

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **043120**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.04.26

(21) Номер заявки
202193023

(22) Дата подачи заявки
2020.05.01

(51) Int. Cl. **G21C 1/22** (2006.01)
G21C 3/24 (2006.01)
G21C 3/54 (2006.01)
G21C 1/32 (2006.01)
G21C 1/03 (2006.01)

(54) **ЖИДКОСОЛЕВОЙ ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР С МОДУЛЬНОЙ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ**

(31) **19172597.7**

(32) **2019.05.03**

(33) **EP**

(43) **2022.03.31**

(86) **PCT/EP2020/062205**

(87) **WO 2020/225156 2020.11.12**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ТОРАЙЗОН ХОЛДИНГ Б.В. (NL)

(72) Изобретатель:
Де Грот Сандер, Пол Лукас Мариус (NL)

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

(56) **US-A1-2009279658**
US-A-3403076
GB-A-2073938
US-A-2999057

(57) Изобретение относится к контуру ядерного реактора, который способен содержать содержащий ядерное топливо солевой расплав в канале, который расположен практически вертикально и обеспечивает проход вверх-вниз. Контуры можно использовать для построения модульного реактора из съемных, индивидуальных жидкосолевых ядерных контуров, одна часть которых ("канал") была размещена в критической конфигурации, при этом канал содержит некритическое количество ядерного материала, но вместе каналы создают критическую зону активной зоны реактора. Изобретение дополнительно относится к способам эксплуатации контура модульного ядерного реактора и ядерного реактора.

043120

B1

043120

B1

Изобретение относится к контуру модульного ядерного реактора, в частности, к контуру модульного жидкосолевого ядерного реактора. Настоящее изобретение также относится к модульному ядерному реактору, в частности, к модульному жидкосолевому ядерному реактору, состоящему из контуров ядерного реактора. Изобретение дополнительно относится к способу эксплуатации контура модульного ядерного реактора. Изобретение дополнительно относится к способу эксплуатации модульного ядерного реактора и к способу тестирования/определения соответствия заданным требованиям ядерного реактора. Изобретение также относится к способу замены части контура ядерного реактора.

С ростом мирового спроса на энергию сохраняется потребность в ядерной энергии, несмотря на недостатки, связанные с атомными станциями ранних поколений. Разрабатываются новые поколения атомных станций (4-го и 5-го поколения), которые специально нацелены на поставки больших количеств безопасной и чистой энергии и в то же время сознательно приближены к стандартам по распространению ядерных материалов и генерированию ядерных отходов.

Одни из них - это так называемые жидкосолевые реакторы.

Жидкосолевой реактор (ЖСР) представляет собой такой тип ядерного реактора, где первичный теплоноситель, или даже само топливо представляет собой жидкосолевую смесь. Для этого типа реактора было предложено много конструкций и построено множество прототипов. Ранние и многие современные концепции созданы на основе ядерного топлива, растворенного во фторидном солевом расплаве. Текущая среда может достигать критичности, втекая в активную зону, где может присутствовать замедлитель, такой как графит. Многие известные концепции основаны на протекании топлива по каналам в графитовой матрице с соевым расплавом, обеспечивающей охлаждение при низком давлении и высокой температуре. Некоторые недавно разработанные концепции исключают использование замедлителя для создания системы с характерным спектром быстрых нейтронов, или применяют специальное замедление для локального генерирования нейтронных спектров, специально предназначенных для конкретных целей, например, для сжигания долгоживущих актиноидов из потоков ядерных отходов.

Хотя жидкосолевые реакторы в прошлом успешно проектировались, строились и эксплуатировались, знания и опыт, требуемые для модернизации реакторов данного типа, ограничены. Ключевые преимущества жидкосолевых реакторных установок, касающиеся безопасности, минимальных потоков отходов и максимальной эффективности ресурсов, были разработаны во многих случаях, и с возрастающей частотой в последние 5-10 лет. Без сомнения, можно рассматривать широкие перспективы жидкосолевых реакторных установок, особенно с ториевым топливом, для обеспечения безопасной энергии в течение тысячелетий, с минимальным бременем радиоактивных отходов. Однако техническая и экономическая жизнеспособность, а также длительный срок выхода на рынок являются главным препятствием для современного внедрения, а значит, и для инвестиций, несмотря на то, что подтверждение принципа действия жидкосолевых реакторов было успешно продемонстрировано исследованиями жидкосолевых реакторов в 50-е и 60-е гг. в США.

Жидкосолевые реакторы, как правило, дают оптимальную экономию нейтронов, позволяя осуществлять частую очистку соли от поглощающих нейтроны продуктов деления и активации, тем самым минимизируя потери нейтронов, предоставляя возможность замыкать циклы ядерного топлива, в которых используемое для деления топливо генерируется из избыточных нейтронов, полученных в результате реакции деления, позволяя осуществлять трансмутацию воспроизводящих элементов, таких как ^{232}Th или ^{238}U , в делящиеся элементы, такие как ^{233}U и ^{239}Pu .

Перспектива замыкания циклов ядерного топлива, создания очень высокой эффективности полезного использования ресурсов в сочетании с очень высокими уровнями (пассивной) безопасности и минимизацией образования долгоживущих отходов, особенно в случае ториевого замкнутого топливного цикла, делает жидкосолевые реакторы очень многообещающими с точки зрения будущих источников энергии.

При комбинировании топлива и теплоносителя в системе ЖСР технология имеет одну ключевую сложность: в первичной системе сходятся все физические и инженерные дисциплины, и они существенно влияют друг на друга. В компонентах жидкосолевой первичной системы сходятся химия, нейтронная физика, материаловедение, термогидравлика, термомеханика и т.д. Поэтому установка жидкосолевого реактора требует междисциплинарного подхода с междисциплинарным анализом и проектированием, а также с междисциплинарной экспериментальной проверкой.

Необходимо значительное количество усилий по разработке и проверке междисциплинарных средств проектирования, кодов и систем лицензирования для размещения расплавов солей. Учитывая междисциплинарную сложность, даже непосредственные внутриреакторные эксперименты или мелко-масштабные демонстрации будет трудно полностью спрогнозировать и обосновать с точки зрения безопасности при отсутствии надлежащих и доказанных междисциплинарных знаний и опыта.

Данное изобретение разрабатывает подход к минимизации срока вывода на рынок для атомных электростанций на основе ЖСР, предлагая эффективный подход к аттестации ядерного оборудования, охватывающий всю междисциплинарную сложность, и предлагая принципы проектирования атомных электростанций с ЖСР, в которых наилучшим образом использована стратегия аттестации ядерного оборудования. Это может практически исключить усложненные промежуточные этапы, которые являются

как дорогостоящими, так и времязатратными. Это сочетание эффективного пути аттестации ядерного оборудования и проекта, который близко соответствует такой аттестации, может привести к тому, что жидкосольевые атомные электростанции станут серийно производиться в пределах 15-летнего периода времени, что значительно короче, чем 20-30 лет, которые в настоящее время считаются реалистичными. Эта оценка подразумевает жизнеспособность технологии ЖСР, которую можно считать доказанной за счет успешной эксплуатации в 50-е и 60-е гг. в США.

Жидкосольевые ядерные реакторы ранее были описаны, например, в US 2015/0243376, US 2017/0117065, WO 2017/098228, GB 2508537, WO 2017/070791.

В жидкосольевых реакторах состав топлива-теплоносителя может быть отрегулирован, а следовательно, кондиционирован в ходе работы. Это не относится к конструкционным материалам и конструктивным компонентам в первичной системе известных ЖСР. Взаимодействие между топливом-теплоносителем и компонентами и материалами первичных систем, а также интенсивные поля облучения, воздействию которых будут подвергаться первичные материалы и компоненты, являются главными проблемами. Необходимы или должны быть испытаны материалы, которые могут выдерживать эти суровые условия в течение обычно предусматриваемого для атомных электростанций срока службы в 40-60 лет. Многие предварительные концептуальные проекты ЖСР либо пренебрегают этим аспектом, либо включают в себя некоторый вид барьера для радиационной защиты или слой расходоуемого материала для защиты первичного материала от вызываемого излучением разрушения и химического взаимодействия с солями.

Одна из этих конструкций ЖСР описана в US 2999057. В US 2999057 петлевая конструкция используется для комплектного ядерного реактора, в котором несколько отдельных потоков жидкости подают в активную зону реакции и выводят из нее, подвергают циркуляции и подают обратно в активную зону или замедлитель. Конструкция такова, что замедлитель содержит некоторое число каналов, причем потоки жидкости подают в нижнюю часть замедлителя и выводят в его верхней части в виде одиночного потока. Вся установка представляет собой полностью фиксированную (неизменяемую) конструкцию.

В US 2009/0279658 также раскрыт жидкосольевой реактор с конструкцией двухжидкостного реактора. Данная конструкция, как правило, представляет собой наполненную солевым расплавом емкость, в которой присутствуют отдельные трубки в неизменяемой конфигурации, через которые также прокачивают жидкосольевое топливо. Размеры трубок и содержание делящихся веществ таковы, что каждая трубка является подкритической, а критичность достигается только тогда, когда трубки приближены друг к другу. Конструкция является фиксированной (неизменяемой) конструкцией, состоящей из одной крупной емкости/защитной оболочки, в которой трубки с циркулирующей солью расположены в неизменяемой конфигурации, без возможности удаления и замены находящихся в активной зоне компонентов. Емкость имеет одиночный вход и выход солевого расплава.

В US 3403076 описан неизменяемый жидкосольевой размножитель топлива, в котором предусмотрены графитовые топливные элементы с вертикально расположенными каналами, через которые можно прокачивать жидкосольевое топливо, заключенные в бланкет с солевым расплавом в качестве теплообменника. Эта система имеет одну единственную крупную реакторную емкость, работающую под давлением, а в графитовые топливные элементы подают солевой расплав через одиночный вход и выход.

В GB 2073938 показаны наполненная солевым расплавом одиночная реакторная емкость и защитная оболочка, через которую проходит система труб с жидкосольевым топливом. Эта одиночная защитная оболочка снабжается солью через одиночный вход и выход.

Все эти конфигурации сходны тем, что вся установка является неизменяемой (фиксированной). Трубки или топливные элементы, транспортирующие жидкосольевое топливо, помещены в критической конфигурации и размещены в охватывающей крупной реакторной емкости/защитной оболочке с одиночным входом и выходом соли, при циркуляции первичной или бланкетной соли в объеме реакторной емкости или в трубках или топливных элементах по центру.

В общем, в концепциях реакторов, в которых приняты разработанные в уровне техники жидкие топливо-теплоноситель, использован и рекомендован относительно большой и неразделенный (цельный) объем соли, заполняющий активную зону системы и вспомогательные трубопроводы и оборудование. Это создает ряд проблем, связанных с реализуемостью этих видов систем. Для сохранения защитной оболочки ядерного материала требуется крупная охватывающая емкость. Эти крупные емкости сложны в изготовлении и обращении, дороги, не являются (легко) сменными, не являются (легко) выгружаемыми после использования. Концепция "глубокоэшелонированной защиты" является краеугольным камнем философии ядерной безопасности и подчеркивает необходимость использования множественных барьеров во избежание высвобождения содержащегося в них запаса ядерного источника. Одна емкость, содержащая все топливо, максимально увеличивает запас источника в одной защитной оболочке и образует одну единственную первую линию защиты от высвобождения. После использования крупная емкость загрязняется и может быть активирована нейтронами, что само по себе является серьезной проблемой с точки зрения отходов. Тем более, если емкость и подсоединенные к ней компоненты все еще наполнены высокоактивными и токсичными отходами топлива-теплоносителя. Транспортировка, хранение и захоронение этого объема затруднены из-за размера и потенциальной опасности радиоактивного воздейст-

вия. Крупная емкость, образующая защитную оболочку, усложняет замену компонентов активной зоны, поскольку емкость должна обеспечивать открывание и поступление вовнутрь, а также извлечение и введение компонентов. Компоненты и материалы активной зоны в системах на основе топлива-теплоносителя, как правило, сильно страдают от радиационного повреждения при экстремальных температурных и химических (коррозионных) условиях. Удобная замена материалов и компонентов активной зоны значительно ускорит внедрение этих систем, поскольку материалы, которые могут выдержать суровые условия в критической зоне систем на основе топлива-теплоносителя в течение продолжительного периода времени, еще не найдены или не разработаны.

