

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **036719**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.12.11

(51) Int. Cl. **G21C 1/12 (2006.01)**

(21) Номер заявки
201992600

(22) Дата подачи заявки
2018.12.25

(54) АКТИВНАЯ ЗОНА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

(31) **2018113680**

(32) **2018.04.13**

(33) **RU**

(43) **2020.03.31**

(86) **PCT/RU2018/000869**

(87) **WO 2019/199200 2019.10.17**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ - ФИЗИКО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ А.И. ЛЕЙПУНСКОГО" (АО
"ГНЦ РФ - ФЭИ"); АКЦИОНЕРНОЕ
ОБЩЕСТВО "НАУКА И**

**ИННОВАЦИИ" (АО "НАУКА И
ИННОВАЦИИ") (RU)**

(72) Изобретатель:

**Логинов Николай Иванович,
Литвинов Виктор Викторович,
Кротов Алексей Дмитриевич (RU)**

(74) Представитель:

Снегов К.Г. (RU)

(56) **US-A1-20160027536**

**MOHAMED S EL-GENK et al. "SAIRS" -
Scalable AMTEC Integrated Reactor Space Power
System. Progress in Nuclear Energy, Vol.45, No. 1,
pp.25-34, 2004
RU-C2-2328042**

(57) Активная зона ядерного реактора относится к области атомной энергетики. Активная зона ядерного реактора включает по меньшей мере один модуль, твердый (5) и жидкий замедлители нейтронов. Модуль содержит корпус (2), по меньшей мере одну тепловую трубу, по меньшей мере один тепловыделяющий элемент, кожух (1) и теплоизоляцию (6). Тепловая труба выполнена из корпуса (3), фитиля (7) и содержит испаряющийся теплоноситель. Тепловыделяющий элемент состоит из оболочки (4) и ядерного топлива (9). Зона испарения тепловой трубы и тепловыделяющие элементы заключены в кожух (1), заполненный жидким теплоносителем. В качестве теплоносителя тепловой трубы и жидкого теплоносителя в кожухе (1) используют жидкие металлы с высокой температурой кипения, например литий, кальций, свинец, серебро. В пространстве между кожухом (1) и корпусом модуля (2) помещена теплоизоляция (6). Твердый замедлитель нейтронов (5) имеет по меньшей мере одно отверстие, в котором размещен по меньшей мере один модуль. Пространство между твердым замедлителем нейтронов (5) и модулем заполнено жидким замедлителем нейтронов. Технический результат - повышение коэффициента полезного действия реакторных установок и расширение области применения активной зоны.

B1**036719****036719****B1**

Изобретение относится к области ядерной энергетики и может быть использовано в реакторах с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую за пределами активной зоны, в частности термофотозлектрическим.

Известна активная зона с тепловыми трубами (заявка на изобретение США "Мобильный быстрый реактор, охлаждаемый тепловыми трубами" US №2016/0027536 A1, опубликована 22.01.2016).

Активная зона реактора по указанной заявке содержит массивы стержневых тепловыделяющих элементов и тепловых труб, заключенных в металлический блок. Тепловыделяющие элементы содержат ядерное топливо, верхний и нижний отражатели нейтронов и газовые полости, расположенные выше и ниже отражателей. Тепловые трубы содержат герметичный корпус, заполненный испаряющимся теплоносителем, и фитиль. Тепловые трубы расположены так, чтобы передавать тепло за пределы активной зоны газообразному теплоносителю - рабочему телу газовой турбины (воздух или CO₂). Максимальная температура рабочего тела (воздух) на входе в турбину около 1100 К.

Недостатком указанного технического решения является относительно низкая температура теплоносителя на выходе из активной зоны, не позволяющая использовать прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.

Наиболее близкой по технической сущности к заявляемому техническому решению является активная зона быстрого реактора SAIRS (M.S. El-Genk, J-M.P. Tournier, "SAIRS" - Scalable AMTEC Integrated Reactor Space Power System//Progress in Nuclear Energy, Vol. 45, No.1, pp. 25-34,2004).

Активная зона включает 60 модулей, состоящих из тепловой трубы и 3 тепловыделяющих элементов. Модули расположены вплотную друг к другу и образуют треугольную упаковку. Оболочки тепловыделяющих элементов припаяны к корпусу тепловой трубы через ренийевые трехгранные вкладыши, передающие тепло к тепловой трубе за счет теплопроводности. Каждый тепловыделяющий элемент имеет газовую полость с одного конца. В качестве топлива используются таблетки нитрида урана с обогащением 83,7%.

