофические аварии, так как они вызваны сценариями запроектных аварий, имеют неприемлемую безопасность и экономическое влияние, хотя вероятность их возникновения является очень низкой. Сценарии запроектных аварий могут быть представлены цунами, экстремальными сейсмическими, погодными,

террористическими/военными событиями.

[0007] Конструкции небольших модульных реакторов отличаются меньшими, модульными и легче транспортируемыми компонентами по сравнению с конструкциями современных больших реакторов. Однако эти компоненты или модули не могут
5 работать не будучи предварительно теплогидравлически (и электрически) связанными в месте размещения. Связывание этих модульных компонентов происходит посредством объединения со сложными сетями трубопровода, клапанами, системами пассивного и/или активного охлаждения активной зоны (неядерное оборудование), выполненными
10 снаружи корпуса, содержащего активную зону. В результате размещение и установка электростанции, основанной на конструкциях небольшого модульного реактора, требует нескольких месяцев для подготовки места, подключения неядерного оборудования
15 установки и связывания всего вспомогательного оборудования независимо от размера небольшого модульного реактора. К тому же, как только системы небольшого модульного реактора связаны, общая площадь размещения электростанции, основанной
20 на небольшом модульном реакторе, и зона аварийной эвакуации все же остаются значительными, даже для конструкций небольшого модульного реактора, производящих малые или очень низкие номинальные мощности. После сборки конструкции небольшого модульного реактора не могут быть транспортированы или изъятые, и в связи с этим
25 не могут быть легко размещены, и не могут быть изъятые с места без выполнения разборки модульных компонентов и нескольких месяцев, предназначенных для разборки неядерного оборудования, обычно с длительными процедурами вывода из эксплуатации для удаления нескольких отдельных и потенциально радиоактивных компонентов
30 небольшого модульного реактора.

СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0008] С учетом вышеупомянутого имеется текущая потребность в действительно
25 транспортируемой, полностью готовой к эксплуатации, компактной системе модульного ядерного генератора и способе безопасного производства электроэнергии с возможностью обеспечения технологического тепла, с возможностью безопасной
30 работы в любых климатических условиях, в любом месте, со способностью безопасно справиться с экстремальным источником стресса окружающей среды (включая серьезные сейсмические события и наводнения) и, в порядке, который, по сути,
35 уменьшает последствия сценариев постулированных проектных, а также запроектных аварий.

[0009] С учетом вышеупомянутого раскрыт транспортируемый упрочненный
35 компактный модульный ядерный генератор. Раскрытый генератор образован активной зоной ядерного реактора, помещенной в корпусе, содержащем встроенное оборудование для преобразования энергии и производства электроэнергии без необходимости
40 неядерного оборудования вне корпуса и содержащем компоненты, которые пассивно обеспечивают охлаждение активной зоны при всех сценариях аварии, включая сценарии запроектной аварии и сценарии проектной аварии.

[0010] В зависимости от электрической нагрузки конкретного места (и потребностей
45 технологического тепла), транспортируемый упрочненный компактный модульный ядерный генератор, для простоты далее называемый транспортируемый ядерный генератор, может быть выполнен с возможностью работать с различными конфигурациями активной зоны, материалами, теплоносителями и замедлителями, так,
чтобы преобразовывать тепловую энергию, производимую активной зоной, в электричество и технологическое тепло, используя встроенное оборудование для преобразования энергии, выполненное с возможностью работать с различными

термодинамическими энергетическими циклами (т.е. Брайтона, Ренкина), и оборудование для производства электроэнергии, выполненное с возможностью регулировать напряжение и частоту в соответствии с потребностями в электроэнергии конкретного места.

5 [0011] В некоторых конфигурациях транспортируемый ядерный генератор может обеспечивать номинальные энергии от 10 МВт до 40 МВт (мегаватт тепловой энергии) с эффективностью приблизительно 45% при работе с модулем преобразования энергии, выполненным с возможностью преобразовывать тепловую энергию с использованием
10 газового цикла Брайтона. При этой примерной конфигурации один транспортируемый ядерный генератор представляет собой блок производства энергии с возможностью производства 4,5-18 МВт электрической энергии (мегаватт электрической энергии). Так как транспортируемый ядерный генератор может работать с пассивным охлаждением с использованием естественной циркуляции воздуха по его поверхности теплопередачи, он может быть сгруппирован с множеством блоков транспортируемых
15 ядерных генераторов так, чтобы соответствовать потребностям в электроэнергии и/или технологическом тепле конкретного места. Так как транспортируемый ядерный генератор является легко транспортируемым и изымаемым, он является подходящим для множества областей применения, например, он может использоваться для производства электроэнергии и технологического тепла в отдаленных районах или
20 местах, не подключенным к сети. Дополнительные применения могут включать в себя производство энергии для различных производственных процессов на земле или насыпном острове (разработка месторождений, добыча нефти и газа, военные установки), движения судов и в качестве быстрой системы резервной сети в критических объединенных сетевых энергосистемах.

25 [0012] В одной примерной конфигурации транспортируемый ядерный генератор образован тремя главными модулями: (1) заменяемым энергетическим модулем реактора, вмещающим активную зону, систему управления и конструкцию изменения направления потока теплоносителя, (2) модулем преобразования энергии, содержащим турбомашинное оборудование и теплообменники, и (3) модулем производства энергии,
30 содержащим быстрый генератор-двигатель, электронные контроллеры и источники бесперебойного питания (т.е. батареи), используемые во время операций запуска. После того как теплогидравлически связаны через уплотняющие фланцы три модуля образуют единый упрочненный корпус, пассивно обменивающийся тепловой энергией с окружающей средой. Вращающееся оборудование, образующее турбомашинные системы
35 модуля преобразования энергии, механически соединено с одним валом, также механически соединенным с валом вращающихся компонентов, встроенных в генератор-двигатель модуля производства энергии, таким образом, все вращающееся оборудование соответственно вращается с одинаковой скоростью без трения с использованием магнитных подшипников. Каждый модуль может быть транспортируемым независимо
40 или все три полностью собранные в единый корпус, что обеспечивает готовность к эксплуатации транспортируемого ядерного генератора. Транспортировка полностью собранных или отдельных модулей транспортируемого ядерного генератора может быть выполнено в соответствии со стандартами транспортировки (т.е. с использованием стандартного оборудования для транспортировки). При транспортировке в полностью
45 собранном виде транспортируемый ядерный генератор представляет собой быстро размещаемый и изымаемый полностью готовый к эксплуатации генератор электроэнергии.

[0013] В одной примерной конфигурации модули транспортируемого ядерного

генератора могут быть связаны с использованием уплотняющих и запорных фланцев так, чтобы образовывать единый упрочненный корпус высокого давления работающий горизонтально. В другой конфигурации с переориентированными внешними и внутренними ребрами теплопередачи транспортируемого ядерного генератора

5 транспортируемый ядерный генератор может работать вертикально. Все три модуля содержат высокоинтегрированные теплообменники, образованные внутренними и

10 внешними ребрами, выполненными с возможностью обеспечивать опору внутренним компонентам, при этом по существу упрочняя общую конструкцию посредством образования множества внутренних и внешних ребер конструкции. Встроенные

15 теплообменники, объединенные со встроенным оборудованием турбомашин и генератора-двигателя, делают возможным работу без необходимости применения внешнего неядерного оборудования, тем самым по существу уменьшая общую площадь размещения, уязвимости и вероятность сценариев потери теплоносителя.

Транспортируемый ядерный генератор может использовать несколько типов активных зон, включая устойчивые к плавлению проводящие керамические активные зоны.

Проточные каналы теплоносителя транспортируемого ядерного генератора выполнены с возможностью обеспечивать высокую эффективность преобразования тепловой

20 энергии в электроэнергию. Эти каналы для теплоносителя получаются путем размещения внутренних ребер с низким гидродинамическим сопротивлением, которые обеспечивают опорную конструкцию активной зоны, при этом обеспечивая передачу остаточной

25 тепловой энергии из активной зоны внешним ребрам транспортируемого ядерного генератора посредством механизмов теплопередачи проводимостью. В этой конфигурации активная зона транспортируемого ядерного генератора может безопасно и пассивно передавать остаточную тепловую энергию в среду, окружающую

30 транспортируемый ядерный генератор, даже при полном отсутствии теплоносителя. Три модуля, образующие единый корпус транспортируемого ядерного генератора, далее будут описаны более подробно.

[0014] В одной конфигурации энергетический модуль реактора объединяет активную зону реактора, работающую на обогащенном расщепляющемся материале (т.е. уране или плутонии), отражатели нейтронов, множество систем управления реактивностью,

35 каналы потока для эффективной циркуляции теплоносителя через энергетический модуль реактора и теплогидравлические системы, связывающие энергетический модуль реактора с модулем преобразования энергии. Корпус энергетического модуля реактора предпочтительно может быть выполнен из композитного материала С-С или

40 подходящего металлического материала. Активная зона может представлять собой любую подходящую активную зону с составом материала и характеристиками теплопередачи, удовлетворяющими потребностям в номинальной энергии.

[0015] Предпочтительная конфигурация активной зоны содержит проводящую керамическую активную зону с керамическим микрокапсулированным топливом, заделанным в карбид кремния (SiC) для образования топливных элементов.

45

[0016] В одной примерной конфигурации транспортируемый ядерный генератор оборудован «устойчивой к плавлению» активной зоной, содержащей монолитные трехструктурно-изотропические топливные (MTF) элементы, в этой конфигурации активная зона изготовлена из топливных элементов, изготавливаемых с топливом

45 TRISO в таблетках SiC, далее называемое полностью керамическое микрокапсулированное (FCM) топливо, запечатанное в элементы SiC или композитного SiC, или с трехструктурно-изотропическими (TRISO) частицами, распределенными в элементах MTF. Любое из спекания, прессования или другого процесса изготовления

SiC может быть использовано для изготовления SiC достаточной структурной прочности и устойчивости к излучению в таблетках и/или блоках. В одной предпочтительной конфигурации может быть использован способ спекания SiC пропитыванием нанопорошками и образованием переходной эвтектической фазы (NITE). Таблетки могут иметь слой бестопливного SiC для окружения областей, заполненных топливом.

[0017] Расщепляющееся топливо, используемое в частицах TRISO, может представлять собой оксид, карбид, оксикарбид или нитрид урана, плутония, тория или другого расщепляющегося изотопа. Редкоземельный оксид выгорающего поглотителя, например, оксид эрбия или оксид гадолиния, может быть включен в керамический брикет SiC.

Выгорающий поглотитель также может содержаться в специально покрытых частицах, смешанных с топливными частицами, образуя таблетки. Непористое высокоплотное покрытие SiC частиц TRISO, плотная матрица SiC топливной таблетки FCM и SiC в топливном элементе обеспечивают множество барьеров для перемещения и рассеивания продуктов расщепления, в форме, которая в то же время является устойчивой к облучению, теплопроводящей и совместимой с операциями при высокой температуре.

[0018] В другом примере транспортируемый ядерный генератор может быть загружен теплопроводящей керамической активной зоной, причем проводящая керамическая активная зона состоит из элементов или блоков MTF и подобным образом выполненных элементов или блоков отражателя (изготовленных, например, из углерода или композитного материала SiC). В этой конфигурации MTF выполнен и имеет размеры для исключения чрезмерных тепловых напряжений во время работы. Один пример представляет собой пластины толщиной 10 см в форме четверти круга, обозначенные на Фиг. 24 и 24А. Другие примеры представляют собой гексагональные или прямоугольные топливные блоки. Во всех конфигурациях топливные блоки и блоки отражателя или элементы содержат отверстия для протекания теплоносителя. Во всех конфигурациях прижимные пластины с соответствующими отверстиями для теплоносителя могут быть предусмотрены на впуске и выпуске активной зоны для сохранения активной зоны все время сжатой. Теплопроводность матрицы проводящей керамической активной зоны также увеличивается путем исключения зазоров между топливными элементами и блоками и уменьшения зазоров между блоками, тем самым уменьшая температуру топлива и поддерживая способность пассивной теплопередачи активной зоны транспортируемого ядерного генератора при всех сценариях аварий.

[0019] Реактивность активной зоны может быть управляемой поглощением нейтронов в отражателе и предотвращением их повторного входа в активную зону и поглощением нейтронов активной зоны. Реактивность активной зоны транспортируемого ядерного генератора управляется посредством применения: (1) управляющих стержней или вращающихся барабанов управления в отражателе, содержащих поглощающие и отражающие нейтроны материалы, расположенные так, чтобы быть пассивно задействованными в режиме поглощения для безопасности; (2) сборки управляющих стержней внутри активной зоны; (3) системы аварийного останова ядерного реактора, которая вводит поглотитель нейтронов в активную зону с помощью пассивной системы, если другие системы выведены из строя. Барабаны управления могут представлять собой поглощающие и отражающие материалы, геометрически расположенные так, чтобы давать возможность большему или меньшему числу нейтронов выходить из или отражаться обратно в активную зону в зависимости от положения вращения.

Поглощающий нейтроны материал может представлять собой керамику на основе SiC или C с бором или поглощающий нейтроны редкоземельный материал, тогда как участки отражателя нейтронов могут использовать бериллий или другие материалы в

подходящей совместимой с высокой температурой форме с подходящими свойствами отражения нейтронов. Эти компоненты управления реактивностью могут работать независимо, и каждый может быть выполнен с возможностью полного или частичного управления реактивностью активной зоны для регулирования энергии и выполнения

5 остановки реактора.

[0020] Могут быть использованы другие конфигурации активной зоны реактора, например, топливные стержни, содержащие ядерный расщепляющийся материал в виде оксида, нитрида, металла или другого, с металлическим или керамическим покрытием, и расположенные в пучках, соответствующих охлаждающей среде. Свободные

10 топливные элементы подходящей геометрической формы, например сферический микротвэл, также могут быть использованы.

[0021] В одной конфигурации активная зона транспортируемого ядерного генератора использует инертный газ в качестве теплоносителя и рабочей текучей среды для модуля преобразования энергии. В этой конфигурации теплоноситель может представлять

15 собой CO_2 , гелий или другие предпочтительные инертные газы (например, аргон). В этом примере активная зона транспортируемого ядерного генератора производит тепловую энергию, тогда как турбомашина, объединенная с различными встроенными теплообменниками, способствует осуществлению регенеративного цикла Брайтона, достигая высокой эффективности преобразования энергии.

[0022] В другой конфигурации активная зона транспортируемого ядерного генератора использует воду в качестве теплоносителя и частично в качестве замедлителя, циркулирующую в первом контуре, полностью заключенном в энергетическом модуле реактора. Давление в первом контуре регулируется с использованием встроенного

25 нагнетателя. Один или множество встроенных разделительных теплообменников обеспечивают тепловую связь между первым контуром в энергетическом модуле реактора и вторым контуром в модуле преобразования энергии. Вода, циркулирующая во втором контуре, принимает тепловую энергию со стороны первого контура

разделительного теплообменника (т.е. парогенератора) так, чтобы изменять термодинамическое состояние из переохлажденной жидкости в перегретый пар. Вода

30 во втором контуре не смешивается с водой, циркулирующей в первом контуре. В этой конфигурации тепловая энергия активной зоны транспортируемого ядерного генератора передается турбомашине в модуле преобразования энергии в виде перегретого пара. После расширения в турбомашине пар выпускается во встроенный конденсатор, который пассивно передает тепловую энергию внутренним и продолжающимся снаружи

35 охлаждающим ребрам модуля преобразования энергии. Когда пар конденсируется, он повторно сжимается насосным блоком, и второй контур возвращается в исходное состояние путем нагнетания переохлажденной воды на впуске второй стороны разделительного теплообменника.

