

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202492367 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2024.11.11

(51) Int. Cl. G21C 1/07 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки  
2023.06.20

(54) ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР С АКСИАЛЬНО СТРАТИФИЦИРОВАННЫМ ТОПЛИВНЫМ СЛОЕМ

(31) 17/811,400

(72) Изобретатель:

(32) 2022.07.08

Ким Говард, Браун Дэниел (US)

(33) US

(74) Представитель:

(86) PCT/US2023/068705

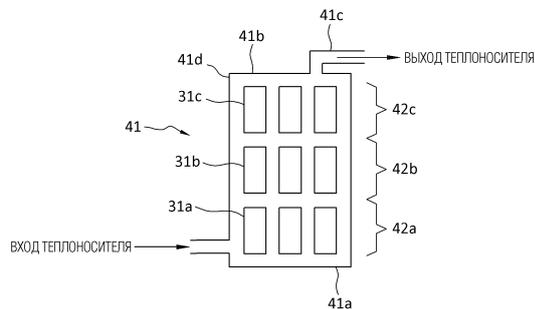
Медведев В.Н. (RU)

(87) WO 2024/151315 2024.07.18

(71) Заявитель:

Экс-ЭНЕРДЖИ, ЭлЭлСи (US)

(57) Ядерный реактор имеет аксиально стратифицированный топливный слой. Реактор включает в себя корпус реактора, имеющий основание, вершину с выпускным отверстием и ось. Аксиально стратифицированный топливный слой расположен внутри корпуса реактора и содержит первую зону, выполненную с возможностью работы при первой температуре  $T_1$ , причем первая зона содержит множество первых частиц топлива, каждая из которых содержит первый радиоактивный керамический сердечник и первое керамическое герметизирующее покрытие; и вторую зону, выполненную с возможностью работы при второй температуре  $T_2$ , при этом  $T_2 > T_1$ , причем вторая зона содержит множество вторых частиц топлива, каждая из которых содержит второй радиоактивный керамический сердечник и второе керамическое герметизирующее покрытие. Канал потока теплоносителя переносит теплоноситель от основания реактора к выпускному отверстию по тракту, последовательно проходящему через первую и вторую зоны. Первое керамическое герметизирующее покрытие обладает большей стабильностью при  $T_1$ , чем при  $T_2$ , а второе керамическое герметизирующее покрытие обладает большей стабильностью при  $T_2$ , чем первое керамическое герметизирующее покрытие.



A1

202492367

202492367

A1

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-581648EA/061

### ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР С АКСИАЛЬНО СТРАТИФИЦИРОВАННЫМ ТОПЛИВНЫМ СЛОЕМ

#### Область техники

Различные примеры осуществления изобретения, описанные в настоящем документе, в целом относятся к ядерному реактору с аксиально стратифицированным топливным слоем, подходящим для высокотемпературных аэрокосмических применений. Аксиально стратифицированный топливный слой обеспечивает ступенчатый подход для твэлов или топливных сборок с различными слоями TRISO, которые влияют на такие свойства топлива, как термостойкость и реакционная способность при облучении.

#### Уровень техники

Традиционные высокотемпературные газоохлаждаемые ядерные реакторы (HTGR), использующие сферические или цилиндрические топливные элементы на основе TRISO, во время работы заполняются однородным слоем топливных элементов.

Реакторы HTGR работают при температурах около 900°C и используют топливные элементы, содержащие дисперсное ядерное топливо. Дисперсное ядерное топливо окружено матричным материалом, который формуют и прессуют в топливные элементы различной формы и геометрии, такие как сферы, например, твэлы, и цилиндры, например, топливные сборки. Затем топливные элементы укладываются в слой твэлов или топливных сборок, и через слой пропускают газообразный теплоноситель, который может быть инертным газом, например, азотом или аргоном, или неинертным газом, например, водородом или водой. Топливные элементы нагревают газообразный теплоноситель. Горячий газ можно использовать для различных целей, например, для производства электроэнергии.

Дисперсное ядерное топливо в реакторах HTGR может включать в себя радиоактивный керамический сердечник, например, оксид урана, оксид тория, оксид плутония, карбид урана, карбид тория, карбид плутония, нитрид урана, нитрид тория или нитрид плутония. В различных вариантах осуществления изобретения радиоактивный керамический сердечник покрывают керамическим герметизирующим слоем, таким как карбид или нитрид кремния, циркония или вольфрама. Радиоактивный керамический сердечник покрывают несколькими покрытиями. Например, дисперсное ядерное топливо может представлять собой частицы с тройным изотропным покрытием (TRISO). В частицах ядерного топлива TRISO используются последовательные слоистые слои углерода и керамический герметизирующий слой. Частицы ядерного топлива TRISO включают в себя сердечник частиц ядерного топлива на основе урана, например,  $UO_3$  или  $U_3O_8$ , который изначально покрывают пористым углеродным слоем низкой плотности, т.е. буферным углеродным слоем, внутренним плотным пиролитическим углеродом (IPyC), керамическим герметизирующим слоем, например, карбидом кремния, и внешним плотным пиролитическим углеродом (OPyC). Эти слои осаждают на сердечник методом

химического осаждения из газовой фазы в кипящем слое.

Керамика на основе кремния часто используется в качестве герметизирующих покрытий на частицах ядерного топлива, например, частицах типа TRISO. Однако в некоторых случаях ядерные реакторы должны работать при экстремальных температурах, т.е. при температурах, превышающих 2000°C. Такие реакторы могут использоваться, например, в технологии ядерной тепловой тяги (NTP). Керамические герметизирующие покрытия на основе кремния не идеальны для высокотемпературных применений, т.е. при температурах, превышающих 1500°C. Различные карбидные, боридные, нитридные и/или оксидные виды керамики сохраняют стабильность при температурах, превышающих 2000°C. Однако производство многих из этих высокотемпературных видов керамики обходится дорого, что делает их использование в качестве герметизирующих покрытий на всех частицах ядерного топлива в активной зоне экономически нецелесообразным. Кроме того, некоторые керамические материалы, например, карбид вольфрама, обладают высокой стабильностью при экстремальных температурах, но не имеют подходящего сечения захвата нейтронов для поддержания критичности. Так, например, активная зона, состоящая из частиц ядерного топлива с герметизирующим покрытием из карбида вольфрама, может быть устойчива к разрушению при экстремальных температурах, но не сможет поддерживать ядерную реакцию.

В данной области техники существует потребность в экономически целесообразных ядерных реакторах с частицами топлива, которые могут поддерживать критичность, а также выдерживать экстремальные температуры.

#### Сущность изобретения

В свете существующей потребности в высокотемпературных ядерных реакторах ниже приводится краткое описание различных примеров осуществления изобретения. В следующем кратком описании могут быть сделаны некоторые упрощения и опущения, которые предназначены для выделения и представления некоторых аспектов различных примеров осуществления изобретения, но не для ограничения объема изобретения. Подробные описания предпочтительного примера осуществления изобретения, достаточные для того, чтобы позволить специалисту в данной области техники реализовать и использовать изобретательские идеи, будут приведены в последующих разделах.

Различные варианты осуществления изобретения, описанные в настоящем документе, относятся к ядерному реактору с аксиально стратифицированным топливным слоем, включающим в себя корпус реактора с основанием, верхней частью, имеющей выпускное отверстие, и осью. Аксиально стратифицированный топливный слой включает в себя несколько зон:

первую зону, выполненную с возможностью работы при первой температуре  $T_1$ , причем первая зона содержит множество первых частиц топлива, каждая из которых имеет первый радиоактивный керамический сердечник и первое керамическое герметизирующее покрытие; и

вторую зону, выполненную с возможностью работы при второй температуре  $T_2$ , при

этом  $T_2 > T_1$ , причем вторая зона содержит множество вторых частиц топлива, каждая вторая частица топлива содержит второй радиоактивный керамический сердечник и второе керамическое герметизирующее покрытие;

причем первое керамическое герметизирующее покрытие имеет большую стабильность при  $T_1$ , чем при  $T_2$ , а второе керамическое герметизирующее покрытие имеет большую стабильность при  $T_2$ , чем первое керамическое герметизирующее покрытие.

В различных вариантах осуществления изобретения реактор включает в себя тракт потока теплоносителя, выполненный с возможностью переноса теплоносителя от основания реактора к выпускному отверстию, причем тракт потока теплоносителя последовательно проходит через первую и вторую зоны. Теплоносителем может быть водород, вода, аммиак, кислород или диоксид углерода. Теплоносителем также может быть инертный газ, такой как азот, аргон или гелий. В случае реакторов с ядерной тепловой тягой (НТТ) для аэрокосмических применений теплоноситель может протекать через реактор с высокой скоростью, выполняя функцию как рабочего тела, так и отвода тепла от реактора.

Согласно различным вариантам осуществления изобретения, первые частицы топлива включают в себя первое керамическое герметизирующее покрытие с первым сечением захвата нейтронов; а вторые частицы топлива включают в себя второе керамическое герметизирующее покрытие со вторым сечением захвата нейтронов, где второе сечение захвата нейтронов выше, чем первое сечение захвата нейтронов.

Согласно различным вариантам осуществления изобретения, первые частицы топлива включают в себя первый радиоактивный керамический сердечник, а вторые частицы топлива включают в себя второй радиоактивный керамический сердечник со вторым сечением захвата нейтронов, где первый радиоактивный керамический сердечник и второй радиоактивный керамический сердечник представляют собой оксид, карбид, оксикарбид или нитрид урана, тория или плутония. Первый радиоактивный керамический сердечник может быть оксидом, карбидом, оксикарбидом или нитридом урана, тория или плутония; а второй радиоактивный керамический сердечник может быть оксидом урана.

