

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **034959**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.04.10

(51) Int. Cl. **C21D 6/00 (2006.01)**
G21D 1/04 (2006.01)

(21) Номер заявки
201650108

(22) Дата подачи заявки
2015.12.01

(54) **СПОСОБ ОТЖИГА АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА И ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР**

(31) **2014153831**

(56) **RU-C1-2396361**
RU-C1-2215794
RU-U1-120275
US-A-5264056

(32) **2014.12.30**

(33) **RU**

(43) **2017.06.30**

(86) **PCT/RU2015/000838**

(87) **WO 2016/108730 2016.07.07**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ
ОБЩЕСТВО "АКМЭ-
ИНЖИНИРИНГ" (RU)**

(72) Изобретатель:
Тошинский Георгий Ильич (RU)

(74) Представитель:
Черных И.В. (RU)

(57) Изобретение относится к ядерной энергетике, и его реализация повышает безопасность эксплуатации ядерных реакторов (ЯР). Изобретение может быть успешно использовано в ЯР с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ), в частности в ядерных реакторах на быстрых нейтронах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ), например эвтектический сплав свинец-висмут, свинец. Способ характеризуется тем, что определяют значение повреждающей дозы быстрых нейтронов (число сна), вызывающее недопустимое снижение пластических свойств стали. Затем при достижении соответствующего значения энерговыработки реактора осуществляют изменение направления движения теплоносителя с рабочего на обратное. Далее выбирают время, в течение которого будет осуществляться отжиг элементов активной зоны, после чего выбирают и обеспечивают в режиме отжига за счет регулирования уровня мощности температуру не ниже такой, при которой обеспечивается восстановление пластических свойств стали в нижней части активной зоны за выбранное время. После истечения выбранного времени режим отжига завершают и осуществляют изменение направления движения теплоносителя с обратного на рабочее. Заявлен также ядерный реактор, позволяющий осуществить предлагаемый способ.

034959
B1

034959
B1

Область техники

Изобретение относится к ядерной энергетике, в частности к способам восстановления пластических свойств конструкционных материалов, подвергшихся радиационному воздействию, и его реализация повышает безопасность эксплуатации ядерных реакторов (ЯР). Изобретение может быть успешно использовано в ЯР с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ), в частности в ядерных реакторах на быстрых нейтронах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ), например эвтектический сплав свинец-висмут, свинец.

Уровень техники

В таких реакторах на быстрых нейтронах с ТЖМТ в качестве конструкционных материалов активной зоны (оболочки твэлов, решетки тепловыделяющих сборок) используются коррозионно стойкие при температурах до 650°C в потоке ТЖМТ стали феррито-мартенситного класса (ФМС). Однако известным недостатком таких сталей является их склонность к низкотемпературному радиационному охрупчиванию (НТРО) при повреждающей дозе быстрых нейтронов, превышающей 10 смещений на атом (сна), в то время как за топливную кампанию повреждающая доза достигает около 100 сна. Эффект НТРО проявляется при температуре облучения ниже 350-380°C и выражается в потере пластических свойств стали, что может привести к хрупкому разрушению изделий при незначительной деформации. Такие деформации более вероятны при проведении операций перегрузки и перестановки ТВС в активной зоне, включая окончательную выгрузку. Поломки оболочек твэлов и ПЭЛОВ и хвостовиков твэлов, выполненных из ФМС-стали, наблюдались при эксплуатации активных зон судовых реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) свинец-висмут.

Поэтому эксплуатация ЯР с охрупченными сталями может привести к их аварийной остановке. Для восстановления пластических свойств стали может использоваться режим высокотемпературного отжига радиационных дефектов, заключающийся в нагреве изделий включающих ФМС до температуры около 500°C на время около нескольких часов.

Известно устройство для отжига чехлов облученных тепловыделяющих сборок ядерного реактора (Авторское свидетельство СССР SU 1023817), содержащее кожух, заполненный теплоносителем, крышку с отверстиями, рабочую камеру, расположенную внутри кожуха, подводный и отводящий патрубки, отличающееся тем, что, с целью повышения качества чехлов, рабочая камера выполнена с вертикальными открытыми сверху каналами, сообщенными между собой сверху и снизу, а в одном из каналов установлен электронагреватель, при этом подводный патрубок размещен над верхней кромкой рабочей камеры, а отводящий - над верхним торцом электронагревателя. Данное техническое решение не позволяет осуществлять отжиг непосредственно в ЯР.

Поскольку в рабочих условиях подогрев теплоносителя в активной зоне составляет около 150°C, а средняя температура ТЖМТ на выходе из активной зоны составляет около 500°C, то радиационному охрупчиванию подвергается нижняя часть активной зоны, омываемая "холодным" теплоносителем.

