

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **038588**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.09.20

(21) Номер заявки
201892167

(22) Дата подачи заявки
2017.05.01

(51) Int. Cl. **G21C 1/22** (2006.01)
G21C 3/24 (2006.01)
G21C 3/54 (2006.01)

(54) УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ И НАСОСА РЕАКТОРА НА РАСПЛАВЛЕННОМ ТОПЛИВЕ

(31) 62/330,726

(32) 2016.05.02

(33) US

(43) 2019.05.31

(86) PCT/US2017/030457

(87) WO 2017/192464 2017.11.09

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ТЕРРАПАУЭР, ЭлЭлСи (US)

(56) US-A-3996099
US-A-4342721
GB-A-964841
WO-A1-2013116942
US-A-4045286
US-A1-2015117589

(72) Изобретатель:
**Эббот Райан, Сиснерос Ансельмо Т.,
мл., Корбин Роберт А., Флауэрс
Дэниель, Фриман Чарльз Грегори,
Хэвстэд Марк А., Джонс Кристофер
Дж., Келлехер Брайан К., Крамер
Кевин, Латковски Джеффри Ф.,
Маквертер Джон Д. (US)**

(74) Представитель:
**Поликарпов А.В., Соколова М.В.,
Путинцев А.И., Черкас Д.А., Игнатьев
А.В. (RU)**

(57) Описаны конфигурации реакторов на расплавленной топливной соли, которые содержат вспомогательную систему охлаждения, которая разделяет часть первичного охлаждающего контура, но допускает пассивное охлаждение тепла радиоактивного распада из реактора. Кроме того, описаны различные конфигурации насосов для циркуляции расплавленного топлива через активную зону реактора и один или несколько установленных в корпусе теплообменников.

B1**038588****038588****B1**

Родственные заявки

Настоящая заявка подана 1 мая 2017 г. в качестве международной патентной заявки РСТ, приоритет которой испрашивается по дате подачи предварительной заявки на патент США № 62/330726, поданной 2 мая 2016 г., которая включена в настоящее описание посредством ссылки.

Введение

Использование расплавленного топлива в ядерном реакторе для производства электроэнергии дает значительные преимущества по сравнению с твердым топливом. Например, реакторы на расплавленном топливе обычно обеспечивают более высокую плотность мощности по сравнению с реакторами на твердом топливе, при этом одновременно снижаются затраты на топливо из-за относительно высокой стоимости производства твердого топлива.

Соли расплавленного фторида, пригодные для использования в ядерных реакторах, были разработаны с использованием тетрафторида урана (UF_4), смешанного с другими фтористыми солями, такими как UF_6 и UF_3 . Реакторы на расплавленной фторидосодержащей соли имеют рабочую температуру между 600 и 860°C. Двойные, тройные и четверные хлоридные соли урана, а также другие расщепляющиеся элементы описаны в поданной тем же заявителем заявке на патент США № 14/981512 под названием "Ядерное топливо на расплавленных солях и связанные с ним системы и способы", которая включена в настоящее описание посредством ссылки. В дополнение к хлоридным топливным солям, содержащим одно или несколько из PuCl_3 , UCl_4 , UCl_3F , UCl_3 , UCl_2F_2 и UClF_3 , в заявке далее описаны топливные соли с модифицированными количествами ^{37}Cl , бромидосодержащие соли, такие как UBr_3 или UBr_4 , хлорид тория (например, ThCl_4), а также способы и системы для использования топливных солей в реакторе на расплавленном топливе.

Ожидается, что средние рабочие температуры реакторов с хлоридной солью составляют от 300 до 600°C, но могут быть еще выше, например больше 1000°C.

Краткое описание чертежей

Следующие чертежи, которые составляют часть этой заявки, являются иллюстрацией описанной технологии и не предназначены для ограничения каким-либо образом объема заявленного изобретения, объем которого должен основываться на формуле изобретения, прилагаемой к настоящему документу.

Фиг. 1 иллюстрирует в виде блок-схемы некоторые из основных компонентов реактора на расплавленном топливе.

Фиг. 2А-2С изображают вариант выполнения конфигурации первичного охлаждающего контура и вспомогательной охлаждающей системы (ACS).

Фиг. 3А-3С изображают вариант выполнения конструкции реактора на расплавленном топливе, имеющего насос для каждого первичного теплообменника, используемый для управления потоком топливной соли.

Фиг. 4 изображает альтернативный вариант выполнения конструкции реактора на расплавленном топливе, аналогичной конструкции, изображенной на фиг. 3А-3С, но имеющей внутренний отражатель.

Фиг. 5, 6 и 7 изображают варианты выполнения альтернативной конфигурации насоса, в которой крыльчатка установлена в нижней части.

Фиг. 8 изображает еще один вариант выполнения конфигурации насоса, в которой одна крыльчатка 812А расположена внутри активной зоны 804 реактора.

Фиг. 9 изображает еще одну конфигурацию насоса, в которой крыльчатка промежуточно расположена между двумя секциями первичного теплообменника.

Подробное описание

Настоящее описание раскрывает различные конфигурации и компоненты ядерного реактора на расплавленном топливе. Для целей настоящей заявки далее описаны варианты выполнения реактора на расплавленном топливе, в которых используется хлоридное топливо, например смесь одной или нескольких топливных солей, таких как PuCl_3 , UCl_3 и/или UCl_4 , и одна или несколько не расщепляющихся солей, таких как NaCl и/или MgCl_2 . Однако следует понимать, что может использоваться любой тип топливной соли, который известен теперь или который будет разработан позже, и что описанные здесь технологии могут быть одинаково применимы независимо от типа используемого топлива. Например, топливная соль может содержать одну или несколько не расщепляющихся солей, таких как, но не ограничиваясь ими, NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , BaCl_2 , KCl , SrCl_2 , VCl_3 , CrCl_3 , TiCl_4 , ZrCl_4 , ThCl_4 , AcCl_3 , NpCl_4 , AmCl_3 , LaCl_3 , CeCl_3 , PrCl_3 и/или NdCl_3 . Следует отметить, что минимальная и максимальная рабочие температуры топлива в реакторе могут варьироваться в зависимости от топливной соли, используемой для поддержания соли в жидкой фазе во всем реакторе. Минимальные температуры могут составлять 300-350°C, а максимальные температуры могут достигать 1400°C или выше. Аналогичным образом, за исключением случаев, о которых сказано прямо, теплообменники будут в целом представлены в настоящем описании в терминах простых однопроходных кожухотрубных теплообменников, имеющих трубные пучки и с трубными решетками с обоих концов. Однако следует понимать, что в общем случае может быть использована любая конструкция теплообменника. Несмотря на то, что некоторые конструкции могут быть более подходящими, чем другие. Например, в дополнение к кожухотрубным теплообменникам могут быть исполь-

зованы пластинчатые, кожухопластинчатые теплообменники, теплообменники с вытравленными каналами и пластинчато-ребристые теплообменники.

На фиг. 1 проиллюстрированы в виде блок-схемы некоторые из основных компонентов реактора на расплавленном топливе. В целом, реактор 100 на расплавленном топливе содержит активную зону 104, содержащую делимую топливную соль 106, которая является жидкой при рабочей температуре. Расщепляемые топливные соли включают соли любого нуклида, способного к делению при воздействии тепловых нейтронов с низкой энергией или нейтронов с высокой энергией. Кроме того, для целей настоящего описания делимый материал включает любой делящийся материал, любой воспроизводящий материал или комбинацию делящихся и воспроизводящих материалов. Топливная соль 106 может полностью заполнять или не полностью заполнять активную зону 104, а показанный вариант выполнения проиллюстрирован с необязательным свободным пространством 102 над уровнем топливной соли 106 в активной зоне 104. Размер активной зоны 104 реактора может быть выбран на основе характеристики и типа конкретной топливной соли 106, используемой для достижения и поддержания постоянного критического состояния топлива, в течение которого тепло, выделяемое непрерывным производством нейтронов в топливе, вызывает повышение температуры расплавленного топлива, когда оно находится в активной зоне реактора. Критичность относится к состоянию, в котором скорость потерь нейтронов равна или меньше, чем скорость производства нейтронов в активной зоне реактора. Производительность реактора 100 улучшается за счет установки одного или нескольких отражателей 108А, 108В, 108С вокруг активной зоны 104 для отражения нейтронов обратно в активную зону. Отражатели могут быть изготовлены из любого материала, отражающего нейтрон, который известен теперь или будет разработан позже, такого как графит, бериллий, сталь, карбид вольфрама. Расплавленная топливная соль 106 циркулирует между активной зоной 104 реактора и одним или несколькими первичными теплообменниками 110, расположенными снаружи активной зоны 104. Циркуляция может обеспечиваться путем использования одного или нескольких насосов 112.

Первичные теплообменники 110 передают тепло от расплавленной топливной соли 106 первичному теплоносителю 114, который циркулирует по первичному охлаждающему контуру 115. В одном варианте выполнения первичный теплоноситель может представлять собой другую соль, такую как NaCl-MgCl_2 , или свинец. Например, в одном варианте выполнения первичный теплоноситель представляет собой соль $42\text{MgCl}_2 + 58\text{NaCl}$. Также возможны и другие теплоносители, включая Na, NaK, сверхкритический CO_2 и эвтектику висмут-свинец. В одном варианте выполнения отражатель 108 находится между каждым первичным теплообменником 110 и активной зоной 104 реактора, как показано на фиг. 1. Например, в варианте выполнения цилиндрическая активная зона реактора 104, имеющая диаметр 2 м и высоту 3 м, ориентирована вертикально, так что плоские концы цилиндра расположены, соответственно, сверху и снизу. Вся активная зона 104 реактора полностью заключена в отражатели 108, между которыми предусмотрены каналы для потока топливной соли 106 в активную зону 104 реактора и из нее.

