

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **040189**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.04.28

(21) Номер заявки
202190682

(22) Дата подачи заявки
2019.09.05

(51) Int. Cl. **G21C 1/28** (2006.01)
G21G 1/06 (2006.01)
G21G 1/08 (2006.01)

(54) **СИСТЕМЫ И СПОСОБЫ ДЛЯ ПРИВОДИМОЙ В ДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРОМ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ТРАНСМУТАЦИИ НА ОСНОВЕ ЖИДКОЙ ФАЗЫ**

(31) **62/727,413; 62/774,427; 62/876,999**

(32) **2018.09.05; 2018.12.03; 2019.07.22**

(33) **US**

(43) **2021.08.31**

(86) **PCT/US2019/049820**

(87) **WO 2020/051376 2020.03.12**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ТАЭ ТЕКНОЛОДЖИЗ, ИНК. (US)

(72) Изобретатель:
Тадзима Тосики, Некас Алес (US)

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

(56) US-A1-20090147906
US-A1-20120164063
US-A1-20150098544
US-A1-20130142296
GOHAR Y.: "Fusion option to dispose of spent nuclear fuel and transuranic elements." No. ANL/TD/TM-00-09. Argonne National Lab., 2000. pg 4, 5, 12 [online] URL < https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/042/31042107.pdf >

(57) Системы и способы, способствующие трансмутации долгоживущих радиоактивных трансурановых отходов в короткоживущие радиоактивные нуклиды или стабильные нуклиды с использованием предымпulseных лазеров для облучения углеродных нанотрубок (УНТ), насыщенных тритием, с получением ионизованного газа углерода и трития и создаваемого лазером пучка частиц для вступления в реакцию ядерного синтеза с тритием и генерации нейтронов.

040189

B1

040189

B1

Область изобретения

Объект изобретения, описанный в настоящем документе, в целом относится к системам и способам, которые способствуют генерации энергетических нейтронов с высокой скоростью посредством создаваемого лазером пучка в целях трансмутации долгоживущих отходов с высоким уровнем радиоактивности (трансураниевых и продуктов деления) в короткоживущие радиоактивные нуклиды или стабильные нуклиды, а точнее, для подкритической жидкофазной трансмутации радиоактивных отходов.

Предпосылки изобретения

Ядерные реакторы деления генерируют постоянный поток радионуклидов отработанного топлива: только в США требуется утилизация 90000 метрических тонн [ссылка 1], а к 2020 мировые запасы отработанного ядерного топлива достигнут 200000 метрических тонн при ежегодном добавлении 8000 тонн. Во Франции ядерная энергия составляет 77% от всей электроэнергии, что делает потребность в трансмутации особенно острой. В настоящее время нет надлежащих и адекватных средств, пригодных для обработки этих изотопных радиоактивных материалов, помимо глубокого захоронения в земле. Разработка таких средств для обработки изотопных радиоактивных материалов требует решения двух задач: во-первых, разработки простых, надежных, безопасных и недорогих способов отделения высокорadioактивных изотопов от остальных материалов во избежание активации нерадиоактивного материала путем трансмутации; а, во-вторых, разработки безопасного, недорогого, энергоэффективного, универсального способа трансмутации.

Современные подходы к трансмутации радионуклидов включают в себя драйверы, которые поддерживают подкритический реактор деления с помощью внешних средств: один из них основан на приводимой в действие ускорителем системе (ADS, accelerator driven system) [ссылка 2], а другой - на приводимой в действие токамаком системе [ссылка 3]. В ADS-системах используется высокоэнергетический (~1 ГэВ) пучок протонов, падающий на подложку (например, Pb, W) и выбивающий нейтроны (30+ нейтронов на протон). Затем эти нейтроны поддерживают деление в подкритическом реакторе. Система на основе токамака генерирует нейтроны из-за реакций дейтерия-трития и использует эти нейтроны для приведения в действие подкритического реактора, также называемого гибридным реактором деления-синтеза.

Также существуют и другие подходы к трансмутации ядерных отходов на основе подкритического режима работы, например MOSART [ссылка 4], а также различные подходы с использованием реакторов IV поколения.

По этим и другим причинам существует потребность в усовершенствованных системах, устройствах и способах, способствующих генерации энергетических нейтронов с высокой скоростью посредством создаваемого лазером пучка с целью подкритической жидкофазной трансмутации радиоактивных отходов.

Сущность изобретения

Различные варианты осуществления, представленные в настоящем документе, в основном относятся к системам и способам, способствующим трансмутации долгоживущих отходов с высоким уровнем радиоактивности посредством генерируемых ядерным синтезом нейтронов в короткоживущие радиоактивные нуклиды (радионуклиды) или стабильные нуклиды. Нейтроны генерируют путем реакции ядерного синтеза между пучком дейтерия и либо тритиевыми, либо дейтериевыми мишенями, тогда как пучок дейтерия лазерно ускоряется основным лазером с использованием процесса, известного как когерентное ускорение ионов лазером (CAIL) [ссылка 6, RAST].

В примерных вариантах осуществления в процессе трансмутации используется подкритический способ эксплуатации с использованием компактного устройства для трансмутации радиоактивных изотопов (в основном изотопов низших актиноидов (НА)), осуществляемый в резервуаре, содержащем сжиженный раствор смеси компонентов отходов отработанного топлива (таких как продукты деления (ПД) и НА), растворенных в растворе расплавленных солей LiF-BeF₂ (FLiBe) [ссылка 5]. Трансмутацию НА осуществляют с помощью энергетических нейтронов, полученных в результате реакции ядерного синтеза, приводимой в действие лазером. Мониторинг и управление в режиме реального времени содержанием FLiBe, НА и ПД в трансмутаторе выполняют с помощью активной лазерной спектроскопии или приводимого в действие лазером источника гамма-излучения.

В дополнительных примерных вариантах осуществления мишень образована из углеродных нанотрубок, насыщенных тритием.

В дополнительных примерных вариантах осуществления дейтериевые или тритиевые мишени представляют собой ионизованный лазером газ с плотностью, почти равной плотности твердого тела. Для формирования этих мишеней предимпульсный лазер (до основного лазера) ионизирует мишень [ссылки 7 и 8]. Пока мишень остается с плотностью твердого тела, ускоренные посредством CAIL дейтроны вступают в реакцию ядерного синтеза (сливаются) с тритием или дейтерием.

В дополнительных примерных вариантах осуществления резервуар для трансмутации поддерживают в подкритическом состоянии в течение всего времени. Подкритический режим создает нагрузку на источники нейтронов, тогда как энергетические нейтроны производятся в тесно связанной конструкции:

(1) путем облучения нанометровой фольги, состоящей из алмаза и дейтрона, с образованием пучка дейтерия посредством процесса САП;

(2) инъекции ускоренного дейтерия в нанометрически "пенистую" насыщенную тритием мишень, синхронно и динамически ионизируемую предимпульсным лазером.

Преимущества примерных вариантов осуществления генерируемых лазером нейтронов включают:

a) малый размер создаваемых лазером пучков ионов и их мишеней;

b) тонкое управление нейтронами: временное, а также пространственное. Все топливо (НА) находится в пределах одной длины свободного пробега при делении источника нейтронов;

c) высокую частоту следования импульсов лазера;

d) высокий КПД лазера от розетки, составляющий 30%.

В примерных вариантах осуществления архитектура лазера, как описано в предыдущем абзаце, выполнена для обеспечения импульсов, например, с энергией импульса <10 фс, составляющей 10 мДж, по размеру пятна 20 мкм, что приводит к оптимальному $a_0=0,5$. Импульс накачки для оптического параметрического усиления чирпированного импульса (от англ. optical parametric chirped-pulse amplification, OPCPA) будет обеспечиваться лазером с сетью когерентного усиления (от англ. coherent amplification network, CAN), позволяющим обеспечивать очень высокую частоту следования импульсов накачки до 100 кГц. Фемтосекундные импульсы производятся фемтосекундным генератором, выдающим более миллиона импульсов в секунду. После генератора импульсы улавливаются с желаемой частотой до 100 кГц, а затем растягиваются до нескольких наносекунд. После растягивания импульс усиливается в криогенной системе OPCPA до уровня десятков мегаджоулей. Криогенная система OPCPA предпочтительно демонстрирует крайне высокую теплопроводность, сопоставимую с медью, что необходимо для отвода десятков киловатт тепловой нагрузки, производимой в ходе процесса оптического параметрического усиления. При спектральной ширине полосы, соответствующей импульсу менее 10 фс, импульс можно легко растягивать примерно до одной наносекунды и усиливать путем оптического параметрического усиления до 10 мДж. В этом процессе импульс смешивается с импульсом накачки, подаваемым системой CAN, с длительностью примерно нс и энергией >10 мДж. Усиленный чирпированный импульс затем сжимается обратно до его исходного значения <10 фс.

В различных вариантах осуществления, предусмотренных в настоящем документе, трансмутация отходов с низким уровнем радиоактивности (от англ. low-level radioactive waste, LLRW) происходит в жидком состоянии, тогда как LLRW растворены в солевом расплаве фторида лития-фторида бериллия (FLiBe).

В различных вариантах осуществления, предусмотренных в настоящем документе, установка трансмутации функционирует в подкритическом режиме, тогда как для приведения в действие трансмутации в течение всего времени требуется источник нейтронов.

В некоторых примерных вариантах осуществления лазерный мониторинг путем лазерной спектроскопии осуществляют с помощью лазера CAN [ссылка 12].

В дополнение, для отслеживания содержания и поведения изотопов НА и ПД в резервуарах в режиме реального времени предусмотрен приводимый в действие лазером источник гамма-излучения (обычно называемого лазерным комптоновским гамма-излучением).

Дополнительный вариант осуществления направлен на двухрезервуарную стратегию для снижения общей стоимости нейтронов, причем один резервуар находится в критическом, а другой - в подкритическом режиме. Два резервуара содержат два соединенных между собой комплекта резервуаров. Первый резервуар или комплект резервуаров предпочтительно содержит смесь Pu и низших актиноидов (НА), включая негтуний, америций и кюрий (Np, Am, Cm), тогда как второй резервуар или комплект резервуаров содержит лишь смесь низших актиноидов (НА). Поскольку первый резервуар или комплект резервуаров находится при критическом режиме ($k_{эфф} = 1$), внешний источник нейтронов не нужен. Кроме того, первый резервуар или комплект резервуаров снабжается топливом с использованием отработанного ядерного топлива (Pu и НА) после химического удаления продуктов деления. В первом резервуаре или в комплекте резервуаров используют быстрые нейтроны (нейтроны ядерного синтеза в дополнение к незамедленным нейтронам деления с энергией >1 МэВ) для трансмутации низших актиноидов (НА) и плутония (Pu), при этом концентрации кюрия (Cm) повышена. В качестве альтернативы, небольшое количество нейтронов может быть инжескировано в первый резервуар или комплект резервуаров для запуска сжигания Pu.

