



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G21C 1/00 (2019.02)

(21)(22) Заявка: 2018137321, 23.10.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.10.2018

Дата регистрации:
06.06.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.10.2018

(45) Опубликовано: 06.06.2019 Бюл. № 16

Адрес для переписки:

607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр-кт
Мира, 37, ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ",
заместителю начальника службы по
инновациям и инвестициям - начальнику
управления В.Е. Миронову

(72) Автор(ы):

Маршалкин Василий Ермолаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное унитарное
предприятие "Российский федеральный
ядерный центр - Всероссийский
научно-исследовательский институт
экспериментальной физики" (ФГУП
"РФЯЦ-ВНИИЭФ") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете

о поиске: RU 2619599 C1, 17.05.2017. RU
2541516 C1, 20.02.2015. RU 2163929 C2,
10.03.2001. US 20100034336 A1, 11.02.2010.

(54) Способ эксплуатации ядерного реактора в замкнутом ториевом топливном цикле

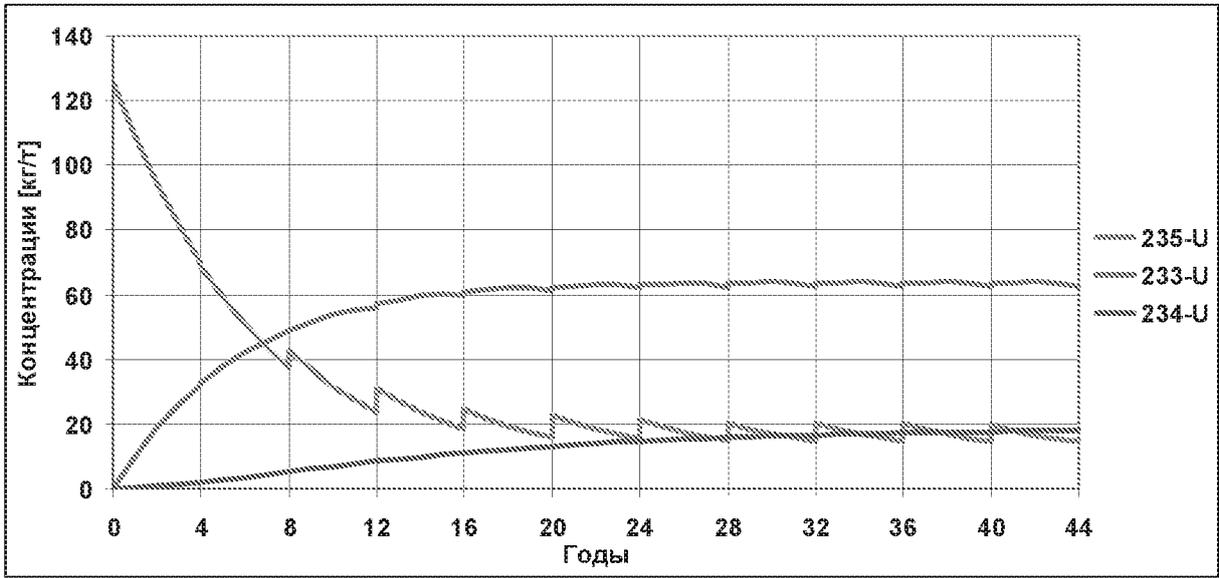
(57) Реферат:

Изобретение относится к способу эксплуатации водо-водяных ядерных реакторов (ВВЭР) в ториевом топливном цикле ($^{235}\text{U}_\alpha\text{ }^{238}\text{U}_\beta\text{ }^{232}\text{Th}_{1-\alpha-\beta}\text{O}_2$), обеспечивающем наработку активных изотопов урана ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu с выходом на замкнутый торий-уран-плутониевый топливный цикл равновесного изотопного состава с регулированием работы реактора путем изменения спектра нейтронов. Способ включает первоначальную загрузку активной зоны реактора оксидным ториевым топливом с высоким обогащением по изотопу ^{235}U (^{235}U ~99%, ^{238}U ~1%) с возможностью перехода в следующих кампаниях к работе на торий-уран-плутониевом топливе равновесного изотопного состава. Нарботанные в процессе одной кампании актиноиды, включающие

делящиеся изотопы ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu , используют в качестве материала, способного к ядерному делению при формировании загрузки для следующей кампании, добавляя по окончании каждой кампании к выгруженному из активной зоны реактора облученному торий-уран-плутониевому топливу на старте последующей кампании необходимое для обеспечения дальнейшего рециклирования актиноидов количество сырьевого тория. В качестве замедлителя и теплоносителя при старте всех кампаний используют тяжелую воду D_2O с последующим разбавлением ее в течение кампании легкой водой H_2O . Техническим результатом является упрощение рециклирования топлива и упрощение обращения с радиоактивными отходами. 3 ил.