[0023] В другой конфигурации первый контур транспортируемого ядерного генератора может содержать жидкий металл, активно циркулирующий с использованием насосов рециркуляции или пассивно, для передачи тепловой энергии второй стороне

40 одного или множества разделительных теплообменников. В этой конфигурации активной зоны транспортируемого ядерного генератора вторая сторона может быть связана с модулем преобразования энергии, использующим турбомашину, выполненную так,

45 чтобы соответствовать требованиям регенеративного энергетического цикла Брайтона с газом в качестве рабочей текучей среды, или модулем преобразования энергии, использующим турбомашину и конденсатор, выполненный так, чтобы соответствовать требованиям энергетического цикла Ренкина с водой в качестве рабочей текучей среды.

[0024] Независимо от конфигураций модуля преобразования энергии, использующего компоненты, выполненные с возможностью соответствия требованиям энергетического цикла Брайтона или Ренкина, модуль преобразования энергии непосредственно соединен с модулем производства энергии, так как вращающиеся компоненты, образующие турбомашину в модуле преобразования энергии, и вращающиеся компоненты, образующие генератор-двигатель модуля производства энергии, непосредственно механически соединены с вращающимся валом так, чтобы вращаться на одинаковой скорости. Скорость вращения вала определяется термогидравлической системой преобразования энергии, условиями нагружения и настройками электронной системы управления, регулирующей электрический генератор-двигатель. Частота и другие электрические параметры энергии генератора могут быть регулируемыми посредством встроенных электронных схем согласования.

[0025] В одной конфигурации энергогенератор в модуле производства энергии может быть переключен для работы в качестве электродвигателя для приведения в движение турбомашины модуля преобразования энергии во время запуска и после остановки. В этой конфигурации энергия запуска может быть обеспечена с помощью блока батарей (т.е. источников бесперебойного питания) или внешнего источника электроэнергии (например, небольшой электродизельной установки).

[0026] В большинстве конфигураций вал, соединяющий все вращающиеся компоненты, встроенные в модуль преобразования энергии и модуль производства энергии, может быть соединен с неподвижными конструкциями соответствующих модулей с использованием магнитных подшипников. Для обеспечения полного отделения и независимости всех модулей модуль преобразования энергии и модуль производства энергии при соединении используют гибкое соединение для механического соединения с валом.

[0027] В другой конфигурации может быть предусмотрено сцепление, если требуется отцепление вращающихся компонентов модуля производства энергии от вращающихся компонентов модуля преобразования энергии, или если конкретное применение требует дифференциальной скорости вращения между вращающимися компонентами этих двух модулей. Следующее далее обсуждение подчеркивает ключевые и общие признаки транспортируемого ядерного генератора.

[0028] Во всех конфигурациях (т.е. использующих газ или жидкости в качестве теплоносителя и/или рабочих текучих сред) транспортируемый ядерный генератор представляет собой многокомпонентную многоуровневую модульность и интеграцию для обеспечения очень компактного транспортируемого блока производства энергии быстро размещаемого и изымаемого. Транспортируемый ядерный генератор представляет собой три предварительно изготовленных модуля, образующих при соединении единый корпус. Каждый модуль может быть выпускаемым серийно, легко транспортируется по отдельности или полностью собранным и готовым к эксплуатации. Энергетический модуль реактора может быть оперативно заменяемым в конце цикла перезагрузки или если требуется аварийное (т.е. военные операции) быстрое извлечение активной зоны, например, с помощью воздушного подъемника (т.е. воздушного транспорта C17 или вертолета большой грузоподъемности).

[0029] Компоненты транспортируемого ядерного генератора, образующие три модуля, основаны на существующих технологиях (турбомашина из различных коммерческих областей применения, и генератор-двигатель из технологий быстрого генератора переменного тока-двигателя с магнитными подшипниками), или испытанных технологиях, разработанных и протестированных в различных национальных

лабораториях и на международном уровне (например, топливо FCM). Энергетический модуль реактора содержит, поддерживает, защищает и охлаждает активную зону ядерного реактора, модуль преобразования энергии, содержащий турбомашину (турбины и компрессорное оборудование для конфигурации охлаждаемого газом транспортируемого ядерного генератора), встроенные теплообменники (т.е. рекуператор, предварительный теплоноситель и промежуточный теплоноситель), подходящие выбранному теплоносителю и термодинамическому энергетическому циклу (т.е. регенеративному или частично циклу Брайтона или Ренкина), и модуль производства энергии, содержащий блок статора/генератора.

10 [0030] Полностью собранный транспортируемый ядерный генератор может быть выполнен с возможностью работать горизонтально с минимальной подготовкой места или вертикально для подземных установок. Во всех конфигурациях транспортируемый ядерный генератор позволяет быстрое размещение и запуск, а также быстрое изъятие реактора полностью или отдельных модулей. Перезагрузка может быть выполнена 15 заменой «используемого» энергетического модуля реактора, содержащего отработанную активную зону, на новый модуль, содержащий неотработанную активную зону. Если неисправность возникает в модуле преобразования энергии или модуле производства энергии, их замена будет выполнена просто заменой неисправного модуля новым или восстановленным на производстве модулем.

20 [0031] В зависимости от выбранной рабочей текучей среды транспортируемый ядерный генератор не требует сложной сети трубопровода и оборудования, обычно образующего неядерное оборудование всех конструкций небольших модульных реакторов. Транспортируемый ядерный генератор полностью собирается и готов для производства энергии незамедлительно после размещения. Если транспортируемый 25 ядерный генератор выполнен с возможностью горизонтальной работы, полученный в результате генератор энергии позволяет простое размещение в местах, характеризующихся сейсмическими активностями, на борту кораблей и некоторых других применениях, требующих критической энергии. Энергетический модуль реактора, модуль преобразования энергии и модуль производства энергии могут быть выполнены 30 с возможностью их индивидуального и независимого закрепления на стандартизированном транспорте, операционных платформах и платформах хранения, с множеством вариантов транспортировки в соответствии со стандартами гражданской и военной транспортировки.

[0032] Транспортируемый ядерный генератор не требует больших масс воды для его 35 пассивного охлаждения и может использовать местную воду или сухой, неиспаряемый или просто воздух окружающей среды в качестве его конечного теплопоглотителя. В ненормальных ситуациях транспортируемый ядерный генератор будет способен полагаться исключительно на пассивный отвод остаточной тепловой энергии из активной зоны посредством теплопередачи проводимостью (при полном отсутствии 40 теплоносителя активной зоны) к стенкам ребристых модулей и пассивную конвекционную теплопередачу в наружный воздух, окружающий транспортируемый ядерный генератор. Энергетический модуль реактора при отделении от остальной части транспортируемого ядерного генератора для перезагрузки способен пассивно отводить остаточное тепло исключительно на основании механизмов излучения и конвекции 45 наружного воздуха.

[0033] Когда транспортируемый ядерный генератор выполнен с возможностью работать с модулем преобразования энергии, основанном на преобразовании цикла Брайтона, он обеспечивает возможность использования отвода тепла при высокой

температуре, что может быть использовано для поддержания различных применений технологического тепла. В этой конфигурации транспортируемый ядерный генератор может быть оборудован теплообменниками для производства низко- и/или высокотемпературного технологического тепла для распределения по оборудованию, предназначенному для опреснения, переработки биотоплива, централизованного теплоснабжения или других промышленных применений.

[0034] Модуль производства энергии может быть выполнен с возможностью запуска турбомашин при нагревании и повышении давления в первом контуре транспортируемого ядерного генератора с поддержкой от источников бесперебойного питания, представленных встроенным блоком батарей (т.е. содержащимися в модуле производства энергии), или небольшого внешнего электро-дизельного генератора. Полностью собранный блок транспортируемого ядерного генератора представляет собой энергетическую установку, выполненную с возможностью запуска, остановки, нормальной работы при пассивном поддержании безопасных границ температуры топлива во время переходных состояний и аварийных условий.

[0035] Другие устройства, установки, системы, способы, признаки и преимущества изобретения будут или станут очевидными специалисту в области техники при изучении следующих далее фигур и подробного описания. Предполагается, что все такие дополнительные системы, способы, признаки и преимущества, включенные в это описание, находятся в пределах объема охраны изобретения и защищены сопровождающей формулой изобретения.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

[0036] Изобретение может быть лучше понято со ссылкой на следующие далее фигуры. Компоненты на фигурах необязательно представлены в масштабе, вместо этого сделан акцент на иллюстрацию принципов изобретения. На фигурах ссылочные позиции обозначают соответствующие части на всех различных видах.

[0037] Фиг. 1 представляет собой вид сверху в поперечном сечении примера структурной схемы транспортируемого ядерного генератора, показывающий границы энергетического модуля реактора, модуля преобразования энергии и модуля производства энергии примерного варианта реализации.

[0038] Фиг. 2 представляет собой вид сверху в поперечном сечении примера структурной схемы транспортируемого ядерного генератора, показывающий единый корпус, содержащий все оборудование для горизонтальной или вертикальной работы транспортируемого ядерного генератора.

[0039] Фиг. 3 представляет собой вид сбоку примера реализации, показанного на Фиг. 1, иллюстрирующий внешние ребра транспортируемого ядерного генератора, выполненные таким образом, чтобы обеспечивать увеличение площади поверхности теплопередачи для пассивного охлаждения, структурного упрочнения и защиты компонентов.

[0040] Фиг. 4 и 5 иллюстрируют вид в поперечном сечении и функциональную схему охлаждаемой газом конфигурации примера реализации транспортируемого ядерного генератора, показанного на Фиг. 1.

[0041] Фиг. 6 представляет собой подробный схематический вид в поперечном сечении внутренних частей примера реализации варианта транспортируемого ядерного генератора с Фиг. 1.

[0042] Фиг. 7 представляет собой изображенный в разрезе вид в перспективе примера реализации энергетического модуля реактора транспортируемого ядерного генератора, показанного на Фиг. 1 и 6.

[0043] Фиг. 8 и 9 иллюстрируют виды в перспективе энергетического модуля реактора без и с верхним отражателем активной зоны соответственно в качестве примера энергетического модуля реактора транспортируемого ядерного генератора.

5 [0044] Фиг. 10, 10А и 10В представляют собой виды в перспективе примера реализации встроенного теплообменника низкого обратного давления, функционирующего в качестве «рекуператора», содержащегося в модуле преобразования энергии, проиллюстрированном на Фиг. 6.

10 [0045] Фиг. 11 представляет собой вид в перспективе полностью собранной примерной конфигурации встроенного теплообменника низкого обратного давления, обеспечивающего разделение между рабочей текучей средой, выходящей из турбомашин, и текучей средой, возвращающейся из компрессора, проиллюстрированного на Фиг. 6 и показанного на Фиг. 10, 10А и 10В.

15 [0046] Фиг. 12 представляет собой вид в перспективе примера реализации полностью собранного встроенного теплообменника низкого обратного давления, проиллюстрированного на Фиг. 11, иллюстрирующий теплопередачу, обусловленную разделенными формами потока между текучей средой, входящей во впуск теплообменника, показанный на Фиг. 10, и текучей средой, возвращающейся из секций промежуточного теплоносителя модуля преобразования энергии, тем самым выполняя функцию рекуперации тепловой энергии, в противном случае растрчиваемую на
20 выпуске турбомашин, предназначенной для расширения текучей среды примера реализации транспортируемого ядерного генератора, показанного на Фиг. 1 и Фиг. 6.

[0047] Фиг. 13 представляет собой вид в перспективе примера реализации устройства, предназначенного для удаления и оперативной замены гидравлического энергетического модуля реактора и выполнения уплотнения энергетического модуля реактора при
25 подготовке к транспортировке или хранению.

[0048] Фиг. 14 и 15 представляют собой вид в перспективе, иллюстрирующий примерную последовательность, применяемую для отсоединения энергетического модуля реактора от полностью собранного транспортируемого ядерного генератора и выполнения замены удаляемого гидравлического модуля, разъединяющего и
30 уплотняющего энергетический модуль реактора (активной зоны), или для выполнения обслуживания на одной стороне модуля преобразования энергии.

[0049] Фиг. 16 представляет собой вид в перспективе, иллюстрирующий примерную транспортировочную платформу транспортируемого ядерного генератора, совместимую со стандартами транспортировки и оборудованную направляющими, позволяющими
35 закреплять модули во время транспортировки и работы и позволяющими скольжение модулей для быстрого соединения или отсоединения без необходимости кранов большой грузоподъемности на месте размещения.

[0050] Фиг. 17 представляет собой вид в перспективе, иллюстрирующий примерную транспортировочную платформу транспортируемого ядерного генератора, показанного
40 на Фиг. 16, с дополнительными конструкциями защиты и пассивного охлаждения для выполнения быстрого оперативного извлечения энергетического модуля реактора (в короткое время после остановки).

[0051] Фиг. 18 представляет собой вид сверху в поперечном сечении, модифицированного варианта примерной структурной схемы транспортируемого
45 ядерного генератора, показанной на Фиг. 1, в которой единый корпус, содержащий все оборудование для горизонтальной (или вертикальной) работы транспортируемого ядерного генератора, выполнен для работы с водой в качестве теплоносителя и рабочей текучей среды энергетического цикла Ренкина с использованием первого и второго

контуров, разделенных по меньшей мере одним разделительным теплообменником. Эта конфигурация транспортируемого ядерного генератора также может применяться для энергетического модуля реактора, охлаждаемого жидким металлом, отделенным от модуля преобразования энергии посредством разделительного теплообменника, и предоставления возможности использования энергетического цикла Брайтона или Ренкина.

[0052] Фиг. 19 и 20 представляют собой вид сверху и функциональную схему соответственно примерной структурной схемы транспортируемого ядерного генератора, показанной на Фиг. 18.

[0053] Фиг. 21 представляет собой подробный схематический вид в поперечном сечении внутренних частей примера реализации варианта транспортируемого ядерного генератора, показанного на Фиг. 18.

[0054] Фиг. 22 представляет собой изображение в перспективе для обеспечения указания масштаба примерного полностью собранного транспортируемого ядерного генератора, закрепленного на стандартной транспортировочной платформе для быстрого размещения и готовности к производству энергии в любом месте размещения.