Несмотря на то, что на фиг. 1 проиллюстрирован один теплообменник 110, в зависимости от варианта выполнения может быть использовано любое количество теплообменников 110, причем теплообменники 110 расположены на внешней поверхности активной зоны 104. Например, также предусмотрены варианты выполнения, имеющие два, четыре, шесть, восемь, десять, двенадцать и шестнадцать первичных теплообменников.

Как обсуждалось выше, можно использовать любую конструкцию теплообменника, но, в целом, теплообменники 110 далее обсуждаются в терминах кожухотрубного теплообменника. В вариантах выполнения кожухотрубного теплообменника топливная соль может проходить через трубки, которые содержатся в корпусе, заполненном первичным теплоносителем. Топливная соль поступает в трубки через одну или несколько трубных решеток, расположенных в корпусе, чтобы предотвратить смешивание топливной соли с первичным теплоносителем. Это называют либо конфигурацией с топливом в трубном пространстве, либо конфигурацией с теплоносителем в межтрубном пространстве. В качестве альтернативы, топливная соль может протекать через корпус, и первичный теплоноситель может проходить через трубки, причем эта конфигурация упоминается либо как конфигурация с теплоносителем в трубном пространстве, либо как конфигурация с топливом в межтрубном пространстве.

Соприкасающиеся с солью поверхности компонентов теплообменника могут иметь оболочку для защиты от коррозии. Другие варианты защиты включают защитные покрытия, свободные футеровки или плотно посаженные футеровки. В одном варианте выполнения оболочка на внутренней поверхности трубок выполнена из молибдена, который получен совместной экструзией вместе с основным материалом трубок теплообменника. Для других поверхностей, контактирующих с топливной солью (наружные поверхности трубных решеток и наружные поверхности корпуса), материал оболочки представляет собой молибденовый сплав. Никель и никелевые сплавы представляют собой другие возможные материалы оболочки. Молибден-рениевые сплавы могут использоваться там, где требуется сварка. Компоненты, контактирующие с первичной охлаждающей солью, могут быть покрыты сплавом-200 (Alloy-200) или любыми другими совместимыми металлами, такими как материалы, отвечающие стандартам по давлению Американского общества инженеров-механиков (ASME). Основным материалом трубок может быть нержавеющая сталь 316 или любые другие совместимые металлы. Например, в одном варианте выполне-

ния сплав 617 представляет собой материал корпуса и трубной решетки.

В варианте выполнения с топливом в трубном пространстве топливная соль протекает через трубки теплообменника 110 и выходит в канал для выпуска топливной соли. Первичный теплоноситель в корпусе теплообменника 110 удаляет тепло из топливной соли, проходящей через трубки, и нагретый теплоноситель затем передается в систему 120 выработки электроэнергии.

Как показано на фиг. 1, нагретый первичный теплоноситель 114 из первичных теплообменников 110 передается в систему 120 выработки электроэнергии для генерации некоторой формы мощности, например тепловой, электрической или механической. Активная зона 104 реактора, первичные теплообменники 110, насосы 112, трубки для циркуляции расплавленного топлива (включая другие вспомогательные компоненты, которые не показаны, такие как обратные клапаны, запорные клапаны, фланцы, дренажные резервуары и т.п.) и любые другие компоненты, через которые расплавленное топливо циркулирует или с которыми оно контактирует во время работы, могут упоминаться как топливный контур 116. Аналогично, контур 115 первичного теплоносителя содержит те компоненты, через которые циркулирует первичный теплоноситель, включая первичные теплообменники 110, трубки для циркуляции первичного теплоносителя (включая другие вспомогательные компоненты, которые не показаны, например охлаждающие насосы 113, обратные клапаны, запорные клапаны, фланцы, дренажные резервуары и т.п.).

Реактор 100 на расплавленном топливе также содержит по меньшей мере один защитный корпус 118, который содержит топливный контур 116, чтобы предотвратить выпуск расплавленной топливной соли 106 в случае утечки из одного из компонентов топливного контура. Следует отметить, что не весь первичный охлаждающий контур 115 находится внутри защитного корпуса 118.

В варианте выполнения поток топливной соли приводится в действие насосом 112, так что топливная соль циркулирует через топливный контур 116. В показанном варианте выполнения для каждого первичного теплообменника 110 имеется один насос 112. Также может быть использовано меньшее или большее количество насосов. Например, в альтернативных вариантах выполнения для каждого теплообменника 110 могут использоваться несколько насосов меньшего размера. В одном варианте выполнения насос 112 может содержать крыльчатку, установленную в некотором месте в топливном контуре 116. В одном варианте выполнения канал или компонент топливного контура, содержащий крыльчатку, также служит кожухом или корпусом насоса, так что вращение крыльчатки приводит в движение поток топливной соли по топливному контуру. Крыльчатки могут иметь любую конструкцию, такую как открытая, полуоткрытая или закрытая, а лопадки крыльчатки могут иметь любую конфигурацию, такую как искривленные назад, искривленные вперед или радиальные. Также в месте расположения крыльчатки или вблизи него может быть предусмотрена одна или несколько лопаток диффузора, чтобы способствовать направлению потока, вызванного вращением крыльчатки. Крыльчатка может быть прикреплена к вращающемуся валу, который соединяет крыльчатку с двигателем, который может быть расположен снаружи топливного контура и защитного корпуса. Пример этого варианта выполнения можно найти на фиг. 6А-6С, который обсуждается ниже. Также возможны и другие конфигурации насосов.

В широком смысле это описание раскрывает многочисленные изменения и конфигурации компонентов, которые улучшают рабочие характеристики реактора 100, описанного с ссылкой на фиг. 1.

Вспомогательная система охлаждения (ACS).

В одном варианте выполнения может быть предусмотрена ACS для вспомогательного охлаждения первичного теплоносителя. ACS может совместно использовать некоторые компоненты первичного охлаждающего контура и быть выполнена таким образом, чтобы принимать на себя охлаждение в течение определенных событий или при определенных обстоятельствах. В варианте выполнения ACS может состоять из одного или нескольких независимых ACS-контуров (т.е. независимо от других ACS-контуров), в которых каждый ACS-контур совместно использует часть своего проточного пути с первичным охлаждающим контуром.

Основными компонентами, которые вместе образуют ACS, являются трубы, такие как трубы из нержавеющей стали-316 с никелевым покрытием; запорные клапаны; вспомогательные теплообменники; воздухопроводы; несущие конструкции и приборы и диагностика.

Фиг. 2А и 2В изображают вариант выполнения конфигурации первичного охлаждающего контура и ACS, адаптированной для использования в ядерном реакторе на расплавленном топливе. В показанном варианте выполнения показан реактор 202 на расплавленном топливе, подключенный к четырем первичным охлаждающим контурам. Вспомогательная система охлаждения интегрирована в четыре независимых параллельных первичных охлаждающих контура. Каждый контур содержит первичное охлаждающее плечо 210 и плечо 212 ACS и совместно используемую часть 204 реактора для впуска и выпуска теплоносителя, которая направляет первичный теплоноситель в реактор 202 и из него. Поскольку она совместно используется, часть реактора 204 для впуска и выпуска считается частью как первичного охлаждающего контура, так и контура ACS.

Первичный охлаждающий контур во время нормальной работы имеет функцию транспортировки тепловой энергии из первичных теплообменников 206 внутри реактора 202, которые могут находиться внутри защитного корпуса реактора, в систему выработки электроэнергии (не показана). Первичный охлаждающий контур состоит из части 204 реактора для впуска и выпуска и первичного охлаждающего

плеча 210. В показанном варианте выполнения первичные охлаждающие плечи 210 содержат теплообменники 206 и оборудование для управления теплоносителем, необходимое для поддержания нормальной работы по охлаждению для реактора 202. В показанном варианте выполнения каждое первичное охлаждающее плечо 210 содержит, среди прочего, два теплообменника 206, насос 220 для теплоносителя, систему регенерации энергии в виде парогенератора 214, сливной бак 216 и бак 218 подпитки теплоносителя. Также может быть предусмотрен паровой подогреватель 226. Система регенерации энергии преобразует тепловую энергию от нагретого первичного теплоносителя в электрическую, тепловую или механическую энергию. Могут быть использованы многие известные типы систем рекуперации энергии, причем может использоваться любая известная сейчас система, или которая будет разработана позже.

В показанном конкретном варианте выполнения парогенератор 214 передает энергию от нагретого первичного теплоносителя в поток воды для генерирования пара, из которого генерируется электрическая, тепловая или механическая энергия, например, с использованием пара для выполнения цикла паровой турбины для выработки электроэнергии. Сливной бак 216 установлен в низком месте в трубе контура, чтобы дать возможность сливать соль из контура для обеспечения возможности обслуживания, ремонта или замены компонентов в цепи. Бак 218 подпитки служит в качестве расширительной камеры и содержит дополнительный теплоноситель для поддержания требуемого уровня и давления теплоносителя в контуре во всем диапазоне рабочих температур, даже если объем первичного теплоносителя в этом температурном диапазоне может колебаться.