В различных вариантах осуществления изобретения первые частицы топлива включают в себя первое керамическое герметизирующее покрытие из оксида, карбида, борида, оксикарбида или нитрида кремния; а вторые частицы топлива включают в себя второе керамическое герметизирующее покрытие из термостойкого керамического герметизирующего слоя, выбранного из группы, состоящей из  $HfB_2$ ,  $ZrB_2$ ,  $TiB_2$ ,  $TaB_2$ ,  $MoB$ ,  $ZrC$ ,  $HfC$ ,  $TiC$ ,  $TaC$ ,  $MoC$ ,  $Mo_2C$ ,  $WC$ ,  $HfN$ ,  $ZrN$ ,  $TiN$ ,  $SiBCN$  и  $Ta_4HfC_5$ .

В различных вариантах осуществления изобретения первые частицы топлива включают в себя первое керамическое герметизирующее покрытие, которое представляет собой оксид, карбид, оксикарбид или нитрид кремния или циркония; а вторые частицы топлива включают в себя второе керамическое герметизирующее покрытие, которое представляет собой оксид, карбид, оксикарбид или нитрид циркония или вольфрама, где первое керамическое герметизирующее покрытие и второе керамическое герметизирующее покрытие оба не содержат цирконий.

Первое керамическое герметизирующее покрытие может быть из карбида кремния для использования в первой зоне, сконфигурированной для работы при первой температуре  $T_1$ ; а второе керамическое герметизирующее покрытие может быть из карбида циркония для использования во второй зоне, сконфигурированной для работы при второй температуре  $T_2$ , где  $T_1$  находится в диапазоне от  $750^{\circ}\text{C}$  до  $1200^{\circ}\text{C}$ , а  $T_2$  находится в диапазоне от  $1200^{\circ}\text{C}$  до  $2000^{\circ}\text{C}$ .

Первое керамическое герметизирующее покрытие может быть из карбида кремния для использования в первой зоне, сконфигурированной для работы при первой температуре  $T_1$ ; а второе керамическое герметизирующее покрытие может быть из карбида вольфрама для использования во второй зоне, сконфигурированной для работы при второй температуре  $T_2$ , где  $T_1$  находится в диапазоне от  $750^{\circ}\text{C}$  до  $1600^{\circ}\text{C}$ , а  $T_2$  находится в диапазоне от  $1600^{\circ}\text{C}$  до  $2800^{\circ}\text{C}$ .

Первое керамическое герметизирующее покрытие может быть из карбида циркония для использования в первой зоне, сконфигурированной для работы при первой температуре  $T_1$ ; а второе керамическое герметизирующее покрытие может быть из карбида вольфрама для использования во второй зоне, сконфигурированной для работы при второй температуре  $T_2$ , где  $T_1$  находится в диапазоне от  $750^{\circ}\text{C}$  до  $2000^{\circ}\text{C}$ , а  $T_2$  находится в диапазоне от  $2000^{\circ}\text{C}$  до  $2800^{\circ}\text{C}$ .

В различных вариантах осуществления изобретения, описанных в настоящем документе, раскрывается ядерный реактор с аксиально стратифицированным топливным слоем, включающим в себя несколько зон. Аксиально стратифицированный топливный слой включает в себя:

первую зону, выполненную с возможностью работы при первой температуре  $T_1$ , причем первая зона содержит множество первых частиц топлива, каждая из которых имеет первый радиоактивный керамический сердечник и первое керамическое герметизирующее покрытие;

вторую зону, выполненную с возможностью работы при второй температуре  $T_2$ , где  $T_2 > T_1$ , причем вторая зона содержит множество вторых частиц топлива, каждая вторая частица топлива содержит второй радиоактивный керамический сердечник и второе керамическое герметизирующее покрытие; и

третью зону, выполненную с возможностью работы при третьей температуре  $T_3$ , где  $T_3 > T_2$ , причем третья зона содержит множество третьих частиц топлива, каждая из которых содержит третий радиоактивный керамический сердечник и третье керамическое герметизирующее покрытие;

причем первое керамическое герметизирующее покрытие имеет большую стабильность при  $T_1$ , чем при  $T_2$ , второе керамическое герметизирующее покрытие имеет большую стабильность при  $T_2$ , чем при  $T_3$ , а третье керамическое герметизирующее покрытие имеет большую стабильность при  $T_3$ , чем второе керамическое герметизирующее покрытие. Первое керамическое герметизирующее покрытие может иметь первое сечение захвата нейтронов, а третье керамическое герметизирующее покрытие может иметь третье

сечение захвата нейтронов, где третье сечение захвата нейтронов выше, чем первое сечение захвата нейтронов.

В различных вариантах осуществления изобретения аксиально стратифицированный топливный слой включает в себя:

множество первых частиц топлива, где первые частицы топлива имеют:

первое керамическое герметизирующее покрытие из оксида, карбида, оксикарбида или нитрида кремния;

слой пористого углерода, слой пиролитического углерода или их комбинацию; или необязательный слой пористого углерода, необязательный внутренний слой пиролитического углерода, первое керамическое герметизирующее покрытие и внешний слой пиролитического углерода;

множество вторых частиц топлива со вторым керамическим герметизирующим покрытием из первого термостойкого керамического герметизирующего слоя, изготовленного из  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TaB}_2$ ,  $\text{ZrC}$ ,  $\text{HfC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{TaC}$ ,  $\text{HfN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{TiN}$ ,  $\text{SiBCN}$  или  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ ; и

множество третьих частиц топлива с третьим керамическим герметизирующим покрытием из второго термостойкого керамического герметизирующего слоя, выбранного из группы, состоящей из  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TaB}_2$ ,  $\text{HfC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{TaC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{HfN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{TiN}$  или  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ ;

причем второе керамическое герметизирующее покрытие и третье керамическое герметизирующее покрытие различны. Вторые частицы топлива могут содержать внешний слой пиролитического углерода поверх второго керамического герметизирующего покрытия. Третьи частицы топлива могут содержать внешний слой пиролитического углерода поверх третьего керамического герметизирующего покрытия.

В различных вариантах осуществления изобретения аксиально стратифицированный топливный слой включает в себя:

множество первых частиц топлива с первым керамическим герметизирующим покрытием из оксида, карбида, оксикарбида или нитрида кремния;

множество вторых частиц топлива со вторым керамическим герметизирующим покрытием из первого термостойкого керамического герметизирующего слоя, изготовленного из  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TaB}_2$ ,  $\text{ZrC}$ ,  $\text{HfC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{HfN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{TiN}$  или  $\text{SiBCN}$ ; и

множество третьих частиц топлива с третьим керамическим герметизирующим покрытием из второго термостойкого керамического герметизирующего слоя, выбранного из группы, состоящей из  $\text{WC}$ ,  $\text{TaC}$ ,  $\text{HfC}$  или  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ .

В различных вариантах осуществления изобретения аксиально стратифицированный топливный слой включает в себя:

первую зону, выполненную с возможностью работы при первой температуре  $T_1$ , причем первая зона содержит множество первых частиц топлива, каждая из которых имеет первый радиоактивный керамический сердечник и герметизирующее покрытие из оксида, карбида, оксикарбида или нитрида кремния;

вторую зону, выполненную с возможностью работы при второй температуре  $T_2$ , где  $T_2 > T_1$ , причем вторая зона содержит множество вторых частиц топлива, каждая вторая частица топлива содержит второй радиоактивный керамический сердечник и герметизирующее покрытие из оксида, карбида, оксикарбида или нитрида циркония; и

третью зону, выполненную с возможностью работы при третьей температуре  $T_3$ , где  $T_3 > T_2$ , причем третья зона содержит множество третьих частиц топлива, каждая из которых содержит третий радиоактивный керамический сердечник и герметизирующее покрытие из оксида, карбида, оксикарбида или нитрида вольфрама. Первые частицы топлива могут иметь герметизирующее покрытие из карбида кремния; вторые частицы топлива могут иметь герметизирующее покрытие из карбида циркония; а третьи частицы топлива могут иметь герметизирующее покрытие из карбида вольфрама. Различные герметизирующие покрытия могут быть выбраны таким образом, чтобы:

первые частицы топлива работали при  $T_1$  в диапазоне от  $750^\circ\text{C}$  до  $1200^\circ\text{C}$ ;

вторые частицы топлива работали при  $T_2$  в диапазоне от  $1200^\circ\text{C}$  до  $2000^\circ\text{C}$ ; и

третьи частицы топлива работали при  $T_3$  в диапазоне от  $2000^\circ\text{C}$  до  $2800^\circ\text{C}$ .

Ядерный реактор может дополнительно содержать:

множество первых топливных элементов в первой зоне, причем каждый первый топливный элемент содержит множество первых частиц топлива, распределенных в первом матричном материале, причем первый матричный материал стабилен при  $T_1$ ; и

множество вторых топливных элементов во второй зоне, причем каждый второй топливный элемент содержит множество вторых частиц топлива, распределенных во втором матричном материале, причем второй матричный материал стабилен при  $T_2$ .

В различных вариантах осуществления изобретения, описанных в настоящем документе, раскрывается ядерный реактор с аксиально стратифицированным топливным слоем, включающим в себя несколько зон, причем:

первая зона сконфигурирована для работы при первой температуре  $T_1$ , причем первая зона содержит множество первых топливных элементов, включающих в себя множество первых частиц топлива, распределенных в первом матричном материале, причем первый матричный материал стабилен при  $T_1$ ; и

вторая зона сконфигурирована для работы при второй температуре  $T_2$ , где  $T_2 > T_1$ , причем вторая зона содержит множество вторых топливных элементов, причем каждый второй топливный элемент содержит множество вторых частиц топлива, распределенных во втором матричном материале, причем второй матричный материал стабилен при  $T_2$ . Реактор может дополнительно содержать третью зону, выполненную с возможностью работы при третьей температуре  $T_3$ , где  $T_3 > T_2$ , причем третья зона содержит множество третьих топливных элементов, причем каждый второй топливный элемент содержит множество третьих частиц топлива, распределенных в третьем матричном материале, причем второй матричный материал стабилен при  $T_3$ .