Авторы настоящего изобретения теперь, по существу, нашли усовершенствованную конструкцию для контура жидкосолевого ядерного реактора. Усовершенствованная конструкция обеспечивает большую гибкость, например, тем, что одиночный контур можно построить и протестировать перед сборкой в комплектный ядерный реактор. Контур сконструирован так, что его можно размещать и извлекать из реактора или замедлителя без разборки всего реактора или без воздействия (разборкой, удалением) на другие контуры в реакторе.

Фундаментальный выбор, сделанный авторами изобретения, состоит в секционировании жидкосолевого топлива-теплоносителя на отдельные, индивидуальные и независимые модули, размещенные в такой совокупности, где можно поддерживать стабильную ядерную реакцию деления в области активной зоны, состоящей из частей активной зоны из модулей. Каждый модуль обладает независимой функциональностью и имеет свой собственный насос, теплообменник и блоки обработки. Каждый модуль представляет собой автономную систему со своей собственной (двойной) защитной оболочкой. Модули можно соединять лишь через систему(ы) вторичного неядерного теплоносителя или другие вторичные системы. А значит, модули не имеют общего солевого расплава или ядерного материала, причем каждый модуль снабжен своим индивидуальным количеством солевого расплава и ядерного материала. Каждый модуль сам по себе является отдельным ядерным реактором, но еще может достигать критичности лишь после того, как два или более модулей размещены поблизости друг от друга.

Модули размещаются поблизости друг от друга таким образом, чтобы их можно было легко удалять. Каждый модуль или контур является независимо извлекаемым из ядерного реактора. Пример приведен на фиг. 6 и 7. Конструкция (примерная - цилиндрическая) модуля позволяет размещать их бок о бок, тогда как удаление одного модуля из массива можно осуществлять, например, путем поднятия или опускания соответствующего модуля.

В целом, изобретение относится к ядерному реактору, содержащему контуры ядерного реактора, контуру ядерного реактора и способам эксплуатации ядерного реактора и контура ядерного реактора.

Контур ядерного реактора по изобретению представляет собой не традиционную реакторную емкость ЖСР, наполненную солью, а конфигурацию из трубопроводов, пучков труб или снабженных каналами блоков/цилиндров, через которые осуществляется циркуляция соли по индивидуальным и независимым контурам. Индивидуальные контуры ядерного реактора и контуры солевого расплава в нем не связаны друг с другом или не соединены друг с другом контуром бланкетной соли.

Индивидуальные контуры ядерного реактора являются независимыми друг от друга и могут эксплуатироваться независимо.

В этом состоит различие с установками уровня техники, в которых жидкосолевые контуры представляют собой одну систему, где они соединены друг с другом центральной системой циркуляции первичной или бланкетной соли. Жидкосолевая установка уровня техники обычно бывает неразделенной. Таким образом, концепция ядерного реактора по изобретению представляет собой модульную концепцию. Индивидуализированные (обособленные) контуры или модули ядерного реактора, которые сконструированы по отдельности, и модульные солевые петли, размещенные поблизости от них, все еще не имеют общей системы труб, солевого расплава или топлива. Каждый модуль содержит свои собственные солевой расплав, топливо и систему труб. Каждый модуль представляет собой отдельный отсек ядерного реактора.

В US 2999057, например, на фиг. 6 показана установка, в которой трубопроводы сходятся близко друг к другу с образованием активной зоны, а затем расходятся. Однако вся установка остается фиксированной (неизменяемой), и ее нельзя удалить из реактора без полной разборки реактора.

Подход с модульной активной зоной по настоящему изобретению дает следующие преимущества:

Каждый модуль сохраняет по меньшей мере две защитные оболочки (т.е. две линии защиты), а целостность их обеих можно непрерывно контролировать, измеряя содержание продукта деления в газе, протекающем в промежутке между первой и второй защитными оболочками, и в теплоносителе снаружи от второй защитной оболочки.

Мониторинг защитной оболочки позволяет использовать отсоединяемые компоненты первичной защитной оболочки. Обычно, целостность первичной границы обеспечивают путем сварки или пайки с превращением первичной границы в одну единственную деталь, не оставляя никаких сомнений в том, что защитная оболочка закрыта. При мониторинге целостности защитной оболочки можно допустить отсоединение компонентов.

Каждый модуль содержит часть общего объема топлива-теплоносителя, т.е. уменьшается запас ис-

точника деления на защитную оболочку.

Каждый модуль содержит подкритическое количество топлива-теплоносителя, которое не может привносить критичность на уровне модуля. Реакция деления может начаться и поддерживаться только при размещении модулей в конкретной конфигурации, с топливом-теплоносителем множественных скомбинированных модулей.

Когда модуль выходит из строя, топливо-теплоноситель в этом модуле может быть пассивно отведено из области критической активной зоны, и критичность во всей активной зоне снижается или прекращается, тогда как на функциональность остальных модулей это не влияет.

Исключаются крупные компоненты, что снижает стоимость, облегчает обращение, транспортировку (при разумных размерах контейнера) и замену. Например, крупные части или модули целиком можно извлекать и заменять, не только обеспечивая возможность продления срока службы системы путем замены, но и обеспечивая введение новых модулей с улучшенными техническими характеристиками или другого топлива-теплоносителя.

Поскольку общий запас топлива-теплоносителя подразделен по модулям, с объемом отходов топлива-теплоносителя имеют дело на уровне модуля, т.е. подвергаются транспортировке поддающиеся управлению объемы, которые могут быть далее переработаны в отдельном месте.

Модули в реакторе можно помещать в реактор и извлекать из него без сложной разборки всего реактора. Замена модулей может быть достигнута путем подъема или опускания модулей из составляющего реактор массива модулей и требует лишь разъединения вторичных соединений, таких как контрольно-измерительные приборы, электропитание, вторичные теплообменники и т.д.

Подход с модульной активной зоной приводит к конфигурации активной зоны, близкой к оптимальной с точки зрения нейтронной физики, поскольку конфигурация определяется практическими конструктивными соображениями на уровне модуля, например, заменяемостью и возможностью введения защитных оболочек на модуль в критической активной зоне. Авторы изобретения отдали приоритет ядерной безопасности, поскольку она является необходимым условием для того, чтобы системы топлива-теплоносителя стали практически реализуемыми. Несмотря на то, что этот подход ограничивает возможности оптимизации конфигурации активной зоны для максимальной экономии нейтронов, использование топлива-теплоносителя дает преимущества, связанные с компенсацией недостатков экономии нейтронов выбранного модульного подхода. Использование топлива-теплоносителя дает потенциальную возможность более высокой эффективности нейтронов, чем в твердотопливных реакторах, особенно в случае нежелательного поглощения нейтронов, продукты деления в топливе-теплоносителе можно эффективно и оперативно удалять. Системы топлива-теплоносителя обладают низким давлением, а значит, защитные оболочки можно оставить относительно тонкими, поскольку они в основном служат в качестве барьера для жидкости и газа низкого давления. Поэтому негативное влияние на характеристики активной зоны, вызванное поглощением нейтронов материалами защитной оболочки в области активной зоны реактора, может быть минимизировано при оптимизации безопасности и относительно быстрых сроках разработки, лицензирования, утверждения и внедрения.

Установка контура ядерного реактора по изобретению (представляющего собой одиночные трубопроводы, множественные трубопроводы, пучки труб или снабженные каналами блоки/цилиндры) позволяет проводить ядерные испытания и аттестацию системы контура при одноконтурной системе на подходящем оборудовании для проведения испытаний ядерного реактора.

В одном аспекте контур ядерного реактора по изобретению содержит петлю, которая способна содержать ядерное топливо и/или обеспечивать его циркуляцию. Петля содержит канал, необязательно - практически прямой, в практически вертикальном расположении. Канал обеспечивает проход вверх и вниз для жидкости в петле.

Индивидуальный жидкосолоевой ядерный контур или его соответствующую разновидность можно помещать в поле облучения существующего реактора (например, подходящего реактора для испытания материала) и, таким образом, можно использовать для конструирования, разработки, испытания и сертификации материалов и компонентов для контура жидкосолоевого ядерного реактора.

Индивидуальный жидкосолоевой ядерный контур можно использовать в качестве компонента жидкосолоевого ядерного реактора, который, в свою очередь, составлен из множества таких индивидуальных контуров.

В другом аспекте изобретение относится к ядерному реактору, который содержит один или более контуров по изобретению. Ядерный реактор, содержащий один контур, можно использовать для проверки и испытания контура. Множество контуров могут быть скомбинированы с образованием жидкосолоевого ядерного реактора, основанного на индивидуальных жидкосолоевых контурах.

Ядерный реактор содержит область активной зоны и область оболочки. Область активной зоны окружена областью оболочки. В ядерном реакторе предусмотрено множество контуров ядерного реактора. Каждый контур ядерного реактора в ядерном реакторе содержит петлю, которая содержит один или более каналов.

Петля способна содержать жидкость, содержащую воспроизводящий и/или делящийся материалы. Один или более резервуаров для жидкости расположены, необязательно разъемно, в соединении с петлей

и способны содержать жидкость, содержащую воспроизводящие и/или делящиеся материалы. Каналы упомянутого множества контуров расположены в области активной зоны. Расположение каналов в активной зоне образует критическую зону ядерного реактора, поддерживающую ядерную реакцию деления.

Каналы множественных индивидуальных контуров могут быть размещены в критической конфигурации, в изначально безопасной и эффективной конфигурации для разработки и эксплуатации жидкосолевого ядерного реактора. Каждый из индивидуальных контуров содержит подкритическое количество ядерного топлива. Каналы каждой конфигурации индивидуального контура могут содержать подкритическое количество ядерного топлива.

Ядерный реактор, построенный из индивидуальных контуров, обеспечивает гибкость топливного цикла (контур может содержать различные сочетания топлив/солей, или сочетания топлив/солей могут быть изменены), причем первичные компоненты контуров, а значит, и ядерного реактора являются заменяемыми (сменными). При наличии контура и реактора, в которых первичные компоненты являются заменяемыми (сменными), срок службы реактора может быть продлен, и им можно надежно управлять. Контур ядерного реактора и построенные из них реакторы также позволяют проводить дополнительную оптимизацию, поскольку компоненты системы могут быть заменены новыми и усовершенствованными компонентами. Конструкция контуров такова, что элементы контуров могут быть испытаны и сертифицированы по отдельности. Конструкция контура ядерного реактора (или петли), а также ядерного реактора, который построен из этих петель, демонстрирует улучшенный профиль безопасности, поскольку такая конфигурация обеспечивает конструкцию, при которой ядерный реактор прекращает функционирование, когда один или более жидкосолевых ядерных контуров отклоняется от его желаемой функции.

