

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **037931**

(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.06.08

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

(21) Номер заявки
201992605

(22) Дата подачи заявки
2018.12.25

(54) АКТИВНАЯ ЗОНА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

(31) 2018129925

(32) 2018.08.16

(33) RU

(43) 2020.05.31

(86) PCT/RU2018/000870

(87) WO 2020/036509 2020.02.20

(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, Михеев
Александр Сергеевич, 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, твёрдый (4) и жидкий замедлители нейтронов. Модуль содержит корпус (1), по меньшей мере одну тепловую трубу, по меньшей мере один тепловыделяющий элемент и теплоизоляцию (5). Тепловая труба выполнена в виде корпуса (2), снабжённого фитилём (6), и содержит теплоноситель. Тепловыделяющий элемент выполнен из ядерного топлива (8), расположенного в зоне испарения тепловой трубы вокруг её корпуса (2) в тепловом контакте с ним и заключённого в оболочку (3). В качестве теплоносителя тепловой трубы используют легкоплавкие металлы с высокой температурой кипения, например литий, кальций, свинец, серебро. Между оболочкой (3) и корпусом (1) модуля помещена теплоизоляция (5). В твёрдом замедлителе (4) нейтронов выполнено по меньшей мере одно отверстие, в котором размещён по меньшей мере один модуль. Пространство между корпусом (1) модуля и твёрдым замедлителем (4) нейтронов заполнено жидким замедлителем нейтронов. Технический результат - повышение коэффициента полезного действия реакторных установок и расширение области применения активной зоны.

037931
B1

037931
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 с термофотоэлектрическим.

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 рениевые трехгранные вкладыши, передающие тепло к тепловой трубе за счёт 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 термофотоэлектрические 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 термофотоэлектрическим преобразованием энергии.

Для исключения указанного недостатка в активной зоне ядерного реактора, включающей автономные модули, тепловыделяющие элементы и тепловые трубы, предлагается

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

модули активной зоны снабдить корпусами и расположить в отверстиях твёрдого замедлителя нейтронов;

тепловые трубы и тепловыделяющие элементы расположить внутри корпусов модулей;

теповыделяющий элемент выполнить из ядерного топлива, расположенного в зоне испарения тепловой трубы вокруг её корпуса в тепловом контакте с ним и заключённого в оболочку;

в пространстве между оболочкой тепловыделяющего элемента и корпусом модуля поместить теплоизоляцию;

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

В частных случаях исполнения активной зоны ядерного реактора предлагается

во-первых, в корпусе модуля создать вакуум;

во-вторых, в другом частном случае заполнить модуль инертным газом с низкой теплопроводностью, например ксеноном;

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

в-четвёртых, в другом частном случае в качестве жидкого замедлителя нейтронов использовать жидкость, не замерзающую по крайней мере до -40°C, например водный раствор спирта;

в-пятых, в качестве теплоносителя тепловой трубы использовать легкоплавкие металлы 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 - корпус модуля;
- 2 - корпус тепловой трубы;
- 3 - оболочка тепловыделяющего элемента;
- 4 - твёрдый замедлитель нейтронов;
- 5 - теплоизоляция;
- 6 - фитиль тепловой трубы;
- 7 - чехол твёрдого замедлителя;
- 8 - ядерное топливо.

Сущность изобретения состоит в следующем.

Активная зона ядерного реактора включает по меньшей мере один модуль активной зоны, твёрдый замедлитель 4 нейтронов и жидкий замедлитель нейтронов.

Модуль активной зоны содержит по меньшей мере одну тепловую трубу, по меньшей мере один тепловыделяющий элемент и теплоизоляцию 5.

Модуль активной зоны выполнен в виде корпуса 1 из слабо поглощающего нейтроны материала, например циркониевого сплава. В частном случае исполнения в корпусе 1 модуля активной зоны создан вакуум. В другом частном случае он заполнен инертным газом, имеющим низкую теплопроводность, например ксеноном.

Вакуум или инертный газ обеспечивают защиту от коррозии материалов корпуса 1 модуля активной зоны, корпуса 2 тепловой трубы и теплоизоляции 5.

Тепловая труба выполнена в виде корпуса 2, снабжённого фитилём 6, и содержит теплоноситель - легкоплавкий металл с высокой температурой кипения.

В частных случаях исполнения в качестве теплоносителя тепловой трубы используют литий, кальций, свинец, серебро.

Корпус 2 и фитиль 6 тепловой трубы изготовлены из тугоплавкого материала, например молибдена.

Тепловая труба предназначена для отвода тепла, образующегося в тепловыделяющих элементах, за пределы активной зоны ядерного реактора.

Тепловыделяющий элемент выполнен из ядерного топлива 8, расположенного в зоне испарения тепловой трубы вокруг её корпуса 2 в тепловом контакте с ним и заключённого в оболочку 3.

Оболочка 3 тепловыделяющего элемента выполнена из тугоплавкого материала, например молибдена.