Недостатком этого технического решения является относительно низкая температура теплоносителя (1200 К) на выходе из активной зоны, что не позволяет эффективно использовать термоэлектрические, термоэмиссионные и термофотозлектрические преобразователи энергии.

Задача изобретения состоит в исключении указанного недостатка, а именно в повышении температуры теплоносителя на выходе из активной зоны.

Технический результат - повышение коэффициента полезного действия ядерных энергетических установок и расширение области применения активной зоны, в частности для реакторов с термофотозлектрическим преобразованием энергии.

Для исключения указанного недостатка в активной зоне ядерного реактора, включающей автономные модули, состоящие из тепловыделяющих элементов и тепловых труб, предлагается:

активную зону ядерного реактора дополнительно снабдить твердым замедлителем нейтронов с отверстиями;

модули активной зоны снабдить корпусом и расположить в отверстиях твердого замедлителя нейтронов;

тепловые трубы расположить внутри корпусов модулей;

зону испарения каждой тепловой трубы и тепловыделяющие элементы заключить в кожух, заполненный жидким теплоносителем;

в пространстве между кожухом и корпусом модуля поместить теплоизоляцию;

пространство между модулями и твердым замедлителем нейтронов дополнительно заполнить жидким замедлителем нейтронов.

В частных случаях исполнения активной зоны ядерного реактора предлагается:

во-первых, во внутренней полости модуля создать вакуум;

во-вторых, в другом частном случае внутреннюю полость модуля заполнить газом с низкой теплопроводностью, например ксеноном;

в-третьих, в качестве жидкого замедлителя нейтронов использовать воду;

в-четвертых, в другом частном случае в качестве жидкого замедлителя нейтронов использовать незамерзающую в зимнее время жидкость, например водный раствор спирта;

в-пятых, в качестве теплоносителя тепловой трубы и жидкого теплоносителя в кожухе использовать жидкий металл с высокой температурой кипения, например литий, кальций, свинец, серебро.

Сущность изобретения поясняется на чертежах, где на фиг. 1 представлено поперечное сечение одного из вариантов исполнения активной зоны ядерного реактора, на фиг. 2 - продольный разрез одного из вариантов исполнения модуля активной зоны ядерного реактора, на фиг. 3 - поперечное сечение одного из вариантов исполнения модуля активной зоны ядерного реактора. На фигурах приняты следующие позиционные обозначения: 1 - кожух; 2 - корпус модуля; 3 - корпус тепловой трубы; 4 - оболочка тепловыделяющего элемента; 5 - твердый замедлитель нейтронов; 6 - теплоизоляция; 7 - фитиль тепловой трубы; 8 - чехол твердого замедлителя; 9 - ядерное топливо.

Сущность изобретения состоит в следующем.

Активная зона ядерного реактора, включающая по меньшей мере один модуль, содержащий по

меньшей мере одну тепловую трубу, выполненную из корпуса 3 и фитиля 7, и по меньшей мере один тепловыделяющий элемент, состоящий из оболочки 4 и ядерного топлива 9, дополнительно снабжена твердым замедлителем нейтронов 5 по меньшей мере с одним отверстием, в котором размещен по меньшей мере один модуль, тепловая труба расположена внутри корпуса модуля, зона испарения тепловой трубы и тепловыделяющие элементы заключены в кожух 1, заполненный жидким теплоносителем, в пространстве между кожухом и корпусом модуля 2 помещена теплоизоляция 6, а пространство между твердым замедлителем нейтронов 5 и модулем заполнено жидким замедлителем нейтронов.

Твердый замедлитель нейтронов 5 выполнен, например, из бериллия и заключен в чехол 8. Твердый замедлитель предназначен для обеспечения теплового спектра нейтронов. В вертикальных отверстиях твердого замедлителя нейтронов 5 размещено по меньшей мере по одному модулю активной зоны. Чехол 8 твердого замедлителя 5 выполнен, например, из циркониевого сплава и предназначен для предотвращения химического взаимодействия твердого замедлителя 5 с жидким замедлителем.

