

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202291721 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2022.10.11

(22) Дата подачи заявки  
2020.12.15

(51) Int. Cl. G21F 1/08 (2006.01)  
G21F 1/12 (2006.01)  
G21B 1/11 (2006.01)  
G21B 1/05 (2006.01)  
H01F 6/06 (2006.01)

---

(54) МНОГОСЛОЙНАЯ НЕЙТРОННАЯ ЗАЩИТА

---

(31) 1919059.4; 2015029.8

(32) 2019.12.20; 2020.09.23

(33) GB

(86) PCT/EP2020/086259

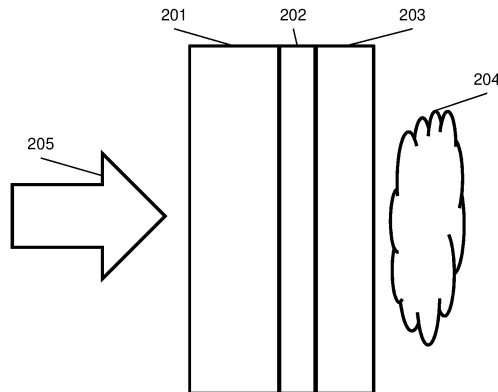
(87) WO 2021/122623 2021.06.24

(71) Заявитель:  
ТОКЕМЕК ЭНЕРДЖИ ЛТД (GB)

(72) Изобретатель:  
Эстбери Джек, Дэвис Томас,  
Миддлбург Саймон (GB)

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

(57) Представлена нейтронная защита, которая содержит множество поглощающих слоев (201, 203) и по меньшей мере один замедляющий слой (202). Каждый из множества поглощающих слоев содержит борид вольфрама или карбид вольфрама. Упомянутый по меньшей мере один замедляющий слой содержит гидрид металла. Каждый замедляющий слой находится между по меньшей мере двумя поглощающими слоями.



A1

202291721

202291721

A1

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-574832EA/019

### МНОГОСЛОЙНАЯ НЕЙТРОННАЯ ЗАЩИТА

#### Область изобретения

Настоящее изобретение относится к нейтронной защите, в частности, хотя и не исключительно, для применения в термоядерных реакторах-токамаках.

#### Предпосылки изобретения

Проблема производства термоядерной энергии является чрезвычайно сложной. Термоядерные нейтроны образуются при нагреве дейтерий-тритиевой (D-T) или дейтерий-дейтериевой (D-D) плазмы так, что ядра имеют достаточную энергию для преодоления кулоновского электростатического отталкивания, чтобы сливаться друг с другом, высвобождая энергетические нейтроны и продукты термоядерной реакции синтеза (например,  $^4\text{He}$  для D-T). На сегодняшний день самым многообещающим способом достижения этого является применение устройства токамака; при традиционном подходе к термоядерному синтезу в токамаках (реализуемом посредством ITER) для оптимизации этого процесса плазма должна иметь высокое время удержания, высокую температуру и высокую плотность.

Токамак характеризуется сочетанием сильного тороидального магнитного поля  $B_T$ , высокого тока плазмы  $I_p$  и, обычно, большого объема плазмы и значительного сопутствующего нагрева, чтобы обеспечить горячую устойчивую плазму, в результате чего может происходить ядерный синтез. Сопутствующий нагрев (например, посредством инъекции десятков мегаватт пучков нейтральных частиц высокой энергии H, D или T) необходим, чтобы увеличивать температуру до достаточно высоких значений, требуемых для возникновения ядерного синтеза и/или для поддержания тока плазмы.

Для того, чтобы обеспечить как можно большую компактность реактора (что делает возможной более высокую эффективность, в частности, при конфигурации плазмы "сферического токамака"), толщину радиационной защиты нужно уменьшить как можно больше, все еще обеспечивая надлежащую защиту для других компонентов. Минимизация расстояния между плазмой и катушками возбуждения предоставляет возможность более сильного магнитного поля в плазме с более низким током в катушках.

Фигура 1 показывает разрез центральной колонны и иллюстрирует те проблемы, которые должен преодолевать защитный материал. Центральная колонна содержит центральный сердечник из катушек 11 с высокотемпературным сверхпроводником (ВТСП) и внешний слой защиты 12. В зависимости от материала, используемого для защиты, на внешней поверхности может иметься слой окисленного защитного материала 13. Существуют три главные причины повреждения, которые возникают из-за плазмы 14. Во-первых, образовавшиеся по реакции термоядерного синтеза высокоэнергетические нейтроны 15 могут по сути выбивать атомы из структуры защиты, создавая каскады 16 повреждения, которые распространяются сквозь материал и ухудшают свойства материалов (такие как механические, термические или сверхпроводящие свойства). Во-

вторых, тепловой поток 17 от реакции термоядерного синтеза значителен и может повреждать защиту вследствие термических напряжений, привносимых неравномерным нагревом и ВТСП-сердечником, поскольку более высокая температура уменьшает ток, который может переноситься во время поддержания сверхпроводимости, и может вызывать резкое повышение сопротивления катушки, вызывая потерю сверхпроводимости магнита. Наконец, энергетические частицы плазмы будут вызывать абляцию 18 внешней поверхности защиты. Это не только вызывает повреждение в самой защите, но и может загрязнять плазму, если защита непосредственно подвергается ее воздействию. Желательно иметь защитный материал, который может сопротивляться этим эффектам, а также предотвращать достижение нейтронами сверхпроводящих катушек.