Контур ACS выполняет функцию передачи тепловой энергии из первичных теплообменников в атмосферный воздух в некоторых ненормальных рабочих сценариях посредством полностью пассивных физических процессов. В показанном варианте выполнения контур ACS состоит из части 204 реактора для впуска и выпуска и плеча 212 ACS. Плечо 212 ACS содержит вспомогательный теплообменник (АНХ) 222 и воздухопровод 224. Воздуховод 224 позволяет потоку холодного окружающего воздуха поступать в АНХ 222 и выпускает нагретый воздух в атмосферу, чтобы удалять тепло из первичного теплоносителя, протекающего в контуре ACS. АНХ 222 предназначен для создания естественной циркуляции соли теплоносителя, вызванной подъемной силой, когда ACS является активной. Как упоминалось выше, АНХ 222 может представлять собой любую подходящую конструкцию теплообменника с воздушным охлаждением, включающую, но не ограничиваясь этим, ребристый теплообменник, оребренный теплообменник, кожухопластинчатый или кожухотрубный теплообменник.

В одном варианте выполнения ACS 200 во время нормальной работы реактора может быть обойден, так что большая часть тепла, генерируемого реактором 202, по возможности доступна для генерирования энергии. В альтернативном варианте выполнения ACS 200 может использоваться непрерывно, независимо от рабочего состояния реактора. В еще одном варианте выполнения контура могут быть выполнены таким образом, что ACS 200 имеет только уменьшенный поток первичного теплоносителя или иным образом вызывает пониженное количество теплопередачи в воздух во время нормальной работы, но большой поток и/или теплоперенос во время ненормальной работы. Например, в одном варианте выполнения во время потери мощности воздухопровод 224 может автоматически открываться или может открываться более полно, чтобы увеличить поток воздуха через АНХ 222.

Как было упомянуто выше, в одном варианте выполнения ACS 200 может быть выполнена так, чтобы быть полностью пассивной при работе. То есть охлаждение, обеспечиваемое ACS 200, происходит в отсутствие внешнего источника энергии или управления. В такой конструкции во время события потери принудительного потока поток первичного теплоносителя может приводиться в действие теплом, генерируемым реактором 220, таким как теплота радиоактивного распада, вырабатываемая топливной солью в реакторе, когда реактор является докритическим. Кроме того, в одном варианте выполнения охлаждающие контура 202 могут быть выполнены так, что в случае потери мощности поток направляется от первичного контура к контуру ACS. Например, клапаны между впускной и выпускной частями 204 реактора и первичным охлаждающим плечом 210 могут автоматически закрываться в случае потери мощности, принудительно направляя поток теплоносителя через контур ACS. В показанном варианте выполнения предусмотрены обратные клапаны 228, которые предотвращают циркуляцию потока из контура ACS в первичное охлаждающее плечо 210.

Следует отметить, что даже несмотря на то, что в аварийной ситуации ACS 200 может работать полностью пассивно, при отсутствии аварийной ситуации ACS 200 может также быть выполнена с возможностью управления, чтобы увеличивать или принимать на себя обязанности по охлаждению первичного охлаждающего контура 206, когда это необходимо. Такое может происходить в моменты, когда выработки электроэнергии не требуется или она нежелательна, но оператору все еще необходимо управлять реактором 202, например, во время запуска, выключения, периодов низкой потребляемой мощности или тестирования. Таким образом, ACS 200 может обеспечивать гибкость при работе в качестве аварийной системы теплоотвода.

В одном варианте выполнения первичный теплоноситель представляет собой расплавленную соль, такую как $42\text{MgCl}_2 + 58\text{NaCl}$, при этом все поверхности, обращенные к соли, изготовлены из материала или покрыты материалом, пригодным для использования с солью теплоносителя. Например, трубы могут быть выполнены из нержавеющей стали-316 с никелевым покрытием на их внутренних поверхностях и

иметь систему распределенного нагрева, используемую во время запуска для расплавления замороженной соли. В одном варианте выполнения для управления потоком охлаждающей жидкости в реакторе 202 могут быть предусмотрены обратные клапаны, когда ACS 200 активируется, чтобы избежать переохлаждения топлива. Как часть границы защитного корпуса для ненормальных рабочих сценариев, могут быть предусмотрены запорные клапаны 230.

Вариант выполнения, показанный на фиг. 2А и 2В, использует четыре независимых контура ACS. Контуры ACS могут быть рассчитаны на избыточность так, что если какой-либо из них не работает, система по-прежнему обеспечивает достаточное охлаждение, чтобы сохранить все структуры, системы и компоненты в границах расчетного предела.

Система дополнительного прямого охлаждения реактора (DRACS).

Как обсуждалось выше, в случае отключения электроснабжения естественная циркуляция топливной соли через первичный теплообменник может предотвратить накопление слишком большой тепловой энергии в топливной соли. Однако также может быть предусмотрена система дополнительного прямого охлаждения реактора (DRACS). В одном варианте выполнения во время отключения электроснабжения DRACS может отвечать за удаление достаточного количества тепловой энергии из реактора для предотвращения повреждения любого из компонентов. DRACS может содержать один или несколько специализированных вторичных теплообменников, которые передают тепловую энергию из топливной соли в первичный теплоноситель, а затем - через ACS. Примеры таких конструкций теплообменников DRACS можно найти в предварительной заявке на патент США № 62/422474, поданной 15 ноября 2016 г. под названием "Тепловое управление ядерными реакторами на расплавленном топливе", которая включена в настоящую заявку посредством ссылки.

В одном варианте выполнения система DRACS имеет специализированный теплообменник DRACS в бассейне ядерного реактора, в дополнение к любым первичным теплообменникам. DRACS может также содержать специальный контур теплоносителя DRACS, полностью независимый от контура первичного теплоносителя. В одном варианте выполнения DRACS может быть рассчитан таким образом, чтобы он мог удалять ожидаемое тепло радиоактивного распада из реактора в том случае, если первичный охлаждающий контур работает не полностью. Варианты выполнения описанных здесь реакторов могут обеспечить один или несколько теплообменников DRACS в дополнение к первичным теплообменникам. Теплообменники DRACS могут располагаться на уровне выше теплового центра активной зоны реактора и первичного теплообменника, чтобы получить больше преимуществ естественной циркуляции, что важнее во время события потери принудительного потока. Например, в варианте выполнения теплообменник DRACS расположен выше первичного теплообменника в потоке топливной соли. Отдельные теплообменники DRACS во время нормальной работы для обеспечения охлаждения могут использоваться или не использоваться.

В альтернативном варианте выполнения верхний отражатель может содержать теплообменник DRACS. В этом варианте выполнения теплообменник DRACS может содержаться в верхнем отражателе. Он может использовать теплоноситель, который также служит в качестве отражателя или поглотителя нейтронов, как более подробно описано в патентной заявке США № 15/282814, поданной 30 сентября 2016 г. под названием "Сборка отражателя нейтронов для динамического сдвига спектра". В одном варианте выполнения теплоноситель может быть твердым при рабочих температурах, но когда верхняя часть активной зоны реактора достигает некоторой более высокой температуры, теплоноситель может плавиться, и в этот момент DRACS может начать работу. Например, можно использовать свинец и сплавы свинца, такие как сплав свинца и висмута (например, эвтектику свинца и висмута: 44,5% Pb -55,5% Bi) и сплав свинца и меди (например, molybdokalkos).

Конфигурации насоса для расплавленного топлива фиг. 3А-3С изображают вариант выполнения конструкции реактора на расплавленном топливе, который для каждого первичного теплообменника имеет насос, используемый для управления потоком топливной соли. В показанном варианте выполнения восемь первичных теплообменников 310 расположены отстоящими друг от друга вокруг центральной активной зоны 304 реактора. На фиг. 3А показан вид сверху вниз от верхней части реактора 300. Фиг. 3В представляет собой вид в разрезе, проходящем через центр реактора 300 и через два противоположных теплообменника 310. Фиг. 3С изображает вид в аксонометрии конфигурации с восемью теплообменниками реактора 300 на расплавленном топливе с частичным вырезом для изображения различных внутренних компонентов, включая крыльчатки, валы и двигатели насосов.

Активная зона 304 реактора ограничена сверху крышкой 319 реактора, которая может быть отражателем или содержать отражатель, а снизу - отражателем 308В нейтронов. В боковом направлении активная зона 304 реактора ограничена оболочками из восьми теплообменников 310. При работе нагретая топливная соль из активной зоны 304 реактора прокачивается через теплообменники, где она охлаждается, и охлажденная топливная соль возвращается в активную зону 304.

В показанном варианте выполнения активная зона 304 реактора и теплообменники 310 находятся в защитном корпусе 318. Первичный защитный корпус 318 ограничен оболочкой или набором оболочек, которые создают корпус с открытым верхом. Охлажденный первичный теплоноситель входит и выходит из корпуса 318 сверху, что позволяет герметичному корпусу быть выполненным как единое целое и не

иметь сквозных отверстий. Первичный охлаждающий контур интегрирован в реактор 300, так что поступающий первичный теплоноситель сначала охлаждает по меньшей мере часть защитного корпуса 318. После того как он направляется на некоторое расстояние рядом с внутренней поверхностью защитного корпуса 318 во впускной канал первичного теплоносителя 330, в показанном варианте выполнения теплоноситель затем направляется в нижнюю часть первичного теплообменника 310. Теплоноситель выходит из верхней части первичного теплообменника 310 и затем выводится из защитного корпуса 318 и в систему выработки электроэнергии (не показана).