[0055] Фиг. 23 и 23А представляют собой изображения в перспективе примерного энергетического модуля реактора транспортируемого ядерного генератора, закрепленного на стандартной транспортировочной платформе для быстрой транспортировки «горячего» энергетического модуля реактора (т.е. аварийного изъятия с места), показанного здесь с дополнительными компонентами пассивного охлаждения и надувными щитами для обеспечения радиоактивной защиты при сценариях горячего удаления активной зоны.

[0056] Фиг. 24 и 24А представляют собой виды в перспективе предпочтительных элементов проводящей керамической активной зоны и полностью керамических микрокапсулированных топливных элементов, образующих устойчивую к плавлению активную зону, которая может быть пассивно охлаждена даже при полном отсутствии теплоносителя.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

[0057] Раскрытые здесь примерные конфигурации транспортируемого ядерного генератора описаны в контексте обеспечения безопасности, быстрой транспортировки и работы системы ядерного генератора для различных применений, требующих электроэнергии и технологического тепла. Специалисту в данной области техники будет понятно, что встроенные модули транспортируемого ядерного генератора могут быть выполнены для любого требующего энергии применения, имеющего необходимость в надежной и непрерывной подаче электроэнергии, возможно, в местоположении без другой альтернативы применения электро-дизельных генераторов с высокой стоимостью работы и загрязняющими выбросами. Транспортируемый ядерный генератор может быть выполнен с различными формами ребер для улучшения механизмов пассивной теплопередачи от внутренних частей транспортируемого ядерного генератора в окружающую среду (конечный теплопоглотитель).

[0058] Фиг. 1 представляет собой вид сверху в поперечном сечении примерной структурной схемы транспортируемого ядерного генератора 100, показывающий границы энергетического модуля 200 реактора, модуля 300 преобразования энергии и модуля 400 производства энергии примерного варианта реализации. Фиг. 2 представляет собой вид сверху в поперечном сечении примера структурной схемы транспортируемого ядерного генератора, показывающий единый корпус транспортируемого ядерного генератора 100, образованный соединением трех модулей (энергетического модуля

реактора, модуля преобразования энергии и модуля производства энергии) и содержащий все встроенное оборудование для горизонтальной или вертикальной работы.

5 [0059] Фиг. 3 представляет собой вид сбоку примера реализации, показанного на Фиг. 1, иллюстрирующий каждый модуль, содержащий внешние ребра 208 на энергетическом модуле реактора, 208 и 208А на модуле преобразования энергии и 208 на модуле производства энергии. Ребра 208 и 208А выполнены таким образом, чтобы обеспечивать увеличение площади поверхности теплопередачи для пассивного охлаждения, структурного упрочнения и защиты компонентов транспортируемого ядерного генератора 100.

10 [0060] На Фиг. 1 и 2 транспортируемый ядерный генератор 100 образован тремя главными модулями: заменяемым энергетическим модулем 200 реактора, вмещающим активную зону 203, системы 204 управления и остановки активной зоны, систему 205 управления активной зоной и отражением, конструкции 206 изменения направления потока теплоносителя (показаны подробно на Фиг. 7) и конструкции 207 пассивной теплопередачи активной зоны. Энергетический модуль реактора связан с модулем 300 преобразования энергии посредством уплотняющего и запорного фланца 201. Модуль 300 преобразования энергии уплотнен с энергетическим модулем реактора с использованием уплотнительного фланца 301 и содержит турбомашинное оборудование 20 304, теплообменники низкого обратного давления «рекуператора» 305, «предварительный теплоноситель» 306 и «промежуточный теплоноситель» 307, конструкции 309 изменения направления потока (подобные 206) и вал 310, механически соединенный со всеми вращающимися компонентами модуля 300 преобразования энергии и модуля 400 производства энергии. Модуль 300 преобразования энергии 25 уплотнен и связан с модулем 400 производства энергии с использованием фланца 301. Модуль 400 производства энергии уплотнен с модулем 300 преобразования энергии с использованием уплотнительного фланца 401 и содержит быстрый генератор-двигатель 402 со встроенными электронными контроллерами, источники бесперебойного питания 403 (т.е. батареи), подлежащие использованию во время операций запуска, встроенную систему охлаждения генератора/теплообменника 404, уплотняющие магнитные 30 подшипники 405 с конструкциями взаимодействующего и гибкого соединения, механически соединенные с вращающимся валом турбомшины 304. После того как они теплогидравлически связаны через уплотнительные фланцы 201-301, 301-401, три модуля образуют единый упрочненный корпус 100, пассивно обменивающийся тепловой энергией с окружающей средой, используя ребра 208 и 208А. В дополнение, для 35 обеспечения параметров теплопередачи для обеспечения передачи тепловой энергии от внутренних частей модуля к внешней среде транспортируемого ядерного генератора 100 ребра 208 и продолжающиеся ребра 208А имеют также структурное упрочнение и защиту компонентов. Граница давления, образованная перегородкой 209 в 40 энергетическом модуле 200 реактора, делает возможными различные теплоносители и разделение сред, представленные первой границей 311 давления при наличии второй границы давления, представленной камерой 210, вмещающей системы 204 и 205 управления. Подобным образом перегородка 406 в модуле 400 производства энергии делает возможным уплотнение и отделение среды 407 генератора-двигателя от среды 45 311, представленной внутри модуля 300 преобразования энергии. Вращающееся оборудование, образующее турбомашинные системы 304 модуля 300 преобразования энергии, механически соединено с одним валом 310, также механически соединенным с валом вращающихся компонентов, встроенных в генератор-двигатель 402 модуля

400 производства энергии, таким образом, все вращающееся оборудование соответствует вращению с одинаковой скоростью с использованием магнитных подшипников 405 без трения (показаны только с одной стороны турбомашинной системы 301 и генератора-двигателя 402).

5 [0061] Каждый модуль может быть транспортируемым независимо или все три полностью собранные и образующие полностью готовый к эксплуатации корпус 100 транспортируемого ядерного генератора. Все модули сопряжены посредством отверстий 211 нагнетательных и кабельных фитингов. Эти отверстия делают возможной загрузку теплоносителя или операции выгрузки, контроль и управление различными
10 электрическими функциями (т.е. приводом управляющего стержня или вращающимися механизмами управления и отражения). Дополнительно отверстия 211 фитингов обеспечивают соединения электрической шины от генератора-двигателя 402 до электросети в месте размещения.

[0062] Транспортировка полностью собранных или отдельных модулей
15 транспортируемого ядерного генератора 100 может быть выполнена в соответствии со стандартами транспортировки (т.е. с использованием стандартного оборудования для транспортировки). При транспортировке в полностью собранном виде транспортируемый ядерный генератор 100 представляет собой быстро размещаемый и изымаемый полностью готовый к эксплуатации генератор электроэнергии.

20 [0063] В одной конфигурации материалы, образующие корпуса высокого давления, представляющие каждый модуль, могут использовать композитные конструкции углерода и карбида кремния в качестве отражателя и также в качестве границы давления (корпус высокого давления). Использование легковесного корпуса с низким поглощением нейтронов будет делать возможным использование внешних механизмов
25 отражения нейтронов для улучшения баланса нейтронов активной зоны 203 небольшого размера (Фиг. 1).

[0064] В одной примерной конфигурации, показанной на Фиг. 1, модули транспортируемого ядерного генератора могут быть соединены с использованием уплотняющих и запорных фланцев 201-301 и 301-401 так, чтобы образовывать единый
30 упрочненный корпус 100 высокого давления транспортируемого ядерного генератора 100, работающего горизонтально. В другой конфигурации, показанной, например, на Фиг. 2, посредством переориентации внешних ребер 208, 208C и 208D теплопередачи транспортируемого ядерного генератора 100, транспортируемый ядерный генератор может быть выполнен с возможностью работать вертикально. Все модули содержат
35 высокоинтегрированные теплообменники, образованные внутренними ребрами 212, 207, 305, 306, 307 и 404, например, показанные на Фиг. 1 и 2. Эти встроенные теплообменники термически связаны с внешними ребрами 208 и 208A на Фиг. 1 и ребрами 208B, 208C и 208D (Фиг. 2) при переориентации для вертикальной работы транспортируемого ядерного генератора 100 или работы в подземных установках. Все
40 внутренние ребра в каждом модуле могут быть выполнены с возможностью обеспечивать поддержку внутренних компонентов, при этом по существу упрочняя общую конструкцию транспортируемого ядерного генератора, так как они образуют множество структурных ребер, таким образом, упрочняя весь корпус 100 транспортируемого ядерного генератора, а также в качестве каналов для потока
45 теплоносителя.

[0065] В одной конфигурации механизмы управления реактором транспортируемого ядерного генератора 100 могут содержать механизмы 205 управления приводом, показанные, например, на Фиг. 4, выполненные с возможностью управления

поглощающими нейтроны материалами 215 посредством вставки/извлечения указанных материалов 215 в областях отражателей 214 нейтронов, в дополнение к механизмам 204 управления приводом, выполненным с возможностью вставки/извлечения поглощающих нейтроны материалов 216 в области активной зоны 203, а также в
5 дополнение к центральному механизму 219 привода управляющих стержней, выполненному с возможностью вставки поглощающего нейтроны материала в областях по существу центральных относительно активной зоны 203.

[0066] В другой конфигурации механизмы управления реактором транспортируемого ядерного генератора 100 могут содержать механизмы 221 управления приводом (Фиг. б), выполненные с возможностью управления поглощающими нейтроны материалами 215 посредством вставки/извлечения указанных материалов 215 в областях отражателей 214 нейтронов, в дополнение к механизмам 204 управления приводом, выполненным с возможностью вставки/извлечения поглощающих нейтроны материалов 216 в области активной зоны 203, в дополнение к центральному механизму 219, выполненному с
15 возможностью вставки/извлечения поглощающих нейтроны материалов 220 в/из по существу центрального места активной зоны 203.

[0067] В другой конфигурации, показанной на Фиг. 7, реактор транспортируемого ядерного генератора 100 может быть выполнен с возможностью использовать энергетический модуль 200 реактора, содержащий механизмы управления реактором, включающие в себя вращающиеся барабаны 213, содержащие поглощающие нейтроны материалы на одной стороне и рассеивающие нейтроны материалы (отражатель) на противоположной стороне каждого вращающегося барабана. Вращающиеся барабаны 213 содержат магнитное соединение, которое всегда пассивно ориентирует барабаны посредством их вращения таким образом, чтобы поглощающие нейтроны материалы
25 обращались к активной зоне 203, таким образом, обеспечивая докритическое состояние активной зоны 203. Когда вращающиеся барабаны 213 управления вращаются с использованием электромагнитного управления (т.е. соленоидного, электромагнитного, оснащенного двигателем или пневматического привода, не показаны на Фиг. 7), вращающийся барабан повернут отражающей нейтроны стороной к активной зоне
30 203, тем самым увеличивая ее критичность. В случае потери электроэнергии вращающийся барабан управления всегда пассивно ориентируется таким образом, чтобы поглощающая нейтроны сторона была обращена к активной зоне 203, тем самым обеспечивая условия останова. Эта конфигурация остается эффективной, даже если корпус 100 транспортируемого ядерного генератора смещен от его опорной платформы
35 и повернут, например, в результате взрывов, вызванных военными событиями.

[0068] Как показано на Фиг. 5, 6, 8, 9 и 21, секции впуска и выпуска активной зоны 203 относительно направления потока теплоносителя обращены к отражателям 217 и 218 нейтронов соответственно. Дополнительно энергетический модуль реактора содержит систему аварийного останова ядерного реактора, которая вводит поглотитель
40 нейтронов в активную зону с помощью пассивной системы, если все другие системы управления выведены из строя.

[0069] Суммируя аспекты решения проблемы управления реактором, управление реактивностью активной зоны 203 может быть выполнено в одной конфигурации посредством управляющих стержней 215 в отражателе 214, содержащем поглощающий и отражающий материал, расположенный таким образом, чтобы быть пассивно вовлеченным в режим поглощения для безопасности и посредством множества приводных управляющих стержней 216 внутри активной зоны. В дополнительной конфигурации управления реактивностью активной зоны 203 может быть выполнено

посредством приводных управляющих стержней 216 внутри активной зоны, центрального управляющего стержня 220 и вращающихся барабанов 213 управления или совокупности этих конфигураций в дополнение к аварийному вводу поглотителя нейтронов для обеспечения дополнительной независимости механизма остановки активной зоны 203. Материал управляющего стержня вероятнее всего представляет собой основанную на SiC или C керамику с бором или редкоземельный поглощающий материал, и бериллий в качестве материала отражателя.

[0070] На Фиг. 1 встроенный теплообменник 212 внутри энергетического модуля 200 реактора может быть выполнен с возможностью обеспечивать пассивное охлаждение механизмов 204 и 205 привода управляющих стержней. На Фиг. 2 и 5 встроенные теплообменники 207 могут быть выполнены с возможностью пассивного отвода остаточного тепла из активной зоны 203 посредством теплопередачи проводимостью между внутренней активной зоной 203 и внешними ребрами 208 (Фиг. 1 и 3) или 208В (Фиг. 2) энергетического модуля 200 реактора. Встроенный теплообменник 207 может быть выполнен с возможностью передачи остаточной тепловой энергии из активной зоны 203 даже при сценариях полной потери теплоносителя. В некоторых конфигурациях активная зона 203 может быть образована топливными элементами, термически связанными с материалами, которые образуют высокотеплопроводный канал 207, как показано, например, на Фиг. 7. На Фиг. 4 и 5 модуль 300 преобразования энергии содержит последовательность встроенных теплообменников. Они могут быть выполнены с возможностью функционировать в качестве рекуператора 305, предварительного теплоносителя 306 и промежуточного теплоносителя 307 в соответствии с термодинамической конфигурацией энергетического цикла Брайтона. Дополнительно встроенные теплообменники, полностью встроенные в выделенные модули представлены встроенным теплообменником 404 генератора-двигателя, встроенным в модуль 400 производства энергии.

[0071] В одной предпочтительной конфигурации транспортируемого ядерного генератора, встроенного в единый корпус 100 на Фиг. 1, 2, 3, 4 и 5 модуль 300 преобразования энергии вмещает турбомашинную систему 304 и аппаратное обеспечение встроенного теплообменника для преобразования тепла, производимого в энергетическом модуле 200 реактора, в механическую энергию, подаваемую вращающемуся валу 310. Для соединения вращающейся турбомашинной системы на этом же валу 310, и в корпусе, представленном модулем 300 преобразования энергии, и принятия газа 312 (Фиг. 5) в качестве рабочей текучей среды с подходящими теплофизическими характеристиками, газ 312 высокой температуры, производимый течением через активную зону 203 в энергетическом модуле реактора впускается в газовые турбины 304А.