По существу, реактор выполнен на основе множественных индивидуальных контуров, которые могут быть размещены в расположении по кругу, причем одна часть каждого контура расположена на малых радиусах ("канал" или "горячая ветвь"), создавая критическую конфигурацию, поддерживающую ядерную реакцию ("критическую зону"), а остальная часть контура расположена на больших радиусах, в значительной мере вне поля облучения критической зоны, в некритической конфигурации. Каналы или трубопроводы контура находятся в непосредственном контакте с солью. Каналы содержат соль и образуют критическую зону реактора за счет обеспечения надлежащих количеств делящегося материала в критической конфигурации, образованной скомбинированными каналами, и использования замедляющих материалов в случае, если целью является реактор со спектром (над-)тепловых нейтронов. Каналы подвергаются воздействию интенсивных потоков излучения. Использование труб позволяет производить замену, как только материалы достигают своих пределов с точки зрения воздействия излучения и/или воздействия соли, и их относительно легко заменить. Каналы могут представлять собой одиночные трубы или пучки труб или блоки с каналами, относительно быстро разрушающиеся из-за воздействия интенсивных потоков излучения в критической зоне реактора в сочетании с контактом с (коррозионной) солью и продуктами деления, и представляют собой относительно мелкие компоненты, которые также могут быть заменены, с повышением срока службы реактора. Несмотря на то, что замена первичных трубопроводов и каналов требует значительного развития дистанционного манипулирования, это считается более осуществимым, чем попытки найти и аттестовать материалы, которые могут выдержать условия ЖСР в течение десятилетий.

В качестве альтернативы, контур может быть изготовлен в вертикальном расположении, при котором каналы находятся в верхней половине контура, а другие компоненты - в нижней, например, как разъяснено на фиг. 6 и 7. При совместном размещении вертикально расположенных контуров каналы находятся в непосредственной близости друг к другу, способствуя обмену нейтронами между модулями, устанавливая критическую конфигурацию активной зоны, в которой может поддерживаться ядерная реакция деления. Удаление одного контура или деактивация контура за счет стекания солевого расплава из каналов в резервуар в нижней половине нарушает критичность реактора.

Ядерный реактор содержит множество отдельных и индивидуальных контуров или модулей ядерного реактора, причем каждый модуль содержит жидкость-солевой расплав и воспроизводящие или делящиеся материалы в качестве ядерного топлива в некритическом количестве в качестве первичной системы,

причем каждый модуль соединен со вторичной системой реактора,

причем каждый модуль расположен в реакторе в некой конфигурации с другими модулями,

причем каждый модуль помещен в поток нейтронов одного или более других модулей,

причем упомянутое множество модулей содержат критическое количество воспроизводящих и/или делящихся материалов при их комбинировании и размещении в упомянутой конфигурации и в потоке нейтронов упомянутых одного или более других модулей,

причем каждый модуль по отдельности является удаляемым из реакторной установки путем отсоединения (частей) модуля от вторичной системы при сохранении конфигурации других модулей в реакторе,

причем первичная система модуля содержит насос, первичный теплообменник и первичное средство обработки, такое как дренажный резервуар, либо отдельный, либо встроженный в контур,

причем вторичная система содержит вторичное средство управления и вторичные теплообменники, не относящийся к выработке ядерной энергии, которые могут обмениваться теплом с первичными тепло-

обменниками модулей.

В вариантах осуществления модули могут обладать вертикально удлиненной многоугольной или цилиндрической формой. В вариантах осуществления первичная система представляет собой (замкнутую) петлю в вертикальной конфигурации в модуле. В вариантах осуществления модули, содержащие петли с солевым расплавом, размещены преимущественно в верхней половине вертикально удлиненной многоугольной или цилиндрической формы, а дополнительный элемент первичной системы, такой как насос, первичный теплообменник и первичное средство обработки, такое как дренажный резервуар, размещены в нижней половине. Когда модули размещены в конфигурации, конфигурация позволяет помещать петлю с расплавленными солями одного модуля в поток нейтронов от других модулей для достижения критической конфигурации для поддержания ядерной реакции и выработки энергии.

В дополнительном аспекте изобретение относится к способу эксплуатации контура ядерного реактора путем размещения канала контура ядерного реактора или репрезентативной разновидности контура ядерного реактора вблизи активной зоны другого ядерного реактора так, чтобы канал контура подвергался воздействию потока нейтронов реактора. Это позволяет моделировать эксплуатацию контура в ядерном реакторе, составленном из множества контуров реактора, с целью проведения испытаний, определения характеристик и аттестации материалов контура, текучих сред контура и компонентов контура, в репрезентативной среде испытаний, включая междисциплинарную сложность ЖСР.

В дополнительном аспекте изобретение относится к способу эксплуатации ядерного реактора, который включает этапы обеспечения ядерного реактора, содержащего контуры ядерного реактора по изобретению и, возможно, замедлитель (нейтронов). Способ дополнительно включает обеспечение множества ядерных топлив, содержащих воспроизводящие и/или делящиеся материалы, и подачу упомянутого множества ядерного топлива в упомянутое множество контуров. Ядерное топливо в части каналов или во всех каналах, а также конфигурация материалов замедлителя и/или каналов создают критическую зону, в которой может поддерживаться ядерная реакция деления. Способ по изобретению обеспечивает возможность того, что контуры по настоящему изобретению можно использовать в ядерном реакторе по самым разным назначениям, некоторые из которых состоят в генерировании энергии, использовании в качестве средства воспроизводства путем использования нейтронов/поглощения нейтронов для преобразования воспроизводящих элементов в делящиеся элементы, с генерированием тем самым ядерного топлива, и/или генерировании изотопов и материалов для других применений и их сочетаний. Модульная конструкция ядерного реактора с ядерными контурами по изобретению предусматривает, что работу ядерного реактора можно использовать для удовлетворения различных потребностей в один и тот же или последовательные промежутки времени без серьезных изменений конфигурации реактора, но путем изменения индивидуальных контуров и/или изменения жидкостей, содержащихся в контурах, и/или изменения замедляющих материалов.

Краткое описание фигур

Фиг. 1 показывает схематическое представление вида сверху ядерного реактора, в котором каналы размещены в активной зоне реактора.

Фиг. 1А показывает схематическое представление вида сверху четырех индивидуальных контуров (разделенных схематическими пунктирными линиями) с каналами, расположенными в точках пирогаподобного представления. Будучи размещенным в реакторе, канал (4) представляет собой участок контура ядерного реактора, находящийся в непосредственной близости к другим отдельным контурам ядерного реактора, которые вместе образуют активную зону ядерного реактора, генерируя комбинированный критический баланс нейтронов за счет их индивидуальных (подкритических) нейтронных вкладов.

Фиг. 2 показывает схематическое представление контура ядерного реактора.

Фиг. 3А-С показывают схематическое представление контура ядерного реактора (вид сбоку), на котором канал размещен на расстоянии от линии возврата и в практически вертикальном положении. Канал содержит двунаправленный поток, установившийся в U-образной изогнутой трубке или в U-образных изогнутых трубках в конструкции "труба в трубе" или в конфигурации в виде снабженного каналами блока.

Фиг. 4 показывает схематическое представление компонентов и входящих-выходящих потоков контура ядерного реактора.

Фиг. 5 показывает схематическое представление вида сбоку одного контура ядерного реактора.

Фиг. 6 показывает схематическое представление на виде сбоку (слева) и виде сверху (справа) контура ядерного реактора в цилиндрической расстановке. В верхней части каналы расположены по кругу с вертикальными каналами с проходом вверх и вниз. Насосы, теплообменники, расширительные баки и блоки извлечения и хранения продуктов деления, а также контрольно-измерительные приборы размещены в нижней части, под каналами, вне поля потока нейтронов. На виде сверху показано предпочтительное расположение каналов с проходом вверх и вниз.

Фиг. 7А показывает индивидуальное расположение контуров ядерного реактора (здесь 7 контуров расположены в круговой конфигурации) в одном варианте осуществления изобретения. При размещении индивидуальных контуров поблизости друг от друга каналы каждого индивидуального контура также расположены поблизости друг от друга, а критичность может быть достигнута путем подбора подходя-

щих количества и концентрации топлива в каналах. Контуры являются удаляемыми из конфигурации.

Фиг. 7В показывает расположение контуров в реакторе в квадратной решетке.

Фиг. 7С показывает вариант осуществления, в котором вокруг круговой области активной зоны реактора расположено некоторое число чередующихся контуров, которые могут либо вносить вклад в реакцию деления в области активной зоны, либо выполнять другую функцию, такую как генерирование топлива путем воспроизводства или нейтронной активации с использованием нейтронов, выходящих из активной зоны радиально. В случае, когда нейтроны в основном поглощаются, а не генерируются периферийными контурами, они образуют так называемую область оболочки (или бланкета) реактора.

Подробное описание

Настоящее изобретение в одном аспекте относится к контуру ядерного реактора, содержащему:

петлю (3), причем петля (3) способна содержать жидкость, содержащую воспроизводящие и/или делящиеся материалы в качестве ядерного топлива и, необязательно, циркулирующую,

причем петля (3) содержит канал (4), предпочтительно практически прямой, который является частью петли и который расположен в практически вертикальном расположении, причем канал (4) обеспечивает проход (4a,4b) вверх и вниз для жидкости в петле.

Контур ядерного реактора согласно изобретению может содержать петлю (3), которая содержит канал (4) и может быть соединена с резервуаром (5) для жидкости. Петля может содержать линию (6) подвода, канал (4), линию (7) отвода, линию (8) возврата. В петле линия подвода, канал, линия отвода и линия возврата соединены и расположены с образованием петли, которая способна содержать жидкость. Жидкость может содержать воспроизводящие и/или делящиеся материалы. Резервуар для жидкости соединен с петлей и расположен и выполнен с возможностью содержать жидкость. Канал каждой петли может быть независимо размещен в практически вертикальном расположении.

Выгодным признаком настоящего изобретения является размещение в индивидуальном контуре восходящего потока, реверсивного потока и нисходящего потока в канале при его установке в практически вертикальном расположении. Эта конфигурация позволяет охватывать канал защитными оболочками, которые могут быть замкнутыми на одном конце, предпочтительно верхнем, и соединены с контуром в том местоположении, где также подсоединен канал. Это позволяет удобно отсоединять, удалять и заменять защитные оболочки и канал по вертикали, через верхний отражатель и/или предназначенный для защиты от излучения экран защитной оболочки реактора. Для систем ЖСР с компонентами активной зоны, подвергающимися воздействию сочетания высоких температур, интенсивных потоков излучения и потенциально вредного химического взаимодействия с соевым расплавом и его компонентами, удобная регулярная замена материалов и компонентов активной зоны является важным аспектом для срока службы реактора и экономии.

Канал может быть разъемно соединен (т.е. соединен так, чтобы его можно было отсоединять, необязательно вместе с защитной оболочкой (29)). При обеспечении канала в качестве прохода вверх-вниз, подача и вывод размещаются на одной и той же стороне (верхней или нижней) контура. Это позволяет удалять контур (и/или канал) из его окружения, либо из близлежащей активной зоны реактора, где контур был размещен с тем, чтобы он облучался или взаимодействовал с излучением из ядерного реактора, либо из замедлителя в случае, если канал контура был расположен в замедлителе реактора. В таком случае удаление может быть достигнуто путем подъема или опускания (высвобожденного) канала и/или всего контура из реактора без необходимости в разборке реактора. Это обеспечивает громадное преимущество перед традиционными (жидкосолевыми) реакторами, поскольку это способствует тому, что части реактора могут быть заменены, отремонтированы или иным образом обработаны без необходимости в разборке (большой части) реактора.