В дополнительном варианте осуществления стенки первого и второго резервуара или комплекта резервуаров изготовлены из материалов на основе углерода, таких как, например, алмаз. Для защиты стенок от химической эрозии и коррозии соли, прилегающей к стенке (обращенной к солевому расплаву), позволяют затвердеть, предотвращая непосредственный контакт солевого расплава со стенками.

В дополнительном варианте осуществления описанные выше варианты трансмутатора можно применить в способах и процессах восстановления диоксида углерода, таких как предполагающие его использование в качестве теплоносителя и генерацию из него синтетического топлива, чтобы иметь

полностью отрицательный показатель высвобождения углерода. В следующем примерном варианте осуществления синтетическое топливо (CH_4 - метан) может быть сгенерировано по реакции $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ (реакция Сабатье), для которой требуется $200\text{--}400^\circ\text{C}$ и присутствие катализатора, например, Ni, Cu, Ru. CO_2 можно извлекать из атмосферы, океана или получать путем непосредственного улавливания CO_2 в источнике выброса, таком как автомобили, здания, вытяжные или дымовые трубы. Диапазон рабочих температур трансмутатора с соевым расплавом составляет $250\text{--}1200^\circ\text{C}$, а значит, он идеально подходит для непрерывного обеспечения необходимой температуры, требуемой для протекания реакции Сабатье с получением метана, и для обеспечения эффективного пути стабилизации и снижения концентрации CO_2 в атмосфере и океане.

Другие системы, устройства, способы, признаки и преимущества объекта изобретения, описанного в настоящем документе, будут или станут ясными специалисту в данной области техники при изучении следующих фигур и подробного описания. Предполагается, что все такие дополнительные системы, способы, признаки и преимущества включены в данное описание, входят в объем описанного здесь объекта изобретения и защищены прилагаемой формулой изобретения. Ни в коем случае не следует истолковывать признаки примерных вариантов осуществления как ограничивающие прилагаемую формулу изобретения, при отсутствии явного указания этих признаков в формуле изобретения.

Краткое описание фигур

Подробности примерных вариантах осуществления, включая конструкцию и работу, можно частично почерпнуть при изучении прилагаемых фигур, на которых одинаковые ссылочные номера относятся к аналогичным деталям. Компоненты на фиг. не обязательно приведены в масштабе, вместо этого акцент делается на иллюстрировании принципов раскрытия. Более того, все иллюстрации предназначены для передачи концепций, причем относительные размеры, формы и другие подробные атрибуты могут быть проиллюстрированы схематически, а не буквально или точно.

Фиг. 1А иллюстрирует вид в перспективе сегментированного аксиально сосуда трансмутатора.

Фиг. 1В иллюстрирует вид в разрезе сегментированного азимутально сосуда трансмутатора.

Фиг. 2А иллюстрирует виды в перспективе источника нейтронов и одиночного смежного резервуара, причем нейтроны генерируются в результате слияния дейтерия-третия (DT). Тритий присутствует в виде газа, а дейтрон создается путем взаимодействия лазера-фольги внутри скважины. Скважины расположены на входном окне.

Фиг. 2В иллюстрирует узел одиночной скважины.

Фиг. 3А иллюстрирует виды в перспективе источника нейтронов и одиночного расположенного рядом резервуара при генерации нейтронов в результате ядерного синтеза дейтерий-третий. В этом варианте осуществления дейтрон генерируется путем взаимодействия лазер-фольга, а тритий образует твердую мишень на задней стороне скважины. Нейтроны образуются, когда дейтроны взаимодействуют с тритием в твердой мишени. Скважины находятся в резервуаре источника нейтронов.

Фиг. 3В иллюстрирует узел одиночной скважины.

Фиг. 4 иллюстрирует схематичное изображение системы лазерного ускорителя с использованием основного лазера и ионизационной камеры с помощью предимпульсного лазера для генерации нейтронов.

Фиг. 5 иллюстрирует схематичное изображение лазерной генерации для системы лазерного ускорителя.

Фиг. 6 иллюстрирует вид сбоку системы трансмутации на основе жидкой фазы с осуществляемыми с помощью лазера разделением и мониторингом.

Фиг. 7 иллюстрирует частичный подробный вид центрального резервуара раствора системы трансмутации на основе жидкой фазы с осуществляемыми с помощью лазера разделением и мониторингом, показанной на фиг. 6.

Фиг. 8 иллюстрирует вид сбоку альтернативного варианта осуществления двухступенчатой системы разделения и трансмутации на основе жидкой фазы с осуществляемыми с помощью лазера разделением и мониторингом.

Фиг. 9 иллюстрирует вариант осуществления, направленный на двухрезервуарную стратегию для снижения общей стоимости нейтронов, когда резервуар 1 находится при критическом режиме, а резервуар 2 - при подкритическом.

Фиг. 10 иллюстрирует вариант осуществления, направленный на процесс генерации синтетического топлива путем химической конверсии CO_2 , тогда как тепло для протекания реакции генерируется за счет деления.

Фиг. 11 иллюстрирует другой вариант осуществления, направленный на процесс генерации синтетического топлива путем химической конверсии CO_2 , тогда как тепло для протекания реакции генерируется за счет деления.

Фиг. 12 иллюстрирует другой вариант осуществления, направленный на процесс генерации синтетического топлива путем химической конверсии CO_2 , тогда как тепло для протекания реакции генерируется за счет деления.

Фиг. 13 иллюстрирует другой вариант осуществления, направленный на процесс генерации синтетического топлива путем химической конверсии CO_2 , тогда как тепло для протекания реакции генерируется за счет деления.

Следует отметить, что элементы сходных конструкций или функций, как правило, представлены одинаковыми ссылочными номерами в иллюстративных целях на всех фигурах. Следует также отметить, что фигуры предназначены лишь для облегчения описания предпочтительных вариантов осуществления.

Подробное описание

Каждый из раскрытых ниже дополнительных признаков и принципов можно использовать по отдельности или в сочетании с другими признаками и принципами для обеспечения систем и способов, способствующих трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов в короткоживущие радиоактивные нуклиды или стабильные нуклиды, с использованием подхода к генерации нейтронов с помощью приводимого в действие лазером ядерного синтеза.

Более того, различные признаки характерных примеров и зависимых пунктов формулы изобретения могут быть скомбинированы не перечисленными конкретно и в явном виде способами для обеспечения дополнительных полезных вариантов осуществления предложенных принципов. В дополнение, следует четко отметить, что все признаки, раскрытые в описании и/или формуле изобретения, предполагаются раскрытыми по отдельности и независимо друг от друга в целях первоначального раскрытия, а также в целях ограничения заявленного объекта изобретения, независимо от составов признаков в вариантах осуществления и/или формуле изобретения. Также следует четко отметить, что все диапазоны значений или обозначения групп целых чисел раскрывают каждое возможное промежуточное значение или промежуточное целое число в целях первоначального раскрытия, а также в целях ограничения заявленного объекта изобретения.

В примерных вариантах осуществления в процессе трансмутации используется подкритический способ эксплуатации с использованием компактного устройства для трансмутации радиоактивных изотопов (в основном изотопов низших актиноидов (НА)), осуществляемый в резервуаре, содержащем сжиженный раствор смеси компонентов отходов отработанного топлива (таких как продукты деления (ПД) и НА), растворенных в растворе расплавленных солей LiF-BeF_2 (FLiBe). Такой процесс описан в предварительной заявке на патент США № 62/544666 [ссылка 5], которая полностью включена сюда по ссылке. Трансмутацию НА осуществляют с помощью энергетических нейтронов, полученных в результате реакции ядерного синтеза, приводимой в действие лазером. Мониторинг и управление в режиме реального времени содержанием FLiBe, НА и ПД в трансмутаторе выполняют с помощью активной лазерной спектроскопии или приводимого в действие лазером источника гамма-излучения.

В приведенных здесь примерных вариантах осуществления нейтроны генерируют путем приводимого в действие лазером ядерного синтеза для трансмутации долгоживущих радиоактивных ядер в короткоживущие или нерадиоактивные нуклиды.

В дополнительных примерных вариантах осуществления дейтериевые или тритиевые мишени представляют собой ионизированный лазером газ с плотностью, почти равной плотности твердого тела. Для образования этих мишеней предимпульсный лазер (до основного лазера) ионизирует мишень [ссылки 7 и 8]. Пока мишень остается при плотности твердого тела, ускоренные посредством CAIL дейтроны вступают в реакцию ядерного синтеза (сливаются) с тритием или дейтерием.

В дополнительных примерных вариантах осуществления резервуар для трансмутации поддерживают в подкритическом состоянии в течение всего времени. Функционирование при подкритическом режиме создает нагрузку на источники нейтронов, тогда как энергетические нейтроны производятся в тесно связанной конструкции:

- (1) путем облучения нанометровой фольги, состоящей из алмаза и дейтрона, с образованием дейтериевого пучка посредством процесса, известного как когерентное ускорение ионов лазером (CAIL);
- (2) путем инъекции ускоренного дейтерия в нанометрически "пенистую" насыщенную тритием мишень, синхронно и динамически ионизируемую предимпульсным лазером.

Обращаясь к чертежам, на фиг. 1А и 1В показан сегментированный сосуд 100 трансмутатора. Фиг. 1А показывает характерный случай аксиальной и радиальной сегментации сосуда 100 на три (3) секции 100А, 100В и 100С сосуда. Фиг. 1В показывает характерное поперечное сечение сосуда 100 с радиальной и азимутальной сегментацией. Сосуд 100 трансмутатора в настоящем варианте осуществления радиально сегментирован на концентрические цилиндрические камеры или резервуары 102, 104, 106, 108 и 110. Азимутально сегментированная камера 107 представляет собой характерную камеру, используемую либо для диагностики, либо для дополнительного источника нейтронов. Путем сегментации сосуда 100 контроль и локализация различных параметров могут быть улучшены более легко и/или более точно, а также может быть улучшена общая безопасность трансмутатора за счет информационной обратной связи от различных сегментов по искусственной нейронной сети к управляющим клапанам для управления концентрацией низших актиноидов. Такое точное управление оптимизирует сжигание большей части низших актиноидов, оставаясь при этом безопасным.