[0072] На Фиг. 5 и 6 после расширения на различных ступенях турбин 304А газ входит во встроенные теплообменники, определенные в виде рекуператора 305 и предварительного теплоносителя 306 перед входом на сторону низкого давления компрессора 304В и сторону высокого давления компрессора 304С с применением течения газа через встроенный промежуточный теплообменник 307 до изменения направления потока с использованием конструкции 206 изменения направления потока низкого сопротивления (Фиг. 1), течет по горячей стороне рекуператора 305 и, наконец, возвращается в исходное состояние газового цикла Брайтона посредством впуска на холодную сторону активной зоны 203 в энергетическом модуле 200 реактора. Предварительный теплоноситель 306 и промежуточный теплоноситель 305 могут быть выполнены в виде теплообменников типа газ-воздух или газ-жидкость, которые

передают остаточное отходящее тепло конечному теплопоглотителю пассивно с помощью ребер 208 и продолжающихся ребер 208А (Фиг. 3). В этой конфигурации охлаждающий реактор газ 312 и рабочий газ Брайтона 312 могут быть одинаковыми. Газ 312 может представлять собой CO₂, гелий, аргон или другую текучую среду с

5 теплофизическими свойствами, которые соответствуют требованиям термодинамики и активной зоны.

[0073] При конфигурации регенеративного цикла Брайтона эффективность преобразования энергии транспортируемого ядерного генератора может приблизительно составлять 45%. Обходной клапан 313 позволяет выполнение нагрузки согласно

10 потребности в энергии по существу посредством перетока газа 312, выходящего из активной зоны.

[0074] Так как вал 310 механически соединен с модулем 400 производства энергии и турбокомпрессором в модуле 300 преобразования энергии, генератор-двигатель 402 может быть выполнен для операций запуска так, чтобы использовать батареи,

15 встроенные в блоки 403 источников бесперебойного питания для преобразования генератора в двигатель и использования двигателя 402 в качестве привода для турбомашин, действующей в качестве системы циркуляции газа при запуске и остановке.

[0075] В одной конфигурации вал 310 может быть соединен с неподвижными

20 элементами модуля преобразования энергии и модуля производства энергии с использованием магнитных подшипников 405, с улавливающими подшипниками, вовлекаемыми в случае внезапной потери электроэнергии в системах управления транспортируемого ядерного генератора, электронных контроллерах или неисправности обмоток электромагнитного подшипника. Для обеспечения отделения модуля

25 преобразования энергии (т.е. во время независимой транспортировки модуля) от модуля производства энергии вал 310 может быть образован двумя отдельными валами, соединенными гибким высокоскоростным соединителем в месте фланцев 301-401 соединения модуля. Встроенное турбомашинное оборудование и оборудование генератора-двигателя позволяют работать без необходимости применения внешнего

30 неядерного оборудования, тем самым по существу уменьшая общую площадь размещения, уязвимости и вероятность сценариев потери теплоносителя.

[0076] На Фиг. 7, 8 и 9 энергетический модуль 200 реактора может использовать несколько типов активных зон 203, включая в себя устойчивые к плавлению проводящие керамические активные зоны.

[0077] В одной примерной конфигурации, показанной на Фиг. 7, активная зона 203 образована топливными элементами 221 с различными геометриями. Топливные элементы 221 могут быть выполнены с возможностью содержать пути 222 для прохода теплоносителя так, чтобы обеспечивать высокую эффективность преобразования

35 тепловой энергии, передаваемой теплоносителю при циркуляции в пределах проточной части. Проточные каналы 222 теплоносителя выполнены с предоставлением возможности текучей среде протекать через топливные элементы 221 и/или с возможностью вставлять или извлекать механизмы управления из активной зоны 203.

40

[0078] В одной конфигурации активной зоны 203 для улучшения механизмов теплопередачи проводимостью каналы 207 охлаждения могут быть получены

45 посредством тепловой связи топливных элементов 221 с ребрами, которые образуют канал 207 кондуктивного охлаждения, так как они обеспечивают канал теплопередачи из внутренних мест активной зоны 203 к внешним ребрам 208 через внутренние ребра 207А. Ребра 207А могут быть выполнены с возможностью направлять поток газа,

выходящий из рекуператора 305, в конструкции 206 изменения направления потока, при этом обеспечивая опорную конструкцию для внутренних частей активной зоны 203 и каналы передачи тепла для пассивной передачи тепловой энергии (т.е. остаточного тепла) из активной зоны к ребрам 208. Конструкции 206 изменения направления потока могут быть выполнены так, чтобы обеспечивать низкое гидродинамическое сопротивление и обеспечивать опорную конструкцию активной зоны, при этом обеспечивая передачу остаточной тепловой энергии из активной зоны внешним ребрам 208 транспортируемого ядерного генератора посредством механизмов теплопередачи проводимостью. В связи с этим активная зона 203 может безопасно и пассивно передавать остаточную тепловую энергию в среду, окружающую транспортируемый ядерный генератор, даже при полном отсутствии теплоносителя.

[0079] Фиг. 10, 10А и 10В представляют собой виды в перспективе примера реализации встроенного теплообменника низкого обратного давления рекуператора, встроенного в модуль 300 преобразования энергии. Как показано на этих Фиг. 10, 10А и 10В, рабочая текучая среда, газ 312, входит в рекуператор 305 с одной стороны, проходит полный контур 360° и выходит из рекуператора (симметрично в одной примерной конфигурации). Таким образом, газ 312 обменивается тепловой энергией с внутренними поверхностями рекуператора 305 без смешивания с текучими средами в тепловом контакте с внешними поверхностями рекуператора 305.

[0080] Фиг. 11 представляет собой вид в перспективе полностью собранной примерной конфигурации теплообменника низкого обратного давления встроенного рекуператора 305, встроенного в модуль 300 преобразования энергии. Эта конфигурация обеспечивает разделение между рабочей текучей средой 312А (горячий газ), выходящей из турбомашин, и текучей средой 312В (холодный газ), возвращающейся из компрессора 304С, описанного на Фиг. 5 и 6.

Фиг. 12 представляет собой вид в перспективе примера реализации полностью собранного теплообменника низкого обратного давления встроенного рекуператора 305 на Фиг. 11, иллюстрирующий теплопередачу, вызываемую разделенными формами потока между текучей средой 312А, входящей во впуск теплообменника 305, показанного на Фиг. 10, и текучей средой 312, возвращающейся из секций 307 промежуточного теплоносителя модуля преобразования энергии, тем самым выполняя функцию рекуперации тепловой энергии, в противном случае растрачиваемую на выпуске турбомашин с минимальным обратным давлением, благодаря уникальной геометрии теплообменника 305. Фиг. 13 представляет собой вид в перспективе примера реализации устройства, выполненного с возможностью «горячей» замены энергетического модуля реактора и специализированного для выполнения уплотнения энергетического модуля реактора при подготовке к транспортировке или хранению. Как показано на этой Фигуре, пример реализации устройства 500 замены модуля использует фланец 505 для его соединения с фланцем 503 для выполнения уплотнения энергетического модуля 200 реактора и отсоединения модуля 300 преобразования энергии 300. Так как фланцы 503 и 505 соединены, они уплотняются к фланцам 201 и 301, показанным на Фиг. 1. Гидравлически активируемые крепежные средства 501 отсоединяют фланцы 201 и 301, при этом механизм 502 вставляет закрывающую секцию 501, которая уплотняет энергетический модуль реактора 200. Фиг. 14 и 15 представляют собой вид в перспективе, иллюстрирующий примерную последовательность, используемую устройством 500 замены для отсоединения энергетического модуля 200 реактора от полностью собранного единого корпуса 100 транспортируемого ядерного генератора и уплотнения энергетического модуля 200 реактора с помощью уплотнительного фланца 501.

[0081] Фиг. 16 представляет собой вид в перспективе, иллюстрирующий примерную модульную транспортировочную платформу 600, совместимую со стандартами транспортировки и оборудованную направляющими 601, позволяющими закрепить модули 200, 300 и 400 во время транспортировки и работы. В этой конфигурации модули могут скользить для быстрого соединения или отсоединения без необходимости кранов большой грузоподъемности на месте размещения.

[0082] Фиг. 17 представляет собой вид в перспективе, иллюстрирующий примерную транспортировочную платформу 600 для транспортировки транспортируемого ядерного генератора, показанную на Фиг. 16, с дополнительной защитой 700 и конструкциями 701 пассивного охлаждения для обеспечения быстрого «горячего» изъятия энергетического модуля 200 реактора (изъятия активной зоны в короткое время после остановки). В этом варианте реализации весь единый корпус 100 транспортируемого ядерного генератора или только энергетический модуль 200 реактора могут быть затоплены так, чтобы увеличивать теплопередачу, если энергетический модуль 200 реактора должен быть транспортирован в относительно короткое время после остановки. В этой конфигурации активная зона продолжает пассивно охлаждаться, в то время как надувные щиты 700 могут быть заполнены водой так, чтобы образовывать толстую водную стену для ослабления поля излучения во время быстрого изъятия активной зоны.

[0083] Фиг. 18 представляет собой вид сбоку в поперечном сечении модифицированного варианта примерной структурной схемы транспортируемого ядерного генератора, показанной на Фиг. 1, в котором единый корпус, содержащий все оборудование для горизонтальной (или вертикальной) работы, транспортируемого ядерного генератора, выполнен для работы с водой 804 в качестве теплоносителя активной зоны 203, циркулирующего в первом контуре подобном типичному водородному ядерному реактору (ВВЭР). Рабочая текучая среда 805 во втором контуре, образующем энергетический цикл Ренкина, также представляет собой воду. В этой конфигурации транспортируемый ядерный генератор содержит первый и второй контуры, разделенные разделительным теплообменником, чья первая сторона 802 принимает тепловую энергию от активной зоны 203 посредством воды 804, циркулирующей под действием принудительной конвекции с помощью насосов 801 охлаждения реактора.

[0084] На Фиг. 18, 19, 20 и 21 в примерной конфигурации транспортируемого ядерного генератора, работающего с водой в качестве теплоносителя и рабочей текучей среды, охлаждающие реактор насосы 801 могут быть выполнены в виде герметичных насосов, размещенных либо на сухом днище или камере 210, как показано на Фиг. 18, или на кольцеобразной оболочке, показанной на Фиг. 21. Давление в первом контуре регулируется с использованием нагнетателя 800, содержащего нагревателя 800В и распылителя 800А (Фиг. 21). Системы управления и пассивного отвода остаточного тепла в этой конфигурации являются подобными описанным на Фиг. 1-7.

[0085] Второй контур, представленный посредством пути 805 потока, принимает тепловую энергию от первого контура с использованием разделительного теплообменника 802 и 803. Вода циркулирует по второй стороне теплообменника 803 с использованием подающих воду насосов 808. Когда пар выпускается второй стороной разделительного теплообменника 803, он расширяется в турбомашине 806, в котором энергия пара преобразуется в механическую энергию, передаваемую модулю 400 производства энергии и генератору 402. Турбомашина 806 и быстрый генератор 402 механически соединены с использованием вала 310 и отдельных механизмов между

модулем 300 преобразования энергии и модулем 400 производства энергии, которые описаны на Фиг. 1-7. Когда пар выпускается на выпуске турбомашин 806, он входит в промежуточный перегреватель 809 встроенного теплообменника (Фиг. 19 и 20) до конденсации в конденсаторе 807, таким образом, возвращаясь в исходное состояние энергетического цикла Ренкина.

[0086] Конденсатор 807 передает тепловую энергию в окружающую среду с использованием ребер 208 с помощью механизмов теплопередачи под действием силы тяжести, которые описаны на Фиг. 1-7. Краткосрочный отвод остаточного тепла из активной зоны 203 может быть выполнен при отсутствии электроэнергии посредством использования ИБП (источников бесперебойного питания) 403. Для конфигураций, в которых активная зона 203 может быть образована устойчивыми к плавлению керамическими материалами, пассивное охлаждение механизмами проводимости даже при сценарии полной потери теплоносителя, обеспечивает температуру активной зоны ниже пределов безопасности. Конфигурация транспортируемого ядерного генератора, содержащего первый и второй контур, работающий в различных границах давления, также может использовать охлаждаемый жидким металлом энергетический модуль реактора, отделенный от модуля преобразования энергии разделительным теплообменником и позволяющий использование энергетического цикла Брайтона или Ренкина во втором контуре.

[0087] Фиг. 22 представляет собой изображение в перспективе для обеспечения указания масштаба примерного полностью собранного транспортируемого ядерного генератора, закрепленного на стандартной транспортировочной платформе 900 для быстрого размещения и готовности к производству энергии в любом месте размещения, включая места с засушливыми и экстремальными условиями окружающей среды.

[0088] Фиг. 23 и 23А представляют собой изображения в перспективе примерного энергетического модуля реактора транспортируемого ядерного генератора, закрепленного на стандартной транспортировочной платформе 900 для быстрой «горячей» транспортировки энергетического модуля реактора (т.е. аварийного изъятия с места), показанные с дополнительными компонентами 701 пассивного охлаждения и надувными щитами 700 для обеспечения радиоактивной защиты при сценариях горячего удаления активной зоны.

[0089] Фиг. 24 и 24А представляют собой виды в перспективе предпочтительных секций 221 проводящей керамической активной зоны и полностью керамических микрокапсулированных (FCM) топливных элементов, образующих устойчивую к плавлению активную зону, которая может быть пассивно охлаждена даже при полном отсутствии теплоносителя. Топливо FCM использует керамические композитные материалы с низким поглощением нейтронов, например, карбид кремния (SiC). Композитные материалы SiC имеют много преимуществ относительно графита для использования в реакторах, так как они имеют очень низкую кинетику реакций с водой и воздухом при высокой температуре, не производят углеродную пыль, не имеют эффекта Вигнера от быстрого высвобождения энергии при низкой температуре после облучения, имеют хорошую устойчивость к излучению, они проявляют очень небольшое изменение размеров при облучении и обеспечивают непористый непроницаемый барьер для рассеивания продуктов распада даже при очень высокой температуре.

[0090] В одной конфигурации активная зона 203 может быть образована топливными элементами 901 и 221, изготовленными из композитных структур однонаправленного упрочненного волокнами NITE-спеченного SiC с волокнами SiC для обеспечения прочности. Ограничители активной зоны 203, и горячие каналы, и все пути 220А потока,

и каналы 222 управляющих стержней также выполнены из упрочненных волокнами композитных материалов. Например, встроенный теплообменник 305 рекуператора, показанный на Фиг. 6, может быть образован с помощью теплообменника SiC PC (печатный монтаж) типа газ-газ, выполненного с возможностью вставки в

5 кольцеобразное пространство, доступное вокруг турбомашин так, чтобы обеспечивать компактность, эффективность и низкое обратное давление. Другие конструкции SiC в активной зоне 203 включают в себя управляющие стержни, изготовленные из спеченной смеси SiC - Gd²⁰³ и Er²⁰³, и муфты управляющих стержней. Наконец, корпус высокого давления может быть изготовлен из предварительно напряженного композитного

10 материала SiC. В некоторых конфигурациях топливные элементы 221 могут обеспечивать частичные разрезы 906 и 905 для обеспечения управляемого фракционирования топливных элементов 221 без трещин, распространяющихся через уплотнители 902 или топливные элементы 901, если они подвергаются серьезным кинетическим напряжениям, вызываемым взрывами, например, в результате военных событий (попадание ракеты).