В показанном варианте выполнения топливная соль приводится в движение по топливному контуру с помощью восьми отдельных крыльчаток 312А, расположенных над теплообменниками 310 в верхних каналах. В месте расположения крыльчаток 312А стороны каналов служат в качестве кожухов или корпусов насосов, которым придана соответствующая форма для дополнения крыльчаток 312А для обеспечения эффективного потока. В показанном варианте выполнения крыльчатки 312А расположены между верхней трубной решеткой 332 теплообменников и горизонтальной частью каналов в верхней части активной зоны 304 реактора.

Каждая крыльчатка 312А соединена вращающимся валом 312В с двигателем 312С, расположенным над реактором 300. Это удаляет электронные компоненты насоса из области большого потока нейтронов и высоких температур. В крышке 319 корпуса может быть предусмотрен один или несколько портов доступа, так что крыльчатка 312А может быть удалена и может быть произведено ее техническое обслуживание или замена.

Крыльчатки 312А и валы 312В могут быть изготовлены из любого материала, подходящего для среды топливной соли с высокой температурой и нейтронным потоком, которая имеется в топливном контуре во впускном отверстии для топлива первичного теплообменника 310. Например, обращенные к топливу компоненты могут быть образованы из одного или нескольких сплавов молибдена, одного или нескольких сплавов циркония (например, ZIRCALOY™), одного или нескольких сплавов ниобия, одного или нескольких никелевых сплавов (например, HASTELLOYS™ N) или из высокотемпературной ферритной, мартенситной или нержавеющей стали и т.п. Крыльчатки 312А и валы 312В могут быть размещены на поверхности, обращенные к топливной соли, для защиты от коррозии. Другие варианты защиты включают защитные покрытия. В варианте выполнения оболочка может быть выполнена из молибдена и получена совместной экструзией с основным материалом крыльчатки или вала. Альтернативный материал оболочки включает молибденовые сплавы, никель и никелевые сплавы и сплавы молибдена и рения.

Фиг. 4 иллюстрирует альтернативный вариант выполнения конструкции реактора на расплавленном топливе, аналогичный конструкции, изображенной на фиг. 3А-3С, но снабженный внутренним отражателем 408С. В показанном варианте выполнения предусмотрен внутренний отражатель 408С, отделяющий активную зону 404 реактора от теплообменников 410. Это уменьшает поток нейтронов через компоненты теплообменников, а также через крыльчатки 412А и валы 412В. В противном случае реактор 400 аналогичен в работе и конфигурации реактору, показанному на фиг. 3А-3С.

Фиг. 5, 6 и 7 иллюстрируют варианты выполнения альтернативной конфигурации насоса, в которой крыльчатка установлена в нижней части. В конфигурации с крыльчаткой, установленной в нижней части, крыльчатка расположена в топливном контуре в выпускном канале для охлажденной топливной соли ниже первичного теплообменника, причем выпускной канал действует как кожух или корпус для крыльчатки. В этой конфигурации крыльчатка находится в более низкой температурной среде, чем в конфигурации с установкой в верхней части, как показано на фиг. 3А-3С и 4 выше. В зависимости от варианта выполнения уменьшенный износ крыльчатки и части вала, непосредственно примыкающего к крыльчатке, может оправдать дополнительную сложность в общей конструкции.

Фиг. 5 иллюстрирует реактор 500, имеющий активную зону 504, ограниченную верхним отражателем 508А, нижним отражателем 508В и внутренним отражателем 508С. В показанном варианте выполнения нижний отражатель 508В проходит сбоку и вверх по сторонам защитного корпуса 518 для дополнительной защиты. Первичный теплообменник 510 выполнен с возможностью иметь поток теплоносителя в межтрубном пространстве (показан пунктирными линиями 514), причем теплоноситель поступает через впускной канал 530 для теплоносителя, а нагретый теплоноситель выходит из выпускного канала 536 для теплоносителя. В показанном варианте выполнения потоки топлива (проиллюстрированные пунктирными линиями 506) проходят из активной зоны 504 реактора через верхний канал над внутренним отражателем 508С и в теплообменник 510 через впускную трубную решетку 532. После прохождения через набор трубок, уже охлажденное топливо выходит из нижней трубной решетки 531 и возвращается обратно в активную зону 504 реактора через нижний канал под внутренним отражателем 508С.

Как показано на фиг. 5, крыльчатка 512А для топливного потока расположена ниже выпускного отверстия для топливной соли первичного теплообменника 510, выполненного с возможностью иметь поток теплоносителя в межтрубном пространстве. Крыльчатка 512А прикреплена к валу 512В, соединенному с установленным сверху двигателем 512С над крышкой корпуса (не показана) и верхним отражателем 508А. В этом варианте выполнения вал 512В проходит через теплообменник 510. Это может увеличить сложность теплообменника 510. В одном варианте выполнения крыльчатка 512А и вал 512В встро-

ены в теплообменник 510, благодаря чему техническое обслуживание достигается путем снятия теплообменника/крыльчатки и узла вала в виде единого блока. В альтернативном варианте выполнения (не показан) вал 512В может не проникать в теплообменник, а скорее располагаться так, чтобы он находился рядом с теплообменником 510, но снаружи него.

Фиг. 6 иллюстрирует реактор 600, аналогичный изображенному на фиг. 5. В показанном варианте выполнения реактор 600 имеет активную зону 604, ограниченную верхним отражателем 608А, нижним отражателем 608В и внутренним отражателем 608С. Опять же, нижний отражатель 608В проходит в поперечном направлении и вверх по сторонам защитного корпуса 618 для дополнительной защиты. Первичный теплообменник 610 выполнен с возможностью иметь поток теплоносителя в межтрубном пространстве (показан пунктирными линиями 614), причем теплоноситель поступает через впускной канал 630 для теплоносителя, а нагретый теплоноситель выходит из выпускного канала 636 для теплоносителя. В показанном варианте выполнения потоки топлива (показаны пунктирными линиями 606) из активной зоны 604 реактора через верхний канал над внутренним отражателем 608С и в теплообменник 610 через впускную трубную решетку 632. После прохождения через набор трубок уже охлажденное топливо выходит из нижней трубки 631 и возвращается обратно в активную зону 604 реактора через нижний канал под внутренним отражателем 608С.

На фиг. 6 крыльчатка 612А показана также расположенной ниже выпускного канала для топливной соли ниже первичного теплообменника 610 и прикрепленной к валу 612В. Однако на фиг. 6 вал 612В изображен проходящим вниз и соединенным с установленным снизу двигателем 612С, расположенным снаружи защитного корпуса 618, посредством электромагнитного соединителя 650. В этом варианте выполнения вал 612В не проникает в защитный корпус 618. Это может увеличить сложность конструкции защитного корпуса, но поддерживает защитный корпус 618 в виде выполненного как одно целое корпуса.

На фиг. 7 изображен реактор 700, аналогичный тому, что показан на фиг. 5. В показанном варианте выполнения реактор 700 имеет активную зону 704, ограниченную верхним отражателем 708А, нижним отражателем 708В и внутренним отражателем 708С. Опять же, нижний отражатель 708В проходит поперек и вверх по боковым сторонам защитного корпуса 718 для дополнительной защиты. Первичный теплообменник 710 выполнен с возможностью иметь поток теплоносителя в межтрубном пространстве (показан пунктирными линиями 714), причем теплоноситель поступает через впускной канал 730 для теплоносителя, а нагретый теплоноситель выходит из выпускного канала 736 для теплоносителя. В показанном варианте выполнения топливо протекает (показано пунктирными линиями 706) из активной зоны 704 реактора через верхний канал над внутренним отражателем 708С и в теплообменник 710 через впускную трубную решетку 732. После прохождения через набор трубок уже охлажденное топливо выходит из нижней трубной решетки 731 и протекает обратно в активную зону 704 реактора через нижний канал под внутренним отражателем 708С.

На фиг. 7 крыльчатки 712А показаны расположенными в активной зоне 704 реактора. В этом варианте выполнения каждый канал для охлажденной топливной соли имеет крыльчатку 712А, расположенную вблизи нижней части активной зоны 704 реактора. Как и на фиг. 6, крыльчатки 712А имеют валы 712В, которые проходят вниз и соединены с установленными в нижней части двигателями 712С, расположенными снаружи защитного корпуса 718, посредством электромагнитных соединительных муфт 750. В этом варианте выполнения валы 712В не проникают в защитный корпус 718.

В альтернативном варианте выполнения вместо отдельного и независимого насоса для каждого первичного теплообменника может быть предусмотрено меньшее или большее количество насосов. Например, в альтернативном варианте выполнения реактора 700, изображенного на фиг. 7, в нижней части активной зоны 704 реактора может быть предусмотрена одна крыльчатка 718А, которая направляет поток из выпускного отверстия для охлажденного топлива двух или большего количества теплообменников 710.