Резервуар или камера 110 представляет собой камеру сжатого газа, состоящего из газообразного дейтерия или трития, и функционирует как источник нейтронов для запуска самоподдерживающейся

цепной реакции в первом и втором концентрических резервуарах 108 и 106. Первый и второй резервуары 106 и 108 содержат смесь расплавленной соли FLiBe и низших актиноидов. Третий концентрический резервуар 104 содержит продукты деления, которые подвергаются трансмутации (превращаются) в стабильные или короткоживущие нуклиды. Четвертый концентрический резервуар 102 представляет собой графитовый отражатель.

Фиг. 2А показывает частичный вид одиночного узла трансмутатора 200, имеющего расположенные в нем резервуар 212 и резервуар 210 источника нейтронов. Резервуар 212 могут окружать дополнительные резервуары, как показано на фиг. 1А, 1В. В этом варианте осуществления лазерный импульс 214 проецируется на зеркало 220 и направляется зеркалом 220 к скважине 218 и в нее. Предусмотрено множество отдельных лазерных импульсов 214 и камер со скважинами 218, например тысячи (1000) лазерных импульсов и камер со скважинами. Увеличенный детальный вид отдельной камеры со скважинами 218 показан на фиг. 2В. В скважине 218 поддерживается вакуум. Лазерный импульс 214 проходит через окно 222 для лазерного излучения и облучает нанометровый фольговый элемент 224. Нанометровый фольговый элемент 224 изготовлен из дейтерированного алмаза и обладает толщиной один или более нанометров, а предпочтительно, толщиной примерно 1-10 нм. Физический процесс, известный как когерентное ускорение ионов (CAIL) [см., например, ссылку 9 и ссылку 24] ускоряет ионы дейтрона и углерода от нанометрового фольгового элемента 224 в виде пучка 216 дейтронов по направлению к центру резервуара 210 источника нейтронов. Максимальная достигаемая энергия задается уравнением 1.0 [см., например, ссылку 10; ссылку 11]:

$$\epsilon_{max} = (2\alpha + 1)Qmc^2(\sqrt{a_0^2 + 1} - 1) \quad 1.0$$

где альфа обычно = 3, $mc^2 = 0,511$ МэВ, $a_0 \sim 0,5$ в зависимости от других условий. Поэтому для дейтерия максимальная энергия составляет 0,41 МэВ, а для ионов углерода - 2,5 МэВ. Пучок 216 дейтронов вступает в реакцию ядерного синтеза с тритием в резервуаре 210 источника нейтронов, генерируя нейтроны 226.

Фиг. 3А и 3В показывают альтернативный вариант осуществления генерации нейтронов. Все еще используется физический процесс CAIL для ускорения дейтронов в виде пучка 216 дейтронов, как обсуждалось выше применительно к фиг. 2А и 2В. Как изображено на фиг. 3А, одиночный узел трансмутатора 200 включает в себя расположенные в нем резервуар 212 и резервуар 210 источника нейтронов. Резервуар 212 могут окружать дополнительные резервуары, как показано на фиг. 1А и 1В. В этом варианте осуществления, как и в предыдущем варианте осуществления, лазерный импульс 214 проецируется на зеркало 220 и направляется зеркалом 220 к скважине 218 и в нее. Предусмотрено множество отдельных лазерных импульсов 214 и камер со скважинами 218, например тысячи (1000) лазерных импульсов и камер со скважинами. Увеличенный подробный вид отдельной камеры со скважинами 218 показан на фиг. 3В. В скважине 218 поддерживается вакуум. Лазерный импульс 214 проходит через окно 222 для лазерного излучения и облучает нанометровый фольговый элемент 224. Нанометровый фольговый элемент 224 изготовлен из дейтерированного алмаза и имеет толщину примерно один или более нанометров. Процесс CAIL ускоряет ионы дейтрона и углерода из нанометрового фольгового элемента 224 в виде пучка 216 дейтронов. Вместо инъекции в резервуар 210 источника нейтронов, пучки 216 дейтронов инжектируют на твердую титан-тритиевую мишень 228 на заднем конце скважины 218, что приводит к испусканию нейтронов 226. Скважины 218 расположены у входного окна 211 в резервуар 210 источника нейтронов, а также внутри резервуара 210 источника нейтронов. Лазерный импульс 214 входит в скважину 218 через входное окно 222 и взаимодействует с нанометровой фольгой 224, создавая пучок 216 дейтронов.

Фиг. 4 подробно иллюстрирует взаимодействие лазер-фольга в одиночной скважине 218, как показано на фиг. 2В и 3В. Как изображено, лазерный импульс 214 уже прошел через входное окно 222 для лазерного излучения (см. фиг. 2В и 3В). Лазерный импульс 214, такой как, например, от лазера CAN [ссылка 12], облучает нанометровую фольгу 224, что приводит к CAIL за счет пондеромоторной силы в основном в направлении вперед, сверх электростатической силы оттягивания фольги 224. Затем продольное электрическое поле (не показано) ускоряет пучок 216 дейтронов и углерода в камеру 210 сжатого газа (см., например, фиг. 2А и 3А). Ускоренный дейтериевый пучок 216 сталкивается с газообразным тритием и вступает с ним в реакцию ядерного синтеза в камере 210, тем самым генерируя энергетические нейтроны 226, такие как, например, нейтроны с энергиями примерно 14 МэВ. Нейтроны 226 выделяются изотропно, и происходит деление низших актиноидов в резервуарах (см., например, резервуары 108 и 106, фиг. 1А и 1В; резервуар 212, фиг. 2А и 3А), окружающих резервуар источника нейтронов (см., например, резервуар 110, фиг. 1А и 1В; резервуар 210, фиг. 2А и 3А).

В альтернативном варианте осуществления резервуар 210 источника нейтронов состоит из углеродных нанотрубок (УНТ), насыщенных тритием. Предымпulsive лазеры 230 и 232 облучают резервуар 210 проникающей в него лазерной энергией в режиме надпороговой ионизации, ионизируя УНТ, насыщенные тритием, [ссылка 7; ссылка 8] и поддерживая ионизованный газ углерода и трития почти при плотности твердого тела в течение короткого времени для того, чтобы пучок дейтронов

вступил в реакцию ядерного синтеза с ионизированной тритиевой плазмой почти при плотности твердого тела. Лазеры 230 и 232 отличаются от основного лазера 214, используемого для ускорения дейтронов. Импульс основного лазера (который ускоряет дейтроны) и предимпульсные лазеры (для ионизации УНТ + трития) должны быть синхронизированы так, чтобы пучок дейтронов отставал от предимпульса и ионизация происходила непосредственно перед пучком дейтронов. В этой схеме синхронизации предимпульсные лазеры 230 срабатывают до предимпульсных лазеров 232. Этот подход обеспечивает высокоэффективный способ преобразования дейтерия-трития в быстрые нейтроны. Примерные значения энергии для лазера предимпульсной ионизации оцениваются в 100-300 мДж для плотности УНТ 10^{22} $1/\text{см}^3$, размера лазерного пятна 10^{-7} см^2 и облучаемой длины 100 см.

В альтернативном варианте осуществления также можно использовать одноцикловое ускорение лазером [ссылка 13; ссылка 14].

В альтернативном варианте осуществления резервуар 210 газового источника нейтронов на фиг. 2А заменен на газообразный дейтерий.

В альтернативном варианте осуществления твердая титан-тритиевая мишень 228 на фиг. 3В заменена на титан-дейтериевую мишень.

В альтернативном варианте осуществления твердая титан-тритиевая мишень на фиг. 3В заменена титаном. Пучок 216 дейтронов взаимодействует с твердой титановой мишенью 228 и внедряется в ее решетку, последующие дейтроны в пучке 216 сталкиваются с уже внедренными дейтронами и вступают с ними в реакцию ядерного синтеза с образованием нейтронов 226.

В примерных вариантах осуществления конструктивные параметры лазера, которые оцениваются из уровня техники [ссылка 15], включают интенсивность $I=10^{17}$ $\text{Вт}/\text{см}^2$; длина волны лазера = 1 мкм; длительность импульса = 5-10 фс; ширина пучка = 5-10 мкм. Лазер линейно поляризован. Дополнительно, толщина фольги 224 (см. фиг. 2В, 3В, 4А и 4В) предпочтительно получается в соответствии с уравнением 2.0

$$d = \lambda a_0 \int \frac{n_{cr}(\lambda)}{n_e(x)} dx \quad 2.0$$

где критическая плотность, $n_{cr}=\pi/(r_e\lambda^2)$, $a_0 = \sqrt{I/(10^{17}(\text{мкм}/\lambda)^2)}$, $r_e=e^2/(m_e c^2)$, при $I_0=1,37 \times 10^{18}$ $\text{Вт}/\text{см}^2$, λ - длина волны лазера [ссылка 16].

Кроме того, в примерных вариантах осуществления конструктивные параметры ускоренного пучка дейтронов находятся в диапазоне 30-200 кэВ. Для этого диапазона частота кулоновских столкновений в 10 раз выше частоты слияний. В ходе одного кулоновского столкновения дейтрон теряет в среднем 4% своей энергии, т.е. энергия передается мишени, такой как тритиевая. Поэтому оптимальная энергия дейтрона составляет 200 кэВ, тогда как мы предполагали 10 кулоновских столкновений до того, как произойдет слияние. Сечение слияния D-T составляет максимум 8 барн, при 60 кэВ.

Высокоэффективный лазер CAN с высокой частотой следования импульсов [ссылка 12] направляется комплектом оптики, см., например, зеркала 220 (фиг. 2А и 3А) на мишень 224 из нанометровой фольги (фиг. 2В, 3В, 4А и 4В). Частота следования интенсивных лазерных импульсов составляет 100 кГц, выдаваемых с высоким КПД 50%. Такой лазер ранее был предложен в качестве диагностической системы [см., например, ссылку 17]. Для подачи 10^{17} нейтронов в секунду ожидается типичная мощность 200 кВт. Такой поток нейтронов достаточен [см., например, ссылку 17] для приведения в действие трансмутатора на 10 МВт.

КПД получаемых под действием лазера нейтронов показан в таблице.

Для указанной толщины фольги и длины лазерного импульса показан КПД при преобразовании энергии лазера в энергию дейтрона

Толщина фольги [нм]	Импульс [фс]	КПД [%]
10	100	1,6
10	45	3,6
10	20	7,5
10	15	9,7
10	8	18
5	45	1
5	20	2,2
5	15	3,2
5	5	10
3,5	2	50

Фиг. 5 иллюстрирует подробности лазерной системы 500 для трансмутатора. Рентгеновская сеть когерентного усиления (XCAN) 504 [ссылка 12; ссылка 19] на основе усиления chirпированного

импульса (CRA) [ссылка 18] будет обеспечивать высокоэнергетическую высокоимпульсную накачку для ОРСРА 506 [ссылка 20]. Импульс будет генерироваться ХCAN-лазером, что делает возможным очень высокую частоту следования импульсов накачки, до 100 кГц. Фемтосекундные импульсы производятся фемтосекундным генератором 502, выдающим более миллиона импульсов в секунду. После генератора импульсы улавливаются с желаемой частотой до 100 кГц перед их растягиванием до нескольких наносекунд. После растягивания импульс усиливается в криогенной системе ОРСРА до уровня десятков мегаджоулей. Усиленный chirпированный импульс затем сжимается обратно до его исходного значения <10 фс.