RU 2 690 840 C1

RU 2 690 840 C1



Фиг.1

RU 2690840 C1

RU 2690840 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G21C 1/00 (2019.02)

(21)(22) Application: **2018137321, 23.10.2018**

(24) Effective date for property rights:
23.10.2018

Registration date:
06.06.2019

Priority:

(22) Date of filing: **23.10.2018**

(45) Date of publication: **06.06.2019** Bull. № 16

Mail address:

**607188, Nizhegorodskaya obl., g. Sarov, pr-kt Mira,
37, FGUP "RFYATS-VNIIEF", zamestitelyu
nachalnika sluzhby po innovatsiyam i investitsiyam
- nachalniku upravleniya V.E. Mironovu**

(72) Inventor(s):

Marshalkin Vasilij Ermolaevich (RU)

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe unitarnoe
predpriyatie "Rossijskij federalnyj yadernyj
tsentr - Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij
institut eksperimentalnoj fiziki" (FGUP
"RFYATs-VNIIEF") (RU)**

(54) **METHOD OF OPERATING A NUCLEAR REACTOR IN A CLOSED THORIUM FUEL CYCLE**

(57) Abstract:

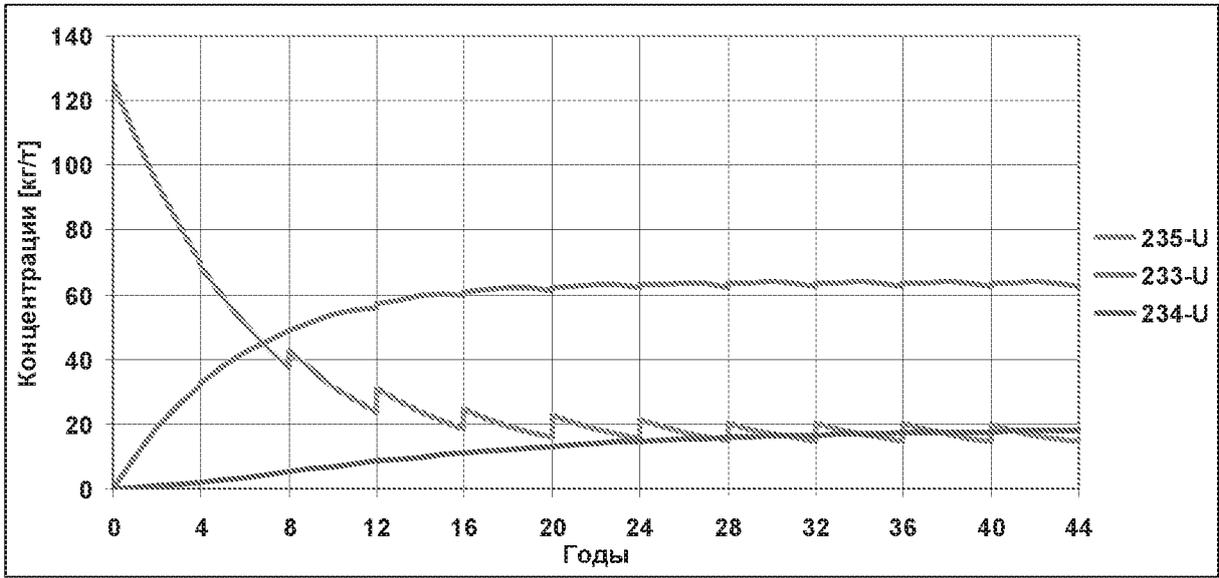
FIELD: nuclear physics and equipment.