Первый матричный материал может представлять собой керамику, металл, металлокерамический композитный материал, композитный материал, состоящий, по

меньшей мере, из двух видов керамики, графит или фенольную смолу. Второй и/или третий матричные материалы могут представлять собой графит, WC или вольфрам.

#### Краткое описание чертежей

Для лучшего понимания различных примеров осуществления изобретения сделаны ссылки на прилагаемые чертежи, на которых:

Фиг. 1 иллюстрирует реактор HTGR с аксиально стратифицированным топливным слоем;

Фиг. 2А-2С показывают частицы топлива типа TRISO, подходящие для использования в реакторе, изображенном на фиг. 1;

Фиг. 3А-3С показывают частицы топлива с герметизирующим покрытием, подходящие для использования в реакторе, изображенном на фиг. 1;

Фиг. 4 показывает топливный элемент; и

Фиг. 5 иллюстрирует реактор HTGR с аксиально стратифицированным топливным слоем, содержащим топливные элементы.

#### Подробное описание изобретения

Далее со ссылкой на чертежи, на которых одинаковыми ссылочными позициями обозначены одинаковые компоненты или этапы, раскрываются общие аспекты различных примеров осуществления изобретения.

Используемый в настоящем документе термин «частица TRISO» определяется как частица ядерного топлива, в которой используются последовательные слоистые слои углерода и керамическое герметизирующее покрытие. Частицы ядерного топлива TRISO включают в себя сердечник частиц ядерного топлива, который изначально покрыт необязательным пористым углеродным слоем низкой плотности, т.е. буферным углеродным слоем, внутренним плотным пиролитическим углеродом (IPyC), керамическим герметизирующим слоем и необязательным внешним плотным пиролитическим углеродом (OPyC). Сердечник частиц ядерного топлива может представлять собой керамику на основе урана, тория или плутония. Керамическое герметизирующее покрытие может представлять собой, среди прочего, оксид, карбид, нитрид или оксикарбид кремния, циркония или вольфрама.

Хотя керамика на основе кремния может использоваться в качестве герметизирующих покрытий на частицах ядерного топлива, например, на частицах типа TRISO, керамические герметизирующие покрытия на основе кремния не идеальны для высокотемпературных применений. Оксид кремния стабилен при температурах до примерно 800°C, что делает использование оксида кремния подходящим только для ядерных реакторов, работающих при низких температурах. Поскольку реакторы HTGR обычно работают при температурах до 900°C, частицы ядерного топлива с герметизирующими покрытиями из оксида кремния могут не подходить. Карбид кремния и карбонитрид кремния стабильны при температурах от примерно 1400°C до 1500°C и поэтому более подходят для реакторов HTGR. Карбидонитридная керамика на основе кремния и бора (SiBCN) стабильна при температурах до 1800°C и также может

использоваться в реакторах HTGR. Однако реакторы, используемые для технологии ядерной тепловой тяги (NTP), работают при температурах до 2700°C. При таких температурах керамические герметизирующие покрытия на основе кремния не подходят, так как они не являются термически стабильными. Например, карбид кремния диссоциирует при температуре около 2450°C.

Для обеспечения превосходной термической стабильности различные карбиды, бориды, нитриды и оксикарбиды обладают приемлемыми термическими свойствами, в том числе температуры плавления, приближающиеся к 3000°C или превышающие 3000°C. Подходящие бориды включают в себя бориды тантала, титана, гафния и циркония, каждый из которых имеет температуру плавления, превышающую 3000°C. Также можно использовать карбиды тантала, титана, гафния, циркония и вольфрама или нитриды титана, гафния и циркония. В некоторых вариантах осуществления изобретения керамические сплавы, такие как карбид титана-гафния, можно использовать в качестве термостойких герметизирующих покрытий.

В настоящем описании раскрывается градуированный подход к слою топливных элементов в реакторе типа HTGR, который позволяет работать при более высоких температурах, чем это может быть достигнуто с помощью гомогенного слоя. Это позволяет реакторам HTGR с градуированными слоями работать с более высокой эффективностью, а также обеспечивает реакторы для таких применений, как ядерная тепловая тяга. Ядерная тепловая тяга требует температур, превышающих 2000°C.

Градуированный слой топливных элементов использует смесь традиционных частиц TRISO, а также новых частиц TRISO, использующих измененный порядок слоев и карбидные материалы, такие как карбид циркония (ZrC) и карбид вольфрама (WC). Благодаря улучшенным механическим свойствам этих материалов, таким как плотность, эти материалы могут быть применены в качестве герметизирующего покрытия. Частица типа TRISO включает в себя герметизирующее покрытие с тонким слоем плотного пироуглерода и последующим тонким слоем керамического материала, такого как SiC, ZrC или WC, нанесенного непосредственно на топливную частицу на основе урана или на топливную частицу на основе урана через промежуточный буферный углеродный слой. Эти топливные частицы с герметизирующим покрытием могут затем использоваться как есть, либо на них может быть нанесен дополнительный слой TRISO, например, внешний слой плотного пироуглерода, поверх герметизирующего покрытия, перед смешиванием частиц TRISO с матричным материалом и формованием полученной смеси в топливные твэлы или топливные сборки. Материалы ZrC или WC обычно не используются для традиционных применений HTGR из-за непомерно высокой стоимости производства и ухудшенных свойств при облучении по сравнению с SiC.

Технология ядерной тепловой тяги (NTP) требует температуры газа, превышающей 2700°C. Это является проблемой для традиционных конструкций с гомогенным топливным слоем, поскольку первичный слой давления и герметизации, карбид кремния, не рассчитан на такие экстремальные температуры. Однако в конструкциях NTP самые высокие

температуры наблюдаются в зоне выпуска отработавших газов, а самые низкие - там, где вводится нагреваемый газ.

В настоящем описании раскрывается трехслойный градуированный топливный слой, в котором используются традиционные материалы TRISO с герметизирующими покрытиями на основе SiC в нижней части топливного слоя, где вводится газ и температура топлива самая низкая. Поскольку традиционные слои TRISO на основе карбида кремния также идеально подходят для облучения, это позволяет топливному слою реагировать и выделять тепло в идеальных условиях облучения.

В зоне выпуска отработавших газов топливного слоя рабочая температура может превышать 2700°C. В верхней части топливного слоя используются материалы TRISO с термостойкими керамическими герметизирующими покрытиями. В различных вариантах осуществления изобретения термостойкие керамические герметизирующие покрытия могут быть изготовлены из HfB<sub>2</sub>, ZrB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub>, TaB<sub>2</sub>, TiC, TaC, WC, HfN, ZrN, TiN или Ta<sub>4</sub>HfC<sub>5</sub>. В различных вариантах осуществления изобретения в верхней части топливного слоя используются материалы TRISO с герметизирующими покрытиями на основе карбида вольфрама. Карбид вольфрама обладает значительно улучшенными механическими свойствами и термостойкостью по сравнению с SiC. Однако карбид вольфрама имеет худшую реакционную способность при облучении по сравнению с SiC. Однако, поскольку материалы TRISO с герметизирующими покрытиями на основе WC используются на выходе, где реакционная способность менее важна, они не влияют на работу реактора.

В промежуточной точке слоя, где температуры начинают приближаться к рабочим пределам слоев TRISO на основе карбида кремния, например, от примерно 1400°C до 1500°C, используются топливные элементы, в которых применяются материалы TRISO с термостойкими керамическими герметизирующими покрытиями. Подходящие термостойкие керамические герметизирующие покрытия в промежуточной части слоя могут быть изготовлены из HfB<sub>2</sub>, ZrB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub>, TaB<sub>2</sub>, HfC, ZrC, TiC, TaC, HfN, ZrN, TiN или Ta<sub>4</sub>HfC<sub>5</sub>. В зависимости от температуры в промежуточной части слоя определенные виды керамики на основе кремния также могут быть использованы в качестве герметизирующего покрытия на частице ядерного топлива. Например, если промежуточная часть реактора работает при температуре от 1400°C до 1800°C, в качестве герметизирующего покрытия можно использовать карбонитрид кремния-бора (SiBCN). В различных вариантах осуществления изобретения в качестве герметизирующего покрытия в частицах TRISO в промежуточной точке слоя используется карбид циркония. Этот карбид циркония обладает аналогичными свойствами при облучении, что и карбид кремния, но устойчив к более высоким температурам. По мере приближения температур к рабочим пределам карбида циркония материалы TRISO с герметизирующими покрытиями на основе ZrC заменяются материалами TRISO с герметизирующими покрытиями на основе WC.

В различных вариантах осуществления изобретения аксиально стратифицированный топливный слой включает в себя:

множество первых частиц топлива с первым керамическим герметизирующим

покрытием из оксида, карбида, оксикарида или нитрида кремния;

множество вторых частиц топлива со вторым керамическим герметизирующим покрытием из первого термостойкого керамического герметизирующего слоя, изготовленного из  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TaB}_2$ ,  $\text{ZrC}$ ,  $\text{HfC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{HfN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{TiN}$  или  $\text{SiBCN}$ ; и

множество третьих частиц топлива с третьим керамическим герметизирующим покрытием из второго термостойкого керамического герметизирующего слоя, выбранного из группы, состоящей из  $\text{WC}$ ,  $\text{TaC}$ ,  $\text{HfC}$  или  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ . Из-за экстремальных температур в выпускной части в верхней части топливного слоя желательны карбид вольфрама и тугоплавкие карбиды тантала и/или гафния (температура плавления  $> 4000^\circ\text{C}$ ).