Криогенная система ОРСРА предпочтительно демонстрирует крайне высокую теплопроводность, сопоставимую с медью, что необходимо для отвода десятков киловатт тепловой нагрузки, производимой во время процесса оптического параметрического усиления. При спектральной ширине полосы, соответствующей импульсу менее 10 фс, импульс можно легко растянуть до примерно одной наносекунды и усилить путем оптического параметрического усиления до 10 мДж. В этом процессе импульс смешивается с обеспечиваемым системой CAN импульсом накачки с примерно не длительностью и энергией >10 мДж.

Лазер для трансмутации сочетает в себе четыре (4) лазерные технологии: CRA [ссылка 18], CAN [ссылка 12; ссылка 19], ОРСРА [ссылка 20; ссылка 21] и криоохлаждаемые нелинейные кристаллы [ссылка 22]. Как показано на фиг. 5, в качестве альтернативы, CAN 504 можно заменить усилителем на тонком диске [ссылка 23]. Лазерная система для трансмутатора предпочтительно способна:

а) выдавать пиковую мощность, соответствующую $a_0=0,5$, или интенсивность примерно 5×10^{17} Вт/см² с размером пятна, например, 5 мкм;

б) производить импульсы, например, <10 фс, 10 мДж, с очень высокой частотой следования импульсов в диапазоне 10-100 кГц или со средней мощностью, которая может достигать 100 кВт;

Дополнительные признаки лазерной системы для трансмутатора включают:

с) система ОРСРА приспособлена для средней мощности. Для более эффективного охлаждения нелинейного кристалла с целью повышения его теплопроводности кристалл установлен на криогенно охлаждаемом теплоотводе. Как упомянуто ранее, при криогенной температуре теплопроводность кристалла при температуре жидкого азота или ниже нее резко возрастает, достигая значения теплопроводности меди [ссылка 22];

д) система ОРСРА [ссылка 20; ссылка 21] сделает возможной генерацию импульсов в режиме 10 фс. При накачке посредством CAN [ссылка 12; ссылка 19], когерентно-сетевой усилитель может быть использован для усиления первоначального импульса, например, до уровня 10 мДж при 10-100 кГц;

е) для применений, требующих, например, 100 кВт или более, N идентичных систем конфигурируются параллельно. Однако такие применения не требуют фазирования лазеров;

ф) в качестве альтернативы системе CAN, накачку усилителя можно заменить лазерной системой на тонком диске [ссылка 23].

Фиг. 6 показывает систему 600 работы лазера в целях спектроскопии, активного мониторинга и разделения продуктов деления. Компонент А представляет собой лазер CAN (соответственно, в виде пучков); компонент В представляет собой модулятор/контроллер лазера CAN (управление свойствами лазера, такими как уровень мощности, форма амплитуды, периоды и фазы, относительные операции, направление и т.д.); компонент С - это лазерные лучи, облучающие раствор и растворители в центральном резервуаре (см. компонент К) как для мониторинга, так и для разделения (или управления химическим составом растворителей); компонент D представляет собой раствор, который содержит растворители, включая ионы трансураниевых элементов (таких как Am, Cm, Np), которые подлежат разделению и трансмутации с помощью трансмутатора E [ссылка 5] (выделяющие получаемые при ядерном синтезе высокоэнергетические нейтроны); компонент F представляет собой воду, которая останавливает нейтроны как из источника ядерного синтеза, т.е. трансмутатора E, так и из продуктов деления; компонент G представляет собой осадок, который необходимо извлечь из отложений на дне центрального резервуара (в качестве примера разделения с помощью лазерной химии в центральном резервуаре, где содержится раствор); компонент H представляет собой ненужные осажденные элементы, которые не должны подвергаться трансмутации в это время в данном конкретном резервуаре и должны быть перемещены в другой резервуар, где они снова будут находиться в аналогичном этому растворе, подлежащем дальнейшему разделению и трансмутации; компонент I представляет собой цепь обратной связи с искусственной нейронной сетью (ИНС) и компьютер, который регистрирует и контролирует сигнал отслеживаемой информации, такой как спектр продуктов деления (ПД); компонент J представляет собой детектор передаваемых сигналов лазера CAN (амплитуд, фаз и частот, а также отклонений и т.д.); компонент K представляет собой "тонкую" первую стенку центрального резервуара, которая позволяет почти свободно пропускать энергетические нейтроны, генерируемые в результате слияния или деления в центральном резервуаре, а компонент L представляет собой внешний резервуар с достаточно толстой стенкой, который содержит все материалы и нейтроны. Как центральный резервуар K, так и внешний резервуар L оборудованы подходящими мониторами температуры, давления и некоторой

дополнительной физической и химической информации в дополнение к мониторингу лазером CAN для контроля и подачи сигналов тревоги о состоянии трансмутатора, для удержания резервуаров от выхода за "пределы" (например, случаев разгона) с помощью подходящих средств защиты, таких как работающие в режиме реального времени клапаны, электрические переключатели и т.д. Компонент Q представляет собой теплообменник, а компонент M преобразует тепло в электричество.

После начала эксплуатации нагретый раствор и воду в центральном и внешнем резервуарах K и L можно поддерживать в их состоянии с помощью двигателей (или, возможно, подходящих каналов внутри резервуаров или их эквивалентов), по желанию, а избыточное тепло отводят и преобразуют в электрическую (или химическую) энергию компонентом M.

Обращаясь к фиг. 8, в системе 800 компонент P представляет собой трубу (и ее клапан, который регулирует поток между резервуарами), соединяющую разнесенные резервуар сепаратора и резервуар трансмутатора. Компонент O представляет собой область растворения вводимых в резервуар трансмутатора разделенных НА. Остаточные продукты деления, остающиеся в компоненте D, выводят по трубопроводу компоненту R в компоненте S - резервуар для хранения.

Обращаясь к фиг. 7, в системе 700 центральный резервуар K содержит раствор D трансураниевых элементов, которые были извлечены из исходного отработанного топлива, которое было сжижено с подходящими растворами (такими как кислоты). На этой стадии процесса мы предполагаем, что U и Pu уже были извлечены из раствора D известными способами (такими как PUREX, т.е. извлечение урана и плутония посредством экстракции). Таким образом, раствор D может включать другие элементы, такие как продукты деления (ПД, такие как Cs, Sr, I, Zr, Tc и т.д.). Эти элементы могут быть склонны поглощать нейтроны, но не обязательно размножать нейтроны, как это склонны делать трансураниевые элементы. Таким образом, ПД необходимо удалить из раствора D в центральном резервуаре K путем химических реакций и лазерной химии и т.д. с помощью лазера CAN A и других химических средств. Если эти элементы осаждаются под действием добавленного химиката и/или химического возбуждения и т.д. от лазера CAN, осажденные компоненты химикатов можно удалить из этого центрального резервуара K в другой резервуар для обработки таких элементов, как продукты деления и т.д.

По завершении процесса разделения трансураниевые элементы (ТРЭ, в основном Am, Cm, Np) облучают нейтронами из трансмутатора E. Эти трансураниевые элементы могут иметь различные изотопы, но все из них являются радиоактивными изотопами, поскольку они находятся за ураном по их атомному номеру. Либо нейтроны из трансмутатора E, либо нейтроны, полученные в результате деления трансураниевых элементов, будут вносить вклад в трансмутацию трансураниевых элементов, если нейтроны поглощаются этими ядрами.

Обращаясь к фиг. 8, система 800 трансмутатора и лазерного монитора и сепаратора включает в себя два отдельных резервуара, разносящих процессы разделения и трансмутации по двум различным резервуарам. Например, сепаратор (с прикрепленным лазерным монитором) находится справа, тогда как трансмутатор - слева. Эти две системы соединены передаточной трубой и клапаном, компонент P, который используется для передачи осажденных (или разделенных) трансураниевых элементов (НА) из резервуара сепаратора справа в резервуар трансмутатора слева. Новый жидкий носитель (компонент O) предпочтительно содержит только (или содержит главным образом) ТРЭ, но уже не продукты деления, которые были отделены в резервуаре сепаратора справа. Разделение выполняют либо традиционным химическим способом, либо с помощью лазера (на основе лазера CAN), который служит для возбуждения (например) атомных электронов НА в целях химического разделения. В центральном резервуаре D слева имеется главным образом (или только) раствор НА. Элементы, оставшиеся вне жидкости, содержат в основном ПД, которые транспортируются по трубе (компонент R) в резервуар для хранения (компонент S). Такие ПД могут быть вместе помещены в отвержденные материалы для последующего захоронения [ссылки 22 и 23].

Когда происходит деление при захвате нейтронов трансураниевыми элементами, от ядерного деления обычно ожидают высокоэнергетического выхода (такого как в диапазоне 200 МэВ на деление). С другой стороны, энергия нейтронов ядерного синтеза не превышает 15 МэВ. Как нейтроны ядерного синтеза, так и события деления в центральном резервуаре выделяют тепло в резервуаре. Раствор примешивает это тепло, как правило, за счет конвекционных потоков (либо самих по себе, либо, по необходимости, с помощью приводимого извне двигателя). Переносчик и экстрактор извлеченного тепла, т.е. компонент M, отводит сгенерированное в центральном резервуаре тепло и преобразует его в электрическую энергию. Эти процессы необходимо контролировать как физически (например, температуру, давление раствора в резервуаре), так и химически (например, химические состояния различных молекул, атомов и ионов в растворе посредством мониторинга лазером CAN) в режиме реального времени в целях мониторинга и управления для обратной связи по параметрам резервуара путем управления клапанами и другими регуляторами, а также функционированием CAN.