На фиг. 8 показан еще один вариант выполнения конфигурации насоса, в которой одна крыльчатка 812А расположена внутри активной зоны 804 реактора. В показанном варианте выполнения одна крыльчатка 840 вращается вокруг центральной оси реактора 800. В показанном варианте выполнения крыльчатка 840 содержит ряд лопаток 842, ступицу 844, из которой лопатки 842 проходят в боковом направлении, и вал 812В, соединенный со ступицей 844. При вращении вала 812В ступица и лопатки также вращаются и вызывают циркуляцию топливной соли в реакторе 800, как показано стрелками 806. В показанном варианте выполнения лопатки 842 проходят от ступицы 844 до точки, примыкающей к боковой стороне активной зоны реактора, в этом случае ограниченной внутренними отражателями 808С. В показанном варианте выполнения боковая сторона активной зоны реактора имеет комплементарную поверхность корпуса для концов лопаток 842, чтобы более эффективно управлять потоком расплавленного топлива через активную зону 804 реактора.

Один или несколько диффузоров 848 могут быть предусмотрены в каждом из верхних каналов, чтобы сделать поток соли более однородным, когда он циркулирует в теплообменнике 810. Диффузоры могут быть такими же простыми, как и направляющая поток перегородка где-нибудь внутри топливного контура, или может представлять собой более сложный набор перегородок, диафрагму или другие статические элементы.

В альтернативном варианте выполнения (не показан) крыльчатка установлена в нижней части, как описано со ссылкой на фиг. 6 и 7, а вал 846 проходит вниз от ступицы, а не вверх, и вращается посредством электромагнитной соединительной муфты ниже защитного корпуса 818 реактора.

На фиг. 9 показана еще одна конфигурация насоса, в которой крыльчатка промежуточно расположена между двумя секциями первичного теплообменника. В показанном варианте выполнения предусмотрен реактор 900, имеющий верхний отражатель 908А, нижний отражатель 908В и один или несколько теплообменников 910, вмещающих активную зону 904 реактора, все из которых содержатся в защитном корпусе 918. Внутренний отражатель (не показан) может, а может и не быть предусмотрен, в зависимости от варианта выполнения, между активной зоной 904 реактора и теплообменником 910, между теплообменником 910 и впускным каналом 930 для теплоносителя, или как то, так и другое. В показанном варианте выполнения топливная соль циркулирует через корпус теплообменника 910, как показано пунктирной линией 906, при этом теплоноситель пропускается через трубки набора трубок, как показано пунктирной линией 914.

Теплообменник 910 разделен на две секции 910А и 910В промежуточной стенкой 928. Трубный пучок является непрерывным по всей длине и проходит от нижней трубной решетки 931, которая является впускным отверстием для теплоносителя, к верхней трубной решетке 932, который является выпускным отверстием для теплоносителя. В показанном варианте выполнения нагретая топливная соль протекает мимо трубного пучка, установленного в верхней части 910А теплообменника 910, который открыт для активной зоны 904 реактора. По меньшей мере часть противоположной стороны корпуса также открыта, что обеспечивает возможность поступления топливной соли в канал 912D насоса, содержащий крыльчатку 912А.

Крыльчатка 912А соединена посредством вала 912В с двигателем (не показан), как описано выше. Вращение крыльчатки 912А принудительно продвигает топливную соль в нижнюю секцию 910В корпуса теплообменника через трубный пучок и наружу из нижней части корпуса через другое отверстие в активной зоне 904 реактора. Для перенаправления потока топливной соли через трубный пучок также может быть предусмотрена одна или несколько перегородок 929.

Фиг. 9 иллюстрирует область 934 внутри корпуса теплообменника 910, которая находится выше уровня топливной соли в активной зоне 904 реактора. Эта область может быть либо сплошной, за исключением проникающих трубок, заполненных, например, материалом отражателя, либо может представлять собой свободное пространство, заполненное инертным газом.

В варианте выполнения, показанном на фиг. 9, крыльчатка 912А расположена внутри теплообменника, т.е. внутри корпуса теплообменника 910. Она расположена вдали от области большого нейтронного потока, при этом также не подвергается воздействию самых высоких температур реактора 900. Крыльчатка 912А и вал 912В могут быть встроены в теплообменник 910, так что все они удаляются для обслуживания или замены как одна сборка. В альтернативном варианте выполнения, использующем другую конструкцию теплообменника, теплообменник может аналогичным образом иметь крыльчатку или крыльчатки внутри теплообменника. Например, в пластинчатом и стержневом теплообменнике крыльчатка может быть расположена в угловом порту пути переноса внутренней пластины или в качестве альтернативы пластина внутри стопки теплообменных пластин может иметь крыльчатку.

Несмотря на прилагаемую формулу изобретения, изобретение также определяется следующими положениями.

1. Ядерный реактор на расплавленном топливе, содержащий топливный контур, содержащий активную зону реактора и один или несколько первичных теплообменников внутри защитного корпуса, причем указанный один или несколько первичных теплообменников выполнены с возможностью передачи теплоносителю тепла, образующегося при ядерном делении, первичный охлаждающий контур, содержащий указанный один или несколько первичных теплообменников и систему регенерации энергии, выполненную с возможностью обеспечения циркуляции теплоносителя для передачи энергии из указанного одного или нескольких теплообменников в систему регенерации энергии, и вспомогательную систему охлаждения, содержащую один или несколько вспомогательных теплообменников, которые выполнены с возможностью передачи энергии от теплоносителя к окружающему воздуху и выпуска воздуха в атмосферу, при этом вспомогательная система охлаждения выполнена с возможностью обеспечения циркуляции теплоносителя из первичного охлаждающего контура к указанному одному или нескольким вспомогательным теплообменникам.

2. Ядерный реактор по предшествующему пункту, в котором избыточное тепло в активной зоне реактора вызывает поток теплоносителя через вспомогательные теплообменники из-за разницы в плотностях теплоносителя в ядерном реакторе на расплавленном топливе.

3. Ядерный реактор по одному из предшествующих пунктов, в котором вспомогательная система охлаждения обеспечивает циркуляцию теплоносителя из первичного охлаждающего контура в указанный один или несколько вспомогательных теплообменников, если в активной зоне реактора имеется достаточное количество избыточного тепла, чтобы вызывать поток теплоносителя через вспомогательные теплообменники.

4. Ядерный реактор по п.1 или по любому пункту, который зависит от п.1, в котором топливный

контур заключен внутри защитного корпуса и крышки корпуса, причем защитный корпус не имеет сквозных отверстий.

5. Ядерный реактор по п.4, в котором теплоноситель втекает в первичные теплообменники и вытекает из них через сквозные отверстия в крышке корпуса.

6. Ядерный реактор на расплавленном топливе, содержащий защитный корпус и крышку корпуса, активную зону, заключенную внутри защитного корпуса и крышки корпуса и имеющую верхнюю область и нижнюю область, теплообменник, заключенный внутри защитного корпуса и крышки корпуса, причем теплообменник проточно соединен с верхней областью активной зоны реактора верхним каналом и проточно соединен с нижней областью активной зоны реактора нижним каналом, причем активная зона реактора, теплообменник и верхний и нижний каналы образуют топливный контур, и крыльчатку, заключенную внутри защитного корпуса и крышки корпуса, причем крыльчатка прикреплена к валу, который выполнен с возможностью вращения двигателем, расположенным снаружи защитного корпуса и крышки корпуса, при этом крыльчатка расположена внутри топливного контура, так что при вращении двигателем она обеспечивает циркуляцию текучей среды через топливный контур.

7. Ядерный реактор по п.6, в котором вал проходит через крышку корпуса и с возможностью вращения соединяет крыльчатку с двигателем, расположенным над крышкой корпуса.

8. Ядерный реактор по п.6, в котором вал заключен внутри защитного корпуса и крышки корпуса и не проходит через них, причем вал соединен с возможностью вращения с двигателем через электромагнитную соединительную муфту.

9. Ядерный реактор по любому одному из пп.6, 7 или 8, в котором крыльчатка расположена в верхнем канале.

10. Ядерный реактор по любому одному из пп.6, 7 или 8, в котором крыльчатка расположена в верхней области активной зоны реактора.

11. Ядерный реактор по любому одному из пп.6, 7 или 8, в котором крыльчатка расположена в нижнем канале.

12. Ядерный реактор по любому одному из пп.6, 7 или 8, в котором крыльчатка расположена внутри теплообменника.

13. Ядерный реактор по любому одному из пп.6, 7 или 8, в котором крыльчатка расположена в нижней области активной зоны реактора.

14. Ядерный реактор по любому одному из пп.6-13, в котором теплообменник представляет собой один из множества независимых теплообменников, заключенных внутри защитного корпуса и крышки корпуса.

15. Ядерный реактор по п.10, в котором каждый независимый теплообменник из множества независимых теплообменников имеет крыльчатку.

16. Ядерный реактор по п.10, в котором имеется только одна крыльчатка, заключенная внутри защитного корпуса и крышки корпуса.

17. Ядерный реактор по любому одному из пп.6-13, в котором теплообменник выбран из кожухотрубного теплообменника, пластинчатого теплообменника, кожухопластинчатого теплообменника, теплообменника с вытравленными каналами и пластинчато-ребристого теплообменника.

18. Ядерный реактор по п.12, в котором крыльчатка и теплообменник представляют собой узел, удаляемый в виде блока из реактора через крышку корпуса.