В качестве делящегося материала ядерного топлива 8 используются изотопы урана или плутония в виде оксидов, нитридов, карбидов с содержанием делящегося изотопа не более 20%.

Назначение тепловыделяющих элементов - получение тепла за счёт ядерных реакций, протекающих в ядерном топливе 8.

Теплоизоляция 5 помещена внутри модуля активной зоны между его корпусом 1 и оболочкой 3 тепловыделяющего элемента. Теплоизоляция 5 выполнена в виде многослойного теплового экрана из фольги тугоплавких металлов, например молибдена.

Назначение теплоизоляции 5 - предотвращение утечки тепла через корпус 1 модуля активной зоны в жидкий замедлитель нейтронов.

Твёрдый замедлитель 4 нейтронов выполнен из замедляющего нейтроны материала, например бериллия, в виде цилиндра или многогранника с отверстиями. Весь замедляющий нейтроны материал заключён в чехол 7 твёрдого замедлителя 4. В отверстиях твёрдого замедлителя 4 нейтронов помещены модули активной зоны. Пространство между модулями активной зоны и твёрдым замедлителем 4 нейтронов заполнено жидким замедлителем нейтронов.

В частных случаях в качестве жидкого замедлителя нейтронов используют воду или жидкости, не замерзающие при понижении температуры по меньшей мере до минус 40°C, например растворы спиртов.

Твёрдый замедлитель 4 нейтронов и жидкий замедлитель предназначены для получения теплового спектра нейтронов. Кроме того, жидкий замедлитель нейтронов выполняет функцию теплоносителя, охлаждающего твёрдый замедлитель 4 нейтронов и корпус 1 модуля.

Чехол 7 твёрдого замедлителя предназначен для защиты твёрдого замедлителя 4 нейтронов от коррозионного воздействия жидкого замедлителя нейтронов.

Активная зона ядерного реактора работает следующим образом.

В ядерном топливе 8 тепловыделяющих элементов происходит реакция деления с выделением тепла. Образующееся тепло передаётся через корпус 2 тепловой трубы к теплоносителю, заполняющему фитиль 6 тепловой трубы. Теплоноситель испаряется из фитиля 6, пар теплоносителя заполняет внутреннее пространство корпуса 2 тепловой трубы, уносит теплоту парообразования за пределы активной зоны ядерного реактора к преобразователю энергии, конденсируется там и возвращается по фитилю 6 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 на входе в преобразователь энергии. Это обеспечивает более высокий коэффициент полезного действия ядерной энергетической установки и расширяет область применения таких установок.

Твёрдый замедлитель 4 нейтронов совместно с жидким замедлителем нейтронов обеспечивают возможность ядерной реакции деления на тепловых нейтронах в низкообогащённом ядерном топливе 8. Жидкий замедлитель нейтронов дополняет функцию твёрдого замедлителя 4 и выполняет также функцию теплоносителя, охлаждающего твёрдый замедлитель 4 нейтронов.

Благодаря теплоизоляции 5 утечки тепла через корпус модуля 1 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.

Твёрдый замедлитель 4 нейтронов выполнен из нескольких бериллиевых дисков диаметром 760 мм и суммарной высотой около 700 мм с 217 отверстиями диаметром 40 мм. Бериллиевые диски полностью окружены чехлом 7, изготовленным из циркониевого сплава Э110. В отверстиях твёрдого замедлителя 4 нейтронов размещены модули активной зоны. В качестве жидкого замедлителя нейтронов используется вода. Отверстия в твёрдом замедлителе 4 нейтронов с модулями расположены по концентрическим окружностям с минимальным расстоянием между центрами модулей 42 мм.

Модуль активной зоны ядерного реактора выполнен в виде цилиндрического корпуса 1 с диаметром около 35 мм и толщиной стенки 1,5 мм, изготовленного из циркониевого сплава Э110. Внутри корпуса 1 модуля расположена тепловая труба.

Корпус 2 тепловой трубы с внешним диаметром около 14 мм выполнен из молибдена. На внутренней поверхности корпуса 2 тепловой трубы смонтирован фитиль 6 тепловой трубы, изготовленный из двух слоев молибденовой сетки с размером квадратной ячейки около 40 мкм. Фитиль 6 тепловой трубы заполнен жидким литием. Зона испарения тепловой трубы вместе с ядерным топливом 8 заключена в наружную оболочку 3 тепловыделяющего элемента. Между оболочкой 3 тепловыделяющего элемента и корпусом модуля 1 помещена теплоизоляция 5, выполненная в виде многослойного теплового экрана, изготовленного из четырёх слоев молибденовой и пяти слоев циркониевой фольги. В корпусе 1 модуля создан вакуум с давлением остаточных газов не более 10^{-1} Па.