Типичный ядерный реактор производит следующие ядерные отходы отработанного топлива [ссылки 22 и 23] на 1 т урана, который генерирует мощность 50 ГВт в день. В ходе этой операции ядерные отходы составляют: примерно 2,5 кг трансураниевых элементов (Np, Am, Cm) и примерно 50 кг продуктов деления. Количество 2,5 кг НА (низших актиноидов, т.е. трансураниевых элементов)

составляет примерно 100 моль, или приблизительно 6×10^{25} атомов НА. Это количество соответствует примерно 7×10^{20} атомов НА в секунду, приблизительно 10^{21} атомов НА в 1 с. Это преобразуется в мощность лазера примерно 1 кВт, если требуется поглощение одного фотона (эВ) каждым атомом НА на возбуждение лазером каждого атома. Примем η как КПД возбуждения атома НА одним фотоном лазера. Тогда мощность P лазера, поглощаемая всеми атомами НА вышеуказанного количества в секунду, будет составлять

$$P \sim (1/\eta) \text{ кВт.}$$

Если $\eta \sim 0,01$, то P составляет примерно 100 кВт. Это количество не мало. С другой стороны, если позаимствовать эффективную технологию лазера CAN с большой плотностью потока [ссылка 12], это будет в пределах досягаемости технологий. При типичных химических воздействиях мы предполагаем, что лазер может либо быть близким к непрерывному излучению, либо иметь очень длительный импульс, так что КПД волоконного лазера и его плотность потока будут максимальными. Для соблюдения надлежащих резонансов или конкретных частот, частоты волоконного лазера необходимо настраивать (наиболее вероятно, перед эксплуатацией) на конкретные значения.

В качестве дополнительных примерных вариантов осуществления высокоэффективный способ генерации нейтронов применим для полей и процессов, требующих нейтронов с энергией до 14 МэВ, таких как, например, медицинские применения при лечении рака, такие как, например, бор-нейтрон-захватная терапия (БНЗТ) и генерация радиоизотопов, испытания на конструкционную целостность зданий, мостов и т.д., материаловедение и испытание микросхем, каротаж нефтяных скважин и т.п.

Представлено два дополнительных варианта осуществления: (1) первый вариант осуществления, направленный на двухрезервуарную стратегию для снижения общей стоимости нейтронов, когда резервуар 1 находится при критическом режиме, а резервуар 2 - при подкритическом, и (2) второй вариант осуществления, направленный на более экологичный трансмутатор с отрицательным показателем высвобождения углерода за счет производства синтетического топлива путем химической конверсии CO_2 , тогда как тепло для протекания реакции генерируется за счет деления.

В примерном варианте осуществления, изображенном на фиг. 9, трансмутатор 900 содержит два соединенных между собой комплекта резервуаров, называемых резервуаром 1 и резервуаром 2. Резервуары 1 и 2, которые по существу аналогичны резервуарам, изображенным на фиг. 2А и 3А, могут включать в себя резервуар, содержащий подвергаемые трансмутации материалы, и расположенный в нем резервуар источника нейтронов, и, как изображено на фиг. 1А и 1В, эти резервуары могут быть окружены дополнительными концентрическими резервуарами. Резервуар 1 предпочтительно содержит смесь Pu и низших актиноидов (НА), включая нептуний, америций и кюрий (Np, Am, Cm), тогда как резервуар 2 содержит смесь только низших актиноидов (НА). Резервуар 1 находится при критическом режиме ($k_{\text{eff}} = 1$), а значит, резервуар 1 не требует внешних нейтронов. Кроме того, резервуар 1 снабжается топливом с использованием отработанного ядерного топлива (Pu и НА) после химического удаления продуктов деления. В резервуаре 1 используют быстрые нейтроны (нейтроны ядерного синтеза в дополнение к незамедленным нейтронам деления с энергией >1 МэВ) для трансмутации низших актиноидов (НА) и плутония (Pu) при повышенной концентрации кюрия (Cm). В качестве альтернативы, в резервуар 1 может быть инжектировано небольшое количество нейтронов для запуска сжигания Pu.

Низшие актиноиды (НА) в резервуаре 1, теперь с более высокой концентрацией кюрия (Cm), могут быть отделены и поданы в резервуар 2. Подсоединенный резервуар 2 работает параллельно, сжигая низшие актиноиды (НА) с повышенной концентрацией кюрия (Cm) в подкритическом ($k_{\text{eff}} < 1$) режиме работы, как описано выше. Этот процесс обеспечивает путь безопасного и плавного сжигания всего трансуранового отработанного ядерного топлива (а не только НА) при снижении количества требуемых для этого нейтронов примерно в 100 раз.

В дополнительном варианте осуществления резервуар 1 и резервуар 2 подвергают мониторингу в режиме реального времени с помощью лазера и гамма-излучения. Широкополосный или сканирующий лазер используют для мониторинга элементного состава в резервуаре 1 и резервуаре 2 с использованием индуцированной лазером флуоресценции и рассеяния. Гамма-мониторинг может быть либо активным, либо пассивным. В пассивном гамма-мониторинге используется гамма-излучение, генерируемое при ядерном распаде или переходе. Активный гамма-мониторинг использует внешний пучок гамма-излучения с энергией выше нескольких МэВ и основан на ядерно-резонансной флуоресценции. Как активный, так и пассивный мониторинг обеспечивает информацию об изотопном составе топлива трансмутатора. Информацию, полученную в результате лазерного и гамма-мониторинга, собирают и направляют в компьютер, содержащий логический блок, выполненный с возможностью предсказания и/или регулирования будущих состояний трансмутатора путем регулировки пополнения топливом резервуара 1 или регулировки концентрации НА в резервуаре 2. Для обеспечения возможности подробного лазерного и гамма-мониторинга топливо в резервуаре 1 и в резервуаре 2 растворяют в солевом расплаве, обеспечивающем возможность распространения света. Мониторинг в режиме реального времени является неотъемлемой частью обеспечения общей активной безопасности и эффективности трансмутатора, тогда как подробные сведения о составе трансмутатора позволят

определить положение регулирующих стержней, пополнение топлива и извлечение продуктов деления. Пассивные признаки включают солевой расплав, расширяющийся с повышением температуры, что приводит к отключению трансмутатора; приемный резервуар отделен от трансмутатора застывшей пробкой, тогда как любой аномальный всплеск температуры приведет к расплавлению пробки и вытеканию под действием силы тяжести всего содержимого трансмутатора в приемный резервуар, состоящий из поглотителей нейтронов.

В другом варианте осуществления стенки резервуара 1 и резервуара 2 изготовлены из материалов на основе углерода, например, алмаза. Для защиты стенок от химической эрозии и коррозии, соли, прилегающей к стенке (обращенной к расплавленной соли), позволяют затвердеть, предотвращая непосредственный контакт расплавленной соли со стенками.

В дополнительном варианте осуществления описанные выше варианты трансмутатора можно применить в способах и процессах восстановления диоксида углерода, таких как предполагающие его использование в качестве теплоносителя и генерации из него синтетического топлива, чтобы иметь полностью отрицательный показатель высвобождения углерода. В следующем примерном варианте осуществления синтетическое топливо (CH_4 - метан) может быть сгенерировано по реакции $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ (реакции Сабатье), для которой требуется 200-400°C и присутствие катализатора, например Ni, Cu, Ru. CO_2 можно извлекать из атмосферы, океана или получать путем непосредственного улавливания CO_2 в источнике выброса, таком как автомобили, здания, вытяжные и дымовые трубы. Диапазон рабочих температур трансмутатора с соевым расплавом составляет 250-1200°C, а следовательно, он идеально подходит для непрерывного обеспечения необходимой температуры, требуемой для протекания реакции Сабатье с получением метана, и для обеспечения эффективного пути стабилизации и снижения концентрации CO_2 в атмосфере и океане.

Обращаясь к фиг. 10, показан частичный вид системы 1000 генерации синтетического топлива, включающей в себя сосуд 1005 трансмутатора, трубопровод 1001 вторичного контура, направление 1002 течения солевого расплава + ТРЭ, теплообменник 1003 и резервуар 1004 для реакции Сабатье. В этом примерном варианте осуществления теплопередающей средой в трубе теплообменника является CO_2 , который используется непосредственно в резервуаре 1004. В альтернативном варианте осуществления, показанном на фиг. 11, теплообменная труба теплообменника 2003 системы 2000 генерации синтетического топлива представляет собой замкнутую и независимую систему, а теплопередающая среда может быть заменена расплавленной солью. Показано, что система 2000 генерации синтетического топлива включает в себя сосуд 2005 трансмутатора, трубопровод 2001 вторичного контура, направление 2002 течения солевого расплава + ТРЭ, теплообменник 2003 и резервуар 2004 для реакции Сабатье.

В дополнительном альтернативном варианте осуществления фиг. 12 показывает частичный вид системы 3000 генерации синтетического топлива, имеющей трансмутатор 3005, теплообменник 3001, направление 3002 течения теплопередающей среды и резервуар 3003 для реакции Сабатье. В этом примерном варианте осуществления реагент CO_2 из реакции Сабатье является теплопередающей средой. В альтернативном варианте осуществления, представленном на фиг. 13, контур 4001 теплообменника системы 4000 генерации синтетического топлива показан как замкнутый и независимый контур с теплопередающей средой, представляющей собой, например, расплавленную соль. Показана система 4000 генерации синтетического топлива, включающая в себя трансмутатор 4005, теплообменник 4001, направление 4002 течения теплопередающей среды и резервуар 4003 для реакции Сабатье.

В дополнительном варианте осуществления осуществления ионизирующее излучение, возникающее внутри трансмутатора и переносимое соевым расплавом, используют в качестве источника энергии 1-10 эВ для обеспечения проведения различных химических реакций. Источник энергии 1-10 эВ, например, обеспечивает возможность получения аммиака и конверсии $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH}$.

Цепь обработки для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия может включать в себя один или более компьютеров, процессоров, микропроцессоров, контроллеров и/или микроконтроллеров, каждый из которых может представлять собой дискретную микросхему или распределен среди (и части) некоторого числа различных микросхем. Цепь обработки для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия может включать в себя процессор цифровых сигналов (ПЦС), который может быть воплощен в аппаратных средствах и/или программном обеспечении цепи обработки данных для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия. В некоторых вариантах осуществления ПЦС представляет собой дискретную полупроводниковую микросхему. Цепь обработки для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия может быть соединена с возможностью связи с другими компонентами по приведенным здесь фигурам. Цепь обработки для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия может исполнять хранящиеся в памяти команды программного обеспечения, которые заставляют цепь обработки выполнять множество различных действий и регулировать другие компоненты, представленные на приведенных здесь фигурах.

Цепь обработки для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия также может выполнять и другие алгоритмы программного и/или аппаратного обеспечения. Например, цепь

обработки для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия может взаимодействовать с цепью связи и выполнять аналогово-цифровые преобразования, кодирование и декодирование, другую обработку цифровых сигналов и другие функции, способствующие преобразованию голосовых, видео- и информационных сигналов в формат (например, синфазный и квадратурный), подходящий для подачи на цепь связи, и могут заставлять цепь связи передавать РЧ-сигналы беспроводным образом по каналам связи.