15 Таким образом, и в результате катастрофической атаки топливные блоки или элементы 221 могут быть разрушены вдоль управляемых частичных разрезов 906 или 905, тем самым оставляя топливные элементы 901 неповрежденными, даже при сценарии наиболее серьезной запроектной аварии или атаки. Этот признак позволяет активной зоне или ее разрушенным топливным блокам 221 содержать все летучие вещества и значительно

20 снижать последствия серьезного сценария нарушения активной зоны. Так как все радиоактивные летучие вещества остаются захваченными внутри топливных элементов 901 при сценарии серьезной проектной и запроектной аварии или атаки, транспортируемый ядерный генератор не требует планирования зон эвакуации, которые требуются всеми ММР (малый модульный реактор) и большими реакторами.

25 [0091] Специалисту в данной области техники будет понятно, как совокупность описанных признаков может быть сформирована для достижения примеров реализаций, которые могут не быть конкретно показаны на фигурах.

[0092] Понятно, что различные аспекты или детали изобретения могут быть изменены без отклонения от объема охраны изобретения. Более того, описание выше представлено

30 только с целью иллюстрации, а не с целью ограничения изобретения, определенного формулой изобретения.

(57) Формула изобретения

1. Транспортируемый ядерный генератор, содержащий:
 - 35 энергетический модуль реактора, вмещающий активную зону ядерного реактора, системы управления и конструкцию изменения направления потока теплоносителя, причем энергетический модуль реактора сжигает ядерное топливо для производства тепловой энергии в теплоносителе/рабочей текучей среде, которая подается во встроенный модуль преобразования энергии и производства электроэнергии;
 - 40 модуль преобразования энергии, содержащий турбомашинное оборудование и теплообменники, причем модуль преобразования энергии принимает тепловую энергию от теплоносителя/рабочей текучей среды из энергетического модуля реактора и производит механическую энергию, которая подается в модуль производства энергии;
 - и
 - 45 модуль производства энергии, содержащий быстрый генератор-двигатель, электронные контроллеры и источники бесперебойного питания, причем модуль производства энергии принимает механическую энергию от модуля преобразования энергии и производит электроэнергию,

причем энергетический модуль реактора, модуль преобразования энергии и модуль производства энергии выполнены теплогидравлически связываемыми друг с другом с образованием готового к эксплуатации ядерного реактора в виде единого корпуса,

5 причем генератор дополнительно содержит каналы для теплоносителя, ограниченные внутренними ребрами с низким гидродинамическим сопротивлением, которые обеспечивают опорную конструкцию активной зоны, при этом обеспечивая передачу остаточной тепловой энергии из активной зоны к внешним ребрам посредством механизмов теплопередачи проводимостью, причем каналы для теплоносителя выполнены с возможностью безопасной и пассивной передачи остаточной тепловой энергии среде, окружающей транспортируемый ядерный генератор, даже при полном 10 отсутствии теплоносителя.

2. Транспортируемый ядерный генератор по п. 1, причем энергетический модуль реактора, модуль преобразования энергии и модуль производства энергии могут быть изготовлены и транспортированы по отдельности и дополнительно выполнены с 15 возможностью их сборки для работы в горизонтальном или вертикальном расположении.

3. Транспортируемый ядерный генератор по п. 1, причем энергетический модуль реактора, модуль преобразования энергии и модуль производства энергии дополнительно выполнены с возможностью их пассивного охлаждения посредством 20 естественной циркуляции теплоносителя по поверхностям теплопередачи.

4. Транспортируемый ядерный генератор по п. 1, причем энергетический модуль реактора, модуль преобразования энергии и модуль производства энергии дополнительно выполнены с возможностью работы в виде автономного блока без необходимости во внешнем трубопроводе или оборудовании.

25 5. Транспортируемый ядерный генератор по п. 1, причем энергетический модуль реактора содержит устойчивую к плавлению теплопроводящую керамическую активную зону ядерного реактора.

6. Транспортируемый ядерный генератор по п. 5, причем устойчивая к плавлению теплопроводящая керамическая активная зона дополнительно содержит:

30 монолитные топливные элементы (MTF), содержащие трехструктурно-изотропическое (TRISO) расщепляющееся топливо, запечатанное в таблетках SiC.

7. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем таблетки SiC имеют структуру, созданную с использованием процесса спекания пропитыванием нанопорошками и образованием переходной эвтектической фазы (NITE).

35 8. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем MTF элементы содержат таблетки SiC с расщепляющимся топливом TRISO, запечатанные в элементы SiC или композитного SiC.

9. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем таблетки с топливом TRISO дополнительно содержат слой бестопливного SiC, окружающий область, заполненную 40 топливом.

10. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем таблетки с топливом TRISO дополнительно содержат оксид, карбид, оксикарбид или нитрид урана, плутония, тория или другого расщепляющегося изотопа.

45 11. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем таблетки с топливом TRISO дополнительно содержат редкоземельный оксид выгорающего поглотителя, содержащий оксид эрбия или оксид гадолиния, включенные в таблетки SiC.

12. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем устойчивая к плавлению теплопроводящая керамическая активная зона дополнительно содержит бестопливные

покрытые частицы, содержащие выгорающий поглотитель.

13. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем устойчивая к плавлению теплопроводящая керамическая активная зона дополнительно содержит топливные элементы, содержащие композитную структуру из однонаправленного упрочненного

5 волокнами NITE-спеченного SiC с волокнами SiC.

14. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем таблетки с топливом TRISO дополнительно содержат высокоплотное непористое покрытие SiC.

15. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем MTF элементы содержат прямоугольные блоки, гексагональные блоки или

10 пластины в форме четверти круга, и

причем MTF элементы содержат отверстия, которые обеспечивают проточные каналы для теплоносителя.

16. Транспортируемый ядерный генератор по п. 15, дополнительно содержащий элементы отражателя нейтронов, содержащие углерод или SiC,

15 причем элементы отражателя нейтронов геометрически выполнены с возможностью соответствовать геометрической конфигурации MTF элементов.

17. Транспортируемый ядерный генератор по п. 15, причем MTF элементы расположены близко друг к другу так, чтобы исключить зазоры между MTF элементами для улучшения посредством этого теплопроводности проводящей керамической

20 активной зоны и для улучшения свойств пассивной теплопередачи активной зоны.

18. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем устойчивая к плавлению теплопроводящая керамическая активная зона дополнительно содержит:

прижимные пластины, обеспеченные на впуске и выпуске активной зоны,

причем прижимные пластины содержат соответствующие отверстия для

25 теплоносителя, которые обеспечивают проточные каналы для теплоносителя, и

причем прижимные пластины выполнены с возможностью обеспечивать прижимную силу, которая сохраняет активную зону все время сжатой.

19. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем устойчивая к плавлению теплопроводящая керамическая активная зона дополнительно содержит:

30 топливные стержни, содержащие ядерный расщепляющийся материал в виде оксида, нитрида или металла с металлическим или керамическим покрытием и расположенные в пучках.

20. Транспортируемый ядерный генератор по п. 19, причем пучки геометрически размещены так, чтобы иметь подходящие свойства теплопередачи относительно

35 теплоносителя.

21. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем устойчивая к плавлению теплопроводящая керамическая активная зона дополнительно содержит свободные топливные элементы в форме сферического микротвэла.

22. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем устойчивая к плавлению

40 теплопроводящая керамическая активная зона выполнена с возможностью обеспечивать пассивное охлаждение даже при отсутствии теплоносителя.

23. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем устойчивая к плавлению теплопроводящая керамическая активная зона дополнительно содержит управляющие стержни, изготовленные из спеченной смеси SiC-Gd²⁰³ и Er²⁰³, и муфты управляющих

45 стержней.

24. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем устойчивая к плавлению теплопроводящая керамическая активная зона дополнительно содержит каналы управляющих стержней, изготовленные из упрочненных волокнами углерода или SiC

композитных материалов.

25. Транспортируемый ядерный генератор по п. 6, причем MTF элементы содержат частичные разрезы для обеспечения управляемого фракционирования MTF элементов без трещин, распространяющихся в таблетки с топливом TRISO в случае, когда
5 транспортируемый ядерный генератор подвергается серьезным кинетическим напряжениям или воздействиям.

26. Транспортируемый ядерный генератор по п. 1, причем энергетический модуль реактора дополнительно содержит по меньшей мере одну из следующих систем управления реактивностью:

10 (1) управляющие стержни или вращающиеся барабаны управления в отражателе нейтронов, содержащие поглощающие и отражающие нейтроны материалы, выполненные с возможностью их пассивного задействования в режиме поглощения для безопасности;

(2) сборка управляющих стержней внутри активной зоны;

15 (3) система аварийного останова ядерного реактора, которая вводит поглотитель нейтронов в активную зону посредством пассивной системы.

27. Транспортируемый ядерный генератор по п. 1, дополнительно содержащий инертный газ в качестве теплоносителя и рабочей текучей среды для модуля преобразования энергии, причем теплоноситель может представлять собой CO₂, гелий,
20 аргон или другой инертный газ.

28. Транспортируемый ядерный генератор по п. 1, причем энергетический модуль реактора, модуль преобразования энергии и модуль производства энергии дополнительно выполнены с возможностью осуществления регенеративного цикла
Брайтона для производства электричества.

25 29. Транспортируемый ядерный генератор по п. 1, дополнительно содержащий: первый контур, полностью заключенный в энергетическом модуле реактора; воду в качестве теплоносителя и замедлителя, циркулирующую в первом контуре; один или более встроенных разделительных теплообменников, выполненных с
30 возможностью обеспечивать тепловое соединение между первым контуром в энергетическом модуле реактора и вторым контуром в модуле преобразования энергии; воду, циркулирующую во втором контуре, которая принимает тепловую энергию от первого контура для производства перегретого пара,

причем вода во втором контуре передает тепловую энергию встроенной турбомашине в модуле преобразования энергии в виде перегретого пара для производства
35 электричества согласно энергетическому циклу Ренкина, и причем после расширения в турбомашине пар выпускается во встроенный конденсатор, который пассивно передает тепловую энергию внутренним и продолжающимся снаружи охлаждающим ребрам модуля преобразования энергии для конденсации пара.

40 30. Транспортируемый ядерный генератор по п. 29, дополнительно содержащий один или более насосов, которые повторно сжимают сконденсированный пар и нагнетают полученную переохлажденную воду на впуске второй стороны разделительного теплообменника во второй контур.

31. Транспортируемый ядерный генератор по п. 1, дополнительно содержащий:
45 первый контур, полностью заключенный в энергетическом модуле реактора; жидкий металл в качестве теплоносителя, активно циркулирующий посредством насосов рециркуляции в первом контуре; один или более встроенных разделительных теплообменников, выполненных с

возможностью обеспечивать тепловое соединение между первым контуром в энергетическом модуле реактора и вторым контуром в модуле преобразования энергии; газ или воду в качестве рабочей текучей среды во втором контуре,

5 причем при использовании газа в качестве рабочей текучей среды турбомашина выполнена с возможностью соответствовать требованиям регенеративного энергетического цикла Брайтона и

причем при использовании воды в качестве рабочей текучей среды турбомашина выполнена с возможностью соответствовать требованиям энергетического цикла Ренкина.

10 32. Транспортируемый ядерный генератор по п. 1, дополнительно содержащий: вращающиеся компоненты, образующие турбомашину в модуле преобразования энергии;

вращающиеся компоненты, образующие генератор-двигатель модуля производства энергии;

15 вращающийся вал, который соединяет вращающиеся компоненты, образующие турбомашину в модуле преобразования энергии, и вращающиеся компоненты, образующие генератор-двигатель модуля производства энергии, в форме непосредственного механического соединения так, что вращающиеся компоненты, образующие турбомашину, и вращающиеся компоненты, образующие генератор-двигатель, вращаются с общей скоростью,

причем скорость вращения вала определяется термогидравликой системы преобразования энергии, условиями нагружения и настройками электронной системы управления, регулирующей машину электрического генератор-двигателя, и

25 причем частота и другие электрические параметры энергии генератора могут быть регулируемыми посредством встроенных электронных схем согласования.

33. Транспортируемый ядерный генератор по п. 32, причем:

генератор-двигатель производит электричество во время работы транспортируемого ядерного генератора,

30 генератор-двигатель может быть использован в качестве электродвигателя для приведения в действие турбомшины модуля преобразования энергии во время запуска и после остановки, и энергия запуска может быть обеспечена для генератора-двигателя во время запуска с помощью источников бесперебойного питания или внешнего источника электроэнергии.

34. Транспортируемый ядерный генератор по п. 1, причем энергетический модуль реактора дополнительно выполнен так, что операция перезагрузки топлива может 35 быть выполнена путем удаления энергетического модуля реактора, содержащего неотработанное или отработанное ядерное топливо, и заменой его новым энергетическим модулем реактора, имеющим неотработанное ядерное топливо.

40 35. Транспортируемый ядерный генератор по п. 34, дополнительно содержащий теплообменники для производства низко- и/или высокотемпературного технологического тепла, подлежащего распределению по оборудованию, предназначенному для опреснения, переработки биотоплива, централизованного теплоснабжения или других промышленных применений.

36. Способ производства электричества, содержащий:

45 обеспечение транспортируемого ядерного генератора, содержащего энергетический модуль реактора, модуль преобразования энергии и модуль производства энергии, которые выполнены теплогидравлически связываемыми друг с другом с образованием готового к эксплуатации ядерного реактора, полностью содержащегося в едином

корпусе,

причем генератор дополнительно содержит каналы для теплоносителя, ограниченные внутренними ребрами с низким гидродинамическим сопротивлением, которые обеспечивают опорную конструкцию активной зоны, при этом обеспечивая передачу остаточной тепловой энергии из активной зоны к внешним ребрам посредством механизмов теплопередачи проводимостью, причем каналы для теплоносителя выполнены с возможностью безопасной и пассивной передачи остаточной тепловой энергии среде, окружающей транспортируемый ядерный генератор, даже при полном отсутствии теплоносителя;

приведение в действие транспортируемого ядерного генератора в одном из следующих режимов:

(1) согласно регенеративному энергетическому циклу Брайтона для производства электричества с использованием инертного газа в качестве рабочей текучей среды;

(2) согласно энергетическому циклу Ренкина для производства электричества при использовании воды в качестве рабочей текучей среды.

37. Способ по п. 36, дополнительно содержащий приведение в действие транспортируемого ядерного генератора в горизонтальной или вертикальной конфигурации.

38. Способ по п. 36, дополнительно содержащий приведение в действие транспортируемого ядерного генератора, используя:

энергетический модуль, содержащий активную зону ядерного реактора;

встроенные теплообменники, образованные внутренними и внешними ребрами, выполненные с возможностью обеспечивать пассивное охлаждение; и систему аварийного останова ядерного реактора, которая вводит поглотитель нейтронов в активную зону посредством пассивной системы, если другие системы выведены из строя.