Модуль активной зоны выполнен в виде корпуса 2 из материала, слабо поглощающего нейтроны, например циркониевого сплава. Внутри корпуса модуля 2 создан вакуум или помещен инертный газ, имеющий низкую теплопроводность, например ксенон. Вакуум или инертный газ обеспечивают эффективную работу теплоизоляции 6, предотвращают окисление корпуса тепловой трубы 3.

Тепловая труба состоит из корпуса тепловой трубы 3, фитиля тепловой трубы 7 и содержит жидко-металлический теплоноситель. Тепловая труба предназначена для отвода тепла, выделяющегося в тепловыделяющих элементах, за пределы активной зоны ядерного реактора. Корпус тепловой трубы 3 выполнен из тугоплавкого металла, например молибдена, ниобия, ванадия или их сплавов. Зона испарения тепловой трубы и тепловыделяющие элементы заключены в кожух 1, заполненный жидким теплоносителем.

В качестве теплоносителя тепловой трубы и жидкого теплоносителя в кожухе 1 используют жидкие металлы с высокой температурой кипения, например литий, кальций, свинец, серебро.

В пространстве между кожухом 1 и корпусом модуля 2 помещена теплоизоляция 6, выполненная из нескольких слоев фольги, изготовленной из тугоплавкого металла, например молибдена или ниобия. Теплоизоляция предназначена для предотвращения утечки тепла через корпус модуля 2 к жидкому замедлителю.

Тепловыделяющий элемент состоит из оболочки 4, выполненной из тугоплавкого материала, и ядерного топлива 9. Ядерное топливо 9 содержит делящееся вещество - уран и(или) плутоний, например, в виде диоксида, нитрида, карбонитрида. Ядерное топливо всех тепловыделяющих элементов образует критическую массу, необходимую для осуществления реакции деления.

Жидкий замедлитель нейтронов размещен в кольцевых зазорах между модулями и твердым замедлителем нейтронов 5. Его назначение - дополнить эффект замедления нейтронов твердым замедлителем нейтронов и обеспечить возможность осуществления реакции деления на тепловых нейтронах. Кроме того, жидкий замедлитель нейтронов выполняет функцию теплоносителя, охлаждающего твердый замедлитель нейтронов и корпус модуля. В качестве жидкого замедлителя используют воду или жидкости, не замерзающие при отрицательной температуре, например -40°C .

Активная зона ядерного реактора работает следующим образом.

В ядерном топливе 9 тепловыделяющих элементов происходит реакция деления с выделением тепла. Выделившееся тепло передается через оболочку тепловыделяющего элемента 4 и жидкий теплоноситель, заполняющий кожух 1, к корпусу 3 тепловой трубы. Теплоноситель тепловой трубы испаряется из фитиля 7, пар теплоносителя заполняет внутреннее пространство корпуса 3 тепловой трубы, уносит теплоту парообразования из активной зоны ядерного реактора к преобразователю энергии, конденсируется там и возвращается по фитилю 7 в зону испарения тепловой трубы. Перенос тепла испаряющимся теплоносителем происходит практически без перепада температуры между источником тепла и его потребителем, что позволяет получить относительно высокую (1500-1800 К) температуру теплоносителя не только на выходе из активной зоны ядерного реактора, но и в месте расположения преобразователей энергии. Это обеспечивает более высокий коэффициент полезного действия ядерной энергетической установки и расширяет область применения таких установок.

Твердый замедлитель нейтронов 5 совместно с жидким замедлителем нейтронов обеспечивают возможность ядерной реакции деления на тепловых нейтронах. Жидкий замедлитель нейтронов выполняет также функцию теплоносителя, охлаждающего твердый замедлитель нейтронов. Благодаря теплоизоляции 6 утечки тепла через корпус модуля 2 сводятся к минимуму, поэтому жидкий замедлитель нейтронов имеет низкую температуру. Это позволяет использовать в качестве жидкого замедлителя воду или водные растворы спирта при атмосферном давлении.

Конкретный вариант исполнения активной зоны ядерного реактора

Твердый замедлитель нейтронов 5 выполнен из нескольких бериллиевых дисков диаметром 1000 мм и суммарной высотой 700 мм с 108 отверстиями диаметром 70 мм и полностью окружен чехлом из циркониевого сплава Э110. В отверстиях твердого замедлителя нейтронов размещены модули, по одному в каждом отверстии. В качестве жидкого замедлителя нейтронов используется вода. Отверстия в твердом замедлителе нейтронов 5 с модулями расположены по узлам треугольной решетки, и активная зона ядерного реактора в целом имеет шестигранную форму.