Существующие защитные конструкции также часто используют водяные каналы как для охлаждения защиты, так и для замедления нейтронов (что увеличивает эффективность защиты). Однако это порождает проблемы, поскольку с водой трудно обращаться во время размещения или технического обслуживания аппаратуры - вследствие рисков находящихся под давлением систем, загрязнения, активизации и испарения воды и возможности попадания воды из реактора в окружающую среду при неправильном обращении.

Следовательно, существует потребность в эффективной нейтронной защите, которая не требует воды для замедления.

#### Сущность изобретения

Согласно первому аспекту предлагается нейтронная защита. Нейтронная защита содержит множество поглощающих слоев и по меньшей мере один замедляющий слой. Каждый из множества поглощающих слоев содержит борид вольфрама или карбид вольфрама. Упомянутый по меньшей мере один замедляющий слой содержит гидрид металла. Каждый замедляющий слой находится между по меньшей мере двумя поглощающими слоями.

Согласно второму аспекту предлагается нейтронная защита. Нейтронная защита содержит гидрид металла. Гидрид металла содержит нейтронопоглощающий элемент, который:

имеет среднее сечение поглощения нейтронов, которое больше 0,1 барн в диапазоне энергии нейтронов между 0,02 и 0,03 эВ; и

имеет растворимость по меньшей мере 1 мол.% в твердой фазе со всеми другими металлами в сплаве.

"Среднее сечение поглощения нейтронов" является средним значением сечений поглощения нейтронов в указанном диапазоне всех изотопов этого присутствующего элемента (взвешенных по их численности). Распределение изотопов нейтронопоглощающего элемента может соответствовать их распространенности в природе, или же оно может быть неким другим распределением с требуемым средним сечением поглощения нейтронов.

Согласно третьему аспекту предлагается термоядерный реактор-токамак. Реактор

содержит тороидальную плазменную камеру, систему удержания плазмы и нейтронную защиту. Система удержания плазмы выполнена с возможностью создавать магнитное поле для обеспечения удержания плазмы во внутреннем пространстве плазменной камеры. Нейтронная защита является нейтронной защитой по первому или второму аспекту и размещена между внутренним пространством тороидальной плазменной камеры и системой удержания плазмы.

Дополнительные варианты осуществления представлены в пункте 2 и последующих пунктах формулы изобретения.

#### Краткое описание чертежей

Фигура 1 иллюстрирует нейтронную защиту центральной колонны токамака и проблемы ее конструкции;

Фигура 2 является схематичной иллюстрацией примерного нейтронозащитного экрана;

Фигура 3 является схематичной иллюстрацией еще одного примерного нейтронозащитного экрана;

Фигура 4 является схематичной иллюстрацией плазменной камеры токамака.

#### Подробное описание изобретения

Эффективный, компактный радиационный экран для уменьшения поглощаемой в чувствительных материалах дозы облучения, происходящего от источника высокоэнергетических нейтронов (таких как в центральной колонне сферического токамака), требует сочетания элементов с большим атомным номером  $Z$  (атомной массой) и элементов с малым  $Z$  в объемных материалах. Высокоэнергетические нейтроны с кинетическими энергиями больше нескольких МэВ эффективно замедляются по двум главным механизмам: во-первых, посредством ядерных реакций неупругого рассеяния с ядрами с большим  $Z$  и, во-вторых, посредством упругого рассеяния с ядрами с малым  $Z$ . После неупругого рассеяния энергии вторичных нейтронов типично ниже пороговых энергий реакции для последующих ядерных реакций неупругого рассеяния с элементами с большим  $Z$ , и поэтому они могут быть эффективно замедлены только посредством элементов с малым  $Z$ . Поэтому сочетание элементов с большим  $Z$  и малым  $Z$  может быть использовано для уменьшения потока высокоэнергетических нейтронов, попадающего на чувствительные материалы за защитным экраном.

Эффективный экран для защиты от высокоэнергетических нейтронов требует четырех основных секций, в порядке от источника нейтронов до защищаемых объектов:

- материал, содержащий элементы с большой атомной массой, чтобы понизить энергию нейтронов из плазмы (особенно материал с большим сечением для реакций неупругого рассеяния или размножения нейтронов);
- замедлитель нейтронов (т.е. материал, содержащий элементы с малой атомной массой), чтобы дополнительно замедлять нейтроны до оптимальных энергий сечения;
- поглотитель нейтронов, чтобы поглощать замедленные нейтроны;
- гамма-защитный экран, чтобы поглощать гамма-лучи, полученные при

взаимодействиях нейтронов на более ранних стадиях.