В различных вариантах осуществления изобретения вторые частицы топлива в промежуточной части топливного слоя могут быть изготовлены из керамических легированных покрытий. Высокотемпературный боридный керамический материал, например, может быть соосажден с 5-30 масс.%  $\text{SiC}$ . Бориды  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$  и  $\text{TiB}_2$  могут быть соосаждены с  $\text{SiC}$ . Хотя это снижает температуру, при которой можно использовать полученный сплав, сплав по-прежнему пригоден при температурах, преобладающих в промежуточной части стратифицированного слоя, которые могут составлять от  $1200^\circ\text{C}$  до  $2000^\circ\text{C}$ . Например,  $\text{ZrB}_2$  представляет собой высокотемпературный керамический материал с температурой плавления, превышающей  $3000^\circ\text{C}$ . Сплав  $\text{ZrB}_2$ , содержащий 23 масс.%  $\text{SiC}$  (сплав  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ ), имеет температуру плавления  $2270^\circ\text{C}$ .

Соответственно, в различных вариантах осуществления изобретения аксиально стратифицированный топливный слой может включать в себя:

множество первых частиц топлива с первым керамическим герметизирующим покрытием из  $\text{SiC}$ ;

множество вторых частиц топлива со вторым керамическим герметизирующим покрытием из керамического сплава  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ ,  $\text{HfB}_2\text{-SiC}$ ,  $\text{TaB}_2\text{-SiC}$  или  $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ ; и

множество третьих частиц топлива с третьим керамическим герметизирующим покрытием из  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$  или  $\text{TaB}_2$ .

В настоящем описании также раскрывается двухслойный градуированный топливный слой, в котором используются традиционные материалы TRISO с герметизирующими покрытиями на основе  $\text{SiC}$  в нижней части топливного слоя, где вводится газ и температура топлива самая низкая. В зоне выпуска отработавших газов топливного слоя рабочая температура может достигать от 2000 до  $2700^\circ\text{C}$ . В различных вариантах осуществления изобретения термостойкие керамические герметизирующие покрытия в зоне выпуска отработавших газов слоя могут быть изготовлены из  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TaB}_2$ ,  $\text{HfC}$ ,  $\text{ZrC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{TaC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{HfN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{TiN}$  или  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ . Например, в верхней части топливного слоя могут использоваться материалы TRISO с герметизирующими покрытиями на основе  $\text{ZrC}$  или  $\text{WC}$ . Если температура в зоне выпуска отработавших газов составляет  $2000^\circ\text{C}$  или ниже, в зоне выпуска отработавших газов могут использоваться как материалы TRISO с герметизирующими покрытиями на основе  $\text{ZrC}$ , так и материалы TRISO с герметизирующими покрытиями на основе  $\text{WC}$ . Если температура в зоне выпуска

отработавших газов превышает  $2000^{\circ}\text{C}$ , в зоне выпуска отработавших газов следует использовать материалы TRISO с герметизирующими покрытиями на основе WC.

В целом, керамические герметизирующие покрытия могут быть нанесены на частицы ядерного топлива методом химического осаждения из газовой фазы из подходящего прекурсора с использованием известных в данной области техники методов. Керамические герметизирующие покрытия могут быть нанесены на частицы ядерного топлива непосредственно или через промежуточный слой пиролитического углерода. Дополнительно на керамическое герметизирующее покрытие наносится внешний слой пиролитического углерода.

Как описано выше, градуированный слой топливных элементов может работать при значительно более высоких температурах, чем традиционные гомогенные топливные слои типа HTGR. Это может повысить эффективность конструкции реактора для выработки энергии и открыть возможности для специализированных применений, таких как конструкции NTR с экстремальными температурами.

На фиг. 1 показан реактор HTGR 1 с градуированным слоем 2 топливных элементов. Реактор включает в себя корпус 1d с нижней частью 1a, верхней частью 1b и осью 1a. Впускное отверстие 1f для теплоносителя расположено в нижней части 1a корпуса реактора 1a или рядом с ней, а выпускное отверстие 1c для теплоносителя расположено в верхней части 1c корпуса 1d реактора или рядом с ней. Газообразный теплоноситель поступает во впускное отверстие 1f для теплоносителя и выходит через выпускное отверстие 1c для теплоносителя. Теплоноситель протекает через множество частиц ядерного топлива в градуированном слое 2 топливных элементов. Теплоносителем может быть водород, вода, аммиак, кислород или диоксид углерода. Теплоносителем также может быть инертный газ, такой как азот, аргон или гелий.

Как показано на фиг. 1, градуированный слой 2 топливных элементов содержит несколько зон, в том числе от двух до четырех зон. Градуированный слой 2 топливных элементов может содержать три зоны, в том числе зоны 2a, 2b и 2c, показанные на фиг. 1. Градуированный слой 2 топливных элементов может содержать две зоны, в том числе зоны 2a и 2c, показанные на фиг. 1. Первая зона 2a расположена в нижней части реактора, рядом с впуском 1f газа. Зона 2a содержит частицы 3 ядерного топлива. Частицы 3 ядерного топлива сконфигурированы для работы при первой температуре  $T_1$ , причем каждая частица 3 ядерного топлива включает в себя первый радиоактивный керамический сердечник и первое герметизирующее покрытие. Первое герметизирующее покрытие может представлять собой первое керамическое герметизирующее покрытие, которое стабильно при  $T_1$ . В различных вариантах осуществления изобретения первое керамическое герметизирующее покрытие представляет собой оксид, карбид, нитрид или оксинитрид кремния или циркония. Первое керамическое герметизирующее покрытие может представлять собой карбид кремния, нитрид кремния, карбид циркония или нитрид циркония.

В различных вариантах осуществления изобретения градуированный слой 2

топливных элементов содержит две зоны, в том числе зоны 2а и 2с, показанные на фиг. 1. Верхняя зона 2с расположена в верхней части реактора, рядом с выходом 1с газа. Зона 2с содержит частицы 5 ядерного топлива. Частицы 5 ядерного топлива сконфигурированы для работы при третьей температуре  $T_3$ , причем каждая частица 5 ядерного топлива включает в себя третий радиоактивный керамический сердечник и третье герметизирующее покрытие. Третье герметизирующее покрытие может представлять собой третье керамическое герметизирующее покрытие, которое стабильно при  $T_3$ , где  $T_3 > T_1$ . В различных вариантах осуществления изобретения третье керамическое герметизирующее покрытие представляет собой оксид, карбид, нитрид или оксинитрид циркония или вольфрама. Третье керамическое герметизирующее покрытие может представлять собой карбид циркония, нитрид циркония, карбид вольфрама или оксинитрид вольфрама. Первый радиоактивный керамический сердечник и третий радиоактивный керамический сердечник представляют собой оксид, карбид, оксикарбид или нитрид урана, тория или плутония.

В различных вариантах осуществления изобретения градуированный слой 2 топливных элементов содержит две зоны: 2а и 2с. Частицы 3 ядерного топлива в зоне 2а включают в себя первый радиоактивный керамический сердечник и керамическое герметизирующее покрытие, содержащее карбид кремния. Частицы 5 ядерного топлива в зоне 2с включают в себя третий радиоактивный керамический сердечник и керамическое герметизирующее покрытие, содержащее карбид циркония. Частицы 3 ядерного топлива сконфигурированы для работы при температуре  $T_1$  в диапазоне от  $750^{\circ}\text{C}$  до  $1200^{\circ}\text{C}$ . Частицы 5 ядерного топлива сконфигурированы для работы при температуре  $T_2$  в диапазоне от  $1200^{\circ}\text{C}$  до  $2000^{\circ}\text{C}$ . Покрытие из карбида кремния в частицах 3 ядерного топлива нестабильно при температурах выше  $1600^{\circ}\text{C}$ .

В различных вариантах осуществления изобретения частицы 3 ядерного топлива в зоне 2а включают в себя первый радиоактивный керамический сердечник и керамическое герметизирующее покрытие, содержащее карбид кремния. Частицы 5 ядерного топлива в зоне 2с включают в себя третий радиоактивный керамический сердечник и керамическое герметизирующее покрытие, содержащее карбид вольфрама. Частицы 3 ядерного топлива сконфигурированы для работы при температуре  $T_1$  в диапазоне от  $750^{\circ}\text{C}$  до  $1600^{\circ}\text{C}$ , при которой покрытие из карбида кремния становится термически нестабильным. Частицы 5 ядерного топлива сконфигурированы для работы при температуре  $T_2$  в диапазоне от  $1600^{\circ}\text{C}$  до  $2800^{\circ}\text{C}$ .

В различных вариантах осуществления изобретения частицы 3 ядерного топлива в зоне 2а включают в себя первый радиоактивный керамический сердечник и керамическое герметизирующее покрытие, содержащее карбид циркония. Частицы 5 ядерного топлива в зоне 2с включают в себя третий радиоактивный керамический сердечник и керамическое герметизирующее покрытие, содержащее карбид вольфрама. Частицы 3 ядерного топлива сконфигурированы для работы при температуре  $T_1$  в диапазоне от  $750^{\circ}\text{C}$  до  $2000^{\circ}\text{C}$ . Частицы 5 ядерного топлива сконфигурированы для работы при температуре  $T_2$  в диапазоне от  $2000^{\circ}\text{C}$  до  $2800^{\circ}\text{C}$ .