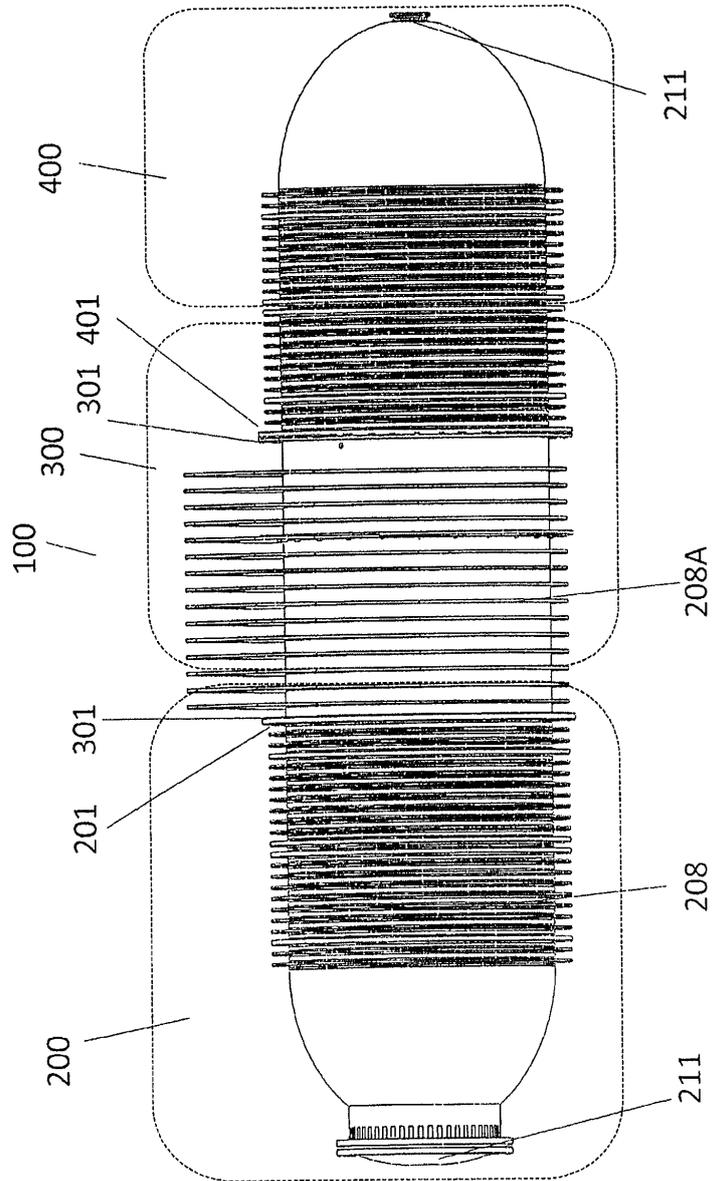
39. Способ перезагрузки транспортируемого ядерного генератора, содержащего энергетический модуль реактора, модуль преобразования энергии и модуль производства энергии, которые выполнены теплогидравлически связываемыми друг с другом с образованием готового к эксплуатации ядерного реактора,

причем генератор дополнительно содержит каналы для теплоносителя, ограниченные внутренними ребрами с низким гидродинамическим сопротивлением, которые обеспечивают опорную конструкцию активной зоны, при этом обеспечивая передачу остаточной тепловой энергии из активной зоны к внешним ребрам посредством механизмов теплопередачи проводимостью, причем каналы для теплоносителя выполнены с возможностью безопасной и пассивной передачи остаточной тепловой энергии среде, окружающей транспортируемый ядерный генератор, даже при полном отсутствии теплоносителя,

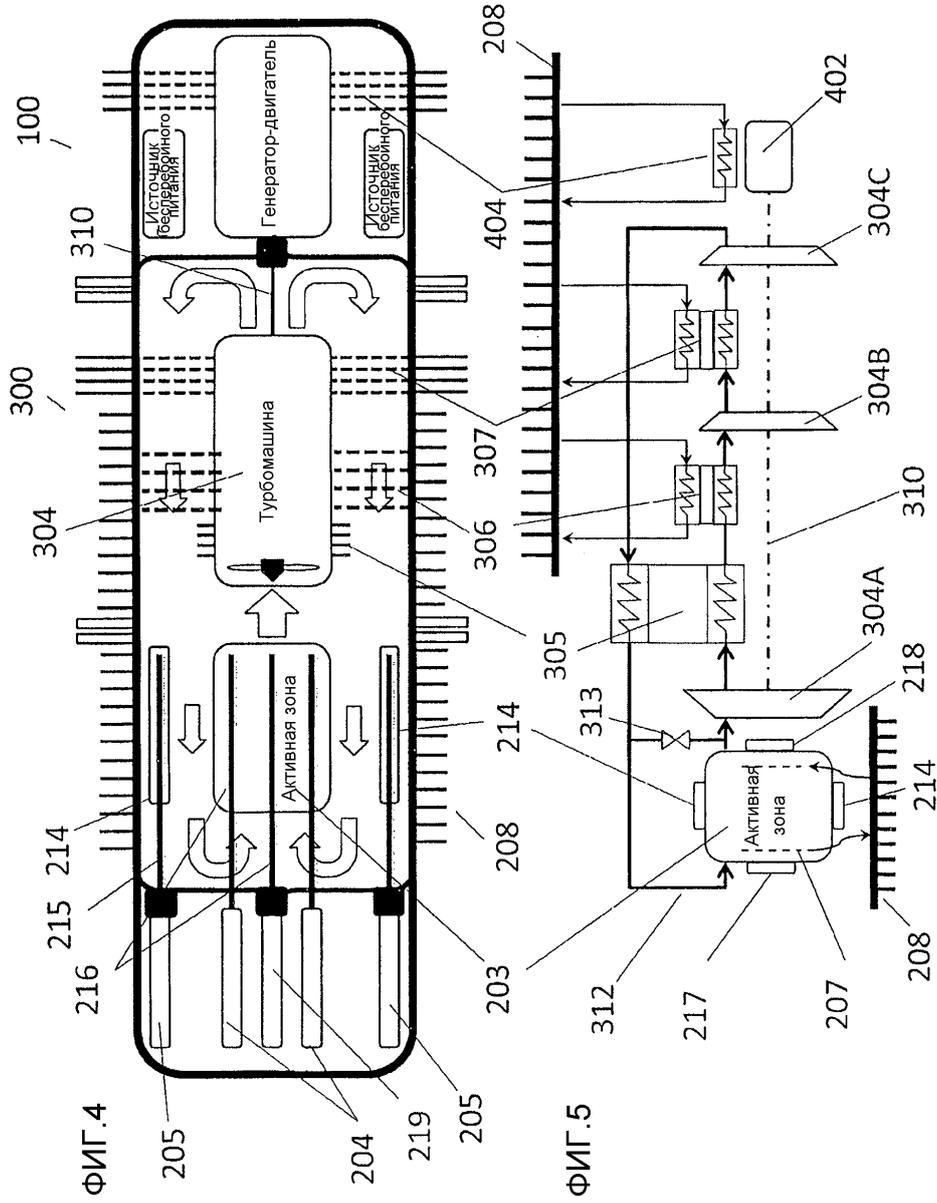
причем способ содержит:

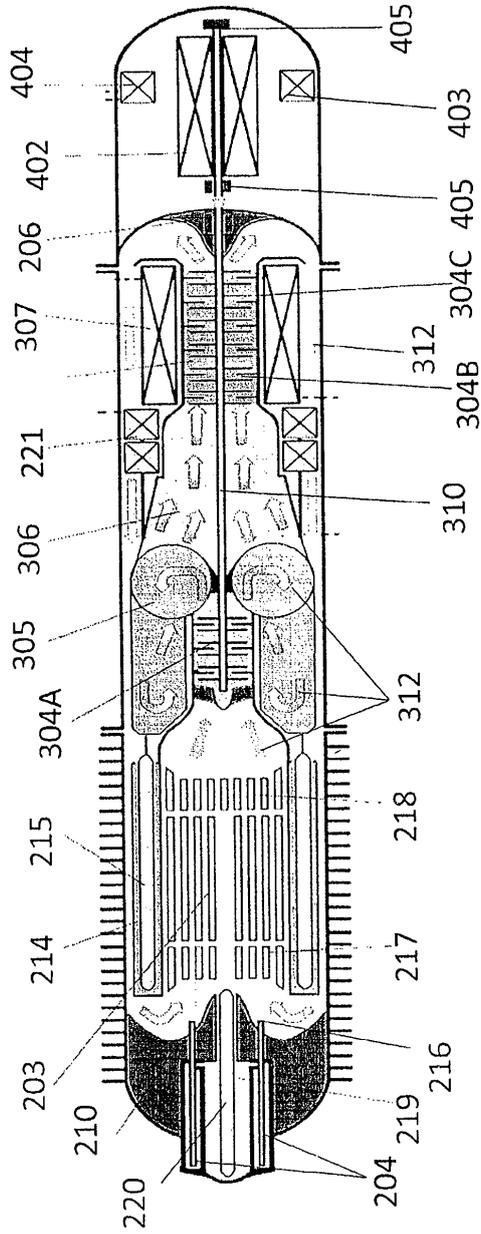
удаление первого энергетического модуля реактора, имеющего неотработанное или отработанное ядерное топливо;

и замену первого энергетического модуля реактора вторым энергетическим модулем реактора, имеющим неотработанное ядерное топливо.