Если единственный материал или композитный материал может выполнять несколько функций, например, в качестве поглотителя нейтронов и гамма-защитного экрана, то две или более секции могут быть объединены.

В традиционной защите замедлителем нейтронов часто является вода, что требует аккуратного обращения для утилизации и безопасности, как описано выше.

Вольфрам является идеальным выбором в качестве составляющего элемента с большим  $Z$  для первой стадии, благодаря своему большому атомному номеру  $Z$  (74) и своей типично большой массе и численной плотности в устойчивых соединениях, по сравнению с другими элементами с большим  $Z$ , такими как свинец. Бориды вольфрама особенно благоприятны для применений в защите, поскольку они добавляют бор в качестве составляющего элемента нейтронозащитного экрана; бор является эффективным поглотителем нейтронов с низкими энергиями, предотвращающим проникновение низкоэнергетических нейтронов через защитный экран. Кроме того, вольфрам является эффективным поглотителем гамма-излучения. По существу, бориды вольфрама могут действовать в качестве всех вышеупомянутых секций, за исключением замедлителя нейтронов (поскольку бор не имеет значительного замедляющего эффекта по сравнению, например, с водородом). Карбиды вольфрама также являются благоприятными для применения в защите, поскольку углерод обеспечивает замедление энергетических нейтронов, хоть и не так эффективно как, например, водород - по существу, они могут быть использованы для всех вышеупомянутых секций, но будут в целом превосходить водородсодержащие материалы в качестве замедлителей или боридов вольфрама в качестве поглотителей нейтронов.

Водород является идеальным замедлителем нейтронов ниже нескольких МэВ и доступен в качестве составляющего элемента многих потенциальных материалов. Однако, самые распространенные, вода и углеводороды, являются проблематичными при встраивании в термоядерную энергетическую установку. Гидриды металлов сравнимы с точки зрения плотности водорода с водой и углеводородами, но остаются твердыми при значительно более высоких температурах, чем вода или типичные углеводороды, при комнатном давлении. Это предоставляет возможность более легкого проектирования конструкций нейтронной защиты (поскольку твердые компоненты легче объединять по сравнению с жидкими компонентами) и приводит в результате к более легкому техническому обслуживанию и выводу из эксплуатации (поскольку существует более низкий риск утечки твердых компонентов).

По существу, композитный защитный экран, как показано на фигуре 2, который является "сэндвичем" из боридов вольфрама и гидрида металла, с двумя слоями 201, 203 боридов вольфрама и слоем 202 гидрида металла между ними, является очень эффективным в качестве нейтронозащитного экрана, предназначенного для защиты чувствительных компонентов 204 от нейтронного облучения 205. Фактически, многослойный защитный экран с чередующимися слоями боридов вольфрама (или карбида

вольфрама) и гидрида металла, с боридом вольфрама (или карбидом вольфрама) в качестве радиально внешних слоев, будет обычно эффективным.

Борид вольфрама может быть предусмотрен в различных формах, например, как цементированный борид вольфрама (частицы бориды вольфрама в металлической матрице), спеченный борид вольфрама или как сплав с металлическим вольфрамом и/или другими элементами, и т.д. Может быть использовано любое из соединений бориды вольфрама, как требуется конкретными конструктивными соображениями применения в защитном экране. Одним перспективным подходом является двухфазная структура вольфрама с  $W_2B$ , которая может быть сформирована в известном процессе, подразумевающим вакуумное горячее прессование чистого вольфрама с нитридом бора, дающим материал с полезными термическими и механическими свойствами.

Карбид вольфрама может также быть предусмотрен в различных формах, например, как цементированный карбид вольфрама (частицы карбида вольфрама в металлической матрице) или как металло-керамический карбид вольфрама (кермет), реактивно спеченный карбид/борид вольфрама или монолитный карбид вольфрама.

Потенциальные гидриды металлов для использования в качестве замедлителя включают гидрид лития ( $LiH_x$ ), гидрид гафния ( $HfH_x$ ), гидрид иттрия ( $YH_x$ ) и гидрид циркония ( $ZrH_x$ ) или их сочетания. В каждом случае гидрид был идентифицирован с помощью химической формулы самого распространенного соединения, но могут быть использованы и другие гидриды (или их сочетания, или сплавы с чистым металлом). Точное отношение  $x$  водорода к металлу может быть выбрано на основе степени требуемого замедления, требуемых структурных свойств и будет в общем составлять между 0,1 и 4, или между 1 и 2. Значение 1,33 было использовано в моделирующем испытании нейтронной защиты.