Цепь связи для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия может быть воплощена в виде одной или более микросхем и/или компонентов (например, передатчика, приемника, приемопередатчика и/или другой цепи связи), которые выполняют беспроводную связь по каналам связи согласно подходящему протоколу (например, Wi-Fi, Bluetooth, Bluetooth с низким энергопотреблением, ближняя бесконтактная связь (NFC), радиочастотная идентификация (РЧИД), проприетарные протоколы и другие). Вместе со цепью связи может быть включена одна или более антенн, при необходимости, для функционирования с различными протоколами и схемами. В некоторых вариантах осуществления цепь связи для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия может содержать антенну для передачи сигналов по каналам связи. Цепь обработки для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия также может взаимодействовать с цепью связи для выполнения обратных функций, необходимых для приема беспроводной передачи и преобразования ее в цифровые данные, голос и видео. Цепь РЧ связи может включать в себя передатчик и приемник (например, объединенные в виде приемопередатчика) и связанную логику кодера. Считывающее устройство также может включать в себя цепь связи и интерфейсы для проводной связи (например, USB-порт и т.д.), а также цепь для определения географического положения считывающего устройства (например, аппаратное обеспечение глобальной системы позиционирования (GPS)).

Цепь обработки для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия также может быть выполнена с возможностью исполнения операционной системы и любых программных приложений, которые находятся на считывающем устройстве, обработки видео и графики, а также выполнения других функций, которые не связаны с обработкой передаваемых и принимаемых сообщений. Любое число приложений (также известных как "приложения пользовательского интерфейса") могут исполняться цепью обработки на специализированном или относящемся к мобильному телефону считывающем устройстве в любое время, и может включать в себя одно или более приложений, связанных с режимом мониторинга диабета, в дополнение к другим обычно используемым приложениям, например, приложениям для смартфонов, которые не связаны с таким режимом, например, электронная почта, календарь, погода, спорт, игры и т.д.

Память для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия может совместно использоваться одним или более различными функциональными блоками, имеющимися в считывающем устройстве, или может быть распределена по двум или более из них (например, в виде отдельных блоков памяти, имеющихся в различных микросхемах). Память также может представлять собой отдельную микросхему сама по себе. Память может быть невременной и может быть энергозависимой (например, ОЗУ или RAM, и т.д.) и/или энергонезависимой памятью (например, ПЗУ или ROM, флеш-память, F-RAM и т.д.).

Команды компьютерной программы для осуществления операций в соответствии с описанным объектом изобретения могут быть записаны на любом сочетании одного или более языков программирования, включая объектно-ориентированный язык программирования, такой как Java, JavaScript, Smalltalk, C++, C#, Transact-SQL, XML, PHP и т.п., а также традиционные процедурные языки программирования, такие как язык программирования "C" или сходные языки программирования. Программные команды могут полностью исполняться на пользовательском вычислительном устройстве (например, считывающем устройстве) или частично на пользовательском вычислительном устройстве. Программные команды могут частично находиться на пользовательском вычислительном устройстве, а частично - на удаленном вычислительном устройстве, или же полностью на удаленном вычислительном устройстве или сервере, например, в случаях, когда данные идентифицированной частоты загружают на удаленное устройство для обработки. При последнем сценарии удаленное вычислительное устройство может быть подключено к пользовательскому вычислительному устройству по сети любого типа или может иметь место подключение к внешнему компьютеру.

Различные аспекты настоящего объекта изобретения изложены ниже, в обзоре и/или в дополнение к вариантам осуществления, описанным здесь ранее, с упором на взаимосвязь и взаимозаменяемость следующих вариантов осуществления. Иными словами, упор сделан на то, что каждый признак вариантов осуществления может быть скомбинирован с каждым и любым другим признаком, если только явно не указано иное или это логически неправдоподобно.

Согласно вариантам осуществления система трансмутатора для трансмутации долгоживущих радиоактивных трансурановых отходов содержит резервуар источника нейтронов, включающий в себя источник нейтронов, где источник нейтронов содержит множество углеродных нанотрубок (УНТ), насыщенных тритием, множество предымпульсных лазеров, выполненных с возможностью облучения резервуара источника нейтронов проникающей в него лазерной энергией в режиме надпороговой

ионизации для ионизации УНТ и трития и поддержания ионизованного газа углерода и трития почти при плотности твердого тела в течение заданного периода времени, множество концентрических резервуаров, расположенных вокруг резервуара источника нейтронов и содержащих одну или более смесей долгоживущих радиоактивных трансурановых отходов, растворенных в соли FLiBe, лазерную систему, ориентированную для аксиального распространения множества лазерных импульсов в источник нейтронов, и множество скважин, ориентированных для аксиального приема упомянутого множества лазерных импульсов, причем каждая из упомянутого множества скважин включает в себя фольговый элемент из дейтерированного материала, причем при облучении фольгового элемента лазерным импульсом из упомянутого множества лазерных импульсов фольговый элемент производит множество ионов дейтрона, ускоряемых в виде пучка ионов по направлению к центру резервуара источника нейтронов, где пучок дейтронов вступает в реакцию ядерного синтеза с ионизованной тритиевой плазмой почти при плотности твердого тела.

В вариантах осуществления фольговый элемент содержит дейтерированный алмазоподобный материал, а упомянутое множество ионов включает ионы дейтрона и углерода.

В вариантах осуществления упомянутое множество ионов ускоряются за счет когерентного ускорения ионов (CAIL).

В вариантах осуществления фольговый элемент обладает толщиной один или более нанометров.

В вариантах осуществления импульс от лазера и предимпульсные лазеры синхронизированы так, чтобы сделать возможным отставание пучка дейтронов от ионизации трития.

В вариантах осуществления упомянутое множество предимпульсных лазеров включает в себя первый комплект предимпульсных лазеров и второй комплект предимпульсных лазеров.

В вариантах осуществления первый комплект предимпульсных лазеров выполнен с возможностью срабатывать перед вторым комплектом предимпульсных лазеров.

В вариантах осуществления лазерная система включает в себя множество зеркал, ориентированных для направления отдельных лазерных импульсов из упомянутого множества лазерных импульсов к отдельным скважинам упомянутого множества скважин и в них.

В вариантах осуществления упомянутое множество концентрических резервуаров сегментированы.

В вариантах осуществления упомянутое множество концентрических резервуаров сегментированы аксиально.

В вариантах осуществления упомянутое множество концентрических резервуаров сегментированы азимутально.

В вариантах осуществления упомянутое множество сегментированных резервуаров содержит первый концентрический резервуар, расположенный вокруг источника нейтронов и содержащий первую смесь долгоживущих радиоактивных трансурановых отходов, растворенных в соли FLiBe, второй концентрический резервуар, расположенный вокруг первого концентрического резервуара и содержащий вторую смесь долгоживущих радиоактивных трансурановых отходов, растворенных в соли FLiBe, третий концентрический резервуар, расположенный вокруг второго концентрического резервуара и содержащий третью смесь долгоживущих радиоактивных трансурановых отходов, растворенных в соли FLiBe, и четвертый концентрический резервуар, расположенный вокруг третьего концентрического резервуара и содержащий одно из воды или воды и отражающего нейтроны экрана.

В вариантах осуществления сегментированные первый, второй, третий и четвертый концентрические резервуары сегментированы аксиально.

В вариантах осуществления сегментированные первый, второй, третий и четвертый концентрические резервуары сегментированы азимутально.

В вариантах осуществления лазерная система включает в себя один из лазера CAN или усилителя на тонких пластинах.

В вариантах осуществления лазерная система дополнительно включает в себя систему ОРСПА, соединенную с лазером CAN или усилителем на тонких пластинах, и генератор, соединенный с системой ОРСПА.

В вариантах осуществления ОРСПА подвергается криогенному охлаждению.

В вариантах осуществления упомянутое множество концентрических резервуаров образуют первый комплект резервуаров, причем система трансмутатора дополнительно содержит второй комплект резервуаров, содержащих смесь Pu и низших актиноидов (НА), включая нептуний, америций и кюрий (Np, Am, Cm).

В вариантах осуществления второй комплект резервуаров выполнен с возможностью работы в критическом состоянии.

В вариантах осуществления стенки одного из первого комплекта резервуаров или второго комплекта резервуаров изготовлены из материалов на основе углерода.

В вариантах осуществления материалы на основе углерода представляют собой алмаз.

Следует отметить, что все признаки, элементы, компоненты, функции и этапы, описанные применительно к любому приведенному здесь варианту осуществления, подразумеваются свободно комбинируемыми и заменяемыми с теми, которые взяты из любого другого варианта осуществления.

Если определенный признак, элемент, компонент, функция или этап описан(а) применительно только к одному варианту осуществления, то следует понимать, что этот признак, элемент, компонент, функцию или этап можно использовать с каждым другим вариантом осуществления, описанным здесь, если только явно не указано иное. Поэтому этот абзац служит в качестве предшествующей основы и письменного основания для введения в формулу изобретения в любой момент пунктов, в которых сочетаются признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из различных вариантов осуществления, или в которых признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из одного варианта осуществления замещены признаками, элементами, компонентами, функциями и этапами из другого варианта осуществления, даже если в следующем описании в явном виде не указано в конкретном случае, что такие сочетания или замещения возможны. В явном виде подтверждается, что явное перечисление всех возможных сочетаний и замещений является чрезмерно обременительным, особенно с учетом того, что допустимость каждого и всех таких сочетаний и замещений может быть легко признана специалистами в данной области техники.

В той степени, в которой раскрытые здесь варианты осуществления включают в себя или функционируют в сочетании с памятью, накопителем и/или машиночитаемым носителем, эти память, накопитель и/или машиночитаемый носитель являются невременными. Следовательно, в той степени, в которой память, накопитель и/или машиночитаемый носитель охватываются одним или более пунктами формулы изобретения, эти память, накопитель и/или машиночитаемый носитель являются лишь невременными.

Упоминание здесь и в прилагаемой формуле изобретения элемента в единственном числе не исключает множества таких элементов, если из контекста четко не следует иное.

Хотя варианты осуществления допускают различные модификации и альтернативные формы, их конкретные примеры были показаны на чертежах и подробно описаны здесь. Однако следует понимать, что эти варианты осуществления не ограничены конкретной раскрытой формой, а напротив, эти варианты осуществления должны охватывать все модификации, эквиваленты и альтернативы, попадающие в пределы сути раскрытия. Кроме того, любые признаки, функции, этапы или элементы вариантов осуществления могут быть перечислены в формуле изобретения или добавлены в формулу изобретения, также как и отрицательные признаки, которые характеризуют объем формулы изобретения с помощью признаков, функций, этапов или элементов, которые не входят в этот объем.