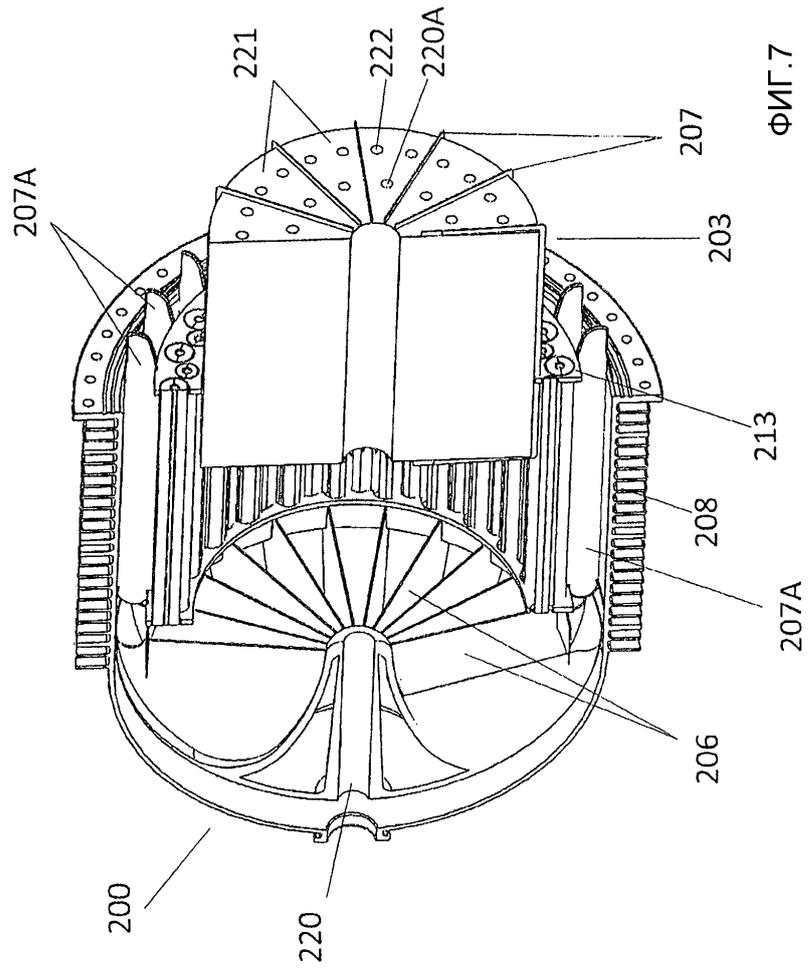
ФИГ.3



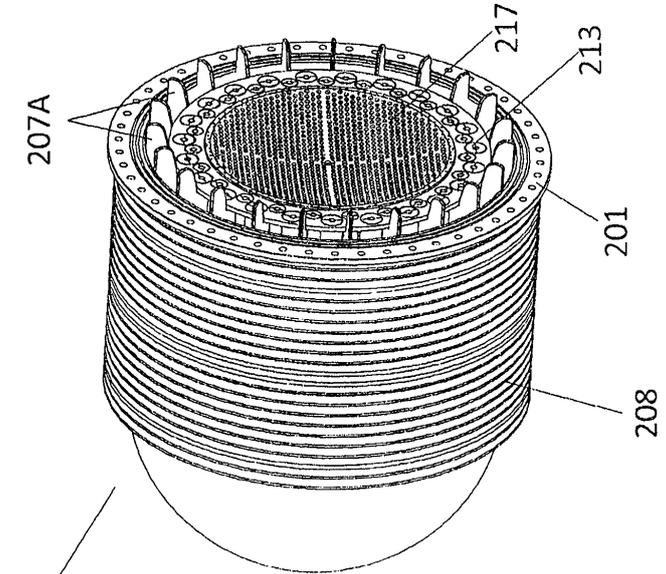


ФИГ.6

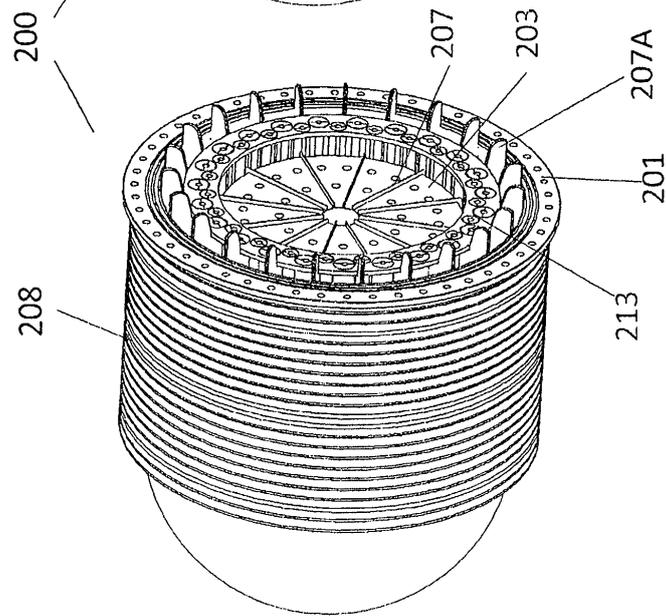
6/21



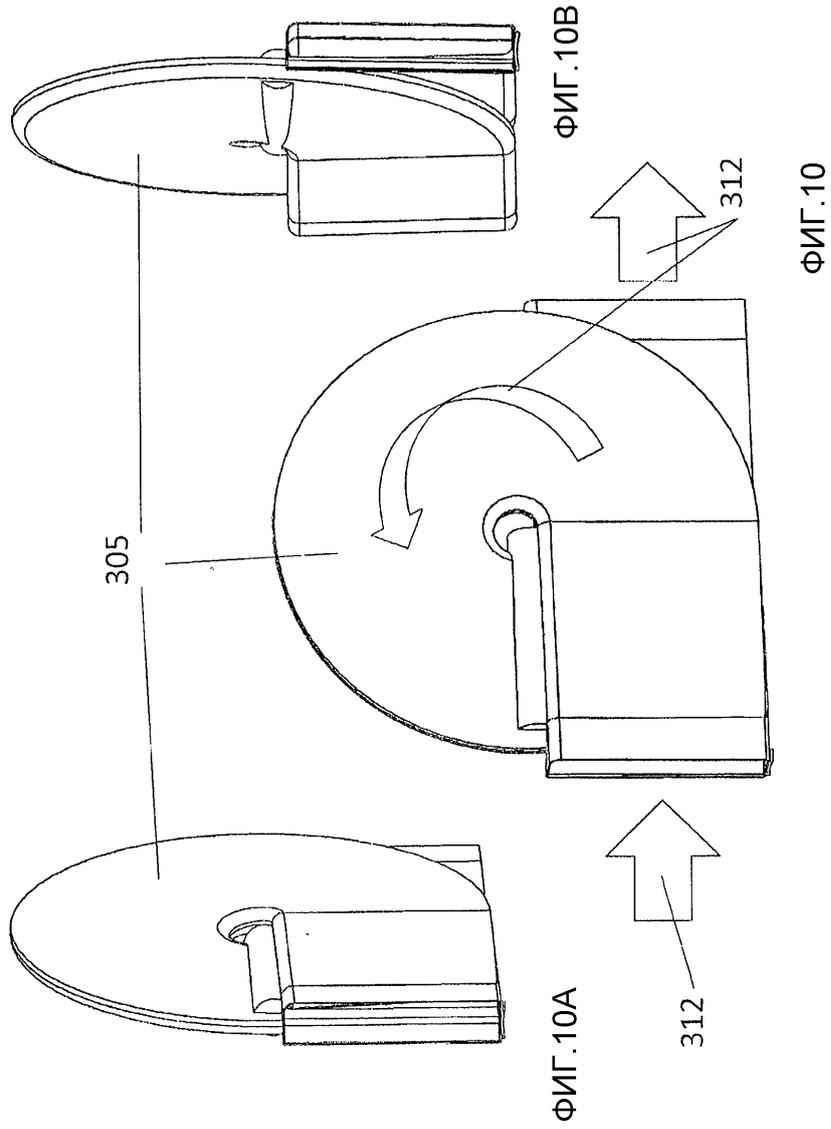
7/21

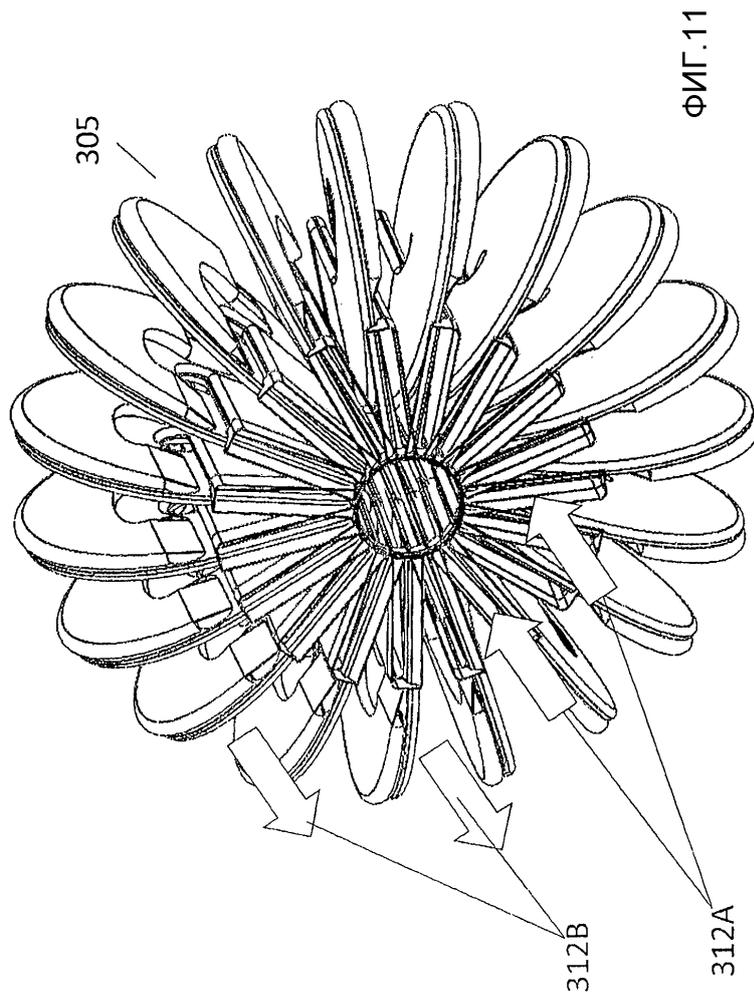


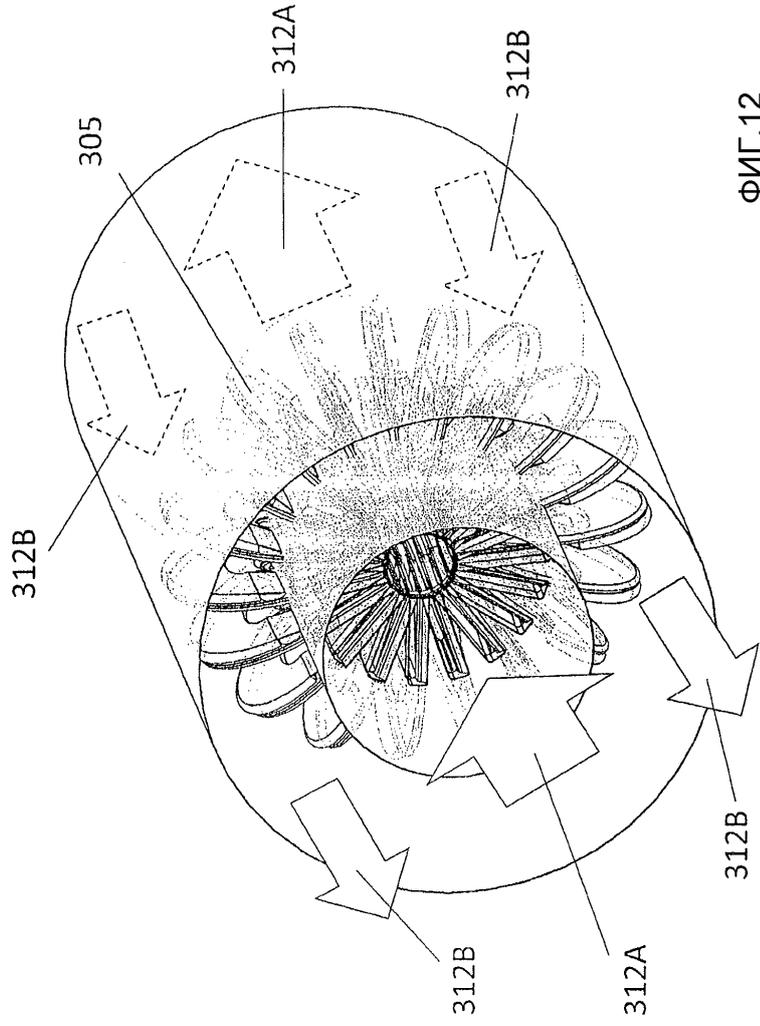
ФИГ.9

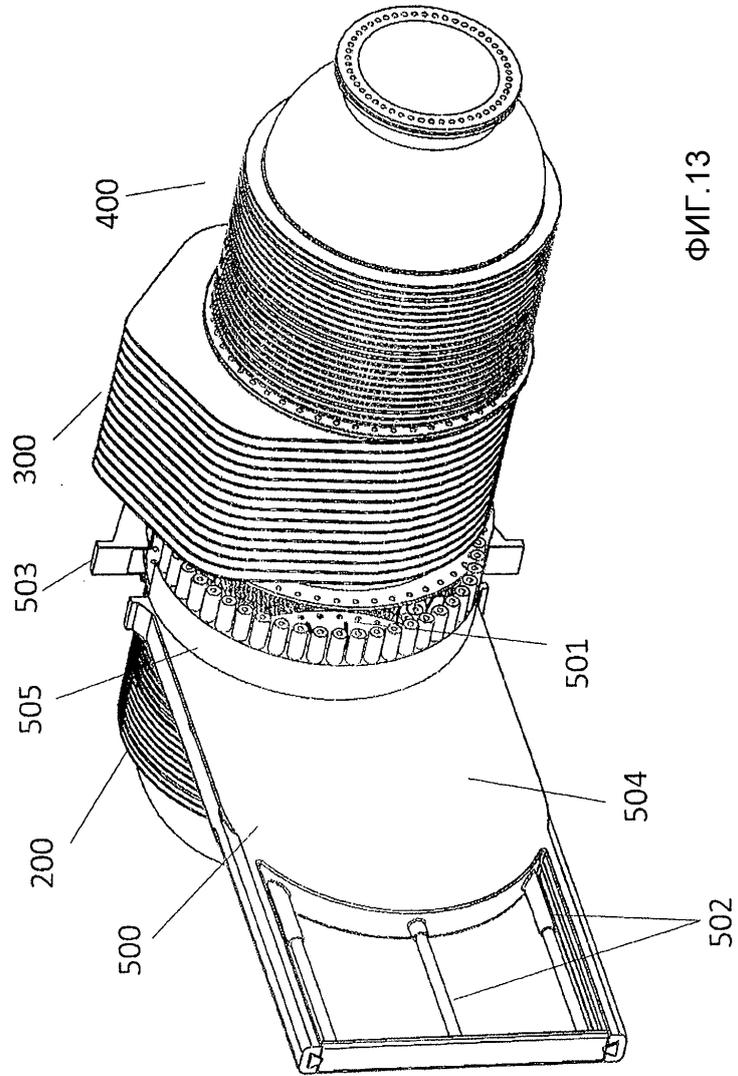


ФИГ.8

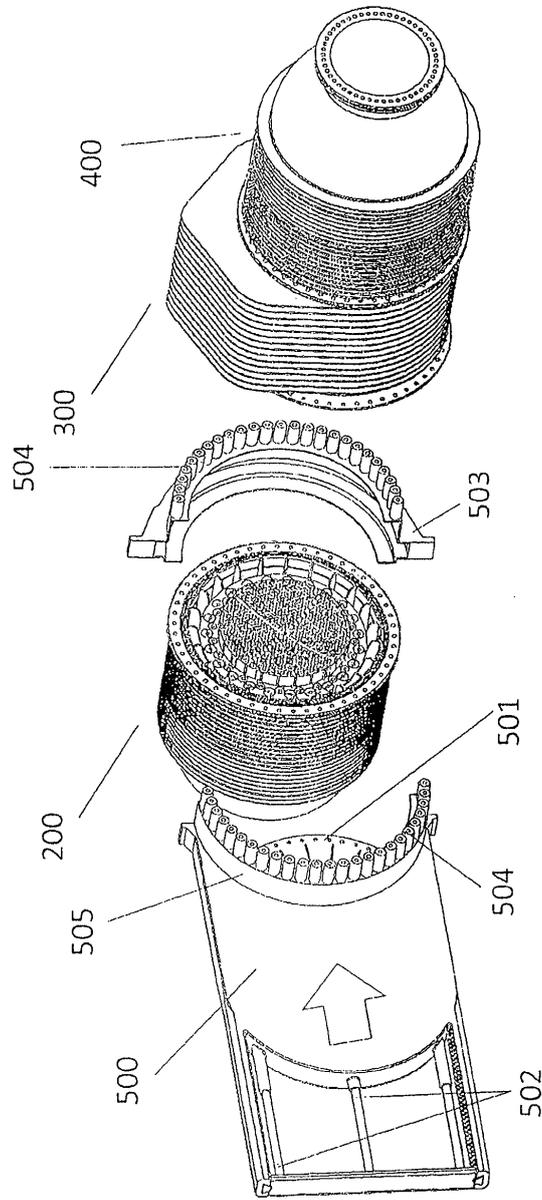