Борид вольфрама будет обычно составлять большую часть защиты, с суммарной толщиной слоев бориды вольфрама, составляющей между 75% и 99% суммарной толщины бориды вольфрама и гидрида металла, более конкретно – между 80% и 95% суммарной толщины бориды вольфрама и гидрида металла. Слой 201 бориды вольфрама, обращенный к источнику нейтронов (т.е. один из внешних слоев бориды вольфрама), может составлять между 30% и 90% суммарной толщины бориды вольфрама и гидрида металла, более конкретно – между 40% и 80% их суммарной толщины. Хотя слой 201 изображен на фигуре 2 как единственный слой, он может быть построен из множества отдельных слоев. Один из других слоев бориды вольфрама (т.е. тот слой, где слой гидрида металла находится между этим слоем и обращенным к нейтронам слоем, в общем, конечный слой 203) может составлять по меньшей мере 10% суммарной толщины бориды вольфрама и гидрида металла. Будет понятно, что верхний предел толщины других слоев бориды вольфрама определяется разницей между суммарной толщиной бориды вольфрама и толщиной бориды вольфрама в обращенном к нейтронам слое.

В любом вышеприведенном обсуждении борид вольфрама (WB) может быть заменен карбидом вольфрама (WC) или сочетанием бориды вольфрама и карбида

вольфрама.

Также могут хорошо работать конструкции с дополнительными слоями  $HfH_x$  и WB, например, с множественными слоями  $HfH_x$ , каждый из которых разделен слоями WB или WC, и имеющие слои WB или WC в качестве радиально внешних слоев. Аналогичные составы будут, как ожидается, хорошо работать в случае других гидридов металлов.

Моделирования слоистой WB- $HfH_x$ -WB защиты (с  $x=1,33$ ) обеспечили защиту, которая была вплоть до 5 раз более эффективной (т.е. привела в результате к в 5 раз меньшему энергетическому воздействию на нижележащие компоненты), чем контрольная защита из карбида вольфрама и воды той же суммарной толщины. Ее корректирование для практически получаемых материалов борида вольфрама и гидрида гафния (а не чистого  $HfH_x$  или конкретного состава борида вольфрама, используемого в моделировании) дало аналогичные результаты.

Слои борида или карбида вольфрама могут быть сформированы из композитных материалов, содержащих борид или карбид вольфрама, например, кермет с частицами борида или карбида вольфрама в металлической матрице. Дополнительно, как обсуждалось ранее, слой борида/карбида вольфрама может содержать смесь борида или карбида вольфрама, которая может быть композитным материалом с некоторым другим материалом (например, керметом, имеющим как борид вольфрама, так и карбид вольфрама в виде агрегатов).

Аналогично, слой или слои гидрида металла могут быть сформированы из композитных материалов, содержащих гидрид металла, например, плакированный металлом слой гидрида металла. Слои гидрида металла могут содержать гидриды множества металлов в сплаве. Это предоставляет преимущество в том, что кривая термического разложения гидрида сплава (т.е. количество водорода, высвободившегося из материала при температуре) будет иметь более широкий температурный профиль, предоставляя возможность каким-либо системам, предназначенным поглощать или удалять получившийся в результате термического разложения водород, более легко принимать водород. В качестве примера, слои гидрида металла могут содержать любое сочетание металлов, известных как образующие друг с другом твердые растворы с объемно-центрированной кубической структурой, например, металлов, находящихся в группах 4, 5 и 6 Периодической таблицы (таких как гафний, ниобий, тантал, титан, вольфрам и цирконий), и/или иттрий, гадолиний, бериллий и уран.

Одной возможностью является использование структуры наподобие "высокоэнтропийного сплава", которая имеет несколько (например, по меньшей мере 5) различных металлов, с атомными долями (т.е. числом атомов этого металла, деленным на суммарное число атомов металлов в гидриде) от 5% до 50% (или 5%-30%) для каждого металла, так что ни один металл не доминирует в свойствах материала. Как и с гидридами единственного металла, отношение атомов водорода к (суммарному) числу атомов металла в гидриде может составлять между 0,1 и 4, более предпочтительно – между 1 и 2.

Когда рассматривается возможность композитных материалов, материалы с

"карбидом и/или боридом вольфрама" могут называться "поглощающими слоями", а "слои гидрида металла" могут называться "замедляющими слоями". Хотя будет понятно, что эти обозначения не следует воспринимать как ограничивающие функцию того или иного слоя - в зависимости от состава некоторое замедление может иметь место в поглощающем слое и наоборот. Обозначения, главным образом, служат для исключения какой-либо путаницы, которая может подразумевать, что, например, слой борида вольфрама должен быть чисто боридом вольфрама.

Защитный экран может быть непрерывным (как показано на фигуре 2), т.е. с прилегающими друг к другу слоями борида вольфрама и гидрида металла. Альтернативно, как показано на фигуре 3, могут присутствовать каналы 301, 302 для хладагента или другие элементы (например, датчики температуры, излучения и/или механического напряжения) между слоями борида 310 вольфрама и гидрида 320 металла, или в одном или более из этих слоев. Каналы для хладагента могут быть выполнены с возможностью нести жидкий или газообразный хладагент (в качестве хладагента может быть использована вода, и защитный экран будет все еще предоставлять полезную альтернативу существующим конструктивным решениям, даже если не будет достигнуто исключение воды из экрана).