Градуированный слой 2 топливных элементов может содержать три зоны, в том числе зоны 2a, 2b и 2c, показанные на фиг. 1. Зона 2a содержит частицы 3 ядерного топлива, сконфигурированные для работы при первой температуре  $T_1$ . Зона 2b содержит частицы 4 ядерного топлива, сконфигурированные для работы при второй температуре  $T_2$ , где  $T_2 > T_1$ . Зона 2c содержит частицы 5 ядерного топлива, сконфигурированные для работы при третьей температуре  $T_3$ , где  $T_3 > T_2$ . Частицы 3 ядерного топлива имеют первое керамическое герметизирующее покрытие с большей термической стабильностью при  $T_1$ , чем при  $T_2$ . Частицы 4 ядерного топлива имеют второе керамическое герметизирующее покрытие с большей термической стабильностью при  $T_2$ , чем первое керамическое герметизирующее покрытие, и большей термической стабильностью при  $T_2$ , чем при  $T_3$ . Частицы 5 ядерного топлива имеют третье керамическое герметизирующее покрытие с большей термической стабильностью при  $T_3$ , чем второе керамическое герметизирующее покрытие.

На фиг. 2A показана частица, подходящая для использования в качестве частицы 3 ядерного топлива в первой зоне 2a реактора, изображенного на фиг. 1, где первая зона работает при температуре до  $1200^\circ\text{C}$  или до  $1500^\circ\text{C}$ . Частица 3, как показано на фиг. 2A, включает в себя радиоактивный сердечник или ядро 11, которое может представлять собой оксид, карбид, оксикарбид или нитрид урана, тория или плутония. Сердечник 11 может представлять собой сердечник частиц ядерного топлива на основе оксида урана, например,  $\text{UO}_3$  или  $\text{U}_3\text{O}_8$ . Сердечник 11 затем покрывают необязательным буферным углеродным слоем 12, слоем 13 внутреннего плотного пиролитического углерода (IPyC), керамическим герметизирующим слоем 14a и необязательным внешним плотным пиролитическим углеродом (OPyC) 15. В различных вариантах осуществления изобретения частица 3 ядерного топлива представляет собой частицу TRISO, содержащую каждый из слоев с 12 по 15, где слой 14a представляет собой карбид кремния. В различных вариантах осуществления изобретения частица 3 ядерного топлива представляет собой частицу типа TRISO, содержащую, по меньшей мере, слои 13 и 14a, где слой 14a представляет собой оксид, карбид, нитрид или оксинитрид кремния.

На фиг. 2B показана частица, подходящая для использования в качестве частицы 4 ядерного топлива в средней зоне 2b реактора, изображенного на фиг. 1, где вторая зона работает при температуре до  $1600^\circ\text{C}$  или до  $2000^\circ\text{C}$ . Частица 4, как показано на фиг. 2B, включает в себя радиоактивный сердечник или ядро 11, аналогичное показанному на фиг. 2A. Сердечник 11 затем покрывают необязательным буферным углеродным слоем 12, слоем 13 внутреннего плотного пиролитического углерода (IPyC), керамическим герметизирующим слоем 14b и необязательным внешним плотным пиролитическим углеродом (OPyC) 15. В различных вариантах осуществления изобретения частица 5 ядерного топлива представляет собой частицу типа TRISO, содержащую, по меньшей мере, слои 13 и 14b, где слой 14b представляет собой оксид, карбид, нитрид или оксинитрид циркония. В различных вариантах осуществления изобретения, где первая зона работает при температуре до  $1200^\circ\text{C}$ , вторая зона работает при температуре до  $1600^\circ\text{C}$ , а слой 14b может представлять собой слой карбида циркония, борид гафния, борид титана или

борида тантала, или слой борида, выбранного из борида гафния, борида титана, борида тантала и борида циркония. В различных вариантах осуществления изобретения, где вторая зона работает при температуре до  $2000^{\circ}\text{C}$ , слой 14b может представлять собой слой карбида циркония или слой борида, выбранного из борида гафния, борида титана, борида тантала и борида циркония.

На фиг. 2С показана частица, подходящая для использования в качестве частицы 5 ядерного топлива в верхней зоне 2с реактора, изображенного на фиг. 1, где третья зона работает при температуре до  $2000^{\circ}\text{C}$  или до  $2800^{\circ}\text{C}$ . Частица 5, как показано на фиг. 2С, включает в себя радиоактивный сердечник или ядро 11. Сердечник 11 затем покрывают необязательным буферным углеродным слоем 12, слоем 13 внутреннего плотного пиролитического углерода (IPyC), керамическим герметизирующим слоем 14с и необязательным внешним плотным пиролитическим углеродом (OPyC) 15. В различных вариантах осуществления изобретения частица 5 ядерного топлива представляет собой частицу типа TRISO, содержащую, по меньшей мере, слои 13 и 14с, где слой 14с представляет собой оксид, карбид, нитрид или оксинитрид вольфрама. В различных вариантах осуществления изобретения, где вторая зона работает при температуре до  $1600^{\circ}\text{C}$ , вторая зона работает при температуре до  $2000^{\circ}\text{C}$ , а слой 14с может представлять собой слой карбида циркония или карбида вольфрама, или слой борида, выбранного из борида гафния, борида титана, борида тантала и борида циркония. В различных вариантах осуществления изобретения, где вторая зона работает при температуре до  $2800^{\circ}\text{C}$ , слой 14b представляет собой слой карбида вольфрама.

Как обсуждалось выше, градуированный слой 2 топливных элементов может содержать две зоны, в том числе зоны 2а и 2с, показанные на фиг. 1. Материал, используемый для керамического герметизирующего покрытия на частицах 3 и 5 ядерного топлива, выбирают исходя из рабочих температур в соответствующих зонах. Если зона 2а достигает температуры до  $1200^{\circ}\text{C}$ , а зона 2с достигает температуры до  $2000^{\circ}\text{C}$ , зона 2а может содержать частицы 3 ядерного топлива, где в качестве слоя 14а используется керамический слой на основе кремния, а зона 2с может содержать частицы 5 ядерного топлива, где в качестве слоя 14с используется керамический слой на основе циркония или вольфрама. Если зона 2а достигает температуры до  $1600^{\circ}\text{C}$ , а зона 2с достигает температуры до  $2800^{\circ}\text{C}$ , зона 2а может содержать частицы 3 ядерного топлива с керамическим слоем 14а на основе циркония или кремния, а зона 2с может содержать частицы 5 ядерного топлива с керамическим слоем 14с на основе вольфрама. Если зона 2а достигает температуры до  $2000^{\circ}\text{C}$ , а зона 2с достигает температуры до  $2800^{\circ}\text{C}$ , зона 2а может содержать частицы 3 ядерного топлива с керамическим слоем 14а на основе циркония, а зона 2с может содержать частицы 5 ядерного топлива с керамическим слоем 14с на основе вольфрама. Керамика на основе вольфрама обладает большей термической стабильностью, чем керамика на основе циркония, которая, в свою очередь, обладает большей термической стабильностью, чем керамика на основе кремния. Однако прекурсоры для керамики на основе циркония и вольфрама дороже, чем прекурсоры для

керамики на основе кремния. Соответственно, более экономичное герметизирующее покрытие 14а на основе кремния может быть использовано в частицах 3 в низкотемпературной зоне 2а, в то время как керамические герметизирующие покрытия на основе циркония или вольфрама могут быть использованы в высокотемпературной зоне 2с. В некоторых вариантах осуществления изобретения, где низкотемпературная зона 2а работает при температуре, превышающей 1200°C, или превышающей 1600°C, герметизирующее покрытие 14а на основе циркония может быть использовано в частицах 3 в низкотемпературной зоне 2а, в то время как керамические герметизирующие покрытия на основе вольфрама могут быть использованы в высокотемпературной зоне 2с.

На фиг. 3А-3С показаны альтернативные варианты осуществления частиц, подходящих для использования в качестве частиц ядерного топлива в реакторе, изображенном на фиг. 1. Частица 3, как показано на фиг. 3А, может быть использована в нижней зоне 2а реактора и включает в себя радиоактивный сердечник или ядро 21, которое может представлять собой оксид, карбид, оксикарбид или нитрид урана, тория или плутония. Сердечник 21 затем покрывается керамическим герметизирующим слоем 22а. В различных вариантах осуществления изобретения керамическое герметизирующее покрытие 22а представляет собой оксид, карбид, нитрид или оксинитрид кремния и сконфигурировано для работы при температуре до 1200°C. На фиг. 3В показан альтернативный вариант осуществления частицы, подходящей для использования в качестве частицы 4 ядерного топлива в средней зоне 2b реактора, изображенного на фиг. 1. Частица 4, как показано на фиг. 3В, включает в себя радиоактивный сердечник или ядро 21 и керамическое герметизирующее покрытие 22b, где слой 22b представляет собой оксид, карбид, нитрид или оксинитрид циркония и сконфигурирован для работы при температуре до 2000°C. На фиг. 3С показан альтернативный вариант осуществления частицы, подходящей для использования в качестве частицы 5 ядерного топлива в верхней зоне 2с реактора, изображенного на фиг. 1. Частица 5, как показано на фиг. 3С, включает в себя радиоактивный сердечник или ядро 21 и керамическое герметизирующее покрытие 22с, где слой 22с представляет собой оксид, карбид, нитрид или оксинитрид вольфрама и сконфигурирован для работы при температуре до 2800°C.