Для проведения отжига активных зон судовых ЯР с ТЖМТ свинец-висмут перед их выгрузкой из реактора был предложен режим изотермического высокотемпературного отжига, аналогичный режиму высокотемпературной водородной регенерации (ВТР), проводимой для восстановления избыточных количеств оксида свинца водородо-газовой смесью вводимой в поток ТЖМТ. Такой режим реализовывался при осушенных парогенераторах (ПГ) при температуре ТЖМТ 300-320°C, одинаковой на входе и на выходе активной зоны, создаваемой за счет работы циркуляционных насосов первого контура (ЦНПК) и остаточного энерговыделения активной зоны. (Громов Б.Ф. Способ очистки внутренней поверхности стального циркуляционного контура с жидкометаллическим теплоносителем на основе свинца. Международная заявка на изобретение, № PCT/RU96/00219 06.08.96 г., Карабаш А.Г. "Химико-спектральный анализ и основы химической технологии жидкометаллического теплоносителя эвтектического сплава свинец-висмут", Труды конференции "Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-98)", Том 2, стр. 595, Обнинск, 1999, К.Д. Иванов, Ю.И. Орлов, П.Н. Мартынов. "Технология свинцово-висмутного теплоносителя на ЯЭУ первого и второго поколения", Сборник докладов конференции "Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2003)", Обнинск: ГНЦ РФ - ФЭИ, 2003 г.) Отсутствие отвода тепла в осушенных ПГ и большой расход ТЖМТ позволяли обеспечить изотермический температурный режим первого контура при температуре 300-320°C. После завершения режима ВТР осуществлялся переход к режиму отвода остаточного энерговыделения после остановки циркуляционных насосов первого контура (или значительного снижения их числа оборотов, что, соответственно, снижает подводимую к ТЖМТ энергию), путём заполнения ПГ конденсатом, образующимся при подаче во второй контур пара от внешнего источника с давлением, соответствующим температуре насыщения более высокой, в сравнении с температурой ТЖМТ. Низкий уровень остаточного энерговыделения, характерный для режима эксплуатации судовых ЯР с ТЖМТ, приводил к довольно быстрому снижению температуры ТЖМТ после остановки ЦНПК за счет тепловых потерь первого контура.

Реализация такого режима на энергетическом ЯР, работающем при высоком значении коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) и имеющим высокий уровень мощности остаточного энерговыделения, при отсутствии возможности длительной остановки для расхолаживания и сниже-

ния выделяемой мощности, приведет к большим трудностям при возвращении в режим расхолаживания после завершения высокотемпературного отжига радиационных дефектов упомянутым способом, и делает такой режим потенциально опасным. Это связано с тем, что выход в изотермический режим при температуре 500°C после осушения ПГ является динамическим процессом, так как происходит за счет мощности остаточного энерговыделения, превышающей уровень тепловых потерь первого контура, и требует быстрого возвращения в режим расхолаживания для исключения недопустимого повышения температуры активной зоны.

Раскрытие изобретения

Задачей, на решение которой направлено изобретение, является создание способа отжига активных зон, исключающего вышеприведенные недостатки известных технических решений в рассматриваемой области.

Техническими результатами при реализации заявляемого изобретения, в частности, являются повышения безопасности проведения высокотемпературного отжига радиационных дефектов и восстановления пластических свойств стали, в частности ФМС-стали, активных зон ЯР;

обеспечение возможности проведения высокотемпературного отжига радиационных дефектов и восстановления пластических свойств стали, в частности ФМС-стали, активных зон ЯР непосредственно в ядерном реакторе;

снижение затрат на проведение высокотемпературного отжига радиационных дефектов и восстановления пластических свойств стали, в частности ФМС-стали, активных зон ЯР;

снижение рисков аварий при перегрузках ЯР за счет повышения пластических свойств стали, в частности ФМС-стали, активных зон ЯР перед их перегрузкой;

обеспечение возможности проведения высокотемпературного отжига радиационных дефектов и восстановления пластических свойств стали активных зон ЯР в произвольное время, при необходимости, не связанное с перегрузкой.

На достижение каждого из указанных выше технических результатов оказывают влияние следующие отличительные признаки изобретения.

Предлагаемый способ отжига активной зоны ядерного реактора осуществим для ядерного реактора, например, с ЖМТ, который содержит активную зону, по крайней мере один парогенератор (ПГ) и по крайней мере один циркуляционный насос первого контура осевого типа с электрическим приводом.

Предлагается способ отжига активной зоны ядерного реактора. Способ характеризуется тем, что определяют значение повреждающей дозы быстрых нейтронов (число сна), вызывающее недопустимое ухудшение пластических свойств стали, в частности ФМС-стали. Затем при достижении соответствующего значения энерговыработки реактора осуществляют изменение направления движения теплоносителя, например, ЖМТ с рабочего (снизу вверх) на обратное (сверху вниз). При этом обеспечивается начало режима отжига, осуществляемого путем омывания горячим теплоносителем с температурой не ниже 450°C, например, ЖМТ нижней части активной зоны, содержащей охрупченную сталь. Далее выбирают приемлемое время продолжительности режима отжига, в течение которого будет осуществляться отжиг элементов активной зоны ЯР для восстановления пластических свойств стали в нижней части активной зоны. После чего определяют температуру не ниже такой, при которой обеспечивается восстановление пластических свойств стали в нижней части активной зоны за выбранное время. В случае если температура оказывается слишком высокой или низкой, то осуществляют соответствующее увеличение или уменьшение времени и повторное определение температуры. Обеспечивают в режиме отжига за счет регулирования уровня мощности ЯР и, при необходимости, расхода теплоносителя определенную, как указано выше, температуру в течение выбранного интервала времени. После истечения выбранного времени режима отжига завершают и осуществляют изменение направления движения теплоносителя, например, ЖМТ с обратного (сверху вниз) на рабочее (снизу вверх).