Максимальная рабочая температура защиты будет обычно определяться температурой термического разложения гидрида металла (т.е. температурой, при которой гидрид металла будет частично разлагаться и высвобождать водород). Фактическая рабочая температура может быть слегка выше температуры термического разложения, поскольку некоторое высвобождение водорода может быть дозволено техническим обоснованием безопасности эксплуатации реактора. Инкапсуляция гидрида металла нержавеющей сталью или аналогичным может быть использована для того, чтобы предотвращать высвобождение водорода в систему реактора. Для применений с низкой или неустановившейся нейтронной нагрузкой, таких как термоядерные реакторы с длительностью импульса менее 10 секунд, непосредственное охлаждение защиты, как правило, не потребуется (хотя может быть предусмотрено в качестве меры предосторожности). В применениях с устойчивой высокой нейтронной нагрузкой охлаждение потребуется для того, чтобы поддерживать защиту ниже температур термического разложения используемого гидрида металла. В общем, для гидрида гафния и гидрида иттрия, температура должна поддерживаться ниже примерно 600°C, для гидрида циркония температура должна поддерживаться ниже примерно 300°C, а для гидрида лития температура должна поддерживаться ниже примерно 200°C.

Охлаждение может быть обеспечено посредством каналов для хладагента в защите (как описано кратко выше) или посредством проведения тепла в каналы для хладагента снаружи слоев защиты.

Фигура 4 показывает плазменную камеру токамака для использования в качестве термоядерного реактора, которая содержит плазменный сосуд 41 и магнитную систему 42 удержания плазмы, предназначенную для обеспечения удержания плазмы 43. Токамак



также содержит нейтронную защиту 44, 45, расположенную между плазменным сосудом и магнитной системой удержания плазмы, в секции 44 нейтронной защиты центральной колонны и секции 45 внешней защиты.

Хотя вышесказанное было главным образом направлено на многослойный защитный экран, аналогичные принципы могут быть применены для обеспечения однослойного нейтронозащитного экрана, содержащего гидриды металлов. Например, может быть предусмотрен нейтронозащитный экран, который содержит нейтронопоглощающий и замедляющий материал, который является гидридом металлического сплава, содержащего по меньшей мере один нейтронопоглощающий элемент. В терминах этого раскрытия "нейтронопоглощающий элемент" имеет среднее сечение поглощения нейтронов, которое больше 0,1 барн в диапазоне энергии нейтронов между 0,02 и 0,03 эВ. "Среднее сечение поглощения нейтронов" является средним значением сечений поглощения нейтронов в указанном диапазоне всех изотопов этого присутствующего элемента (взвешенных по их численности). Распределение изотопов нейтронопоглощающего элемента может соответствовать их распространенности в природе, или же оно может быть неким другим распределением с требуемым средним сечением поглощения нейтронов. Подходящие элементы для сплава являются теми же, что и элементы, обсуждавшиеся выше для гидрида металла в многослойном решении. Подходящие нейтронопоглощающие элементы включают гафний, вольфрам, бор, диспрозий и гадолиний (которые все подходят при своем естественном изотопном составе, но могут использоваться с другим изотопным составом).

Доля нейтронопоглощающего элемента может составлять по меньшей мере 5 мол.%. Отношение водорода к другим элементам в таком материале составляет между 0,1 и 4, более предпочтительно – между 1 и 2. Материал может быть высокоэнтропийным сплавом, содержащим по меньшей мере 5 элементов, отличных от водорода (по меньшей мере один из которых является сильно нейтронопоглощающим элементом), причем каждый из неводородных элементов составляет между 5 мол.% и < 50 мол.% сплава (по атомной доле, исключая водород). Материал может быть гидридом нейтронопоглощающего элемента.

Такой материал может также быть использован как часть многослойного защитного экрана, например, экрана, содержащего нейтронопоглощающий и замедляющий материал в дополнение к другим материалам, которые поглощают или замедляют нейтроны, или экрана, содержащего нейтронопоглощающий и замедляющий материал и оболочку или аналогичный защитный слой.