Список литературы

[Ссылка 1]

https://www.gao.gov/key_issues/disposal_of_highlevel_nuclear_waste/issue_summary

Accessed Oct. 23, 2018.

[Ссылка 2] Gulik, V., & Tkaczyk, A. H., Cost optimization of ADS design: Comparative

study of externally driven heterogeneous and homogeneous two-zone subcritical reactor systems.

Nuclear Engineering and Design, 270, 133-142 (2014).

[Ссылка 3] Weston M. Stacey, Solving the Spent Nuclear Fuel Problem by Fissioning

Transuranics in Subcritical Advanced Burner Reactors Driven by Tokamak Fusion Neutron

Sources, *Nuclear Technology*, (2017). DOI: 10.1080/00295450.2017.1345585

[Ссылка 4] Sheu, R. J., et al. "Depletion analysis on long-term operation of the

conceptual Molten Salt Actinide Recycler & Transmuter (MOSART) by using a special

sequence based on SCALE6/TRITON.” *Annals of Nuclear Energy* 53 (2013): 1-8.

[Ссылка 5] Tajima T. and Necas A., “Systems And Methods For Frc Based Transmutator And Radioisotope Generator,” U.S. Patent Application No. 62/544,666, August 11, 2017.

[Ссылка 6] Tajima, Toshiki, Dietrich Habs, and Xueqing Yan. “Laser acceleration of ions for radiation therapy.” *Reviews of Accelerator Science and Technology* 2.01 (2009): 201-228.

[Ссылка 7] Kishimoto, Y., and Tajima, T., Strong Coupling between Clusters and Radiation, *High Field Science*, eds. T. Tajima, K. Mima, and H. Baldis (Kluwer, NY, 2000), pp. 83-96.

[Ссылка 8] Kishimoto, Y., Masaki, T., and Tajima, T., High energy ions and nuclear fusion in laser-cluster interaction, *Phys. of Plasmas* 9, 589-601(2002).

[Ссылка 9] Yan, X.Q., Tajima, T., Hegelich, B.M., Yin, L., and Habs, D., Theory of laser ion acceleration from a foil target of nanometer thickness, *Applied Phys. B* 98, 711 (2010).

[Ссылка 10] Mako, F., and T. Tajima. “Collective ion acceleration by a reflexing electron beam: Model and scaling.” *The Physics of fluids* 27, no. 7: 1815-1820 (1984).

[Ссылка 11] Steinke, S., Henig, A., Schnürer, M., Sokollik, T., Nickles, P.V., Jung, D., Kiefer, D., Hörlein, R., Schreiber, J., Tajima, T. and Yan, X.Q., Efficient ion acceleration by collective laser-driven electron dynamics with ultra-thin foil targets. *Laser and Particle Beams*, 28(1), pp.215-221 (2010).

[Ссылка 12] Mourou, G., Brocklesby, B., Tajima, T. and Limpert, J., The future is fibre accelerators. *Nature Photonics*, 7(4), p.258 (2013).

[Ссылка 13] Mourou, G., S. Mirnov, E. Khazanov, and A. Sergeev. “Single cycle thin film compressor opening the door to Zeptosecond-Exawatt physics.” *The European Physical Journal Special Topics* 223, no. 6: 1181-1188 (2014).

[Ссылка 14] Zhou, M.L., Yan, X.Q., Mourou, G., Wheeler, J.A., Bin, J.H., Schreiber, J. and Tajima, T., 2016. Proton acceleration by single-cycle laser pulses offers a novel monoenergetic and stable operating regime. *Physics of Plasmas*, 23(4), p.043112 (2016).

[Ссылка 15] Tajima, T., “Laser driven compact ion accelerator,” U.S. Patent 6,867,419, issued March 15, 2005.

[Ссылка 16] Esirkepov, T., M. Yamagiwa, and T. Tajima. “Laser ion-acceleration scaling laws seen in multiparametric particle-in-cell simulations.” *Physical review letters* 96, no. 10 (2006): 105001.

[Ссылка 17] Tajima T., Mourou G. and Necas A., “Systems And Methods For Liquid Phase Based Transmutation With Can Laser Based Monitoring,” U.S. Patent Application No.

62/665,287, May 1, 2018.

[Ссылка 18] D. Strickland and G. Mourou, "Compression of Amplified Chirped Optical Pulses," *Opt. Commun.* 56, 219-221 (December 1985).

[Ссылка 19] G. Mourou and J. Nees "Selectively Triggered High-Contrast Laser", U.S. Patent No. 5,541,947, issued July 30, 1996.

[Ссылка 20] A. Dubietis, G. Jonušauskas, and A. Piskarskas, "Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal," *Opt. Commun.* 88(4-6), 437-440 (1992).

[Ссылка 21] R. Budrinuas, T. Stanislauskas, J. Adamonis, A. Alecknavicius, G. Veitas, G. Stanislovas-Balickas, A. Michailova, and A. Varanaci-Iusi, 53 W average power CEP-stabilized OPCPA, system delivering 5.5 TW few cycle pulses at 1 kHz repetition rate, Vol. 25, No. 5 | 6 Mar 2017 | OPTICS EXPRESS 5797

[Ссылка 22] S. Backus, C. Durfee, G. Mourou, H. C. Kapteyn, M. M. Murnane, 0.2 Terawatt laser system at 1 kHz, *Opt. Lett.* 22, 1256 (1997).

[Ссылка 23] A. Giesen and J. Speiser, "Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 13 (3), 598 (2007).

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система трансмутатора для трансмутации долгоживущих радиоактивных трансурановых отходов, содержащая

резервуар источника нейтронов, включающий в себя источник нейтронов, причем источник нейтронов содержит множество углеродных нанотрубок (УНТ), насыщенных тритием;

множество предимпульсных лазеров, выполненных с возможностью облучения резервуара источника нейтронов проникающей в него лазерной энергией в режиме надпороговой ионизации для ионизации УНТ и трития и поддержания ионизованного газа углерода и трития почти при плотности твердого тела в течение заданного периода времени;

множество концентрических резервуаров, расположенных вокруг резервуара источника нейтронов и содержащих одну или более смесей долгоживущих радиоактивных трансурановых отходов, растворенных в соли FLiBe;

лазерную систему, ориентированную для аксиального распространения множества лазерных импульсов в источник нейтронов; и

множество скважин, ориентированных для аксиального приема упомянутого множества лазерных импульсов, причем каждая из упомянутого множества скважин включает в себя фольговый элемент из дейтерированного материала, причем при облучении фольгового элемента лазерным импульсом упомянутого множества лазерных импульсов фольговый элемент производит множество ионов дейтрона, ускоряемых в виде пучка ионов по направлению к центру резервуара источника нейтронов, где пучок дейтронов вступает в реакцию ядерного синтеза с ионизованной тритиевой плазмой почти при плотности твердого тела.

2. Система трансмутатора по п.1, причем фольговый элемент содержит дейтерированный алмазоподобный материал, а упомянутое множество ионов включает ионы дейтрона и углерода.

3. Система трансмутатора по пп.1 и 2, причем упомянутое множество ионов ускоряются за счет когерентного ускорения ионов (CAIL).

4. Система трансмутатора по пп.1-3, причем фольговый элемент обладает толщиной один или более нанометров.

5. Система трансмутатора по пп.1-4, причем импульс от лазера и предимпульсные лазеры синхронизированы, чтобы обеспечить отставание пучка дейтронов от ионизации трития.

6. Система трансмутатора по пп.1-5, причем упомянутое множество предимпульсных лазеров включает в себя первый комплект предимпульсных лазеров и второй комплект предимпульсных лазеров.

7. Система трансмутатора по п.6, причем первый комплект предимпульсных лазеров выполнен с возможностью срабатывать до второго комплекта предимпульсных лазеров.

8. Система трансмутатора по пп.1-7, причем лазерная система включает в себя множество зеркал, ориентированных для направления отдельных лазерных импульсов упомянутого множества лазерных импульсов к отдельным скважинам упомянутого множества скважин и в них.

9. Система трансмутатора по пп.1-8, причем упомянутое множество концентрических резервуаров сегментированы.

10. Система трансмутатора по п.9, причем упомянутое множество концентрических резервуаров сегментированы аксиально.

11. Система трансмутатора по п.9, причем упомянутое множество концентрических резервуаров сегментированы азимутально.

12. Система трансмутатора по пп.1-8, причем упомянутое множество сегментированных резервуаров содержит

первый концентрический резервуар, расположенный вокруг источника нейтронов и содержащий первую смесь долгоживущих радиоактивных трансурановых отходов, растворенных в соли FLiBe;

второй концентрический резервуар, расположенный вокруг первого концентрического резервуара и содержащий вторую смесь долгоживущих радиоактивных трансурановых отходов, растворенных в соли FLiBe;

третий концентрический резервуар, расположенный вокруг второго концентрического резервуара и содержащий третью смесь долгоживущих радиоактивных трансурановых отходов, растворенных в соли FLiBe; и

четвертый концентрический резервуар, расположенный вокруг третьего концентрического резервуара и содержащий одно из воды или воды и отражающего нейтроны экрана.

13. Система трансмутатора по п.12, причем сегментированные первый, второй, третий и четвертый концентрические резервуары сегментированы аксиально.

14. Система трансмутатора по п.12, причем сегментированные первый, второй, третий и четвертый концентрические резервуары сегментированы азимутально.

15. Система трансмутатора по пп.1-14, причем лазерная система включает в себя один из лазера CAN или усилителя на тонких пластинах.

16. Система трансмутатора по п.15, причем лазерная система дополнительно включает в себя систему ОРСПА, соединенную с лазером CAN или усилителем на тонких пластинах, и генератор, соединенный с системой ОРСПА.

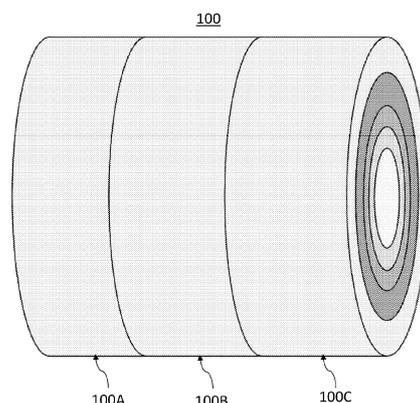
17. Система трансмутатора по п.16, причем система ОРСПА подвергается криогенному охлаждению.

18. Система трансмутатора по пп.1-17, причем упомянутое множество концентрических резервуаров образуют первый комплект резервуаров, при этом система трансмутатора дополнительно содержит второй комплект резервуаров, содержащих смесь Pu и низших актиноидов (НА), включая нептуний, америций и кюрий (Np, Am, Cm).