SUBSTANCE: invention relates to a method of operating water-cooled nuclear reactors (WWER) in a thorium fuel cycle ($^{235}\text{U}_\alpha$ $^{238}\text{U}_\beta$ $^{232}\text{Th}_{1-\alpha-\beta}$) O_2 , providing operating time of active uranium isotopes ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu and ^{241}Pu with output to closed thorium-uranium-plutonium fuel cycle of equilibrium isotopic composition with regulation of reactor operation by changing neutron spectrum. Method includes initial loading of reactor core with thorium oxide fuel with high enrichment by isotope ^{235}U (^{235}U -99 %, ^{238}U -1 %) with possibility of transition in the following campaigns to operation on thorium-uranium-plutonium fuel of equilibrium isotopic

composition. Actinides produced in the process of one campaign, including fissile isotopes ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu and ^{241}Pu is used as a material capable of nuclear fission when generating a load for the next campaign, at the end of each campaign, adding to the thorium-uranium-plutonium fuel irradiated from the reactor core, at the start of the subsequent campaign, the amount of crude thorium required for further recycling of actinides. As retarder and heat carrier at start of all campaigns heavy water D_2O is used with further dilution thereof with light water H_2O for the campaign.

EFFECT: technical result is simplification of fuel recycling and simplified handling of radioactive wastes.

1 cl, 3 dwg



Фиг.1

RU 2690840 C1

RU 2690840 C1

Изобретение относится к области атомной энергетики, к способам эксплуатации водо-водяных ядерных реакторов (ВВЭР) в ториевом топливном цикле ($^{235}\text{U}_\alpha$ $^{238}\text{U}_\beta$ $^{232}\text{Th}_{1-\alpha-\beta}$) O_2 , обеспечивающим наработку активных изотопов урана ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu с выходом на замкнутый торий-уран-плутониевый топливный цикл равновесного изотопного состава с регулированием работы реактора путем изменения спектра нейтронов.

Основными проблемами атомной энергетики, которые остаются актуальными в настоящее время являются: улучшение эффективности использования топлива, повышение безопасности эксплуатации реактора, упрощение обращения с радиоактивными отходами, создание технологического барьера на пути распространения делящихся материалов. Использование уран-уранового топлива в ядерной энергетике сопровождается наработкой младших актиноидов ^{237}Np , Am , Cm , наличие которых затрудняет дальнейшее рециклирование топлива, содержащего эти актиноиды. Их утилизация предполагается путём использования быстрых реакторов или реакторов мусорщиков. Однако реализация этих технологий задерживается. Эта проблема остаётся и при использовании высокообогащённого урана в оксидном ториевом топливном реакторе типа ВВЭР с использованием в качестве теплоносителя тяжёлой воды и её разбавления лёгкой водой при переходе к замкнутому торий-уран-плутониевому топливному циклу. Задачей, на решение которой направлено заявляемое изобретение, является разработка способа эксплуатации реактора типа ВВЭР, вырабатывающего энергию в замкнутом топливном цикле, обеспечивающего упрощение обращения с отходами ядерного топлива и наработку после каждой кампании актиноидов с таким же или большим количеством делящегося материала, подходящего для повторного использования, чем его было в активной зоне в начале кампании.

Так, например, известен способ эксплуатации ядерного реактора в уран – ториевом топливном цикле с расширенным воспроизводством изотопа ^{233}U (патент RU 2541516, публик. 20.02.2015). Для упрощения регулирования реактивности, повышения безопасности эксплуатации и увеличения ресурса активной зоны способ включает следующие операции: осуществление первоначальной загрузки реактора оксидным уран-ториевым топливом с массовым соотношением изотопа ^{233}U к тяжелому металлу в активной зоне, равным 0,072; использование изотопа ^{233}U в качестве основного материала, способного к ядерному делению; формирование интенсивности нейтронного потока и его энергетического распределения в начале кампании реактора в промежуточном спектре, в котором доля быстрых нейтронов превалирует над тепловыми; использование в качестве замедлителя и теплоносителя тяжелой воды, при этом отношении объемов вода/топливо выбирают в диапазоне значений не более 1,2; управление работой реактора на мощности путем удержания критического состояния ($K_\infty=1$) и обеспечения баланса между нарабатываемыми изотопами ^{233}U и поглотителями нейтронов, осуществляют при непрерывном разбавлении тяжелой воды (D_2O) легкой водой (H_2O) в течение всей кампании реактора при выборе объемного соотношения состава теплоносителя $\text{D}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$ в соответствии с выражением $(\alpha \text{D}_2\text{O} + (1-\alpha) \text{H}_2\text{O})$, где коэффициент α , который зависит от скорости выгорания топлива, скорости наработки поглотителей, времени эксплуатации реактора и т.д. выбирают из диапазона $1 \geq \alpha \geq 0,8$.