Канал может быть окружен или заключен в защитную оболочку, которая также является съемной и/или заменяемой. Между защитной оболочкой и каналом может присутствовать инертный газ, который может действовать в качестве теплоизоляции, причем его можно контролировать (оперативно) для выявления утечки соли и можно использовать для нагрева (подогрева) первичных компонентов.

Остальная часть контура также соответствует конструкциям с глубоководной защитой посредством подходящих защитных слоев для предотвращения выделения радиоактивных материалов из защитных оболочек или герметичных зон. Аналогично функции защитной оболочки канала, газовые промежутки могут иметь функции обнаружения/мониторинга утечек и/или нагрева системы контура.

В промежутке между отдельными (содержащимися) каналами можно устанавливать или исключать материал замедлителя для регулирования и оптимизации спектра нейтронов, приспособленного к топливному циклу, предусмотренному системой (например, простой цикл сжигания урана, или цикл воспроизводства тория-урана или урана-плутония). Для конструкции теплового реактора применение индивидуальных контуров реактора предусматривает отделение замедлителя из контакта с солью. Функциональность замедлителя и защитной оболочки для солевого расплава или функциональность направления потока солевого расплава разделены, в отличие от других известных или находящихся в разработке конструкций систем тепловых ЖСР.

Таким образом, в другом аспекте изобретения предложен способ, в котором компоненты контура реактора удаляют путем отсоединения канала, защитной оболочки канала и/или резервуара для жидкости

от контура и удаления канала, защитной оболочки канала и/или резервуара для жидкости из контура или путем удаления всего контура из реактора. В случае, когда контур расположен в конфигурации реактора, заменяемые соединенный канал, защитную оболочку канала и резервуары для жидкости можно удалять и/или заменять из оболочки или области активной зоны реактора. В некоторых вариантах осуществления удаление канала, защитной оболочки канала и/или резервуара для жидкости из контура включает в себя удаление всего контура ядерного реактора из реактора перед удалением канала, защитной оболочки канала и/или резервуара для жидкости из контура. В других вариантах осуществления канал, защитную оболочку канала и/или резервуар для жидкости можно удалять из контура ядерного реактора в то время, как остальная часть контура ядерного реактора остается в ядерном реакторе.

Линия подвода для канала расположена на одном конце канала. Линия отвода расположена на другом конце канала. Канал имеет подающий конец (линию подвода) и выпускной конец (линию отвода), оба из которых являются частью и/или соединены с петлей так, чтобы подача жидкости в канал и выпуск ее из канала происходили на одной и той же стороне канала.

Контур может содержать жидкость и обеспечивать ее циркуляцию. Контур содержит петлю, которая содержит канал (4).

Канал (иногда идентифицируемый как "горячая ветвь"), употребляемый в настоящем документе, представляет собой часть контура, наиболее подверженную воздействию нейтронного излучения, вызванного ядерными реакциями деления внутри канала и/или вне каналов (при воздействии внешнего нейтронного излучения), и причем канал и текучая среда в канале нагреваются за счет ядерных реакций деления и/или ядерного нагрева (энергии, выделяющейся в материалах канала и текучей среде при поглощении излучения). Текучая среда контура течет через канал двунаправленным образом (вверх-вниз или вниз-вверх). Канал может быть выбран из одиночной трубы с проходом вверх и вниз, пучка труб, конструкции "труба в трубе" или снабженного каналами блока/цилиндра. Канал может обеспечивать односторонний или двусторонний поток соли. Канал может быть соединен с линией (6) подвода и линией (8) возврата, подающей жидкость в канал и выводящей жидкость из канала. Предпочтение отдается каналу, который обеспечивает двусторонний поток, такой как пучок труб, труба в трубе или снабженный каналами блок/цилиндр.

Практически прямое положение канала, предпочтительно, применимо к внешнему расположению канала контура. В альтернативном варианте осуществления канал может иметь проход вверх и вниз, поворачивающийся по спирали вверх (или вниз) по внешнему периметру канала и через петли спирали вниз (или вверх) до завершения прохода.

Канал может соединяться на одном конце с линией подвода. На другом конце канал соединяется с линией (7) отвода. Линия отвода на одном конце соединяется с каналом. Линия отвода на другом конце соединяется с линией возврата. Линия возврата на одном конце соединяется с линией отвода. Линия возврата на другом конце соединяется с линией подвода. Данная компоновка линии подвода, канала, линии отвода и линии возврата обеспечивает замкнутый контур или петлю, как это использовано в изобретении.

Обычно канал соединен на двух концах (входном и выходном) канала так, что канал является частью замкнутой петли, которая способна содержать жидкость и обеспечивать ее циркуляцию. На одном из этих концов линия подвода может присутствовать выше по потоку относительно канала, а линия отвода может быть обеспечена ниже по потоку относительно канала. Линия возврата может быть расположена ниже по потоку относительно линии отвода и выше по потоку относительно линии подвода, вследствие чего может быть обеспечена петля, содержащая канал.

С контуром может быть соединен один или более резервуаров (5) для жидкости. Контур способен содержать жидкость. Жидкость может содержать воспроизводящие и/или делящиеся материалы. Ядерный контур по настоящему изобретению образует петлю, в которой канал может быть размещен и разнесен на некоторое расстояние от остальной части контура, таким образом, чтобы при эксплуатации канал можно было помещать в поток излучения существующего ядерного реактора (т.е. подходящего реактора для испытания материалов). Сам канал и содержимое канала могут быть подвергнуты излучению существующего (испытываемого) ядерного реактора. Другие элементы контура ядерного реактора могут быть размещены дополнительно вне потока излучения существующего реактора.

Это обеспечивает установку, в которой могут быть испытаны и аттестованы материалы и конфигурация самого контура ядерного реактора. Таким образом, контур ядерного реактора можно использовать для общего тестирования, проверки модели и аттестации новой концепции реактора путем помещения его в поток излучения испытываемого ядерного реактора. Один или более резервуаров для жидкости, соединенных с контуром, можно использовать для заполнения контура ядерного реактора, а также можно использовать для хранения содержимого жидкости.

В одном варианте осуществления, предпочтительно, канал не содержит критического количества ядерного материала, т.е. канал является подкритическим.

В некоторых вариантах осуществления контур может содержать жидкость. Жидкость может содержать воспроизводящие и/или делящиеся элементы. Жидкость может представлять собой солевой расплав. Жидкость можно подвергать циркуляции через контур, например, за счет конвекции и/или с помощью насоса, встроенного в контур.

Обычно, солевой расплав имеет высокий коэффициент термического расширения. Таким образом, при использовании солевого расплава в петле может происходить естественная циркуляция. Соль в канале, которая нагревается под действием реакции деления, поднимается в верхнюю часть канала или выдавливается дальше, где тепло может быть отведено из солевого расплава, например, посредством необязательного теплообменника. Солевой расплав, имеющий высокий коэффициент термического расширения, становится более плотным и движется с обратной тенденцией через линию вывода и линию возврата петли и заменяется солью, которая был нагрета в пределах активной области. По мере того, как охлажденная соль движется через контур, она проходит через "критическую зону" в канале, т.е. там, где она может быть подвергнута воздействию внешнего излучения. Прохождение через критическую зону генерирует тепло в солевом расплаве, заставляя его становиться менее плотным и циркулировать в верхнюю часть канала емкости, повторяя процесс. Таким образом, естественное течение вызывает циркуляцию горячей соли через контур и необязательный теплообменник, где тепло может отводиться, и приводит более холодную соль назад через область критической зоны, где она нагревается. Эта естественная циркуляция может образовывать первичный привод потока внутри контура.

Эффект естественной циркуляции в контуре может снизить потребность в задействовании насоса в петле или контура для циркуляции материала через реакционную емкость активной зоны. Насосы могут быть предусмотрены для дополнения этого эффекта естественной циркуляции и/или могут потребоваться в качестве первичной силы для циркуляции. Например, когда в контуре генерируется большое количество энергии, является предпочтительным, чтобы насос активно перемещал тепло из канала в тот участок контура, где тепло отводится.

В некоторых вариантах осуществления канал размещен в практически вертикальном расположении. Практически вертикальный в данном контексте означает, что жидкость в канале может двигаться по каналу за счет конвекции и/или силы тяжести. Канал может находиться под углом к вертикали, составляющим самое большее примерно 45 градусов, предпочтительно не более примерно 20, 15 или 10 градусов. Является более предпочтительным, чтобы этот угол составлял менее примерно 5 градусов. Является предпочтительным, чтобы элементы петли и контура были выполнены и расположены таким образом, чтобы контур или обеспечивал или способствовал пассивному стеканию текучей среды в резервуар для жидкости под действием силы тяжести.

В варианте осуществления, в котором контур ядерного реактора представляет собой жидкосолевого реактор, который может содержать воспроизводящие и/или делящиеся материалы, резервуар для жидкости может быть соединен с контуром через активно или пассивно активируемый клапан или сквозной проход.

Примером пассивно активируемого сквозного прохода является солевая пробка (или застывшая пробка) (11) в соединении между контуром и резервуаром для жидкости, которая обычно достигается путем активного охлаждения участка так, что солевой расплав затвердевает. Этот участок обычно бывает расположенным между петлей и резервуаром. Сразу после деактивации или устранения охлаждения или повышения температуры пробка будет плавиться, а содержимое контура будет стекать в резервуар. Солевая пробка обычно применима в случае перегрева контура ядерного реактора, и за счет пассивного стекания через солевую пробку делящийся материал удаляют из активной зоны, эффективно снижая или прекращая ядерную реакцию деления. Резервуар для жидкости предпочтительно расположен вблизи самой нижней точки контура ядерного реактора. Сочетание практически вертикального расположения по меньшей мере канала и размещения солевой пробки и резервуара для жидкости вблизи самой нижней точки контура позволяет в экстренных случаях (т.е. аварий или перегрева) опорожнять содержимое контура в резервуар, тем самым удаляя делящийся материал из контура и из области критической активной зоны реактора, с прекращением или ослаблением ядерной реакции деления в контуре так, чтобы реакторная установка больше не была критической. Предпочтительно, резервуар расположен вне потока излучения реактора или по меньшей мере в том положении, где поток излучения реактора не способен поддерживать ядерную реакцию в контуре. Резервуар для жидкости можно использовать для стока жидкости из контура (сценарий отключения) и/или для заполнения контура жидкостью (сценарий запуска). Резервуар для жидкости может быть адаптирован для хранения жидкости и обладает возможностью управления температурой в целях кондиционирования соли. Резервуар для жидкости можно удалять и заменять. Наличие съемных и сменных резервуаров для жидкости обеспечивает возможность введения новых составов солевого расплава в контур или управления очисткой или изменением солевого расплава в другом месте. В качестве альтернативы, индивидуальные резервуары можно опорожнять в переносной резервуар или контейнер, который можно удалять и заменять.