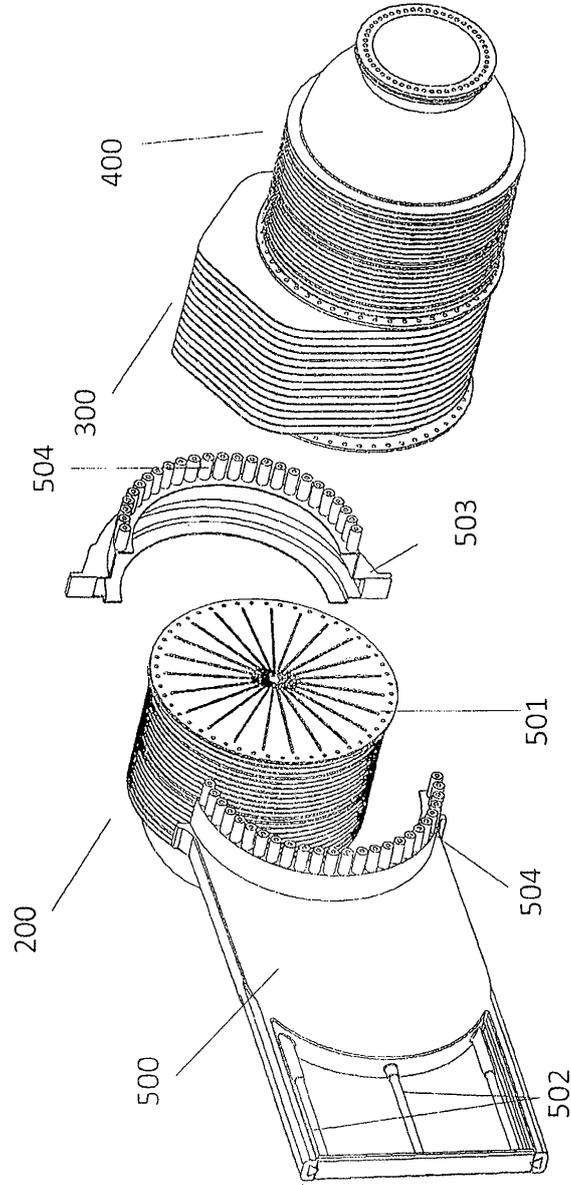


ФИГ. 13

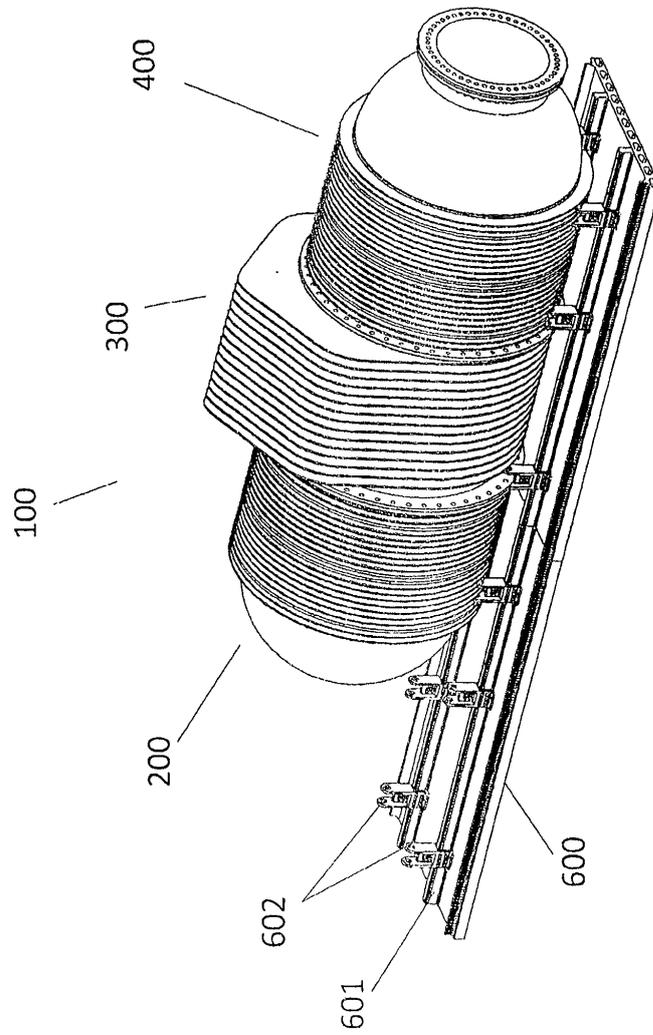


ФИГ.14

13/21

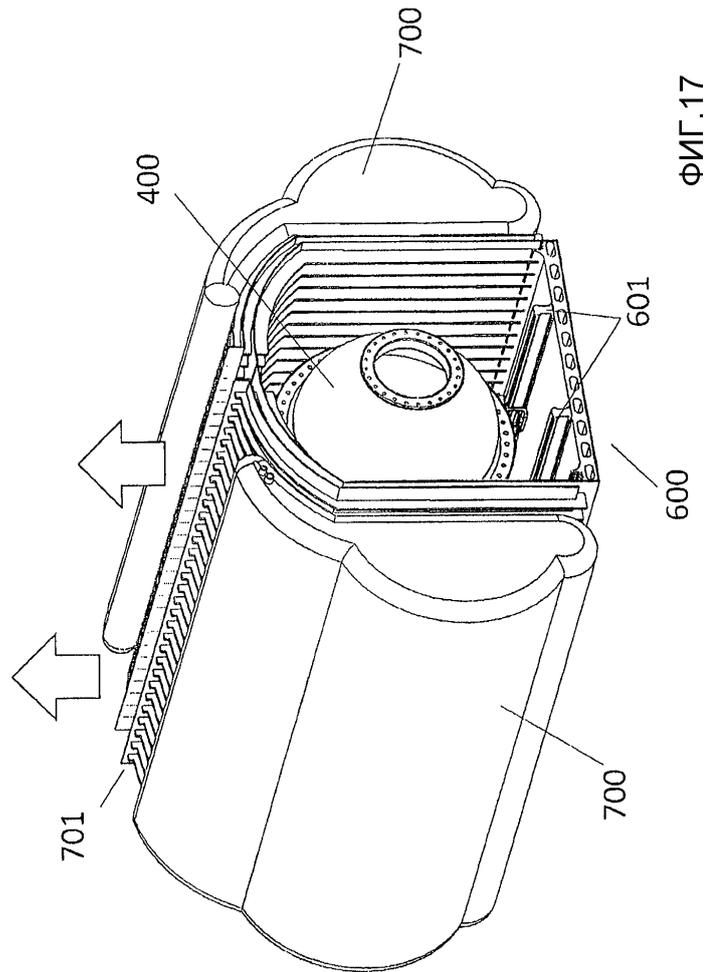


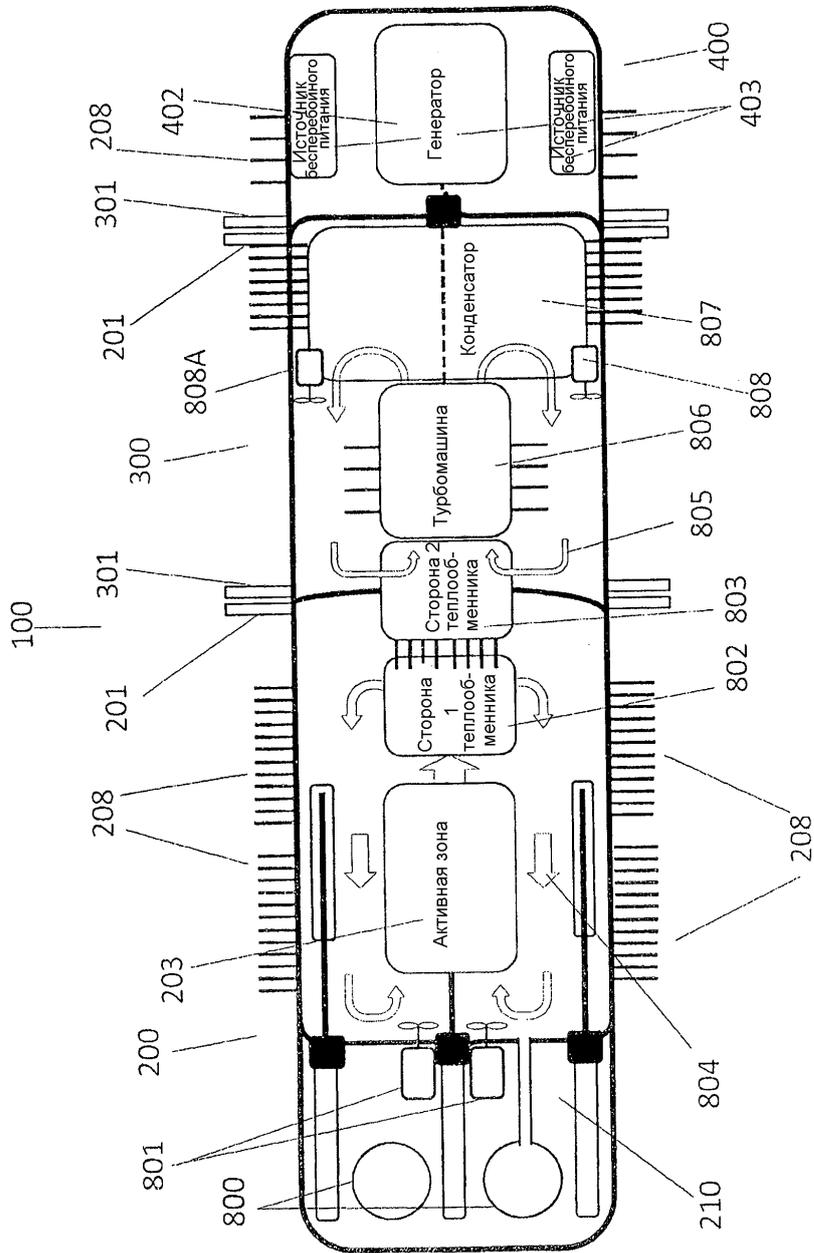
ФИГ. 15



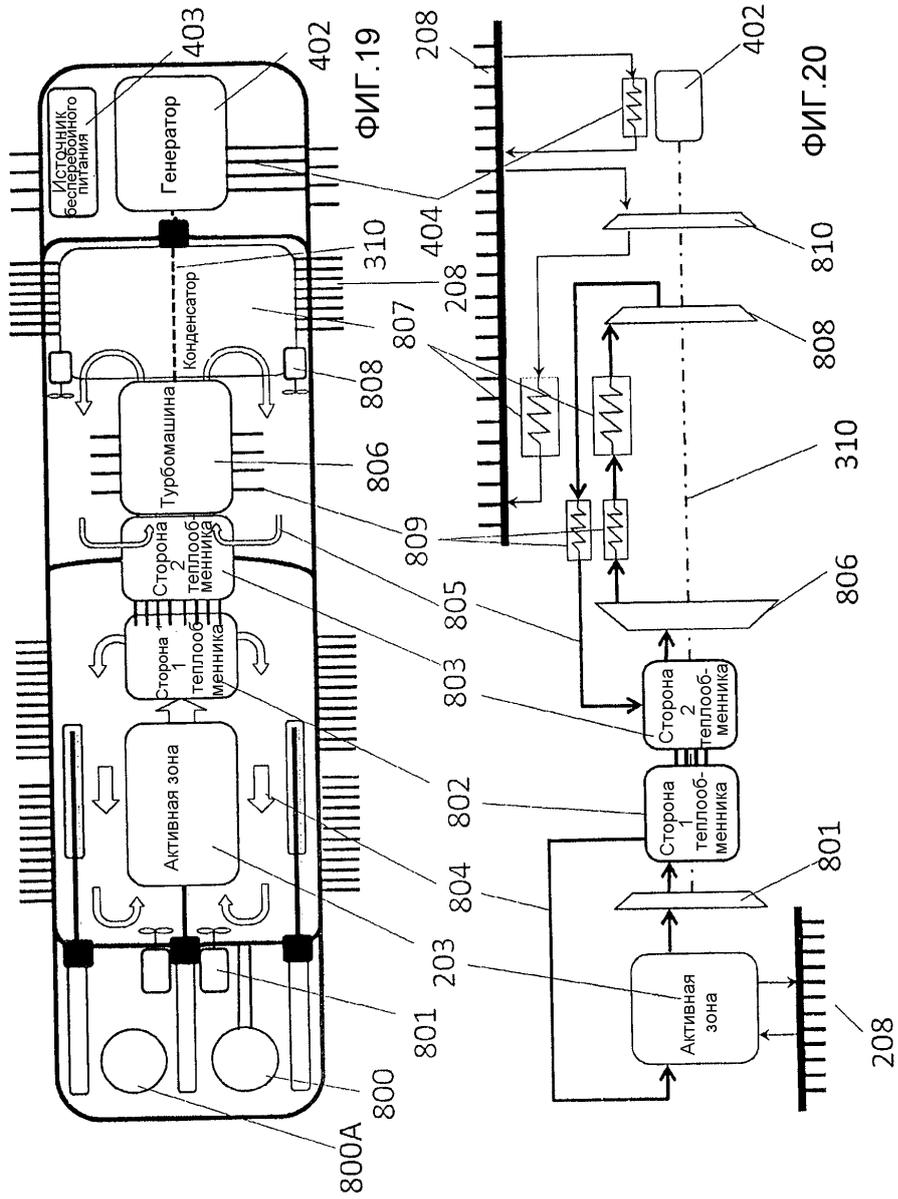
ФИГ. 16

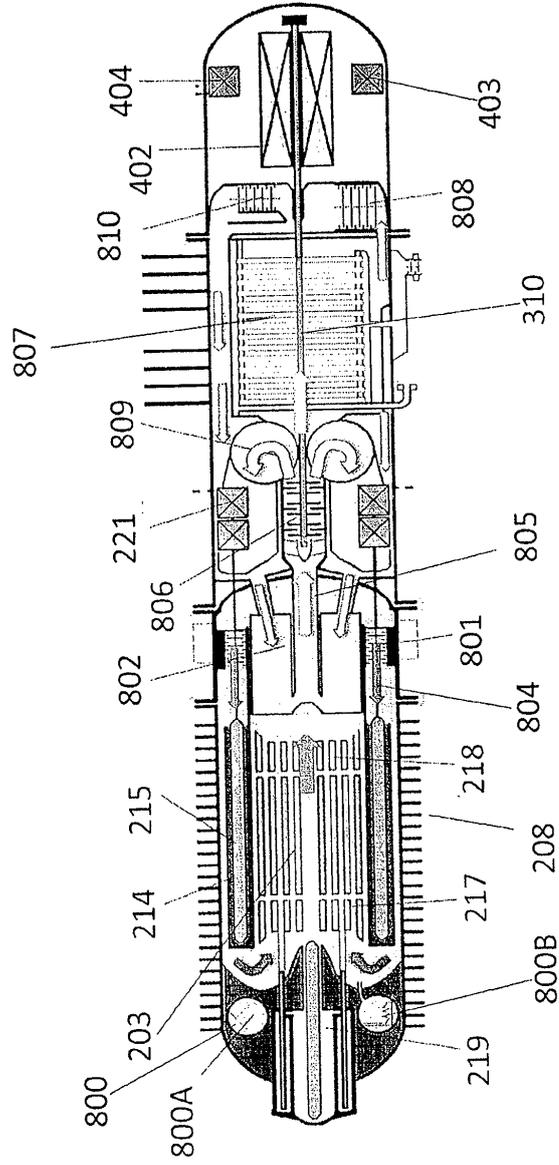
15/21



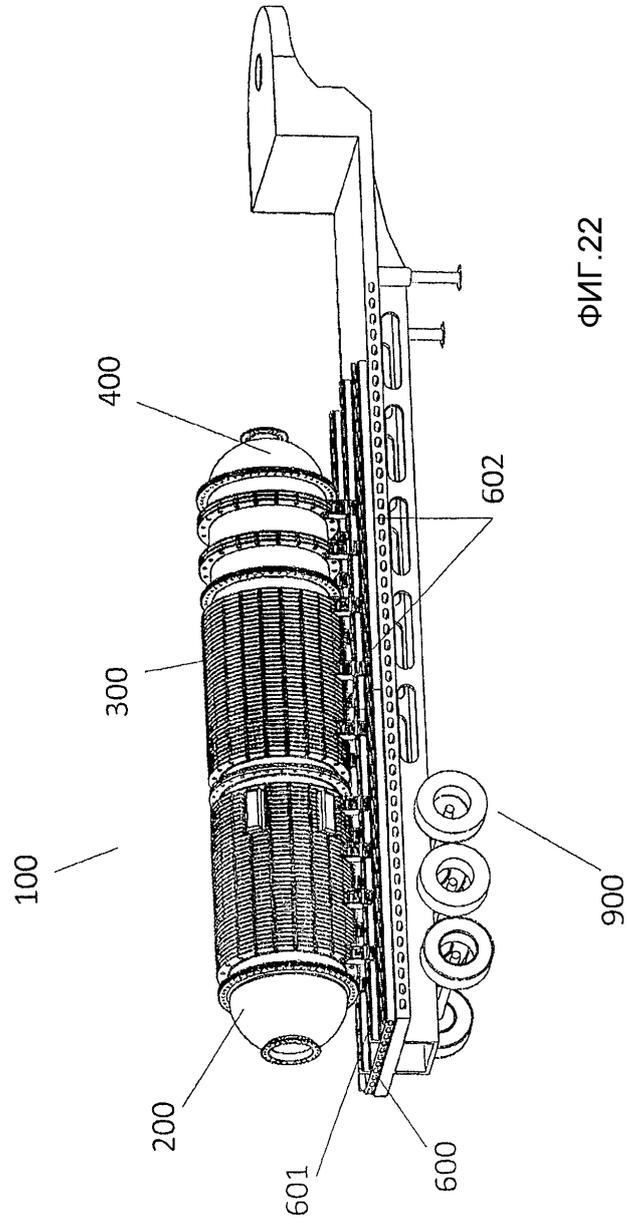


ФИГ.18





ФИГ.21



ФИГ.22