Топливные стержни исходных сборок выполняют однородными из $(^{233}\text{U}-^{232}\text{Th})\text{O}_2$ таблеток. Начало работы реактора характеризуется выгоранием изотопа ^{233}U и наиболее эффективной наработкой распадающегося с задержкой ^{233}Pa в ^{233}U . В способе эксплуатации АЗ, сформированной из тепловыделяющих сборок, изменение спектра нейтронов ведут путем воздействия на состав теплоносителя, с темпом, соответствующим скорости выгорания ^{233}U и его наработки, уменьшают содержание тяжелой воды в течение кампании реактора до значения 0,8 (к концу 6 года). Это разбавление сопровождается смягчением спектра нейтронов и понижением удельного содержания ^{233}U , необходимого для поддержания критического состояния. Нарботка поглотителей нейтронов (осколки деления, ^{234}U , ^{233}Pa ...) сопровождается дополнительной наработкой ^{233}U , превышающей его выгорание.

Для повышения эффективности использования ядерного топлива, упрощения обращения с радиоактивными отходами процесс эксплуатации активной зоны реактора необходимо осуществлять в замкнутом топливном цикле с возможностью перехода в следующих кампаниях к работе на торий-уран-плутониевом топливе равновесного изотопного состава. Так, например, известен способ эксплуатации ядерного реактора в замкнутом ториевом топливном цикле (патент RU2634476, публик. 31.10.2017), выбранный в качестве ближайшего аналога. Способ включает первоначальную загрузку активной зоны реактора оксидным ториевым топливом, содержащим изотоп тория ^{232}Th и материал, способный к ядерному делению, массовое соотношение которого к тяжелому металлу в активной зоне выбирают в зависимости от используемого материала, формирование интенсивности нейтронного потока и его энергетического распределения в начале кампании реактора в спектре, в котором доля быстрых нейтронов превалирует над тепловыми, используя в качестве замедлителя и теплоносителя тяжелую воду D_2O с выбором отношения объемов вода/топливо не более 1,23, которое зависит от вида и удельного содержания в топливе делящегося изотопа, и управление работой реактора на мощности путем удержания его в критическом состоянии, обеспечивая баланс между нарабатываемым изотопом ^{233}U и поглотителями нейтронов, а также наработку актиноидов, включающих делящиеся изотопы ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu , путем непрерывного разбавления в течение кампании реактора тяжелой воды легкой водой H_2O , процесс эксплуатации активной зоны реактора осуществляют в замкнутом топливном цикле с возможностью перехода в следующих кампаниях к работе на торий-уран-плутониевом топливе равновесного изотопного состава, для чего наработанные в процессе одной кампании актиноиды, включающие делящиеся изотопы ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu , используют в качестве материала, способного к ядерному делению при формировании загрузки для следующей кампании, добавляя по окончании каждой кампании к выгруженному из активной зоны реактора облученному торий-уран-плутониевому топливу на старте последующей кампании необходимое для обеспечения дальнейшего рециклирования актиноидов количество сырьевого тория, при этом в случае содержания в облученном топливе актиноидов, включающих делящиеся изотопы, в недостаточном для достижения критического состояния при загрузке последующей кампании количестве, осуществляют обогащение топлива, по крайней мере, по одному из делящихся изотопов, а если их содержание превышает необходимое количество, то излишки убирают, причем в качестве

замедлителя и теплоносителя при старте всех последующих кампаний используют тяжелую воду D_2O с последующим разбавлением ее в течение кампании легкой водой H_2O при отношении объемов вода/топливо в активной зоне реактора выбирают не более 1,23.

Нейтронная кинетика и изотопное преобразование первой кампании оказались такими, что падение реактивности топлива при выгорании ^{235}U и наработке поглотителей нейтронов с избытком компенсировалось её повышением (без осколков деления) при наработке изотопа ^{233}U . Оказалось, что для стартовой загрузки второй кампании в критическом состоянии ($K_{\infty}=1$) при использовании тяжелой воды на старте достаточно использования 99% актиноидов отработавшего топлива первой кампании и добавления тория до тонны тяжелого металла. Однако, начиная с третьей кампании, для обеспечения критического состояния ($K_{\infty}=1$) в стартовом состоянии последующей кампании оказалось необходимым добавление 7~5 кг/т обогащенного урана к актиноидам, извлекаемым из отработавшего топлива предыдущей кампании. Основная причина необходимости этого добавления обусловлена наработкой значимого количества последовательно поглощаемых нейтроны изотопов ^{236}U , ^{237}Np , ^{238}Pu на стартовом активном изотопе ^{235}U . Для более качественной оптимизации нейтронной кинетики и изотопного преобразования при выходе на равновесный состав замкнутого торий-уран-плутониевого цикла необходимы дальнейшие усовершенствования.