19. Ядерный реактор по любому одному из пп.6-18, содержащий по меньшей мере один диффузор, расположенный в топливном контуре.

20. Ядерный реактор на расплавленном топливе, содержащий защитный корпус и крышку корпуса, активную зону, заключенную внутри защитного корпуса и крышки корпуса, причем активная зона реактора имеет верхнюю область и нижнюю область, множество теплообменников, заключенных в защитный корпус и крышку корпуса, причем каждый теплообменник имеет впускное отверстие для топлива, проточно соединенное с верхней областью активной зоны реактора, и выпускное отверстие для топлива, проточно соединенное с нижней областью активной зоны реактора, и крыльчатку внутри активной зоны реактора, причем крыльчатка прикреплена к валу, выполненному с возможностью вращения двигателем, расположенным снаружи защитного корпуса и крышки корпуса, причем крыльчатка, когда она вращается двигателем, обеспечивает циркуляцию топлива из активной зоны реактора через указанное множество теплообменников.

21. Ядерный реактор по п.20, в котором указанное множество теплообменников распределено вокруг активной зоны реактора.

22. Ядерный реактор по п.20 или 21, в котором каждое впускное отверстие для топлива указанного множества теплообменников проточно соединено с верхней областью активной зоны реактора посредством соответствующего верхнего канала, а каждое выпускное отверстие для топлива указанного множества теплообменников проточно соединено с нижней областью активной зоны реактора посредством соответствующего нижнего канала.

23. Ядерный реактор по любому одному из пп.20-22, в котором крыльчатка расположена в верхней области активной зоны реактора.

24. Ядерный реактор по любому одному из пп.20-22, в котором крыльчатка расположена в нижней области активной зоны реактора.

25. Ядерный реактор по любому одному из пп.20-24, в котором активная зона реактора имеет круглое горизонтальное поперечное сечение, имеющее центральную ось в месте расположения крыльчатки, а крыльчатка имеет ступицу, расположенную на центральной оси активной зоны реактора.

26. Ядерный реактор по любому одному из пп.20-25, в котором крыльчатка содержит одну или несколько лопаток, проходящих от ступицы до точки, смежной с боковой стороной активной зоны реактора.

Очевидно, что описанные здесь системы и способы хорошо адаптированы для достижения упомянутых целей и преимуществ, а также им присущих. Специалистам должно быть понятно, что способы и системы в этом описании могут быть реализованы многими способами и, как таковые, не должны ограничиваться приведенными выше иллюстративными вариантами выполнения и примерами. В этом отношении любое количество признаков различных вариантов выполнения, описанных здесь, может быть объединено в один вариант выполнения, при этом возможны альтернативные варианты выполнения, имеющие меньшее или большее количество признаков, чем признаки, описанные в настоящем документе.

Несмотря на то, что различные варианты выполнения описаны для целей настоящего описания, могут быть сделаны различные изменения и модификации, которые находятся в пределах объема, предусмотренного настоящим описанием. Например, электромагнитные соединительные муфты могут использоваться с верхними двигателями, чтобы уменьшить количество проходов через крышку корпуса, и в этом случае валы не должны проникать в крышку корпуса, например, как показано на фиг. 3А-С. Могут быть сделаны многочисленные другие изменения, которые будут понятны специалистам и которые охватываются сущностью изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Ядерный реактор на расплавленном топливе, содержащий защитный корпус и крышку корпуса;
активную зону, заключенную внутри защитного корпуса и крышки корпуса, причем активная зона реактора имеет верхнюю область и нижнюю область;
теплообменник, заключенный внутри защитного корпуса и крышки корпуса и расположенный снаружи активной зоны, причем теплообменник проточно соединен с верхней областью активной зоны реактора верхним каналом и проточно соединен с нижней областью активной зоны реактора нижним каналом, причем активная зона реактора, теплообменник и верхний и нижний каналы образуют топливный контур;
отражатель, ограничивающий боковую сторону активной зоны реактора, причем отражатель расположен вблизи теплообменника и отделяет активную зону реактора от теплообменника, при этом верхний канал проходит сверху отражателя и ограничивает верх отражателя, а нижний канал проходит снизу отражателя и ограничивает низ отражателя; и
крыльчатку, заключенную внутри защитного корпуса и крышки корпуса, причем крыльчатка прикреплена к валу, который выполнен с возможностью вращения двигателем, расположенным снаружи защитного корпуса и крышки корпуса; при этом крыльчатка расположена внутри топливного контура ниже верха отражателя и выше теплообменника, так что при вращении двигателем крыльчатка циркулирует текучую среду через топливный контур.
2. Ядерный реактор по п.1, в котором вал проходит через крышку корпуса и с возможностью вращения соединяет крыльчатку с двигателем, расположенным над крышкой корпуса.
3. Ядерный реактор по п.1, в котором вал заключен внутри и не проходит через защитный корпус и крышку корпуса, причем вал соединен с возможностью вращения с двигателем через электромагнитную соединительную муфту.
4. Ядерный реактор по пп.1, 2 или 3, в котором крыльчатка расположена в верхнем канале.
5. Ядерный реактор по пп.1-4, в котором теплообменник представляет собой один из множества независимых теплообменников, заключенных внутри защитного корпуса и крышки корпуса.
6. Ядерный реактор по п.5, в котором каждый независимый теплообменник из множества независимых теплообменников имеет крыльчатку.
7. Ядерный реактор по п.5, в котором имеется только одна крыльчатка, заключенная внутри защитного корпуса и крышки корпуса.
8. Ядерный реактор по пп.1-4, в котором теплообменник выбран из кожухотрубного теплообменника, пластинчатого теплообменника, кожухопластинчатого теплообменника, теплообменника с вытравленными каналами и пластинчато-ребристого теплообменника.
9. Ядерный реактор по п.1, в котором крыльчатка и теплообменник представляют собой узел, удаляемый в виде блока из реактора через крышку корпуса.
10. Ядерный реактор по пп.1-4, дополнительно содержащий по меньшей мере один диффузор, расположенный в топливном контуре.
11. Ядерный реактор на расплавленном топливе, содержащий

защитный корпус и крышку корпуса;

активную зону, заключенную внутри защитного корпуса и крышки корпуса, причем активная зона реактора имеет верхнюю область и нижнюю область;

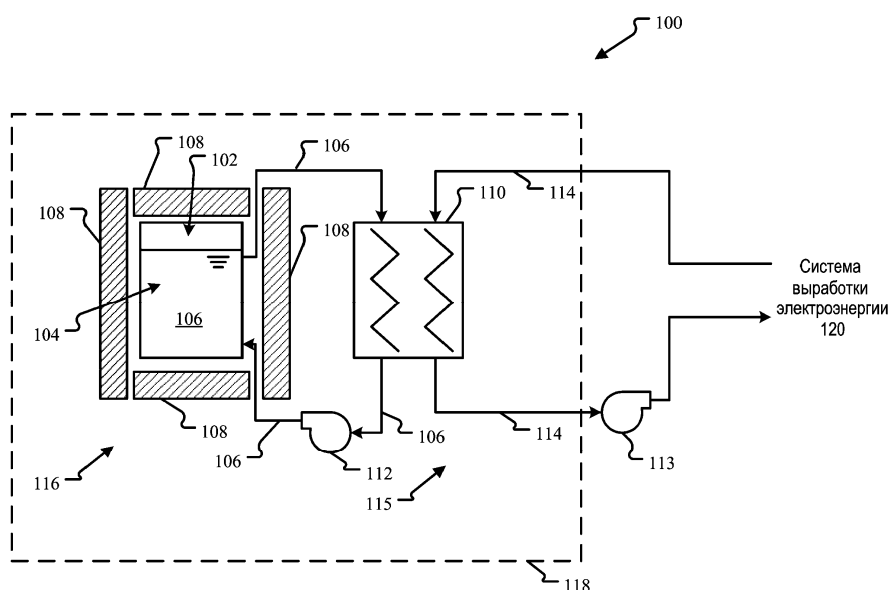
множество теплообменников, заключенных в защитный корпус и крышку корпуса, причем указанное множество теплообменников распределено вокруг активной зоны реактора, при этом каждый теплообменник имеет впускное отверстие для топлива, гидравлически соединенное с верхней областью активной зоны реактора посредством соответствующего верхнего канала, и выпускное отверстие для топлива, гидравлически соединенное с нижней областью активной зоны реактора посредством соответствующего нижнего канала;

отражатель, ограничивающий боковую сторону активной зоны реактора, причем отражатель расположен вблизи указанного множества теплообменников и отделяет активную зону реактора от указанного множества теплообменников, при этом верхний канал проходит сверху отражателя и ограничивает верх отражателя, а нижний канал проходит снизу отражателя и ограничивает низ отражателя; и