Предлагается конструкция ядерного реактора с ЖМТ, содержащего активную зону, по крайней мере один ПГ, по крайней мере один циркуляционный насос первого контура осевого типа с электрическим приводом. При этом электрический привод циркуляционного насоса содержит схему электропитания, обеспечивающую возможность переключения направления вращения циркуляционного насоса на обратное (реверс) и изменения частоты вращения.

Осуществление изобретения

Предлагается техническое решение по проведению высокотемпературного отжига радиационных дефектов конструкционных материалов активной зоны для восстановления в ЯР с ЖМТ и ТЖМТ (например, эвтектический сплав свинец-висмут, свинец) пластических свойств стали, в частности, коррозионно-стойких при температурах до 650°C в потоке ЖМТ сталей феррито-мартенситного класса (ФМС).

Предлагаемый способ отжига активной зоны ядерного реактора пригоден для ядерных реакторов с ЖМТ, в которых циркуляция теплоносителя осуществляется осевыми циркуляционными насосами с электроприводом.

Для проведения высокотемпературного отжига активной зоны в ЯР с осевыми насосами, при работе в неизотермическом режиме на сравнительно невысоком уровне мощности с помощью переключений в электрической схеме питания электроприводов насосов производится изменение направления их враще-

ния. При этом изменяется направление циркуляции теплоносителя через активную зону. "Холодный" теплоноситель после ПГ в этом случае подается на выход активной зоны, а горячий теплоноситель с температурой более 450°C будет омывать нижнюю часть активной зоны, где сталь охрупчилась. При этом будет происходить восстановление пластических свойств стали. Поскольку осушать ПГ при таком способе реализации режима высокотемпературного отжига не требуется, то отвод остаточного энерговыделения после завершения режима отжига и остановки реактора будет обеспечен. Таким образом, режим отжига будет безопасным. Поскольку гидравлический КПД проточной части насоса при обратном направлении вращения будет ниже, то расход теплоносителя при одном и том же числе оборотов насоса (частоте вращения) в случае обратного вращения будет ниже, чем в случае прямого вращения. Это позволит более просто обеспечить режим отжига с превышением относительной мощности над относительным расходом и достичь температуры теплоносителя, омывающего нижнюю часть активной зоны, на уровне более 450°C при более низком уровне мощности реактора, т.е. в более безопасных условиях. Ожидать снижения ресурса насоса при его работе в таком нерасчетном режиме не следует в связи с его кратковременностью.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ отжига активной зоны ядерного реактора с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ), содержащим, по меньшей мере, активную зону, по крайней мере один парогенератор и по крайней мере один циркуляционный насос первого контура осевого типа с электрическим приводом, характеризующийся тем, что определяют значение повреждающей дозы нейтронов, вызывающее недопустимое ухудшение пластических свойств стали, осуществляют при достижении соответствующего значения энерговыработки реактора изменение направления движения теплоносителя с рабочего снизу вверх на обратное сверху вниз путем переключения направления вращения циркуляционного насоса, при этом обеспечивают начало режима отжига, осуществляемого путем омывания горячим теплоносителем нижней части активной зоны, содержащей охрупченную сталь, затем выбирают приемлемое время продолжительности режима отжига, определяют температуру не ниже такой, при которой обеспечивается восстановление пластических свойств стали в нижней части активной зоны за выбранное время, в случае если температура оказывается слишком высокой или низкой, то осуществляют соответствующее увеличение или уменьшение времени и повторное определение температуры, после чего осуществляют регулирование уровня мощности ядерного реактора для поддержания определенной температуры в течение выбранного времени, а после истечения выбранного времени завершают режим отжига и осуществляют изменение направления движения теплоносителя с обратного сверху вниз на рабочее снизу вверх.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что обеспечивают омывание нижней части активной зоны горячим теплоносителем с температурой не ниже 450°C.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что в режиме отжига для поддержания определенной температуры в течение выбранного времени осуществляют регулирование расхода теплоносителя.

4. Ядерный реактор с ЖМТ, выполненный с возможностью осуществления способа по пп.1-3, содержащий активную зону, по крайней мере один парогенератор, по крайней мере один циркуляционный насос первого контура осевого типа с электрическим приводом, обеспечивающий рабочее направление движения теплоносителя снизу вверх, отличающийся тем, что электрический привод циркуляционного насоса содержит схему электропитания, обеспечивающую возможность переключения направления вращения циркуляционного насоса на обратное - реверс.

5. Реактор по п.4, отличающийся тем, что электрический привод циркуляционного насоса содержит схему электропитания, обеспечивающую возможность изменения частоты вращения.