Техническим результатом заявляемого изобретения является упрощение рециклирования топлива и упрощение обращения с радиоактивными отходами.

Указанный технический результат достигается за счет того, что в способе эксплуатации ядерного реактора в замкнутом ториевом топливном цикле, включающем первоначальную загрузку активной зоны реактора оксидным ториевым топливом ($^{235}U_{\alpha}$ $^{238}U_{\beta}$ $^{232}Th_{1-\alpha-\beta}$) O_2 с возможностью перехода в следующих кампаниях к работе на торий-уран-плутониевом топливе равновесного изотопного состава, для чего наработанные в процессе одной кампании актиноиды, включающие делящиеся изотопы ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu , используют в качестве материала, способного к ядерному делению при формировании загрузки для следующей кампании, добавляя по окончании каждой кампании к выгруженному из активной зоны реактора облученному торий-уран-плутониевому топливу на старте последующей кампании необходимое для обеспечения дальнейшего рециклирования актиноидов количество сырьевого тория, при этом в случае содержания в облученном топливе актиноидов, включающих делящиеся изотопы в недостаточном для достижения критического состояния при загрузке последующей кампании количестве, осуществляют обогащение топлива, по крайней мере, по одному из делящихся изотопов, а если их содержание превышает необходимое количество, то излишки убирают, причем в качестве замедлителя и теплоносителя при старте всех кампаний используют тяжелую воду D_2O с последующим разбавлением ее в течение кампании легкой водой H_2O при отношении объемов вода/топливо в активной зоне реактора не более 1,23, новым является то, что для первоначальной загрузки активной зоны реактора используют топливо с высоким обогащением по изотопу ^{235}U ($^{235}U > 90\%$, $^{238}U < 10\%$), а по окончании первых трех кампаний выгруженное из активной зоны реактора облученное торий-уран-плутониевое топливо перерабатывают, понижая содержание изотопа ^{236}U в уране до менее, чем 2

% по мас.

Использование для первоначальной загрузки активной зоны реактора топлива с высоким обогащением по изотопу ^{235}U ($^{235}\text{U} > 90\%$, $^{238}\text{U} < 10\%$) позволяет оптимизировать нейтронную кинетику активной зоны реактора путём понижения содержания изотопа ^{238}U , являющимся сырьевым изотопом при наработке младших актиноидов - Am, Cm, при рециклировании топлива и восполнении выгорающего тория. Использование в стартовой топливной композиции урана с более высоким обогащением изотопом ^{235}U (пониженным содержанием ^{238}U) будет сопровождаться соответствующим понижением наработки изотопа ^{239}Pu и более тяжёлых изотопов и элементов в первых кампаниях. Поэтому в стартовой загрузке целесообразно понижать содержание ^{238}U (в пределах стремиться к 100% обогащению урана изотопом ^{235}U) и таким образом соответственно понижать наработку изотопа ^{239}Pu и изотопов более тяжёлых изотопов и элементов.

Понижение содержания изотопа ^{236}U в уране до менее, чем 2 % по мас. в выгруженном из активной зоны реактора облученном торий-уран-плутониевом топливе, также позволяет оптимизировать нейтронную кинетику активной зоны реактора путём понижения содержания изотопа ^{236}U , являющимся сырьевым изотопом при наработке младших актиноидов ^{237}Np , Am и Cm при рециклировании топлива и восполнении выгорающего тория.

Необходимость понижения содержания изотопа ^{236}U по окончании первых трех кампаний связана с тем, что наработка ^{236}U идёт наиболее интенсивно в процессе этих кампаний в связи со значимым содержанием ^{235}U в первоначальной загрузке, выходит на насыщение и затем понижается по мере выгорания ^{235}U .