В некоторых вариантах осуществления контур может дополнительно содержать другие компоненты, такие как расширительный бак, чтобы справляться с колебаниями давления и изменениями объема солевого расплава, например, из-за термического расширения. Контур может дополнительно содержать насосы для транспортировки жидкости в контуре, теплообменник для нагрева текучей среды в контуре или для отвода тепла из текучей среды в контуре во вторичную среду, используемую для переноса тепла в блок выработки энергии. Контур может дополнительно содержать или может быть соединен со средствами для химической обработки, например, для удаления примесей, нежелательных побочных продуктов, поглощающих нейтроны продуктов активации или деления или образующихся в солевом расплаве

элементов, которые усиливают деградацию системы за счет коррозии или осаждения. Потенциальные проблемы нераспространения при извлечении материала следует и можно решать с помощью конструкции. Контур может дополнительно содержать или может быть соединен со средствами для добавления и/или удаления одного или более из воспроизводящего материала, делящегося материала, продуктов деления, материалов-источников для нейтронной активации и активируемых нейтронами материалов, а также жидкостей, таких как солевые расплавы.

В одном варианте осуществления резервуар для жидкости представляет собой множество резервуаров для жидкости. Количество ядерного материала в контуре и/или в канале может быть меньше критического количества (т.е. канал контура содержит подкритическое количество ядерного материала). В этом варианте осуществления, предпочтительно, канал не содержит критического количества ядерного материала, т.е. канал являлся подкритическим. Таким образом, в некоторых вариантах осуществления могут быть предусмотрены множественные резервуары для жидкости, так что один резервуар для жидкости может содержать часть жидкости, содержащейся в контуре, а значит, только подкритическое количество ядерного топлива.

Резервуары для жидкости можно удалять из конструкции и помещать в транспортировочные контейнеры для удаления жидкости в место для очистки соли, место для оптимизации состава соли или для других целей обработки соли, включая кондиционирование для хранения и утилизации отходов.

Жидкость в контуре ядерного реактора (а значит, и в реакторе) согласно изобретению может содержать воспроизводящие материалы, предпочтительно выбранные из числа одного или более из ^{232}Th , ^{238}Pu , ^{238}U , ^{240}Pu , ^{242}Pu и других изотопов актиноидов.

Жидкость в контуре ядерного реактора (а значит, и в реакторе) согласно изобретению может содержать делящиеся материалы, предпочтительно выбранные из числа одного или более из ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu и других изотопов актиноидов.

В этом отношении термин "воспроизводящий материал" означает материал, который может быть преобразован в делящийся материал путем нейтронной трансмутации и последующего ядерного распада. В этом отношении термин "делящийся материал" означает материал, который можно заставить претерпевать ядерное деление под действием нейтронного облучения (т.е. является делящимся), а также производить нейтроны в результате такого деления, которое может поддерживать ядерную реакцию в надлежащих условиях. Процесс трансмутации воспроизводящих материалов в делящиеся материалы за счет поглощения нейтронов называется воспроизводством топлива.

Жидкость в контуре ядерного реактора (а значит, и в реакторе) согласно изобретению может содержать делящиеся материалы, предпочтительно выбранные из числа одного или более из ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu и других изотопов актиноидов.

Жидкость в контуре ядерного реактора (а значит, и в реакторе) согласно изобретению может содержать долгоживущие изотопы, извлеченные из ядерных отходов, такие как изотопы нептуния, плутония, америдия, кюрия и других актиноидов, например, в целях снижения срока хранения ядерных отходов.

Жидкость в контуре ядерного реактора (а значит, и в реакторе) согласно изобретению может содержать изотопы, специально предназначенные для генерирования продуктов деления или активации, которые имеют медицинское или промышленное применение, варьирующихся от обогащенных стабильных изотопов, таких как ^{176}Yb (для генерирования ^{177}Lu), ^{160}Gd (для генерирования ^{161}Tb), до выбранных полустабильных или нестабильных изотопов, таких как $^{235}\text{U}/^{233}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ (для генерирования ^{99}Mo , ^{90}Sr и ^{131}I путем деления), ^{237}Np (для генерирования ^{238}Pu) и ^{226}Ra (для генерирования ^{227}Ac , ^{228}Th , ^{229}Th , ^{225}Ac и т.д.), помимо прочих.

Жидкость в контуре ядерного реактора согласно изобретению может представлять собой солевой расплав. В предпочтительном варианте осуществления солевой расплав выбран из фторидов и/или хлоридов, предпочтительно, одного или более из LiF , NaF , KF , RbF , BeF_2 , ZrF_4 , LiCl , NaCl , KCl , RbCl , BeCl_2 , ZrCl_4 и их смесей.

Канал по настоящему изобретению изготовлен из материала, который может в достаточной мере выдержать коррозию под действием солевого расплава в контуре, с минимальным повреждением из-за потока нейтронов и излучения, при минимизации поглощения нейтронов, что способствует оптимизации экономии нейтронов. Материал, который обладает высокой стойкостью к коррозионному действию солевого расплава, может относительно хорошо выдерживать радиационное повреждение и обладает низким поглощением нейтронов. Подходящий материал может представлять собой сплавы молибдена, графит, карбиды кремния и другие карбиды.

Канал по настоящему изобретению в своем простейшем виде представляет собой одиночную трубку (трубу) или канал. В одном варианте осуществления канал (4) содержит трубку (4a) с проходом вверх и трубку (4b) с проходом вниз, которые соединены друг с другом сверху или снизу. Это также может быть воплощено в виде U-образной трубки с изгибом сверху или снизу (одиночная труба), предпочтительно сверху.

Таким образом, предпочтительно, канал представляет собой U-образную трубку, причем каждая из линии подвода и линии отвода расположена независимо на нижнем конце или вблизи него (в нижней половине) канала (фиг. 3A).

В одном варианте осуществления канал представляет собой конструкцию труба в трубе (фиг. 3В). Конструкция труба в трубе (двойная труба, двухсторонняя) содержит внутреннюю трубку (14), расположенную внутри внешней трубки (15), причем внутренняя трубка имеет меньший наружный диаметр, чем внутренний диаметр внешней трубки, причем один конец (предпочтительно, нижний конец) внутренней трубки соединен с линией подвода, а один конец внешней трубки (предпочтительно, нижний конец) соединен с линией отвода, при этом внешняя трубка имеет закрытый конец, удаленный от конца, соединенного с линией отвода (предпочтительно, сверху),

или

при этом один конец внутренней трубки соединен с линией отвода, а один конец внешней трубки соединен с линией подвода, причем внешняя трубка имеет закрытый конец, удаленный от конца, соединенного с линией подвода, а другой конец внутренней трубки имеет отверстие и расположен вблизи закрытого верха внешней трубки, а длина внутренней трубки во внешней трубке короче, чем у внешней трубки. Это создает участок, в котором поток жидкости меняется на обратный по направлению.

В дополнительных вариантах осуществления канала внутренняя или восходящая трубка размещена коаксиально относительно возвратной или внешней трубки, и наоборот.

В другом варианте осуществления канал может содержать одну трубку, в которой жидкость течет вверх (или вниз), и множество трубок, в которых жидкость течет вниз (или вверх). Для обеспечения этого трубки могут иметь различный диаметр. См. в этом отношении фиг. 3С.

В еще одном варианте осуществления канал может быть предусмотрен в виде сплошного блока или цилиндра, в котором выполнены каналы, проходящие через блок или цилиндр так, чтобы они совместно вмещали восходящий поток, реверсивный поток и нисходящий поток (фиг. 3С). Конструкция блока может быть оптимизирована для оптимального распределения топлива, а также может содержать замедляющие элементы, и/или сама по себе состоит из материала замедлителя.

Является предпочтительным, чтобы канал вмещал в себя восходящий и нисходящий поток, и важен участок изменения направления потока на обратное, поскольку он может позволить отсоединять весь канал в концевом местоположении, где он соединен с остальной частью контура, предпочтительно, на нижнем конце. То же применимо для охватывающих канал защитных оболочек, которые также могут быть подсоединены на этом же конце, предпочтительно, на нижнем конце, с образованием кожуха, который может быть заменен путем отсоединения защитной оболочки и перемещения защитной оболочки вертикально из реактора через верхний отражатель нейтронов и/или предназначенный для защиты от излучения экран защитной оболочки реактора.

Контур ядерного реактора, содержащий петлю, которая содержит канал, может содержать или может быть соединен с другими элементами и/или функциональностями, такими как теплообменники, насосы, средства химической обработки и т.д., по существу такими, как разъясняется в настоящем документе в других местах, для образования индивидуального независимого контура.

Настоящее изобретение в другом своем аспекте относится к ядерному реактору, содержащему область активной зоны и область оболочки, и причем реактор составлен из множества отдельных и индивидуальных контуров или модулей ядерного реактора, причем каждый контур содержит

петлю (3), причем петля (3) способна содержать жидкость, содержащую воспроизводящие и/или делящиеся материалы в качестве ядерного топлива и, необязательно, циркулирующую,

причем петля содержит канал (4), предпочтительно практически прямой, который является частью петли и который расположен в практически вертикальном расположении, причем канал обеспечивает проход (4а, 4б) вверх и вниз для жидкости в петле, причем каждый из каналов упомянутого множества контуров расположен в области активной зоны, и при этом каждый контур является независимо извлекаемым из ядерного реактора.

Таким образом, ядерный реактор содержит область активной зоны (1) и область оболочки (2). Область активной зоны окружена областью оболочки. Область оболочки может обладать функциональностью отражателя нейтронов, экрана защиты от излучения или поглощающего нейтроны бланкета для генерирования материалов и изотопов путем нейтронной активации, или сочетанием этих функциональностей. Функциональность бланкета оболочки может быть достигнута с помощью контуров, подающих и выводящих текучую среду в оболочку, содержащую материалы-мишени для нейтронной активации. В ядерном реакторе предусмотрено множество контуров ядерного реактора.

Канал представляет собой часть контура, находящуюся в критической зоне реактора, т.е. подвергающуюся воздействию потока нейтронов.

Ядерный реактор построен из группы (множества) индивидуальных контуров ядерного реактора. Контур представляет собой отдельные контуры или модули и являются извлекаемыми из реактора без влияния на другие модули. Каналы контуров расположены поблизости друг от друга. Упомянутое множество контуров может быть размещено в конфигурации, образующей реактор, такой как круговая, прямоугольная или другая конфигурация. Круговая конфигурация является предпочтительной. Каналы контуров могут быть расположены на меньших расстояниях друг от друга (т.е. в большей близости друг к другу), чем другие элементы, которые входят в состав контура. Эффективная визуализация состоит в том, что при реакторе, имеющем форму пирога на виде сверху, индивидуальные контуры образуют ку-

сочки пирога, каждый с каналом контура ближе к центру пирога. Это позволяет эффективно размещать другие элементы контура вне или более удаленно от критической зоны реактора. Контур может содержать множественные каналы. В круговой конфигурации канал может находиться на меньшем радиусе от центра реактора, чем другие элементы. Каналы вместе образуют критическую зону, являющуюся активной зоной реактора. В некоторых вариантах осуществления каналы могут быть размещены по нескольким кругам с образованием критической зоны. Другой круг каналов (9) может окружать критическую зону. Критическая зона окружена областью оболочки, которая может обеспечивать функциональность отражателя нейтронов, замедлителя нейтронов, экрана защиты от излучения или бланкета. Функциональность бланкета может быть достигнута за счет дополнительных контуров, которые подают бланкетный материал-мишень в каналы (9), которые расположены в области оболочки, окружающей критическую зону. Бланкет можно использовать для генерирования делящегося материала (воспроизводства) из воспроизводящего материала или для получения изотопов по самым разным назначениям. Функциональность бланкета может быть обеспечена каналами, имеющими ту же самую или иную геометрическую форму (в поперечном сечении), чем каналы (4), используемые в активной зоне. Каналы контура, как в активной зоне (4), так и вне активной зоны (9), в оболочке, могут обладать геометрическими формами (поперечными сечениями), которые являются круглыми (как показано на фигуре 1), но также могут независимо быть овальными и/или эллиптическими. Каналы в области оболочки могут быть предназначены для поглощения нейтронов из критической зоны реактора и, в зависимости от их назначения, могут обладать конфигурацией, очень сильно отличающейся от конфигурации каналов контуров активной зоны, предназначенных и оптимизированных для их функции. Каждый из каналов может независимо содержать жидкость, которая может содержать воспроизводящий и/или делящийся материал или другой материал-мишень, активируемый потоком нейтронов в области оболочки.