Материал может быть градиентным, так что его состав варьируется по его толщине. Например, может иметься более высокая доля нейтронопоглощающего материала ближе к радиально внешним поверхностям нейтронной защиты и более высокая доля водорода ближе к радиально внутренним поверхностям нейтронной защиты.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Нейтронная защита, содержащая:
  - множество поглощающих слоев, каждый из которых содержит борид вольфрама или карбид вольфрама; и
  - по меньшей мере один замедляющий слой, содержащий гидрид металла;
  - при этом каждый замедляющий слой находится между по меньшей мере двумя поглощающими слоями.
2. Нейтронная защита по пункту 1, при этом гидрид металла содержит один или более металлов из групп 4, 5 и 6 из Периодической таблицы и/или иттрий, бериллий, гадолиний или уран.
3. Нейтронная защита по пункту 2, при этом гидрид металла содержит один или более из гафния, ниобия, тантала, титана, иттрия и циркония.
4. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, при этом гидрид металла содержит по меньшей мере 5 металлов, причем каждый металл имеет атомную долю от 5 мол.% до 50 мол.% по сравнению с суммарным числом атомов металлов в гидриде металла.
5. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, при этом гидрид металла имеет отношение атомов водорода к атомам металла между 0,1 и 4, более предпочтительно – между 1 и 2.
6. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, при этом каждый поглощающий слой содержит сплав металлического вольфрама и борида и/или карбида вольфрама.
7. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, при этом суммарная толщина поглощающих слоев составляет по меньшей мере 75% общей совокупной толщины поглощающих слоев и замедляющих слоев, более предпочтительно между 80% и 95%.
8. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, при этом внешний поглощающий слой имеет толщину, которая составляет между 30% и 90% общей совокупной толщины поглощающих слоев и замедляющих слоев, более предпочтительно между 40% и 80%, причем защита выполнена так, что внешний поглощающий слой обращен к источнику нейтронов.
9. Нейтронная защита по пункту 8, при этом дополнительный поглощающий слой, который не является внешним поглощающим слоем, имеет толщину, которая составляет по меньшей мере 10% общей совокупной толщины поглощающих слоев и замедляющих слоев.
10. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, содержащая каналы для хладагента, расположенные между поглощающими слоями и замедляющими слоями.
11. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, содержащая каналы для хладагента, встроенные в один или более из поглощающих слоев и/или замедляющих слоев.

12. Нейтронная защита, содержащая гидрид металла, содержащий нейтронопоглощающий элемент, который:

имеет среднее сечение поглощения нейтронов, которое больше 0,1 барн в диапазоне энергии нейтронов между 0,02 и 0,03 эВ; и

имеет растворимость по меньшей мере 1 мол.% в твердой фазе со всеми другими металлами в сплаве.

13. Нейтронная защита по пункту 12, при этом гидрид металла содержит один или более металлов из групп 4, 5 и 6 из Периодической таблицы и/или иттрий, бериллий, гадолиний или уран.

14. Нейтронная защита по пункту 13, при этом нейтронопоглощающий элемент является одним из:

гафния;

вольфрама;

бора;

диспрозия; или

гадолиния.

15. Узел, содержащий нейтронную защиту по пункту 10 или 11 и источник хладагента, соединенный с каналами для хладагента, при этом источник хладагента выполнен с возможностью поддерживать нейтронную защиту при температуре ниже температуры разложения гидрида металла.

16. Термоядерный реактор-токамак, содержащий:

тороидальную плазменную камеру;

систему удержания плазмы, выполненную с возможностью создавать магнитное поле для обеспечения удержания плазмы во внутреннем пространстве плазменной камеры;

нейтронную защиту по любому из пунктов 1-14, размещенную между внутренним пространством тороидальной плазменной камеры и системой удержания плазмы.

17. Термоядерный реактор-токамак по пункту 16, при этом нейтронная защита является нейтронной защитой по пункту 10 или 11 и содержит источник хладагента, соединенный с каналами для хладагента, при этом источник хладагента выполнен с возможностью поддерживать нейтронную защиту при температуре ниже температуры разложения гидрида металла.

## ИЗМЕНЕННАЯ ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ (ст.34 РСТ)

1. Нейтронная защита, содержащая:

множество поглощающих слоев, каждый из которых содержит борид вольфрама или карбид вольфрама; и

по меньшей мере один замедляющий слой, содержащий гидрид металла;

при этом каждый замедляющий слой находится между по меньшей мере двумя поглощающими слоями;

выполненная так, что при применении самый внешний поглощающий слой расположен между смежным замедляющим слоем и источником нейтронов.

2. Нейтронная защита по пункту 1, при этом гидрид металла содержит один или более металлов из групп 4, 5 и 6 из Периодической таблицы и/или иттрий, бериллий, гадолиний или уран.

3. Нейтронная защита по пункту 2, при этом гидрид металла содержит один или более из гафния, ниобия, тантала, титана, иттрия и циркония.

4. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, при этом гидрид металла содержит по меньшей мере 5 металлов, причем каждый металл имеет атомную долю от 5 мол.% до 50 мол.% по сравнению с суммарным числом атомов металлов в гидриде металла.

5. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, при этом гидрид металла имеет отношение атомов водорода к атомам металла между 0,1 и 4, более предпочтительно – между 1 и 2.

6. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, при этом каждый поглощающий слой содержит сплав металлического вольфрама и борида и/или карбида вольфрама.

7. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, при этом суммарная толщина поглощающих слоев составляет по меньшей мере 75% общей совокупной толщины поглощающих слоев и замедляющих слоев, более предпочтительно между 80% и 95%.

8. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, при этом самый внешний поглощающий слой имеет толщину, которая составляет между 30% и 90% общей совокупной толщины поглощающих слоев и замедляющих слоев, более предпочтительно между 40% и 80%.

9. Нейтронная защита по пункту 8, при этом дополнительный поглощающий слой, который не является самым внешним поглощающим слоем, имеет толщину, которая составляет по меньшей мере 10% общей совокупной толщины поглощающих слоев и

замедляющих слоев.

10. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, содержащая каналы для хладагента, расположенные между поглощающими слоями и замедляющими слоями.

11. Нейтронная защита по любому предшествующему пункту, содержащая каналы для хладагента, встроенные в один или более из поглощающих слоев и/или замедляющих слоев.

12. Узел, содержащий нейтронную защиту по пункту 10 или 11 и источник хладагента, соединенный с каналами для хладагента, при этом источник хладагента выполнен с возможностью поддерживать нейтронную защиту при температуре ниже температуры разложения гидрида металла.

13. Термоядерный реактор-токамак, содержащий:

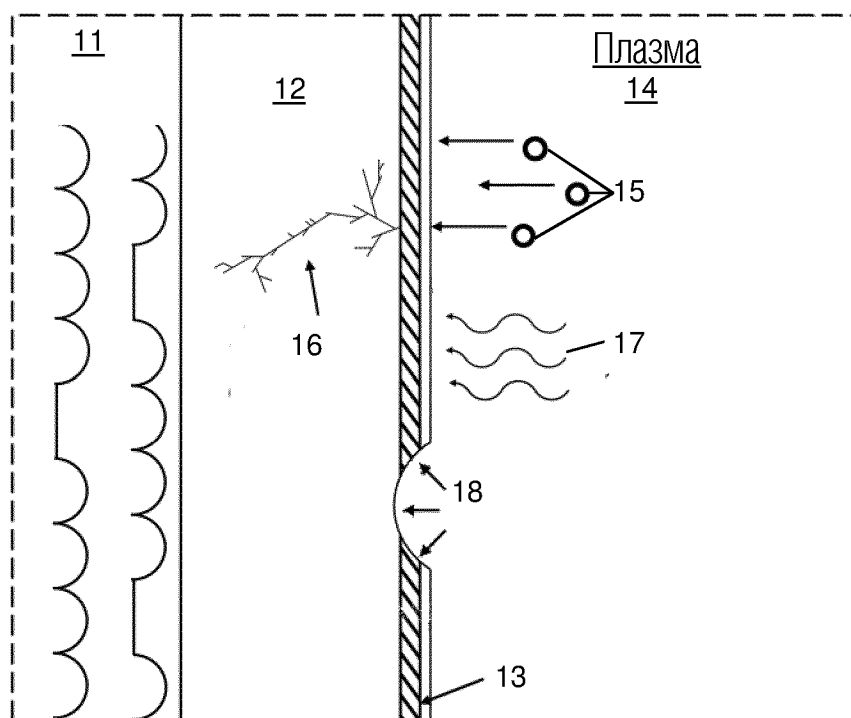
тороидальную плазменную камеру;

систему удержания плазмы, выполненную с возможностью создавать магнитное поле для обеспечения удержания плазмы во внутреннем пространстве плазменной камеры;

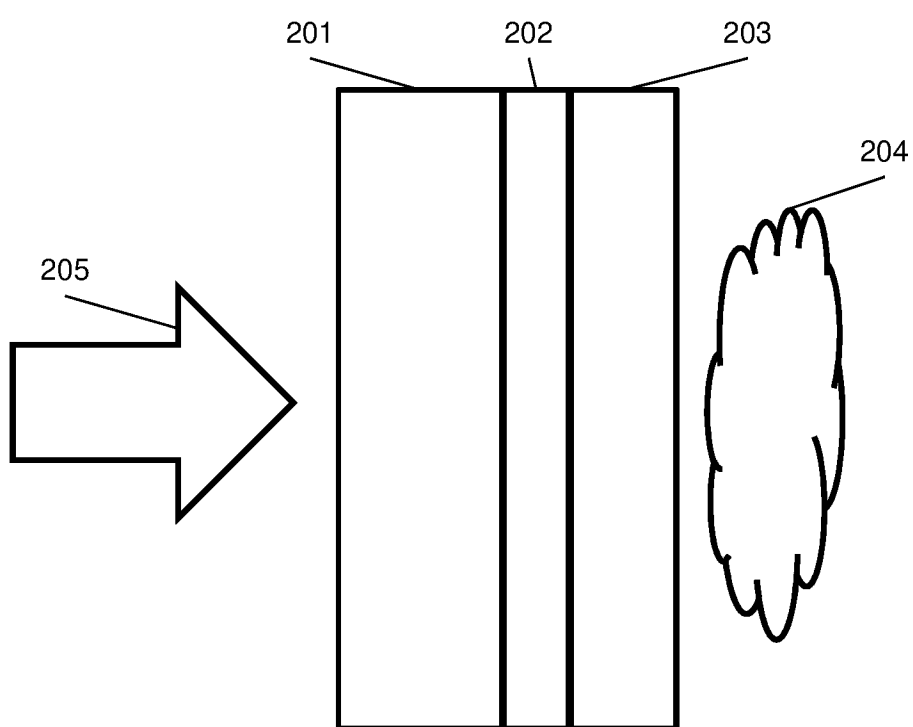
нейтронную защиту по любому из пунктов 1-11, размещенную между внутренним пространством тороидальной плазменной камеры и системой удержания плазмы, так что самый внешний слой обращен к внутреннему пространству тороидальной плазменной камеры.