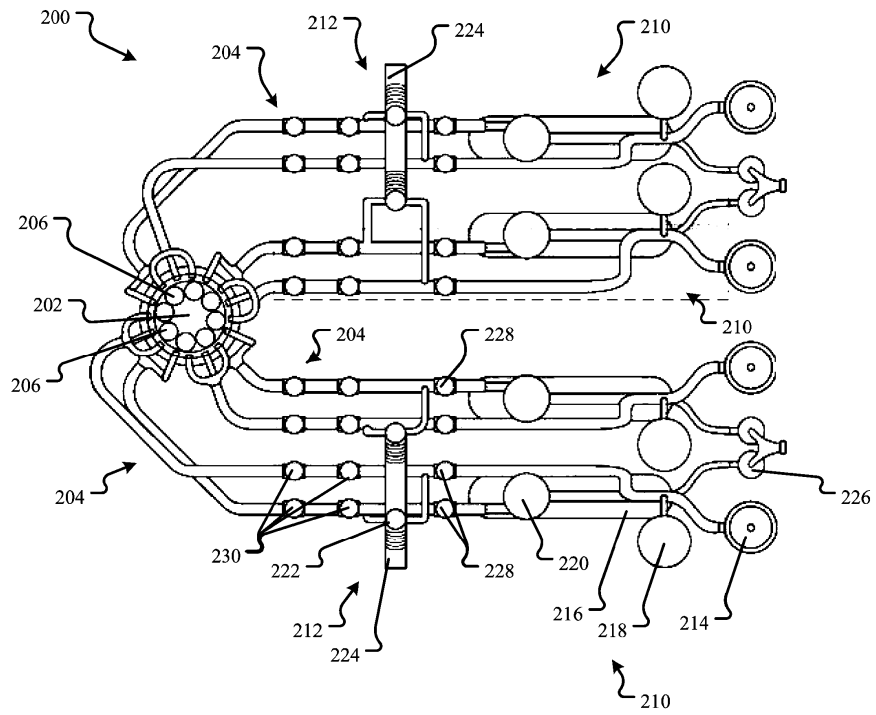
крыльчатку, расположенную внутри активной зоны реактора ниже верха отражателя и выше теплообменника, причем крыльчатка прикреплена к валу, выполненному с возможностью вращения двигателем, расположенным снаружи защитного корпуса и крышки корпуса, причем крыльчатка, когда она вращается двигателем, циркулирует топливо из активной зоны реактора через указанное множество теплообменников.

12. Ядерный реактор по п.11, в котором активная зона реактора имеет круглое горизонтальное поперечное сечение, имеющее центральную ось в месте расположения крыльчатки, а крыльчатка имеет ступицу, расположенную на центральной оси активной зоны реактора.

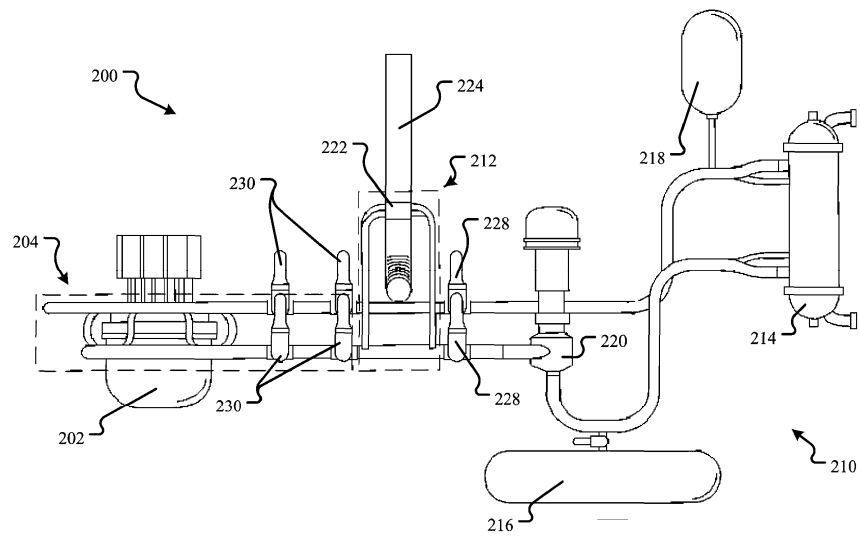
13. Ядерный реактор по пп.11, 12, в котором крыльчатка содержит одну или несколько лопаток, проходящих от ступицы до точки, примыкающей к боковой стороне активной зоны реактора.