В различных вариантах осуществления изобретения первое керамическое герметизирующее покрытие, например, слой 14а на фиг. 2А, имеет первое сечение захвата нейтронов; второе керамическое герметизирующее покрытие, например, слой 14b на фиг. 2В, имеет второе сечение захвата нейтронов; а третье керамическое герметизирующее покрытие, например, слой 14с на фиг. 2С, имеет третье сечение захвата нейтронов. Третье сечение захвата нейтронов может быть меньше первого и/или второго сечения захвата нейтронов. Карбид кремния обладает хорошей термической стабильностью при температурах, преобладающих в зоне 2а реактора, а также обладает хорошими свойствами при облучении, например, высоким сечением захвата нейтронов, что позволяет частицам 3 ядерного топлива со слоями SiC 14а в зоне 2а топливного слоя 2 реагировать и выделять тепло. Карбид циркония обладает хорошей термической стабильностью при температурах,

преобладающих в зоне 2b реактора, которые превышают температуры, преобладающие в зоне 2a, а также обладает приемлемыми свойствами при облучении, что позволяет использовать частицы 4 ядерного топлива со слоями ZrC 14b в зоне 2a. В различных вариантах осуществления изобретения температуры в третьей зоне 2c могут достигать от 2500°C до 2500°C. В этих экстремальных условиях большинство керамических покрытий не являются термически стабильными. Соответственно, в зоне 2c используются частицы 5 ядерного топлива со слоями карбида вольфрама 14c. Слои карбида вольфрама 14c обладают хорошей термической стабильностью при температурах, преобладающих в зоне 2c реактора. Хотя WC обладает худшими свойствами при облучении, например, более низким сечением захвата нейтронов, чем ZrC или SiC, свойства при облучении менее критичны, чем термическая стабильность в высокотемпературной зоне 2c, поэтому использование слоя WC 14c является приемлемым. Эти же соображения относятся и к керамическим герметизирующим покрытиям 22a-22c на фиг. 3A-3C.

Возвращаясь к фиг. 1, комбинация однослойных частиц ядерного топлива, показанных на фиг. 3A-3C, и многослойных частиц ядерного топлива, показанных на фиг. 2A-2C, может использоваться в реакторе в различных зонах реактора. В нижней зоне 2a могут использоваться частицы 3 с радиоактивным ядром или сердечником 21 и единственным внешним слоем 22a карбида кремния, где зона 2a работает при температуре до 1200°C. В средней зоне 2b могут использоваться частицы TRISO 3, показанные на фиг. 2A, которые содержат радиоактивный сердечник 11, слой 14a карбида кремния и внешний слой 15 пиролитического углерода, где зона 2b работает при температуре до 1600°C. Открытый слой 22a карбида кремния на частицах в нижней зоне 2a термически стабилен до 1200°C; выше этой температуры поверхность карбида кремния может подвергаться окислению, если источник кислорода загрязняет охлаждающий газ. Слой 14a карбида кремния на частицах в средней зоне 2b защищен от воздействия окислителей плотным слоем 15 пиролитического углерода и менее подвержен окислению. В верхней зоне 2c реактора могут использоваться частицы 5 ядерного топлива, показанные на фиг. 2C или фиг. 3C, с керамическими герметизирующими покрытиями 14c или 22c на основе циркония или вольфрама.

В альтернативном варианте осуществления изобретения в реакторе в различных зонах реактора, изображенного на фиг. 1, может использоваться комбинация частиц ядерного топлива, не имеющих герметизирующего покрытия, и частиц ядерного топлива с керамическим герметизирующим покрытием. В нижней зоне 2a могут использоваться частицы 3 с радиоактивным ядром или сердечником 12, слоем 12 пористого углерода и слоем 13 пиролитического углерода, где частицы 3 в зоне 2a аналогичны частицам, показанным на фиг. 2A, за исключением того, что у них отсутствуют внешние слои 14a и 15. Зона 2a работает при температуре до 1200°C. В средней зоне 2b могут использоваться частицы TRISO 3, показанные на фиг. 2A, которые содержат радиоактивный сердечник 11, внутренние углеродные слои 12 и 13, слой 14a карбида кремния или карбида циркония и внешний слой 15 пиролитического углерода, где зона 2b работает при температуре до

1600°C. Слой 14а карбида кремния на частицах в средней зоне 2b защищен от воздействия окислителей плотным слоем 15 пиролитического углерода. В верхней зоне 2с реактора могут использоваться частицы 5 ядерного топлива, показанные на фиг. 2С или фиг. 3С, с керамическими герметизирующими покрытиями 14с или 22с на основе циркония или вольфрама. Как правило, керамические герметизирующие покрытия на основе циркония не используются как в зоне 2b, так и в зоне 2с.

Хотя на фиг. 1 показан градуированный слой 2 топливных элементов с несколькими зонами 2а-2с частиц ядерного топлива, различные варианты осуществления изобретения, раскрытые в настоящем документе, включают в себя градуированные слои топливных элементов, содержащие топливные элементы, содержащие частицы ядерного топлива, диспергированные в матричном материале. На фиг. 4 показан топливный компакт 31 с частицами 33 ядерного топлива, диспергированными в матричном материале 32. Частицы 33 ядерного топлива могут представлять собой любые из частиц 3, 4 и 5, показанных на фиг. 2А-2С, где керамический слой 14а, 14b или 14с выбирается исходя из желаемой рабочей температуры компакта. Альтернативно, частицы 33 ядерного топлива могут представлять собой любые из частиц 3, 4 и 5, показанных на фиг. 3А-3С, где керамический слой 22а, 22b или 22с выбирается исходя из желаемой рабочей температуры. Если желаемая рабочая температура топливного компакта 31 составляет менее 1200°C, матричный материал 32 может представлять собой керамический материал; металл; металлокерамический композитный материал, например, кермет карбида титана/никель-кобальта, кермет карбида вольфрама/кобальта и т.д.; композитный материал, состоящий, по меньшей мере, из двух видов керамики; графит; или фенольную смолу. Если желаемая рабочая температура топливного компакта 31 превышает 1200°C, матричный материал 32 может представлять собой термостойкий материал, такой как графит, WC или вольфрам.

Топливные компакты 31 могут иметь кубовидную или цилиндрическую форму. В различных вариантах осуществления изобретения топливные компакты 31 могут представлять собой в целом сферические твэлы с равномерно распределенными в них частицами 33 ядерного топлива.

На фиг. 5 показан реактор HTGR 1 с градуированным слоем 2 топливных элементов, аналогичным показанному на фиг. 1. Реактор включает в себя корпус 41d. Впускное отверстие 41f для теплоносителя расположено в нижней части 41а корпуса 41а реактора или рядом с ней, а выпускное отверстие 41с для теплоносителя расположено в верхней части 41b корпуса 1d реактора или рядом с ней. Как показано на фиг. 5, градуированный слой 42 топливных элементов содержит несколько зон, в том числе зоны 42а, 42b и 42с. Первая зона 42а расположена в нижней части реактора, рядом с впуском 41f газа. Третья зона 42с расположена в верхней части реактора, рядом с выходом 41с газа.

Зона 42а содержит топливные компакты 31а, причем компакты 31а аналогичны компактам 31, показанным на фиг. 4. Компакты 31а содержат частицы 33 ядерного топлива, диспергированные в матрице 32, где частицы 33 ядерного топлива могут представлять собой частицы 3, показанные на фиг. 2а или фиг. 3а, где частицы 3 содержат керамическое

герметизирующее покрытие 14a или 22a из карбида кремния. Зона 42a, содержащая топливные компакты 31a, сконфигурирована для работы при температурах до 1200°C или до 1600°C.

Зона 42b содержит топливные компакты 31b. Компакты 31b содержат частицы 33 ядерного топлива, диспергированные в матрице 32, где частицы 33 ядерного топлива могут представлять собой частицы 4, показанные на фиг. 2B или фиг. 3B, где частицы 3 содержат керамическое герметизирующее покрытие 14b или 22b из карбида циркония. Зона 42b, содержащая топливные компакты 31b, сконфигурирована для работы при температурах до 2000°C.

Зона 42c содержит топливные компакты 31c. Компакты 31c содержат частицы 33 ядерного топлива, диспергированные в матрице 32, где частицы 33 ядерного топлива могут представлять собой частицы 5, показанные на фиг. 2C или фиг. 3C, где частицы 3 содержат керамическое герметизирующее покрытие 14c или 22c из карбида вольфрама. Зона 42c, содержащая топливные компакты 31c, сконфигурирована для работы при температурах до 2800°C.

Компакты 31a, 31b и 31c зон 42a, 42b и 42b содержат достаточную массу, чтобы избежать флюидизации охлаждающим газом.

Хотя различные примеры осуществления изобретения были подробно описаны со ссылкой на определенные иллюстративные аспекты, следует понимать, что настоящее изобретение может быть реализовано в других вариантах осуществления, а его детали могут быть модифицированы в различных очевидных отношениях. Как очевидно для специалистов в данной области техники, могут быть внесены изменения и модификации без отступления от сущности и объема изобретения. Соответственно, приведенное выше описание и чертежи приведены только для иллюстрации и никоим образом не ограничивают объем изобретения, который определяется только формулой изобретения.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Ядерный реактор с аксиально стратифицированным топливным слоем, содержащий:

корпус реактора, имеющий основание, вершину с выпускным отверстием и ось;

при этом аксиально стратифицированный топливный слой содержит:

- первую зону, выполненную с возможностью работы при первой температуре  $T_1$ , причем первая зона содержит множество первых частиц топлива, каждая из которых содержит первый радиоактивный керамический сердечник и первое покрытие, при этом первое покрытие представляет собой углеродное покрытие, первое керамическое герметизирующее покрытие или их комбинацию; и

- вторую зону, выполненную с возможностью работы при второй температуре  $T_2$ , причем  $T_2 > T_1$ , при этом вторая зона содержит множество вторых частиц топлива, каждая из которых содержит второй радиоактивный керамический сердечник и второе керамическое герметизирующее покрытие;

канал потока теплоносителя, выполненный с возможностью переноса теплоносителя от основания реактора к выпускному отверстию, причем канал потока теплоносителя последовательно проходит через первую и вторую зоны;

при этом первое керамическое герметизирующее покрытие обладает большей стабильностью при  $T_1$ , чем при  $T_2$ , а

второе керамическое герметизирующее покрытие обладает большей стабильностью при  $T_2$ , чем первое керамическое герметизирующее покрытие.