Для надлежащего доведения активной зоны реактора до критичности выбранные или все контуры могут по отдельности подавать подкритическое количество ядерного топлива в критическую зону реактора. В таком случае скомбинированные в активной зоне каналы (и необязательные замедляющие материалы в каналах и/или в промежутках между каналами) обеспечивают достаточную критическую массу и замедление, вследствие чего в активной зоне реактора достигается критичность. Критичность сильно зависит от температуры, что приводит к снижению плотности делящегося материала в каналах в случае повышения температуры и наоборот, таким образом пассивно добавляя контроль безопасности реакции деления. Для дополнительного контроля или прекращения реакции деления управляющие стержни могут вводить или удалять нейтронопоглощающие материалы из области активной зоны за счет их перемещения в промежутках между каналами или близко к ним, в материалах замедлителя, если они присутствуют в промежутках между каналами, или в области оболочки.

В некоторых вариантах осуществления активная зона содержит 2 или более, 4 или более, 6 или более, 10 или более или 25 или более, предпочтительно от 6 до 20 каналов. В некоторых вариантах осуществления реактор содержит 2 или более, 4 или более, 6 или более, 8 или более или 10 или более контуров.

В типичном варианте осуществления реактор основан на множественных индивидуальных контурах, содержащих петли, которые могут быть размещены по кругу, причем одна часть каждого контура расположена на малых радиусах ("канал" или "горячая ветвь"), создавая критическую конфигурацию, поддерживающую ядерную реакцию ("критическую зону"), а остальная часть контура (другие элементы, функциональности) расположена(ы) на большем расстоянии или радиусе, в значительной мере вне поля излучения критической зоны, в некритической конфигурации.

Канал представляет собой отдельный и отделяемый компонент, который можно отсоединять, удалять и заменять. Защитная оболочка (29) канала представляет собой отдельный компонент, который можно отсоединять, удалять и заменять. Защитная оболочка канала может содержать множественные охватывающие защитные оболочки. Между защитной(ми) оболочкой(ми) канала и каналом может присутствовать инертный газ, который может обеспечивать теплоизоляцию, который можно контролировать на наличие продуктов деления или других солевых (летучих) ингредиентов для выявления утечки и который может применяться для нагрева (подогрева) канала путем продувки пространства между защитными оболочками канала и каналом горячим газом. Канал и/или защитная оболочка представляют собой отдельные компоненты, которые можно по отдельности отсоединять, удалять и заменять. Канал может быть (частично) охвачен одной или более отдельными защитными оболочками. В качестве альтернативы, весь контур может быть удален (вынут или извлечен) из области активной зоны для замены.

Каждый из каналов, предпочтительно с защитными оболочками, упомянутого множества контуров расположен в области активной зоны. В некоторых вариантах осуществления область активной зоны может содержать замедлитель (10). Замедлитель (10) может быть расположен в промежутках между каналами или окружающим каналы. Таким образом, каналы (и замедлитель) вместе образуют критическую зону активной зоны реактора. Подходящий замедлитель может представлять собой любой твердый материал с низкой атомной массой и с низким поглощением нейтронов, включая материалы на основе углерода.

В некоторых вариантах осуществления можно обеспечить ядерный реактор без замедлителя, т.е. так называемый реактор на быстрых нейтронах, обеспечивающий спектр быстрых нейтронов. Хотя эти типы реакторов обладают определенными техническими проблемами, такими как быстрое разрушение мате-

риалов, концепция с использованием контуров по изобретению позволила бы проводить относительно быструю и легкую замену первичных материалов, которые образуют контуры, такие как каналы и защитные оболочки каналов из контуров, или контура целиком.

В ряде применений, которые требуют более надтеплого спектра (больше теплового, чем быстрых нейтронов, например, в ториевом цикле), или теплового спектра, является предпочтительным наличие реактора, содержащего замедлитель.

Замедление можно дополнительно придавать путем выбора материала каналов и защитных оболочек каналов и путем добавления замедляющего материала в промежутках между каналами контуров, или оно может быть минимизировано за счет использования незамедляющих материалов в контурах и заполнения пространства между каналами контуров незамедляющими средой или материалом.

Критичность в этом отношении относится к режиму нормальной эксплуатации ядерного реактора, при котором ядерное топливо поддерживает реакцию деления. Реактор достигает критичности (и рассматривается как критический), когда каждое событие деления высвобождает достаточное число нейтронов для поддержания продолжающейся последовательности ядерных реакций деления.

Каналы реактора могут быть расположены таким образом, чтобы каждый из каналов (и жидкость в них) претерпевал(а) воздействие сходного потока нейтронов и спектра нейтронов. В качестве альтернативы, критические зоны могут быть расположены так, чтобы каждый канал в критической зоне мог претерпевать воздействие различных потоков и/или различных спектров нейтронов. Такое расположение может быть полезным в случае, когда для конкретной критической зоны требуется особый поток нейтронов, например, зоны, в которой расположен канал, который является частью контура, предназначенного для генерации конкретных изотопов путем нейтронной активации, или за счет использования нейтронов/поглощения нейтронов для преобразования воспроизводящих элементов в делящиеся элементы.

В отличие от традиционных ядерных реакторов критичность, а значит, и цепную реакцию деления уже можно надлежащим образом останавливать или регулировать на понижение путем вмешательства в один или более контуров вместо требуемого вмешательства во все контуры в реакторе для приведения всей активной зоны в состояние не критичности. Таким образом, не все контуры приходится переводить в "отключенный режим" или регулировать на понижение. Это может быть очень удобным с точки зрения технического обслуживания и безопасности. Для иллюстрации, рассмотрим реактор, содержащий 10 контуров, каждый из которых привносит 10% критического количества ядерного материала в активную зону, вследствие чего у активной зоны достигается критичность. В экстренном случае (аварии) необходимо отключить только один контур (обеспечить стекание его содержимого в резервуар(ы) для жидкости), и весь реактор становится не критическим, тогда как другие 9 контуров могут оставаться незатронутыми.

В дополнительном аспекте изобретение предлагает способ эксплуатации ядерного реактора, содержащего множество индивидуальных контуров ядерного реактора по настоящему изобретению. Способ позволяет использовать ту гибкость, которую может обеспечить ядерный реактор, содержащий множество контуров ядерного реактора.

Способ дополнительно включает обеспечение множества ядерных топлив или материалов-мишеней, содержащих воспроизводящие материалы и/или делящиеся материалы и/или другие материалы, активируемые потоком нейтронов, и подачу множества ядерных топлив и/или материалов-мишеней во множество контуров. Способ дополнительно включает подачу множества ядерных топлив, содержащих воспроизводящие и/или делящиеся материалы, в контуры, предпочтительно в каждый из контуров. Ядерное топливо в каналах контуров приводят в критическую конфигурацию.

Критическая активная зона реактора может быть образована каналами контуров, вводящими делящийся материал в надлежащих количествах и в подходящей конфигурации в область активной зоны реактора.

Спектр реактора может регулироваться солью, материалами канала, материалами защитной оболочки и/или специальным замедлителем в промежутках между или вокруг каналов контуров.

Замедление можно настраивать на желаемый спектр нейтронов, либо на активную зону реактора со спектром быстрых нейтронов (минимизированное замедление), либо на активную зону реактора со спектром (над)тепловых нейтронов, либо на различные специальные спектры нейтронов в отдельных секциях в области активной зоны для оптимизации деления, воспроизводства или активации в различных контурах в различных местоположениях.

Реакторная установка с модульной активной зоной также позволяет поэтапно переключать индивидуальные контуры с функции воспроизводства на функцию воспроизводства-сжигания и с функции сжигания на функцию воспроизводства. В случае, если большинство контуров обеспечивает надлежащую критичность для поддержания ядерной реакции деления в области активной зоны, например, за счет деления ^{235}U ("сжигания"), один или более контуров могут использовать избыточные нейтроны, полученные из реакции деления, в активной зоне, например, для преобразования/трансмутации делящегося ^{233}U из воспроизводящего ^{232}Th ("воспроизводство"), до тех пор, пока в контуре не установится равновесие воспроизводство-сжигание, и в данном случае из ^{232}Th образуется столько же ^{233}U , сколько расходуется на реакцию деления. Экономия нейтронов в реакторе и контуре должна быть достаточно оптимизированной во избежание слишком большой потери нейтронов. Контуры, ранее применявшиеся в основном

для сжигания, можно затем переключить с функции регулярного сжигания на функцию воспроизводства, заменив соль или добавив к соли тория. С течением времени этот контур можно затем переключить с воспроизводства на функцию воспроизводства-сжигания с достижением, в конечном счете, равновесия между воспроизводством и сжиганием. Таким образом, реактор поэтапно преобразуется в сторону эксплуатации при замкнутом ториевом цикле, в котором ^{232}Th преобразуется в топливо ^{233}U , что не требует вообще или требует лишь минимального добавления делящегося материала в контуры реактора для поддержания реакции деления.

Настоящее изобретение может предложить способ для замыкания уран-плутониевого цикла, в котором, в конечном счете, реакцию деления в критической зоне реактора можно поддерживать за счет деления плутония, а избыточные нейтроны используются для трансмутации воспроизводящего ^{238}U до делящегося ^{239}Pu в надлежащих количествах.

Настоящее изобретение может предложить способ, который можно использовать для сжигания долгоживущих изотопов, которые были извлечены из ядерных отходов, для снижения срока хранения ядерных отходов. В этом случае реактор является критическим, но один или более контуров либо в критической/активной зоне, либо в области оболочки имеют особый солевой состав, в котором эти долгоживущие изотопы, извлеченные из ядерных отходов, могут быть подвергнуты трансмутации и/или делению с получением короткоживущих и среднеживущих изотопов и продуктов деления.

Настоящее изобретение может предложить способ получения конкретных изотопов путем нейтронной активации конкретных элементов. В этом случае реактор является критическим, но один или более контуров либо в критической зоне/области активной зоны, либо в области оболочки имеют особый солевой состав, в который включены эти материалы-мишени, а желаемые продукты активации извлекают из контура для их использования по заданному назначению.

Преимущество такого подхода с точки зрения (замкнутого) ядерного топливного цикла по настоящему изобретению, как в контуре, так и в реакторе, состоит в сочетании:

применения солевого расплава, позволяющего оперативно очищать и кондиционировать соль, а также путем удаления поглощающих нейтроны продуктов деления или активации оптимизировать экономию нейтронов за счет минимизации потерь на поглощение нейтронов. Потенциальные проблемы нераспространения при извлечении материала должны быть и могут быть решены с помощью конструкции;

применения индивидуального канала контуров, вместе образующих критическую зону, что в принципе позволяет каждому контуру содержать разную смесь солей и разное содержание воспроизводящего делящегося материала, которое может быть изменено путем регулировки или замены соли.