Внешняя оболочка 3 тепловыделяющего элемента с наружным диаметром 20 мм и толщиной стенки 1 мм изготовлена из молибдена, заполнена таблетками ядерного топлива 8 из диоксида урана с обогащением 19,75%. Высота топливного столба около 500 мм. Между топливными таблетками и оболочкой 3 тепловыделяющего элемента создан кольцевой зазор (на чертеже не показан) для отвода газообразных продуктов деления в расположенную над ядерным топливом 8 полость. Общее число тепловыделяющих элементов в активной зоне равно числу модулей. При тепловой мощности активной зоны 1200 кВт средняя мощность одного тепловыделяющего элемента составляет около 5,7 кВт. Расчётная температура внешней оболочки 3 тепловыделяющего элемента 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 - Корпус модуля,
- 2 - корпус тепловой трубы,
- 3 - оболочка тепловыделяющего элемента,
- 4 - твёрдый замедлитель нейтронов,
- 5 - теплоизоляция,
- 6 - фитиль тепловой трубы,
- 7 - чехол твёрдого замедлителя,
- 8 - ядерное топливо,
- + вода (на чертеже не нумеруются),
- + жидкий теплоноситель,
- + пар теплоносителя,
- + жидкий замедлитель нейтронов.

Активная зона = твёрдый 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 = топливо + оболочка.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Активная зона ядерного реактора, включающая по меньшей мере один модуль, по меньшей мере одну тепловую трубу, содержащую корпус, фитиль и теплоноситель, и по меньшей мере один тепловыделяющий элемент, состоящий из ядерного топлива и оболочки, отличающаяся тем, что активная зона дополнительно снабжена твёрдым замедлителем нейтронов по меньшей мере с одним отверстием, в котором размещён по меньшей мере один модуль, снабжённый корпусом, тепловая труба помещена внутри корпуса модуля, тепловыделяющий элемент выполнен из ядерного топлива, расположенного в зоне испарения тепловой трубы вокруг её корпуса в тепловом контакте с ним и заключённого в оболочку, между оболочкой и корпусом модуля помещена теплоизоляция, а пространство между корпусом модуля и твёрдым замедлителем нейтронов заполнено жидким замедлителем нейтронов.

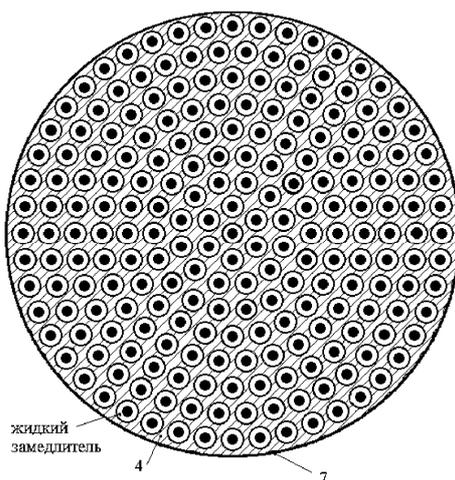
2. Активная зона ядерного реактора по п.1, отличающаяся тем, что в корпусе модуля создан вакуум.

3. Активная зона ядерного реактора по п.1, отличающаяся тем, что корпус модуля заполнен инертным газом с низкой теплопроводностью, например ксеноном.

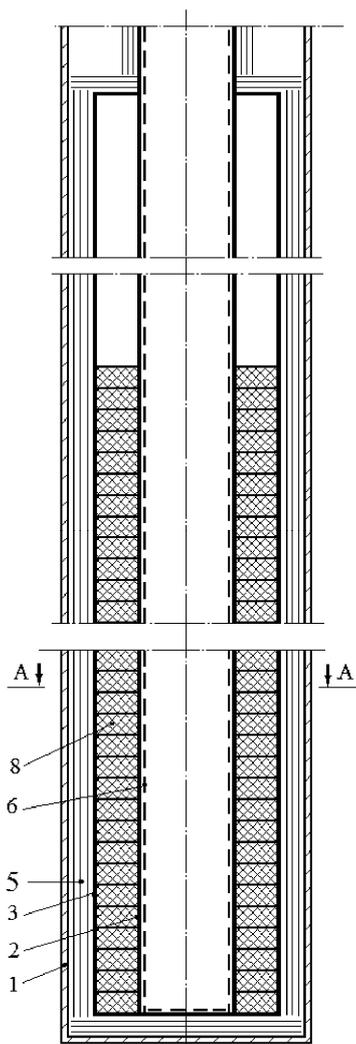
4. Активная зона ядерного реактора по п.1, отличающаяся тем, что в качестве теплоносителя тепловой трубы используют легкоплавкие металлы с высокой температурой кипения, например литий, кальций, свинец, серебро.

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 жидкости, не замерзающие по крайней мере до -40°C , например водный раствор спирта.

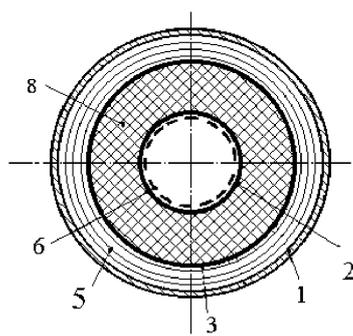


Фиг. 1



Фиг. 2

A - A



Фиг. 3