Модуль активной зоны ядерного реактора выполнен из циркониевого сплава Э110 в виде герметичного цилиндрического корпуса 2 с диаметром около 60 мм и толщиной 1-2 мм. Внутри корпуса модуля расположена тепловая труба.

Корпус тепловой трубы 3 с внешним диаметром около 20 мм выполнен из молибдена. На внутренней поверхности корпуса тепловой трубы 3 смонтирован фитиль тепловой трубы 7, изготовленный из двух слоев молибденовой сетки с размером квадратной ячейки около 40 мкм. Фитиль тепловой трубы 7 заполнен жидким литием. Зона испарения тепловой трубы выполнена высотой около 500 мм и вместе с шестью тепловыделяющими элементами заключена в кожух 1 с наружным диаметром 47 мм, заполненный жидким литием. Кожух 1 и оболочки тепловыделяющих элементов 4 изготовлены из молибдена. Между кожухом 1 и корпусом модуля 2 помещена экранно-вакуумная теплоизоляция 6, выполненная из четырех слоев молибденовой и пяти слоев циркониевой фольги. В корпусе модуля создан вакуум с давлением остаточных газов не более 10^{-1} Па.

Оболочка тепловыделяющего элемента 4 с наружным диаметром 13 мм и толщиной стенки 1 мм, изготовлена из молибдена, заполнена таблетками ядерного топлива 9 из диоксида урана с обогащением 19,75% и герметизирована верхней и нижней заглушками. Высота топливного столба 500 мм. Для увеличения радиальной теплопроводности топливного столба между топливными таблетками помещены тонкие молибденовые шайбы. Топливные таблетки выполнены с центральными отверстиями диаметром около 3 мм для отвода газообразных продуктов деления в расположенную над ядерным топливом 9 полость. Общее число тепловыделяющих элементов в активной зоне 432. При тепловой мощности активной зоны 1200 кВт средняя мощность одного тепловыделяющего элемента составляет около 2,8 кВт, а мощность модуля, отводимая тепловой трубой, 16,8 кВт. Расчетная рабочая температура оболочки тепловыделяющего элемента 4 составляет 1525 К. В качестве теплоносителя тепловых труб используется Li^7 , в качестве жидкого замедлителя - вода при атмосферном давлении.

Преимущества предлагаемой активной зоны ядерного реактора по сравнению с наиболее близким техническим решением заключаются в повышении температуры теплоносителя на выходе из активной зоны с 1200 до 1500 К и выше, что приводит к повышению коэффициента полезного действия ядерных энергетических установок. Кроме того, это позволяет расширить область применения активной зоны, в частности для реакторов с термофотоэлектрическим преобразованием энергии.

Список терминов:

- 1 - кожух;
- 2 - корпус модуля;
- 3 - корпус тепловой трубы;
- 4 - оболочка тепловыделяющего элемента;
- 5 - твердый замедлитель нейтронов;
- 6 - теплоизоляция;
- 7 - фитиль тепловой трубы;
- 8 - чехол твердого замедлителя;
- 9 - ядерное топливо;
- + вода (на фиг. не нумеруются);
- + жидкий теплоноситель;
- + пар теплоносителя;
- + жидкий замедлитель нейтронов;
- активная зона = твердый замедлитель нейтронов + модуль а.з. + жидкий замедлитель нейтронов;
- модуль а.з. = корпус модуля + тепловая труба + твэлы + теплоизоляция;
- тепловая труба = корпус тепловой трубы + фитиль тепловой трубы + теплоноситель;
- твэл = оболочка + топливо + фитиль твэла.

Активная зона ядерного реактора:

"...2. Активная зона - часть реактора, в которой размещены ядерное топливо, замедлитель, поглотитель, теплоноситель, средства воздействия на реактивность и элементы конструкций, предназначенные для осуществления управляемой цепной ядерной реакции деления и передачи энергии теплоносителю..."