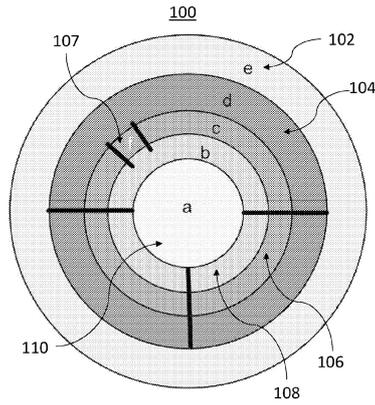
19. Система трансмутатора по п.18, причем второй комплект резервуаров выполнен с возможностью работы в критическом состоянии.

20. Система трансмутатора по пп.18 и 19, причем стенки одного из первого комплекта резервуаров или второго комплекта резервуаров изготовлены из материалов на основе углерода.

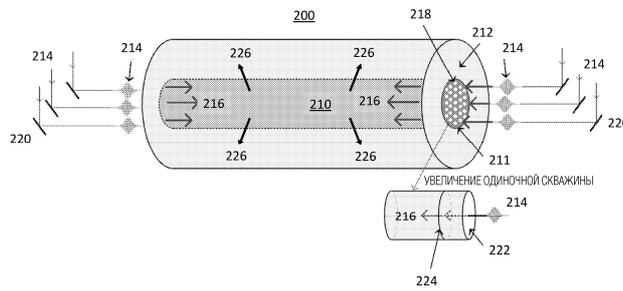
21. Система трансмутатора по п.20, причем материалы на основе углерода представляют собой алмаз.



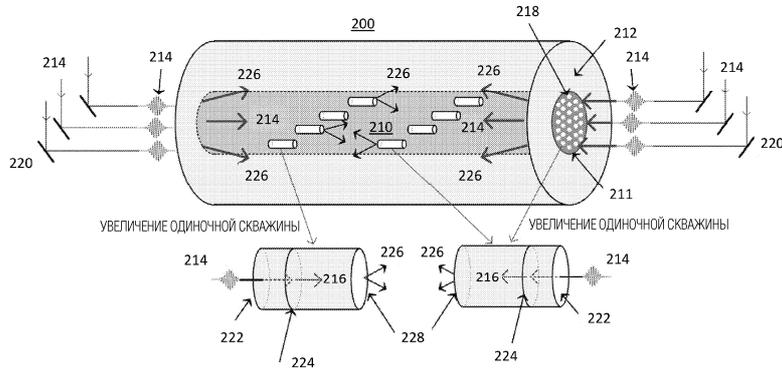
Фиг. 1А



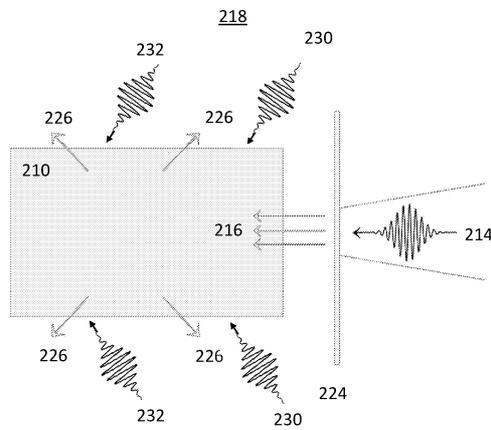
Фиг. 1В



Фиг. 2А, 2В

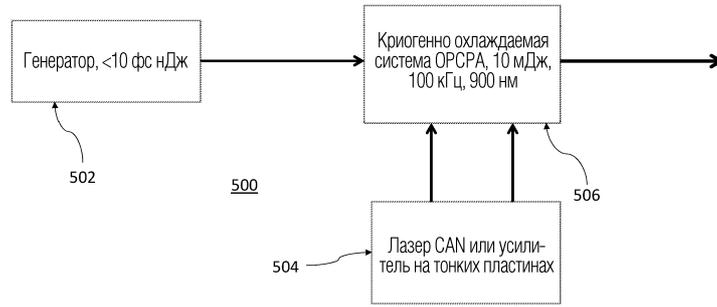


Фиг. 3А, 3В

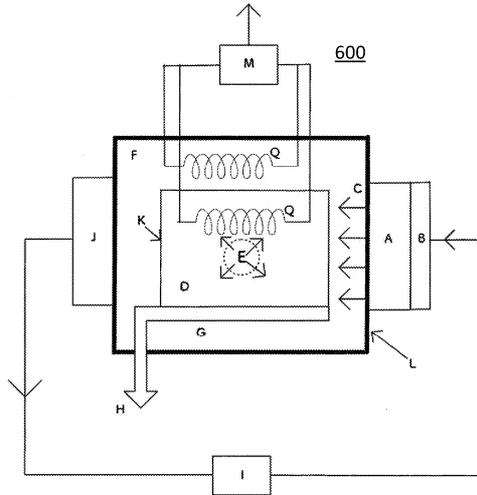


Фиг. 4

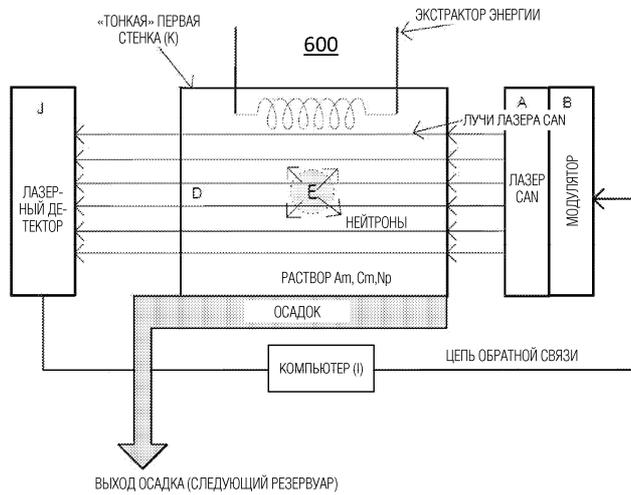
Эффективная высокая пиковая и средняя мощность лазерной трансмутации ядерных отходов



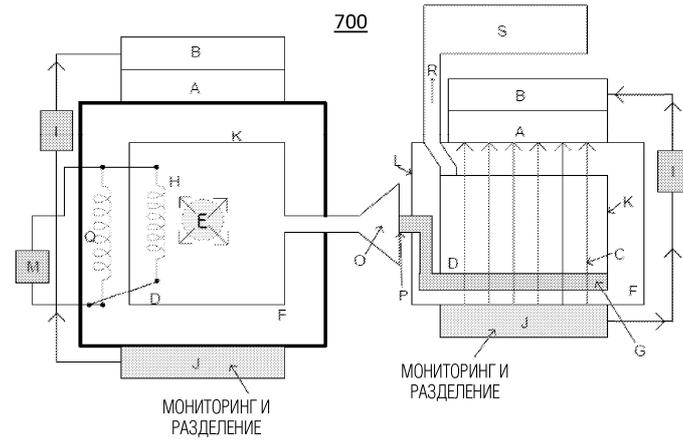
Фиг. 5



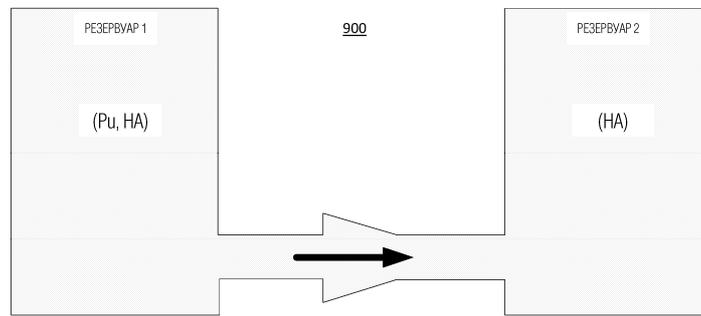
Фиг. 6



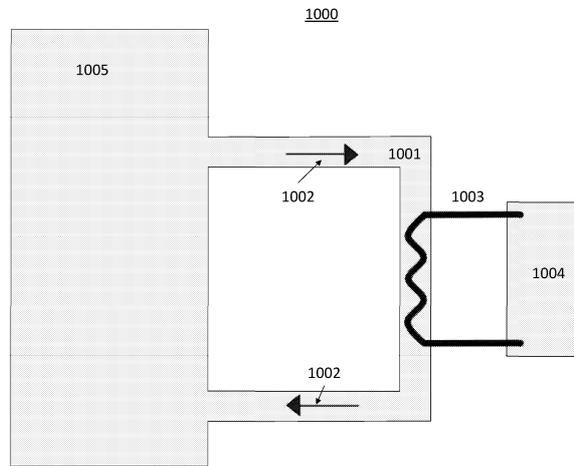
Фиг. 7



Фиг. 8

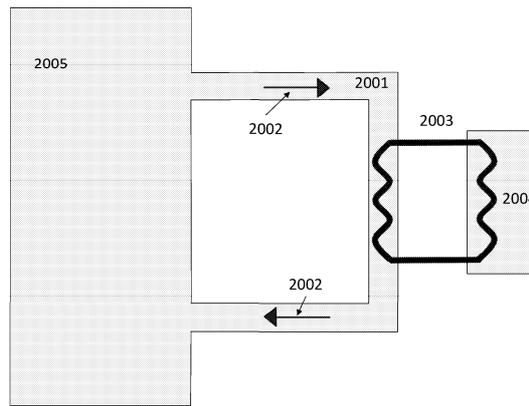


Фиг. 9



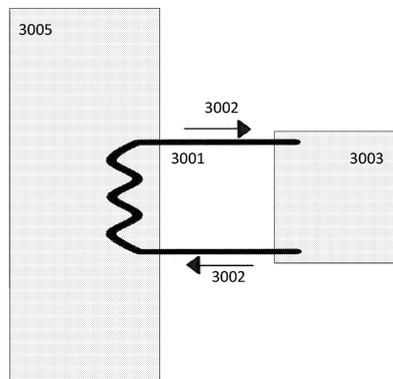
Фиг. 10

2000



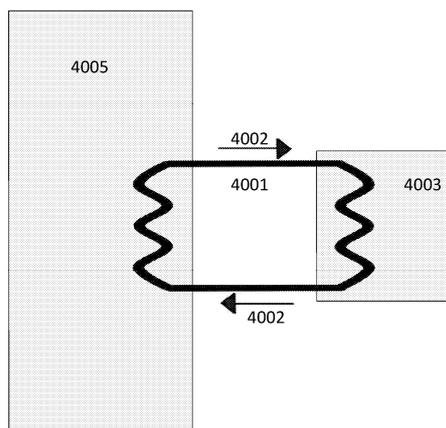
Фиг. 11

3000



Фиг. 12

4000



Фиг. 13