2. Ядерный реактор по п. 1, в котором теплоноситель представляет собой азот, аргон, гелий, водород, воду, аммиак, кислород или диоксид углерода.

3. Ядерный реактор по п. 1, в котором:

первое керамическое герметизирующее покрытие имеет первое сечение захвата нейтронов; а

второе керамическое герметизирующее покрытие имеет второе сечение захвата нейтронов;

причем второе сечение захвата нейтронов превышает первое сечение захвата нейтронов.

4. Ядерный реактор по п. 1, в котором первый радиоактивный керамический сердечник и второй радиоактивный керамический сердечник представляют собой оксид, карбид, оксикарбид или нитрид урана, тория или плутония.

5. Ядерный реактор по п. 1, в котором:

первый радиоактивный керамический сердечник выбран из группы, состоящей из оксида, карбида, оксикарбида или нитрида урана, тория или плутония; а

второй радиоактивный керамический сердечник представляет собой оксид урана.

6. Ядерный реактор по п. 1, в котором:

первое керамическое герметизирующее покрытие выбрано из группы, состоящей из оксида, карбида, борида, оксикарбида или нитрида кремния; а

второе керамическое герметизирующее покрытие представляет собой термостойкое керамическое герметизирующее покрытие, выбранное из группы, состоящей из  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TaB}_2$ ,  $\text{ZrC}$ ,  $\text{HfC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{TaC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{HfN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{TiN}$ ,  $\text{SiBCN}$  и  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ .

7. Ядерный реактор по п. 1, в котором:

первое керамическое герметизирующее покрытие представляет собой оксид, карбид, борид, оксикарбид или нитрид кремния или циркония; а

второе керамическое герметизирующее покрытие представляет собой оксид, борид, карбид, оксикарбид или нитрид циркония или вольфрама;

причем как первое керамическое герметизирующее покрытие, так и второе керамическое герметизирующее покрытие не содержит циркония.

8. Ядерный реактор по п. 7, в котором:

первое керамическое герметизирующее покрытие представляет собой карбид кремния; а

второе керамическое герметизирующее покрытие представляет собой карбид циркония;

причем  $T_1$  находится в диапазоне от  $750^\circ\text{C}$  до  $1200^\circ\text{C}$ , а  $T_2$  находится в диапазоне от  $1200^\circ\text{C}$  до  $2000^\circ\text{C}$ .

9. Ядерный реактор по п. 7, в котором:

первое керамическое герметизирующее покрытие представляет собой карбид кремния; а

второе керамическое герметизирующее покрытие представляет собой карбид вольфрама;

причем  $T_1$  находится в диапазоне от  $750^\circ\text{C}$  до  $1600^\circ\text{C}$ , а  $T_2$  находится в диапазоне от  $1600^\circ\text{C}$  до  $2800^\circ\text{C}$ .

10. Ядерный реактор по п. 7, в котором:

первое керамическое герметизирующее покрытие представляет собой карбид циркония; а

второе керамическое герметизирующее покрытие представляет собой карбид вольфрама;

причем  $T_1$  находится в диапазоне от  $750^\circ\text{C}$  до  $2000^\circ\text{C}$ , а  $T_2$  находится в диапазоне от  $2000^\circ\text{C}$  до  $2800^\circ\text{C}$ .

11. Ядерный реактор по п. 1, дополнительно содержащий:

третью зону, выполненную с возможностью работы при третьей температуре  $T_3$ , причем  $T_3 > T_2$ , при этом третья зона содержит множество третьих частиц топлива, каждая из которых содержит третий радиоактивный керамический сердечник и третье керамическое герметизирующее покрытие;

причем второе керамическое герметизирующее покрытие обладает большей стабильностью при  $T_2$ , чем при  $T_3$ ; а

третье керамическое герметизирующее покрытие обладает большей стабильностью при  $T_3$ , чем второе керамическое герметизирующее покрытие.

12. Ядерный реактор по п. 11, в котором:

первое керамическое герметизирующее покрытие имеет первое сечение захвата нейтронов; а

третье керамическое герметизирующее покрытие имеет третье сечение захвата нейтронов;

причем третье сечение захвата нейтронов превышает первое сечение захвата нейтронов.

13. Ядерный реактор по п. 11, в котором:

первое керамическое герметизирующее покрытие представляет собой оксид, карбид, оксикарбид или нитрид кремния;

второе керамическое герметизирующее покрытие представляет собой первое термостойкое керамическое герметизирующее покрытие, выбранное из группы, состоящей из  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TaB}_2$ ,  $\text{ZrC}$ ,  $\text{HfC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{TaC}$ ,  $\text{HfN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{TiN}$ ,  $\text{SiBCN}$  и  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ ; и

третье керамическое герметизирующее покрытие представляет собой второе термостойкое керамическое герметизирующее покрытие, выбранное из группы, состоящей из  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TaB}_2$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{TaC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{HfN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{TiN}$  или  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ ;

причем второе и третье керамические герметизирующие покрытия являются различными.

14. Ядерный реактор по п. 11, в котором:

первое керамическое герметизирующее покрытие представляет собой оксид, карбид, оксикарбид или нитрид кремния;

второе керамическое герметизирующее покрытие представляет собой первое термостойкое керамическое герметизирующее покрытие, выбранное из группы, состоящей из  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TaB}_2$ ,  $\text{ZrC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{HfN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{TiN}$ ,  $\text{SiBCN}$  и  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ ; и

третье керамическое герметизирующее покрытие представляет собой второе термостойкое керамическое герметизирующее покрытие, выбранное из группы, состоящей из  $\text{WC}$ ,  $\text{TaC}$ ,  $\text{HfC}$  и  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ .

15. Ядерный реактор по п. 11, в котором:

первое керамическое герметизирующее покрытие выбрано из группы, состоящей из оксида, карбида, оксикарида или нитрида кремния;

второе керамическое герметизирующее покрытие представляет собой оксид, карбид, оксикарбид или нитрид циркония; и

третье керамическое герметизирующее покрытие представляет собой оксид, карбид, оксикарбид или нитрид вольфрама.

16. Ядерный реактор по п. 12, в котором:

первое керамическое герметизирующее покрытие представляет собой карбид кремния;

второе керамическое герметизирующее покрытие представляет собой карбид циркония; и

третье керамическое герметизирующее покрытие представляет собой карбид

вольфрама.

17. Ядерный реактор по п. 16, в котором:

$T_1$  находится в диапазоне от  $750^{\circ}\text{C}$  до  $1200^{\circ}\text{C}$ ;

$T_2$  находится в диапазоне от  $1200^{\circ}\text{C}$  до  $2000^{\circ}\text{C}$ ; и

$T_3$  находится в диапазоне от  $2000^{\circ}\text{C}$  до  $2800^{\circ}\text{C}$ .

18. Ядерный реактор по п. 1, дополнительно содержащий:

множество первых топливных элементов в первой зоне, каждый из которых содержит множество первых частиц топлива, распределенных в первом матричном материале, причем первый матричный материал стабилен при  $T_1$ ; и

множество вторых топливных элементов во второй зоне, каждый из которых содержит множество вторых частиц топлива, распределенных во втором матричном материале, при этом второй матричный материал стабилен при  $T_2$ .

19. Ядерный реактор по п. 11, дополнительно содержащий:

множество первых топливных элементов в первой зоне, каждый из которых содержит множество первых частиц топлива, распределенных в первом матричном материале, причем первый матричный материал стабилен при  $T_1$ ;

множество вторых топливных элементов во второй зоне, каждый из которых содержит множество вторых частиц топлива, распределенных во втором матричном материале, при этом второй матричный материал стабилен при  $T_2$ ; и

множество третьих топливных элементов в третьей зоне, каждый из которых содержит множество третьих частиц топлива, распределенных в третьем матричном материале, причем третий матричный материал стабилен при  $T_3$ .

20. Ядерный реактор по п. 18, в котором первый матричный материал выбран из группы, состоящей из:

керамики;

металла;

металлокерамического композитного материала;

композитного материала, состоящего из, по меньшей мере, двух видов керамики;

графита; и

фенольной смолы.

21. Ядерный реактор по п. 18, в котором второй матричный материал выбран из группы, состоящей из графита, WC и вольфрама.