Традиционные реакторные установки, в основном работающие на твердых типах топлива, не обладают возможностью минимизировать нейтронное поглощение продуктов активации и деления за счет удаления продуктов деления, поскольку они содержатся в топливе, и их можно удалять только путем тщательной переработки твердого топлива в отдельном месте, и не обладают гибкостью для удобного (частичного) изменения, оптимизации или настройки содержимого активной зоны. Контур и реактор по изобретению обеспечивают возможность удаления продуктов деления.

Традиционные жидкосолевые реакторные установки в основном работают с одним объемом соли, что делает поэтапную регулировку состава соли сложной, поскольку такое изменение влияет на весь объем соли, в котором соль выполняет неоптимизированную и нелокализованную функцию воспроизводства и сжигания. Реактор и контур по изобретению обеспечивают возможность работы с множеством различных солей и обеспечивают относительно легкую и удобную поэтапную регулировку состава соли.

Вышеупомянутые преимущества реакторной установки с модульной активной зоной по сравнению с другими конструкциями жидкосолевого реактора приведены в дополнение к недостаткам обращения с большими объемами соли, такими как крупные компоненты, которые трудно заменить и которые быстро разрушаются в среде жидкосолевого реактора, с ограниченным пониманием того, где находится топливо, проблематичным протоколом аттестации и лицензирования, при котором мелкомасштабные испытания не могут быть легко экстраполированы на полномасштабную эксплуатацию, и ограниченной гибкостью в оптимизации рабочих характеристик реактора путем замены оптимизированных компонентов, причем всего этого можно избежать, применив реакторную установку с модульной активной зоной по изобретению.

Должно быть ясно, что при ядерном реакторе, который составлен из индивидуальных контуров ядерного реактора, элементы и варианты осуществления, которые были описаны применительно к контуру ядерного реактора, также образуют элементы и варианты осуществления самого ядерного реактора и что элементы и варианты осуществления ядерного реактора, которые являются частью или относятся к контуру ядерного реактора, также представляют собой элементы и варианты осуществления контура ядерного реактора.

Изобретение дополнительно относится к способу эксплуатации контура ядерного реактора, как описано в настоящем документе в других местах, путем обеспечения контура ядерного реактора, размещения канала контура ядерного реактора вблизи активной зоны другого (тестируемого) ядерного реактора так, чтобы критическая зона канала контура подвергалась воздействию потока излучения другого реактора. Способ дополнительно предписывает подачу жидкости в контур, осуществление циркуляции жидкости через контур и подвергание жидкости воздействию потока излучения тестируемого ядерного

реактора в канале. Способ дополнительно включает мониторинг характеристик (элементов) контура и/или жидкости (которая может представлять собой солевой расплав и может содержать делящиеся и/или воспроизводящие материалы или другие химические элементы). Способ может дополнительно включать обеспечение ядерного топлива, содержащего делящиеся и/или воспроизводящие материалы. Ядерное топливо может подаваться в контур. Ядерное топливо может быть подвергнуто циркуляции в контуре и может быть подвергнуто воздействию потока излучения другого реактора, предпочтительно в критической зоне.

При помещении контура ядерного реактора и, в частности, канала контура в поток нейтронов другого ядерного реактора, установку, материалы, из которых сделан контур, и/или жидкость (расплавленные соли) и/или воспроизводящий и делящийся материал в ядерном топливе, можно подвергать испытанию и аттестации, либо в сочетании друг с другом, либо по отдельности. Например, в одном варианте осуществления способ может включать обеспечение контура, описанного в настоящем документе в других местах, обеспечение жидкости (предпочтительно, солевого расплава) и подвергание контура и жидкости воздействию потока излучения существующего ядерного реактора для проведения мониторинга, испытаний и экспериментов по поведению материала контура, жидкости и рабочим характеристикам контура в целом. Полученные указанным образом данные полезны при усовершенствовании самого контура, состава жидкостей, используемых в контуре, и, в конечном счете, при дальнейших конструировании и оптимизации ядерного реактора по изобретению.

Таким образом, в некоторых вариантах осуществления изобретения параметры для (компонентов) контура представляют собой, помимо прочих, поведение материалов, подверженных механизмам деградации при условиях жидкосолевого реактора, таких как контакт с солевым расплавом, высокой температурой и (нейтронным) излучением, обычно это такие аспекты поведения, как коррозионная стойкость, прочность, охрупчивание, ползучесть, вязкость при разрушении, термическое расширение, теплопроводность.

Таким образом, в некоторых вариантах осуществления изобретения параметры для характеристик жидкости представляют собой, помимо прочих, химический состав, растворение или осаждение продуктов деления, поведение продуктов активации, разрушение/разложение под действием излучения, коагуляция элементов в соли, тепло- и электропроводность, коррозионность, фторидный/хлоридный потенциал, вязкость.

Таким образом, в некоторых вариантах осуществления изобретения параметры для ядерного топлива представляют собой, помимо прочих, растворение в солевом расплаве, потенциал осаждения, коагуляцию с другими элементами в соли.

Таким образом, в некоторых вариантах осуществления изобретения параметры для рабочих характеристик контура представляют собой, помимо прочих, тепловыделение, безопасность эксплуатации, эффективность тепловыделения и теплопереноса, тестирование и аттестацию компонентов контура.

При эксплуатации контура таким образом также можно использовать контур по изобретению для большого числа применений, которые будут обсуждаться в настоящем документе в других местах, например, генерирование конкретных изотопов путем нейтронной активации, делящегося материала из воспроизводящего материала и т.д.

В конкретном варианте осуществления способ может дополнительно включать этап генерирования изотопов, например, для медицинских, диагностических применений или применений при визуализации. Этот вариант осуществления может включать этап подачи конкретных элементов в контур, подвергания элементов воздействию потока нейтронов реактора и обеспечения трансмутации элементов в другие элементы и выделения получившихся в результате элементов из жидкости. Выделение может осуществляться поточно или автономно (т.е. жидкость можно удалять из контура и выделение осуществлять в другом месте). Сходным образом, продукты деления можно извлекать из контуров, в которых имеет место реакция деления, например, для медицинских, диагностических применений или для применений при визуализации.

Конструкция контура по изобретению и ядерного реактора, содержащего контуры по изобретению, обладают определенными преимуществами, такими как, но не ограничиваясь ими:

Они делают возможной стратегию замены и оптимизацию рабочих характеристик реактора путем замены контуров усовершенствованными контурами и контурами с усовершенствованными конструкциями каналов.

Множественные контуры реактора вместе образуют критическую зону реактора. Поэтому критическая масса в критической зоне разделена по отдельным защитным оболочкам. В случае стекания из контура критическая масса в критической зоне эффективно снижается, тем самым снижая или прекращая ядерную реакцию.

Индивидуальные каналы (или контуры) могут содержать различные солевые составы с различными воспроизводящими, делящимися или другими материалами.

Конфигурация активной зоны реактора может быть выбрана такой, что каналы индивидуальных контуров размещены в различных местоположениях в критической зоне, чтобы служить по разным назначениям, таким как деление, воспроизводство и нейтронная активация, для получения оптимизированных рабочих характеристик.

Конфигурация активной зоны может быть выбрана такой, что каналы индивидуальных контуров размещены в различных местоположениях в критической зоне, чтобы генерировать спектр и распределение нейтронного потока для оптимизации рабочих характеристик каждого канала в каждом местоположении в реакторе.

Соль в канале может быть заменена другим солевым составом для изменения назначения канала в критической зоне реактора или зоне оболочки.

Производство многих относительно мелких компонентов может быть более экономически эффективным, чем производство нескольких очень крупных компонентов. Экономия по количеству может перевесить экономию по масштабу.

Относительно мелкие компоненты обеспечивают возможность удобных испытаний на репрезентативных масштабах, что облегчает и снижает затраты и продолжительность разработки и аттестации компонентов и реактора.

В отличие от других конструкций (теплого) жидкосолевого реактора, конкретные материалы замедлителя, такие как графит, могут быть расположены снаружи и в промежутках между каналами, вместо нахождения в непосредственном контакте с несущими ядерное топливо солями. Таким образом, функция замедлителя может быть отделена от функций направления или удержания потока солевых расплавов. Это особенно удобно для графита, который является очень подходящим замедлителем, но демонстрирует очень сложное поведение в среде ядерного реактора. В качестве меры по продлению срока службы и технического обслуживания, отдельный замедлитель вокруг каналов может быть подвергнут повышению температуры для отжига радиационных повреждений, причем либо в ходе циклов эксплуатации, либо в промежутках между циклами эксплуатации, в результате чего исходные свойства материала могут быть восстановлены. Для графита это может быть очень эффективным, обеспечивая подходящие свойства замедлителя путем (повторяющегося) отжига, до такой степени, что материал замедлителя больше не будет требовать замены в течение срока службы реактора.

Физическое отделение соли в каналах от замедлителя, находящегося в промежутках между каналами, также обеспечивает возможность термической оптимизации замедлителя, в значительной мере независимой от температуры канала и соли. Материал замедлителя, например, можно доводить до и поддерживать при температурах, отличных от температур соли или канала, чтобы минимизировать влияние радиационного повреждения в ходе эксплуатации для максимизации срока службы. Например, графитовый замедлитель можно поддерживать при более низкой температуре, чем типичные температуры соли, за счет чего влияние радиационного повреждения снижается, а срок службы максимизируется.

Поскольку реактор с модульной активной зоной образован сборкой отдельных, индивидуальных и независимых контуров реактора, система и каждый индивидуальный контур состоит из относительно мелких компонентов, которые работают при низком давлении. Система, построенная из мелких компонентов, позволяет, например, отсоединять канал от контура и удалять его из контура в экранированный контейнер для транспортировки к месту кондиционирования, утилизации или, если это применимо, для переработки. После этого может быть введен новый канал (или другой элемент). Например, это может происходить по вертикали через экран защиты от излучения наверху реактора. Тот же подход может быть применен для других частей и компонентов контура, или всего контура целиком.

Ссылочные номера:

- 1 - область активной зоны;
- 2 - область оболочки;
- 3 - петля;
- 4 - канал;
- 4a - канал с проходом вверх;
- 4b - канал с проходом вниз;
- 5 - резервуар для жидкости;
- 6 - линия подвода;
- 7 - линия отвода;
- 8 - линия возврата;
- 9 - канал оболочки;
- 10 - замедлитель или незамедляющая среда;
- 11 - активный или пассивный клапан (застывшая пробка) к резервуару для жидкости;
- 12 - трубка с проходом вверх;
- 13 - трубка с проходом вниз;
- 14 - внутренняя трубка;
- 15 - внешняя трубка;
- 16 - расширительный бак;
- 17 - теплообменник;
- 18 - насос;
- 19 - обработка;
- 20 - подаваемый материал;

- 21 - вторичная система нагрева;
- 22 - продукты деления и активации;
- 23 - продукты деления и активации;
- 24 - воспроизводящие, делящиеся материалы и материалы-мишени;
- 25 - экран;
- 26 - критическая зона;
- 27 - одиночная трубка с проходом вверх;
- 28 - множественные трубки с проходом вниз;
- 29 - защитная оболочка канала;
- 30 - соединение петли-защитной оболочки канала;
- 31 - проход через отражатель нейтронов и/или экран защиты от излучения для удаления/замены канала и защитной оболочки канала;
- 32 - проход через отражатель нейтронов и/или экран защиты от излучения для удаления/замены резервуара для жидкости.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Ядерный реактор, содержащий область активной зоны и область оболочки, и причем реактор составлен из множества отдельных и индивидуальных контуров или модулей ядерного реактора, причем каждый контур содержит

петлю (3), причем петля (3) способна содержать жидкость, содержащую воспроизводящие и/или делящиеся материалы в качестве ядерного топлива и, необязательно, циркулирующую,

причем петля содержит канал (4), предпочтительно практически прямой, который является частью петли и который расположен в практически вертикальном расположении, причем канал обеспечивает проход (4а, 4б) вверх и вниз для жидкости в петле, причем каждый из каналов упомянутого множества контуров расположен в области активной зоны, и

при этом каждый отдельный и индивидуальный контур ядерного реактора является независимо извлекаемым из ядерного реактора.