14. Термоядерный реактор-токамак по пункту 13, при этом нейтронная защита является нейтронной защитой по пункту 10 или 11 и содержит источник хладагента, соединенный с каналами для хладагента, при этом источник хладагента выполнен с возможностью поддерживать нейтронную защиту при температуре ниже температуры разложения гидрида металла.

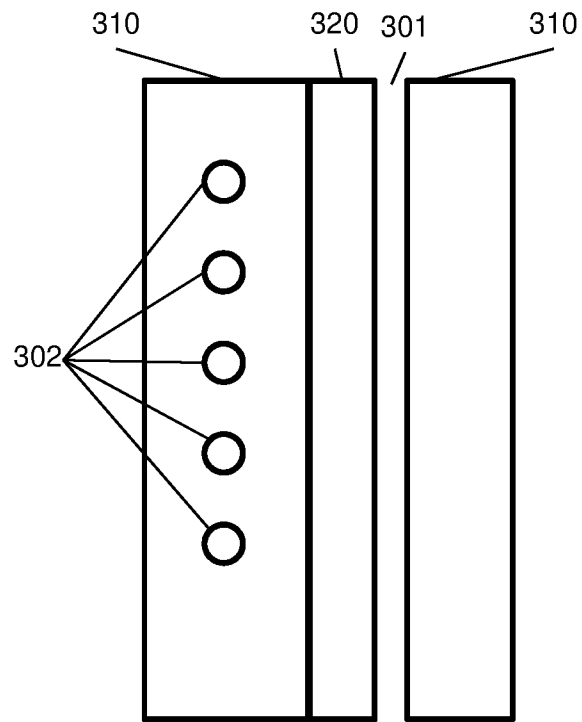
1/2



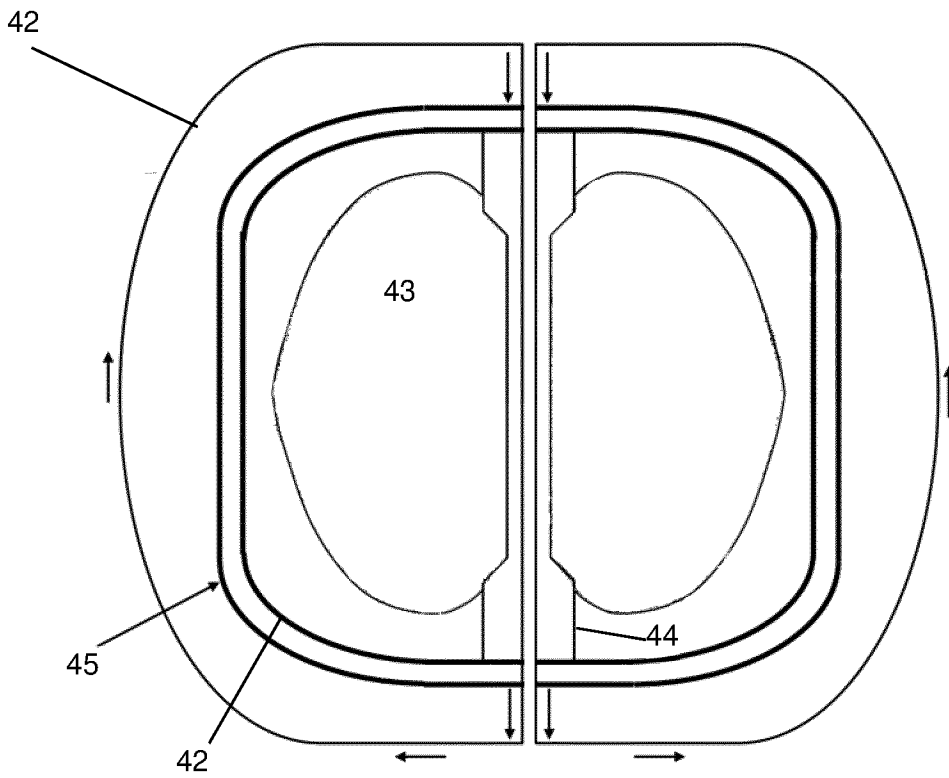
ФИГ. 1



ФИГ. 2



ФИГ. 3



ФИГ. 4