Выделенный изотоп ^{236}U и вместе с ним некоторое количество ^{238}U и ^{235}U являются долгоживущими и не представляют радиологической опасности при их хранении. Они могут быть утилизированными на более поздних этапах замкнутого торий-уран-плутониевого топливного цикла с лучшим нейтронным балансом. При этом сравнительно низкие количества нарабатываемых изотопов ^{237}Np , ^{238}Pu могут рециклироваться.

На фиг.1-3 представлены картины изотопного преобразования: фиг.1 - стартового изотопа ^{235}U и нарабатываемых ^{233}U и ^{234}U ; фиг.2 - радиационным захватом нейтронов изотопом ^{235}U с наработкой ^{236}U и с последующей наработкой изотопов ^{237}Np , ^{238}Pu ; фиг.3 – изотопов Pu.

Примером конкретного выполнения заявляемого способа может служить способ эксплуатации ядерного реактора типа ВВЭР в замкнутом ториевомтопливном цикле. Топливные стержни исходных сборок первой кампании выполняют с обогащением по изотопу ^{235}U из ($^{235}\text{U}_{0,1343}$ $^{238}\text{U}_{0,0013}$ $^{232}\text{Th}_{0,8624}$) O_2 таблеток. При запуске реактора в качестве теплоносителя используют тяжелую воду, с ее содержанием, близким к 100 %, получаемую, например, в промышленной установке по дезинтегрированию ассоциатов молекул тяжелой и легкой воды (патент RU 2163929 C2 C12M 1/33, публик. 10.03.2001), либо способом многоступенчатого изотопного обмена (патент RU 2060801 C1 B01D 59/28, публик. 27.05.96), либо из подземных вод (патент RU 2393987 C2 C01B

5/02, публик. 10.07.2010).

Нейтронно-физические расчёты были выполнены для одно-твэльной ячейки, предложенной МАГАТЭ (для реактора PWR) с заменой энергетического плутония изотопом ^{235}U , легкой воды - тяжелой водой. Были проведены расчёты изменения

5 изотопного состава и нейтронной кинетики в десяти последовательных 4-х летних кампаниях для ячейки с радиусом воды, равным $R_B = 0,75$ см в приближении бесконечной среды (ячейка с удельным содержанием ^{235}U , равным 126 кг, а ^{238}U - 12,6 кг на тонну

10 тяжелого металла, водотопливным отношением $V_B/V_T = 1.226$ и удельной мощностью $P=211$ Вт/см). В течение облучения критическое состояние ($K_\infty=1$) ячейки поддерживается разбавлением тяжёлой воды лёгкой водой H_2O в соответствии с выражением $(\alpha \text{D}_2\text{O} + (1-\alpha) \text{H}_2\text{O})$, где коэффициент α является параметром, определяющим количество

15 разбавления. Разбавление можно осуществить, выполнив соединение контура теплоносителя с водяным объемом, в котором находится легкая вода для его разбавления. Это соединение формируют на участке трубопровода после прохождения теплоносителя через парогенератор. Разбавление осуществляют с обеспечением постоянного впрыскивания легкой воды в контур теплоносителя. Подмешивание легкой

20 воды в замедлителе является способом реализации запаса реактивности для поддержания ячейки (реактора) в критическом состоянии по мере выгорания реакцией деления стартового ^{235}U и наработки поглотителей нейтронов при соблюдении эффективной экономии нейтронов.

Если рассматривать результаты расчётов изменения изотопного состава и нейтронной кинетики в десяти последовательных кампаниях, то можно увидеть, что нейтронная

25 кинетика и изотопное преобразование в замкнутом торий-уран-плутониевом топливном цикле представляются наиболее оптимальными и эффективными. Картину изотопного преобразования можно условно разделить на три группы. Первая, наиболее интенсивно

30 меняющаяся группа представлена на фиг.1 и связана с нейтронами деления стартового изотопа ^{235}U и нарабатываемого ^{233}U , их превалирующего поглощения ^{232}Th (из-за его большого содержания) с наработкой изотопа ^{233}U , деления ^{233}U и радиационного

35 захвата нейтронов им с наработкой ^{234}U . Последующего захвата нейтронов ^{234}U и наработкой исходного изотопа ^{235}U . Этот «укороченный замкнутый цикл» интенсивно работает на протяжении всех кампаний замкнутого торий-уран-плутониевого