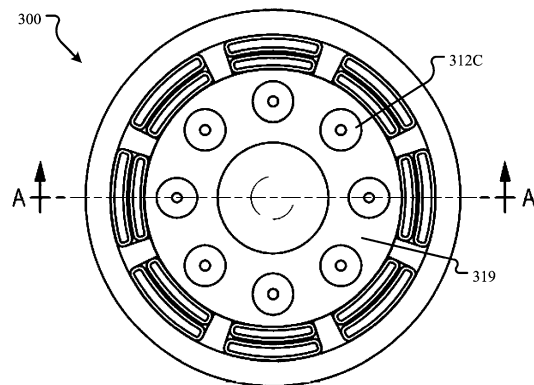
Фиг. 1



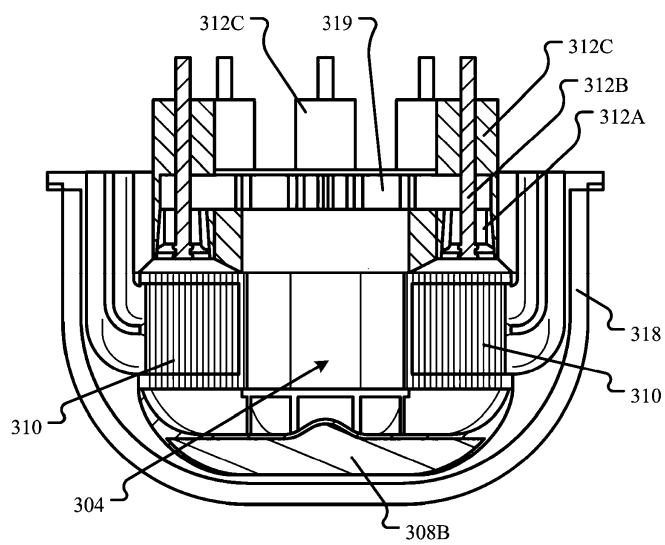
Фиг. 2А



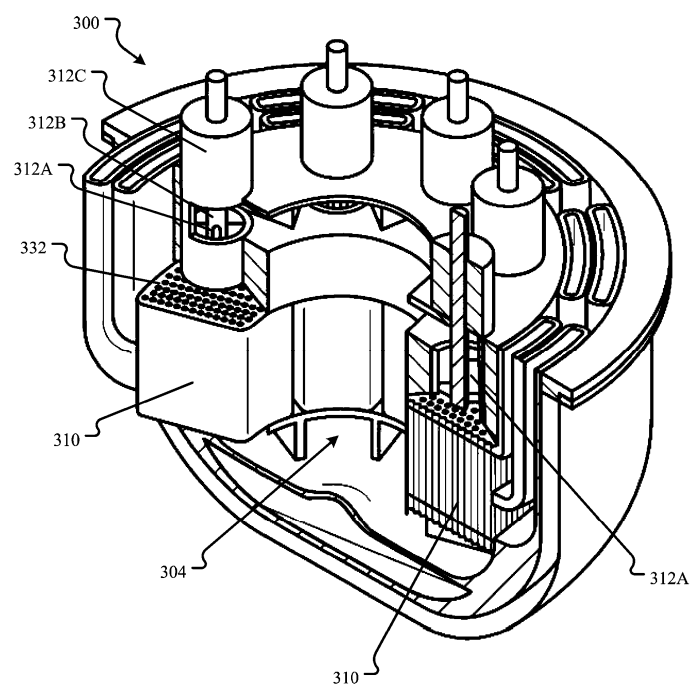
Фиг. 2В



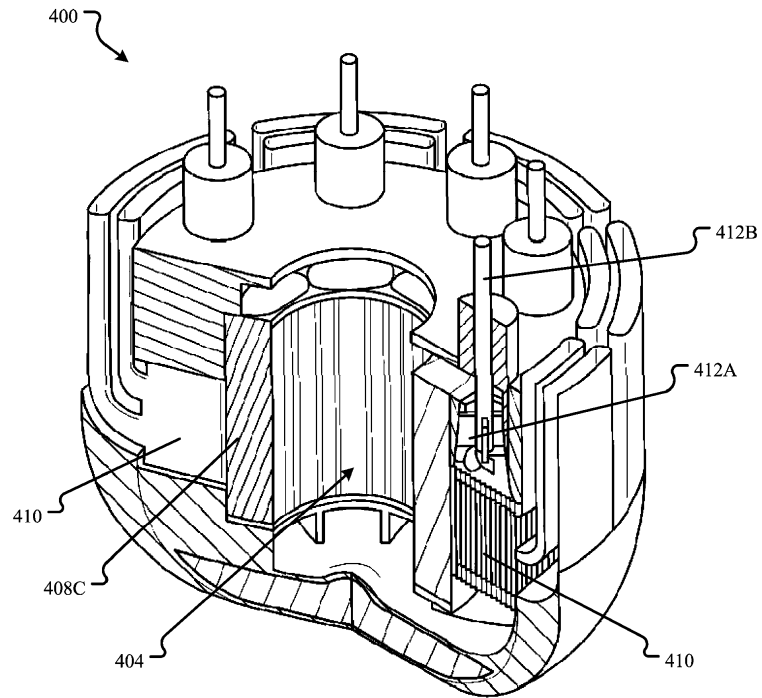
Фиг. 3А



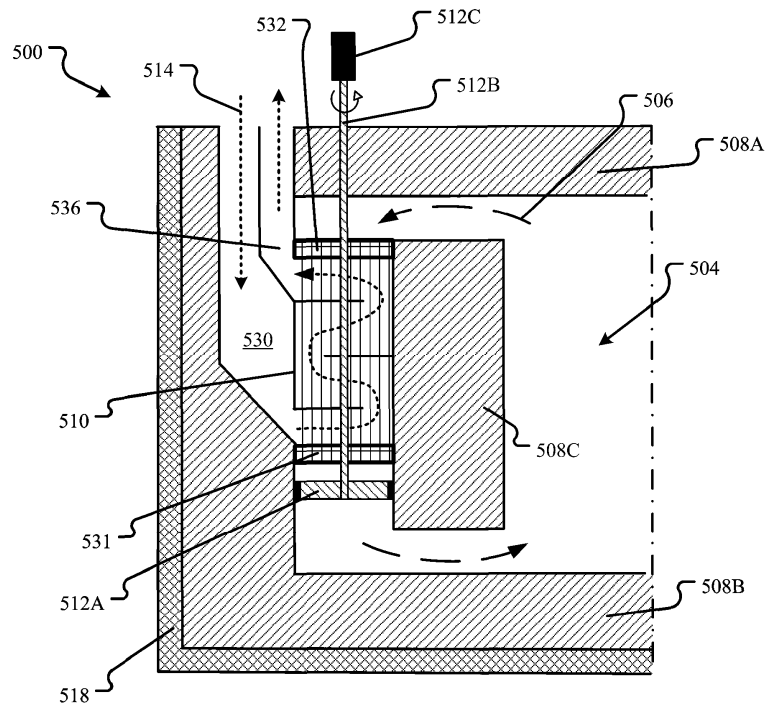
Фиг. 3В



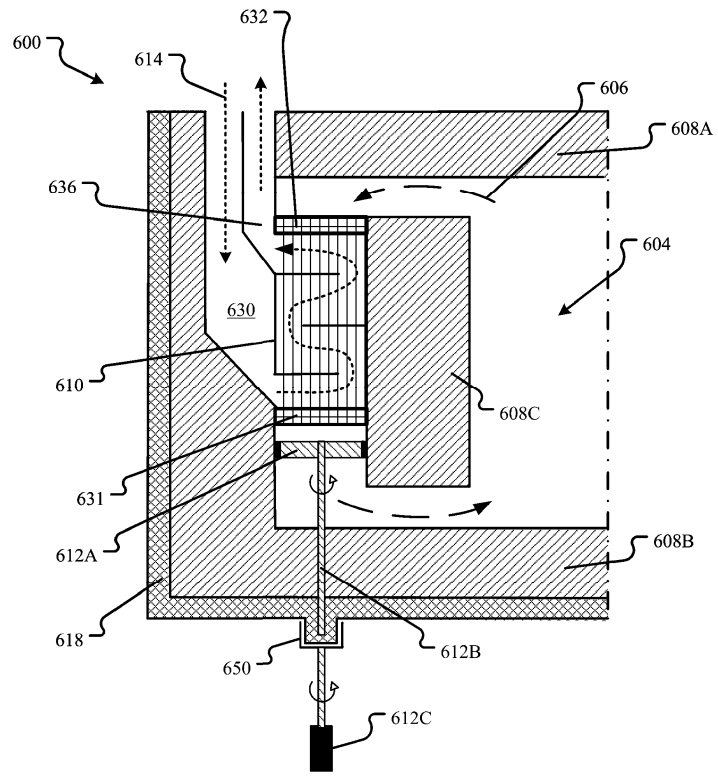
Фиг. 3С



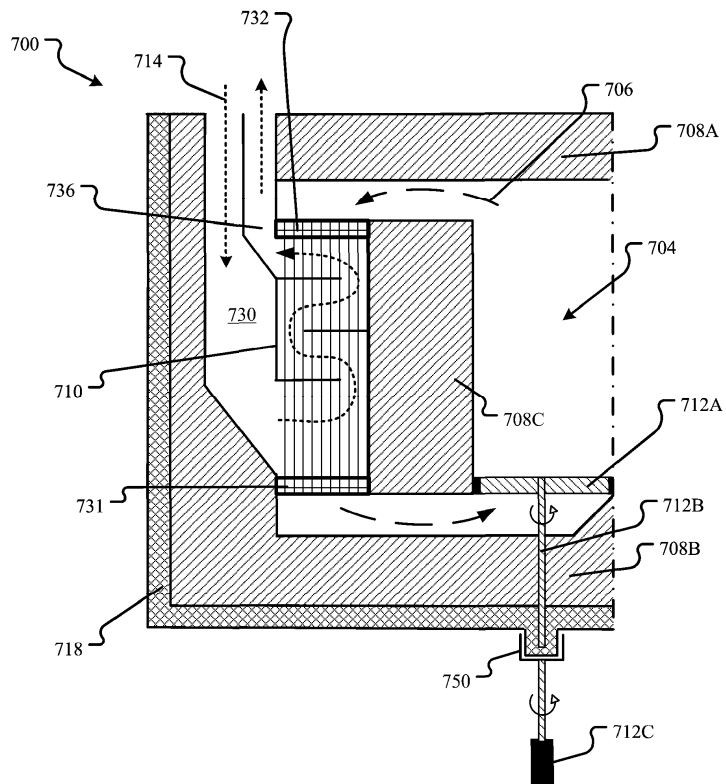
Фиг. 4



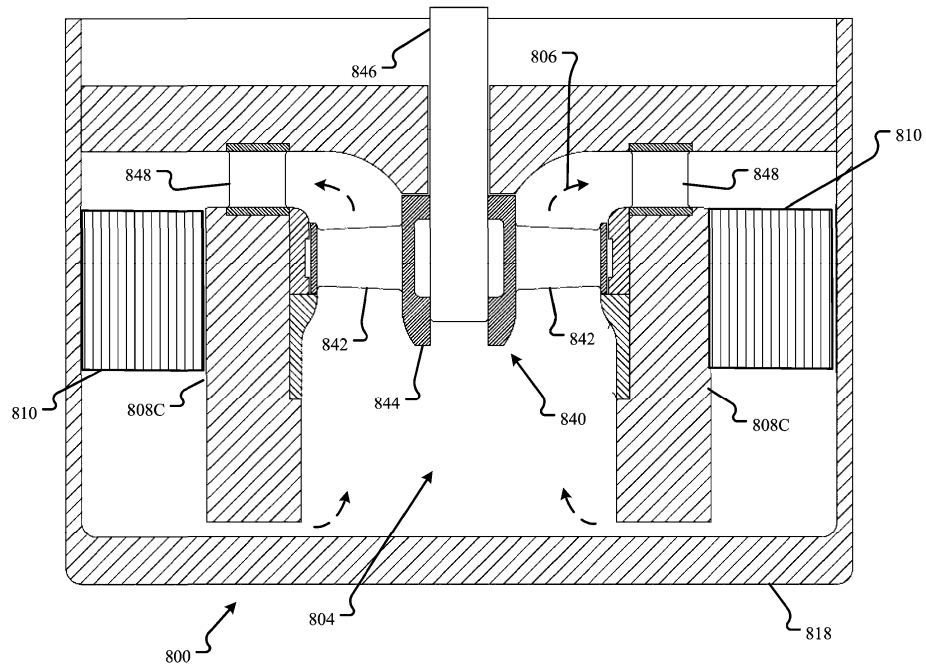
Фиг. 5



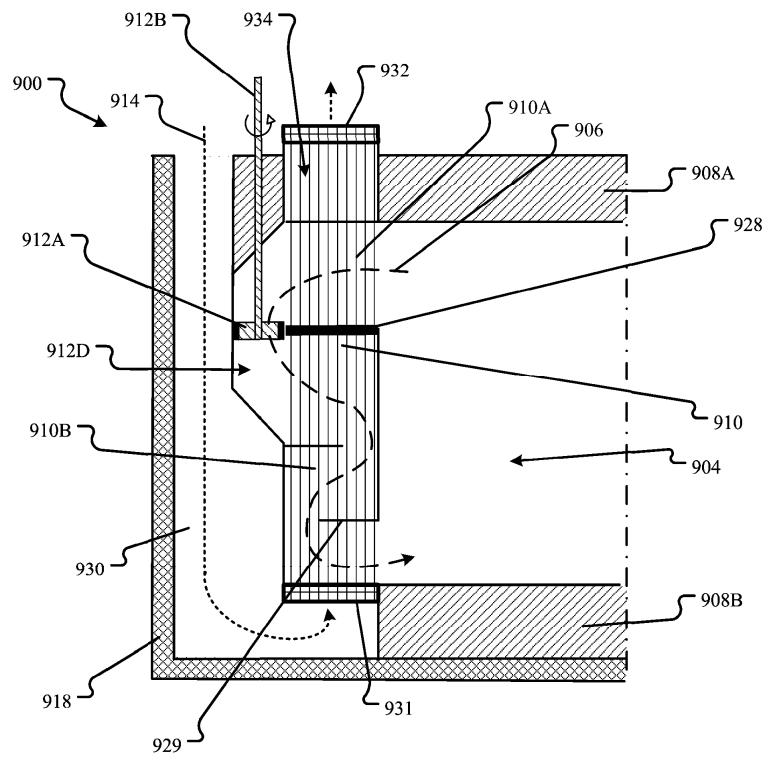
Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9