Постановление Ростехнадзора от 10.12.2007 N 4 "Об утверждении и введении в действие федеральных норм и правил в области использования атомной энергии "Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП-082-07" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 21.01.2008 N 10951) © Консультант Плюс, 1997-2017.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Активная зона ядерного реактора, включающая по меньшей мере один модуль, содержащий по меньшей мере одну тепловую трубу и по меньшей мере один тепловыделяющий элемент, состоящий из оболочки и ядерного топлива, отличающаяся тем, что активная зона дополнительно снабжена твердым замедлителем нейтронов по меньшей мере с одним отверстием, в котором размещен по меньшей мере один модуль, снабженный корпусом, тепловая труба расположена внутри корпуса модуля, зона испаре-

ния тепловой трубы и тепловыделяющие элементы заключены в кожух, заполненный жидким теплоносителем, в пространстве между кожухом и корпусом модуля помещена теплоизоляция, а пространство между твердым замедлителем нейтронов и модулем заполнено жидким замедлителем нейтронов.

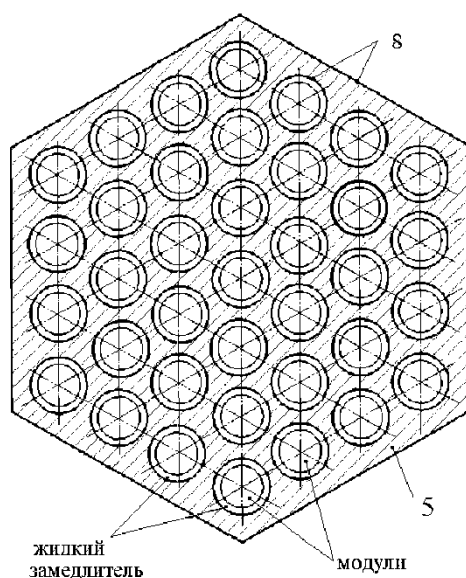
2. Активная зона ядерного реактора по п.1, отличающаяся тем, что во внутренней полости модуля создан вакуум.

3. Активная зона ядерного реактора по п.1, отличающаяся тем, что внутренняя полость модуля заполнена газом с низкой теплопроводностью, например ксеноном.

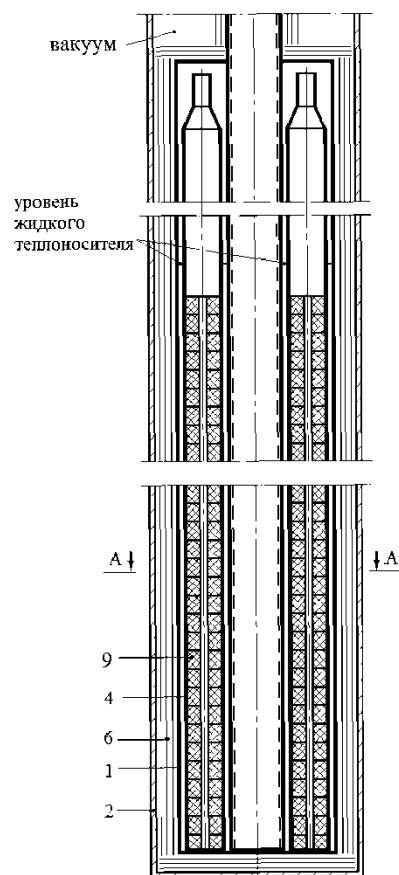
4. Активная зона ядерного реактора по п.1, отличающаяся тем, что в качестве теплоносителя тепловой трубы используют жидкие металлы с высокой температурой кипения, например литий, кальций, свинец, серебро.

5. Активная зона ядерного реактора по п.1, отличающаяся тем, что в качестве жидкого замедлителя нейтронов используют воду.

6. Активная зона ядерного реактора по п.1, отличающаяся тем, что в качестве жидкого замедлителя нейтронов используют незамерзающие в зимнее время жидкости, например водный раствор спирта.

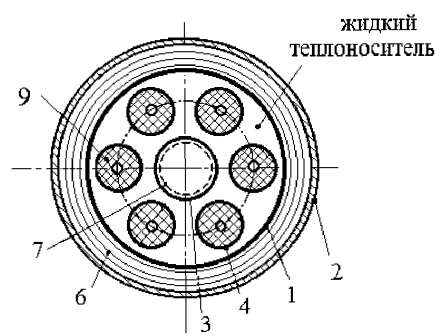


Фиг. 1



Фиг. 2

A - A



Фиг. 3



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2