По доверенности

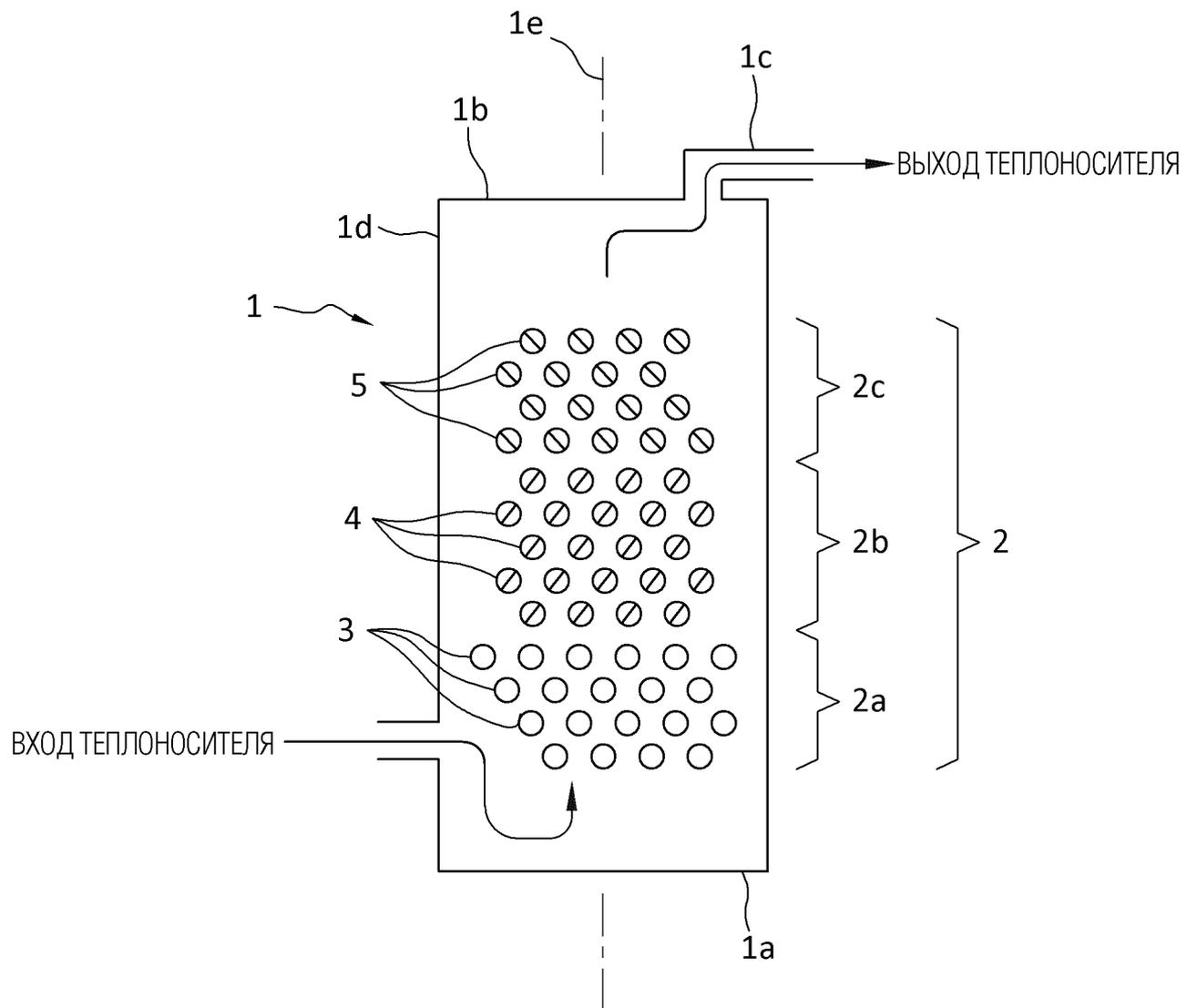


FIG. 1

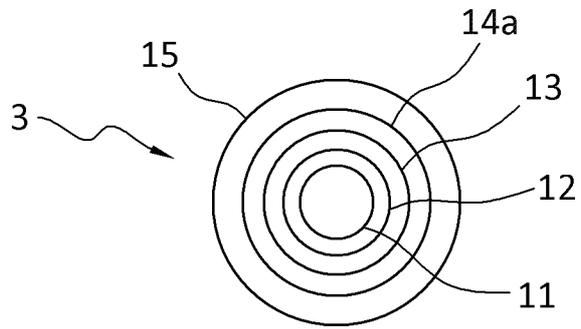


FIG. 2A

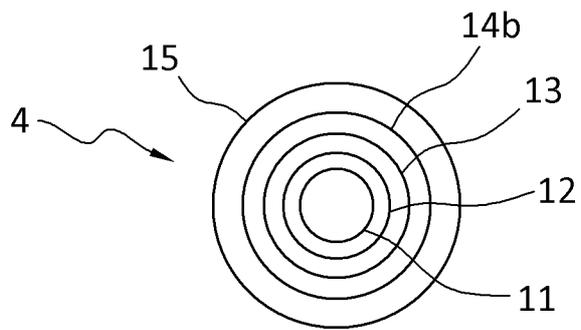


FIG. 2B

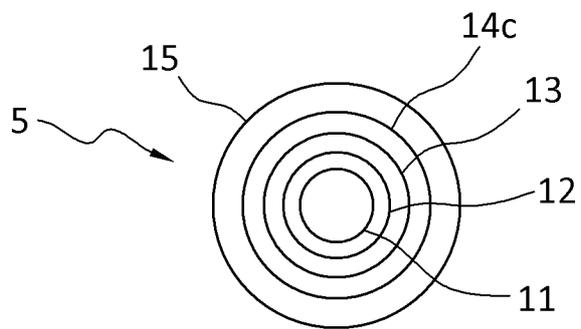


FIG. 2C

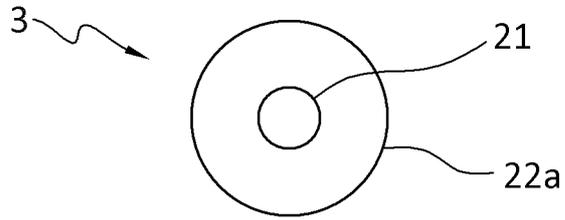


FIG. 3A

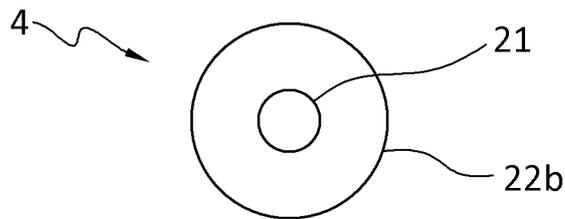


FIG. 3B

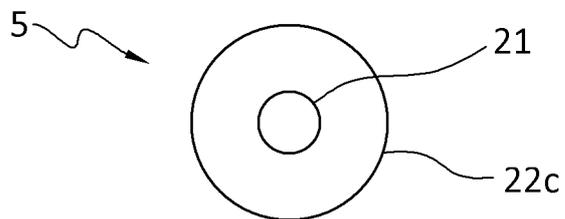


FIG. 3C

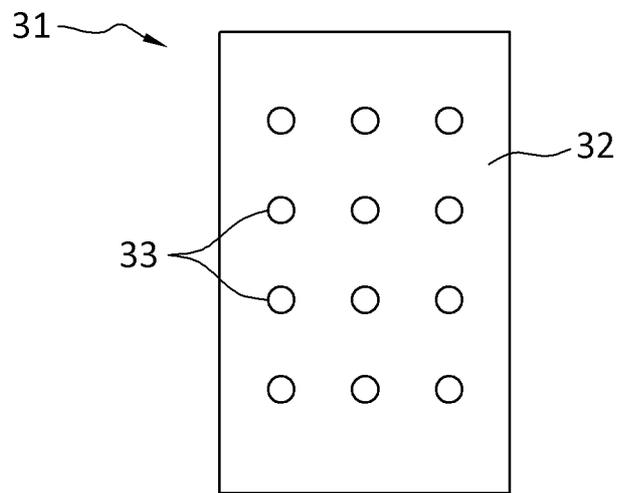


FIG. 4

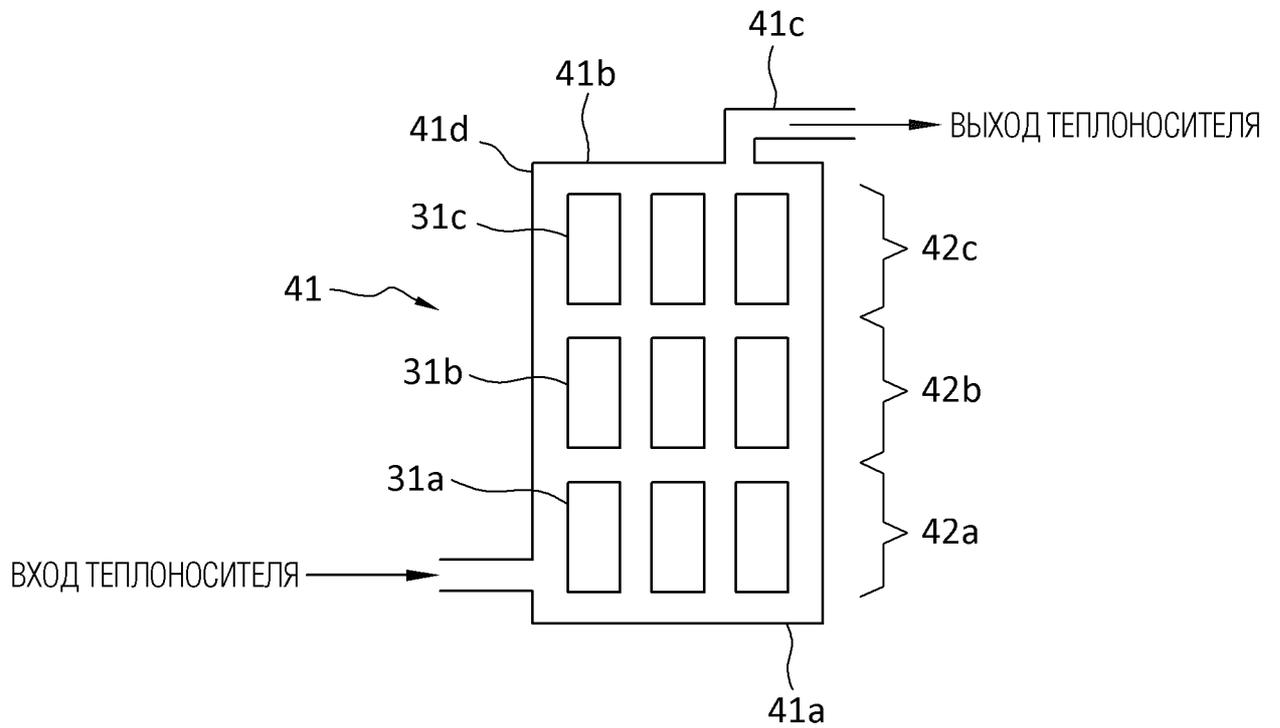


FIG. 5