2. Ядерный реактор по п.1, причем индивидуальный контур содержит подкритическое количество ядерного топлива в критической зоне реактора.

3. Ядерный реактор по п.1, причем упомянутое множество отдельных и индивидуальных контуров или модулей ядерного реактора обеспечивают критическое количество топлива в реакторе, предпочтительно в критической зоне, так что может поддерживаться ядерная реакция.

4. Ядерный реактор по п.1, причем канал в контуре представляет собой одиночную трубу, пучок труб, трубу в трубе или (монокричное) снабженное каналами тело.

5. Ядерный реактор по любому из предыдущих пунктов, причем канал является съемным.

6. Ядерный реактор по любому из предыдущих пунктов, причем канал снабжен необязательно съемной защитной оболочкой (29).

7. Ядерный реактор по любому из предыдущих пунктов, причем канал имеет подающий конец и выпускной конец, оба из которых являются частью петли и/или соединены с петлей, так что подача жидкости в канал и выпуск из канала происходит на одной и той же стороне канала.

8. Ядерный реактор по п.5, причем расположение каналов образует критическую зону ядерного реактора.

9. Ядерный реактор по п.5 или 6, причем каждый канал содержит подкритическое количество ядерного топлива в критической зоне реактора.

10. Ядерный реактор по любому из предыдущих пунктов, причем критическая зона реактора дополнительно содержит замедлитель.

11. Ядерный реактор по любому из предыдущих пунктов, причем каналы расположены в активной зоне, предпочтительно по одному или более кругов, предпочтительно по одному концентрическому кругу.

12. Ядерный реактор по любому из предыдущих пунктов, причем каналы расположены в замедлителе, предпочтительно по одному или более кругов, предпочтительно по одному концентрическому кругу.

13. Способ эксплуатации ядерного реактора, включающий этапы:

обеспечение ядерного реактора, охарактеризованного в пп.1-10, содержащего множественные контуры;

обеспечение ядерного топлива, содержащего воспроизводящие и/или делящиеся материалы;

подача ядерного топлива во множество контуров;

приведение ядерного топлива в каналах контуров в критическую конфигурацию.

14. Способ эксплуатации контура ядерного реактора путем расположения канала контура ядерного реактора, охарактеризованного в любом из пп.1-5, вблизи активной зоны другого ядерного реактора, так что канал контура подвергается воздействию потока нейтронов другого реактора.

15. Способ по п.14, включающий этапы:

обеспечение контура ядерного реактора, охарактеризованного в любом из пп.1-10;
 обеспечение ядерного топлива, содержащего воспроизводящие и/или делящиеся материалы;
 подача ядерного топлива в контур;
 необязательно, обеспечение циркуляции ядерного топлива в контуре;
 подвергание ядерного топлива в критической зоне контура воздействию потока нейтронов другого реактора и мониторинга и/или моделирования одного или более параметров:

- i) компонентов контура,
- ii) жидкости,
- iii) поведения образца материала,
- iv) ядерного топлива и/или
- v) рабочих характеристик контура.

16. Способ по п.13, дополнительно включающий этапы

эксплуатации реактора в критической конфигурации, причем по меньшей мере часть контуров подают делящийся материал в критическую зону с замедлением или без него для поддержания реакции деления;

эксплуатации части контуров в режиме воспроизводства при сжигании в критической зоне, причем избыточные нейтроны от реакции деления позволяют генерировать делящийся материал из воспроизводящих материалов, например ^{233}U из ^{232}Th , или ^{239}Pu из ^{238}U , предпочтительно ^{233}U из ^{232}Th , и вызывать деление по меньшей мере части сгенерированных делящихся материалов;

установления равновесия между воспроизводством и сжиганием в одном или более контуров;

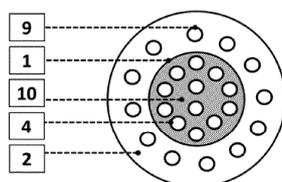
замены жидкости в одном или более других контуров реактора, тем самым с переключением других контуров с режима сжигания на режим воспроизводства;

обеспечения возможности достижения контурами равновесия, с обеспечением тем самым реакторной установки, которая работает в замкнутом ядерном топливном цикле воспроизводства-сжигания.

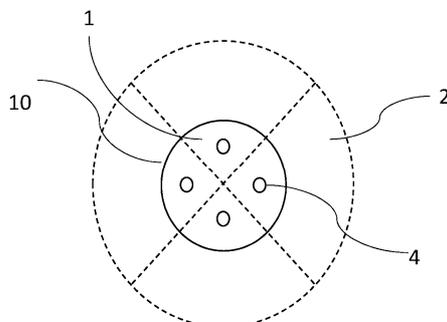
17. Способ удаления и/или замены компонентов контура ядерного реактора по любому из пп.1-12, включающий этапы отсоединения канала, защитной оболочки канала и/или резервуара для жидкости от контура ядерного реактора, удаления и/или замены канала, защитной оболочки канала и/или резервуара для жидкости из контура ядерного реактора.

18. Способ по п.17, причем контур ядерного реактора помещен в конфигурации ядерного реактора, содержащей множественные контуры ядерного реактора, причем из одного из контуров ядерного реактора заменяемые соединенные канал, защитную оболочку канала и резервуары для жидкости удаляют и/или заменяют из области активной зоны или оболочки реактора.

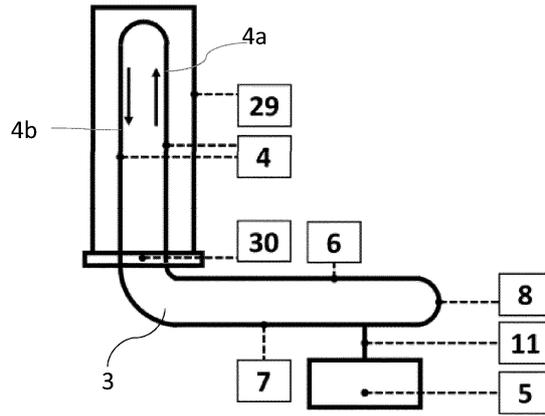
19. Способ по п.17 или 18, причем удаление или замену осуществляют путем практически вертикального перемещения заменяемых соединенных канала, защитной оболочки канала и/или резервуаров для жидкости.



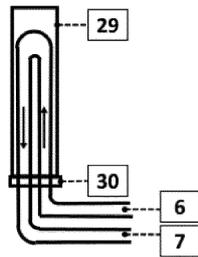
Фиг. 1



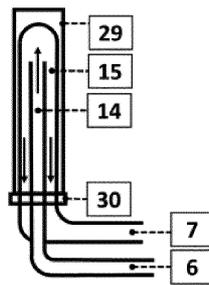
Фиг. 1А



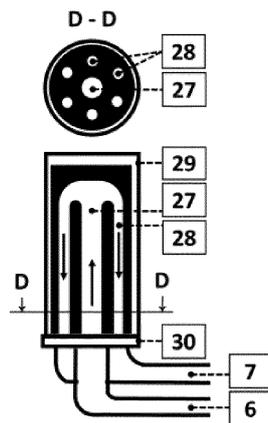
Фиг. 2



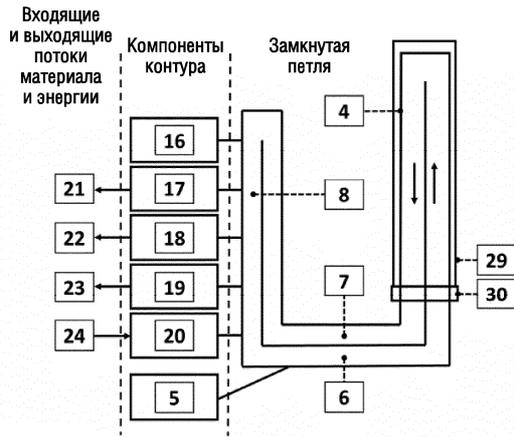
Фиг. 3А



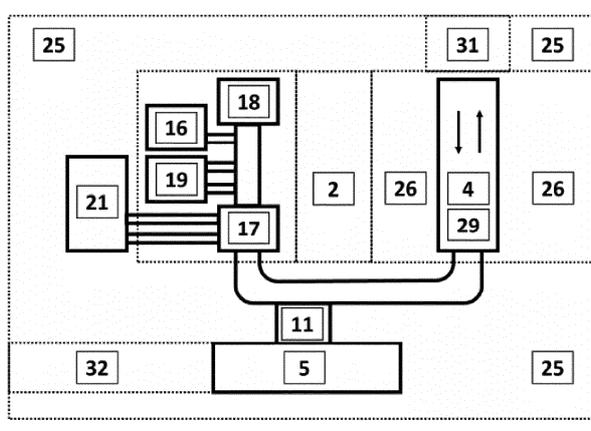
Фиг. 3В



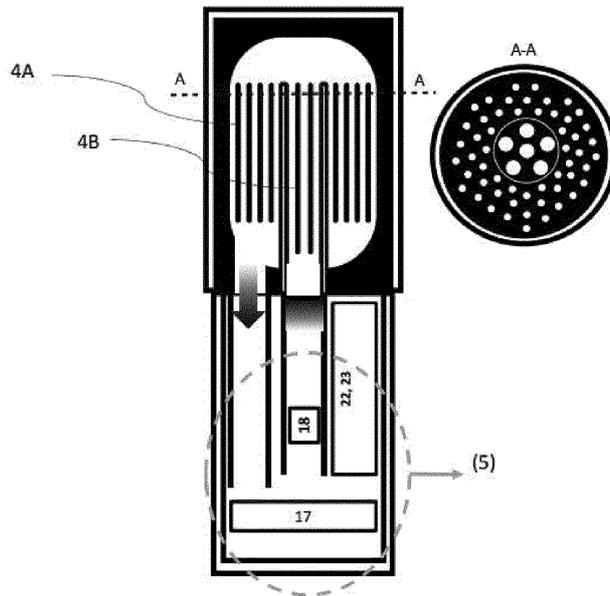
Фиг. 3С



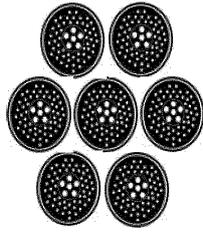
Фиг. 4



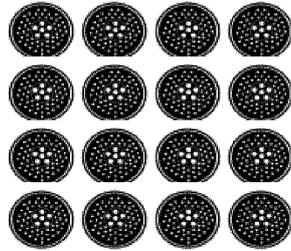
Фиг. 5



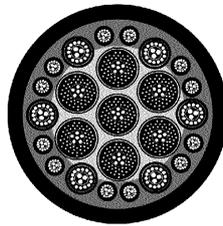
Фиг. 6



Фиг. 7А



Фиг. 7В



Фиг. 7С