40 топливного цикла и в каждой кампании в основном определяет энерговыделение, нейтронную кинетику и изотопное преобразование в топливе. Вторая группа представлена на рисунке 2 и связана с содержанием ^{238}U , радиационным захватом

45 нейтронов изотопом ^{235}U с наработкой ^{236}U и с последующей наработкой изотопов ^{237}Np , ^{238}Pu в последовательных захватах нейтронов. Нарботка ^{236}U идёт наиболее интенсивно в процессе первых кампаний в связи со значимым содержанием ^{235}U в первоначальной загрузке, выходит на насыщение и затем понижается по мере выгорания ^{235}U . Отсутствие активных изотопов в этой группе определяет её в качестве основной

поглощающей нейтроны группой. Она является переходной областью между парами активных изотопов ^{233}U , ^{235}U и ^{239}Pu , ^{241}Pu . Её наработка и интенсивность поглощения нейтронов в ней на порядок ниже при использовании ^{233}U вместо ^{235}U в топливе, что

является одним из главных преимуществ использования ^{232}Th относительно ^{238}U в качестве сырьевого изотопа и предоставляет возможность понижения наработки младших актиноидов. Третья группа представлена на фиг.3 и связана с изотопами плутония. Видно, что в первых кампаниях наработка ^{239}Pu происходит на ^{238}U исходной стартовой загрузки. По мере наработки ^{238}Pu на ^{237}Np (начиная с ^{236}U) дополнительно возрастает наработка ^{239}Pu . Деление ^{239}Pu нейтронами любой энергии понижает его содержание и наработку ^{240}Pu и последующих изотопов и элементов. Аналогичная ситуация имеет место с парой ^{241}Pu и ^{242}Pu . Нетрудно увидеть сравнительно низкую интенсивность наработки, изотопного преобразования и соответственно второстепенную роль плутония в энерговыделении в таком топливе. Однако при этом процесс деления ядер плутония ограничивает наработку ядер америция, кюрия и изотопов более тяжёлых элементов. Из фиг. 2 и 3 видно, что использование в стартовой топливной композиции урана с более высоким обогащением изотопом ^{235}U (пониженным содержанием ^{238}U) будет сопровождаться соответствующим понижением наработки изотопа ^{239}Pu и более тяжёлых изотопов и элементов в первых кампаниях. Поэтому в стартовой загрузке целесообразно понижать содержание ^{238}U (в пределе стремиться к 100% обогащению урана изотопом ^{235}U) и таким образом соответственно понижать наработку изотопа ^{239}Pu и изотопов более тяжёлых изотопов и элементов.

Из фиг.2 видно, что после каждой из трёх первых кампаний целесообразно выделять уран из облучённого ядерного топлива и путём изотопного разделения освобождать его от изотопа ^{236}U до уровня 1-2% и ниже, соответственно обогащая его изотопами с более низкими массовыми числами. При этом в кампаниях уменьшается последовательное поглощение нейтронов ^{236}U , ^{237}Np , ^{238}Pu (см. фиг. 2), что значительно улучшает нейтронный баланс и понижает расход ^{235}U . Вместе с этим оптимизируется выход на равновесный изотопный состав замкнутого торий-уран-плутониевого топливного цикла (с минимальным содержанием изотопов ^{236}U , ^{237}Np , ^{238}Pu), в котором и будет работать будущая ядерная энергетика.

Выделенные изотопы ^{236}U и некоторое количество ^{235}U и ^{238}U могут быть утилизированными на более поздних этапах замкнутого торий-уран-плутониевого топливного цикла с лучшим нейтронным балансом. При этом сравнительно низкие количества нарабатываемых изотопов ^{237}Np , ^{238}Pu могут рециклироваться.

Таким образом, использование разделительной технологии при подготовке стартового (понижение содержания изотопа ^{238}U) топлива и свежего топлива второй и третьей кампаний (понижение содержания изотопа ^{236}U) качественно уменьшает наработку младших актиноидов ^{237}Np , Am и Cm при стартовой загрузке реактора типа ВВЭР торием и высокообогащённым ураном. При этом понижаются содержание младших актиноидов в радиоактивных отходах и рециклируемом топливе, а также понижается потребление высокообогащённого урана.

(57) Формула изобретения

Способ эксплуатации ядерного реактора в замкнутом ториевом топливном цикле, включающий первоначальную загрузку активной зоны реактора оксидным ториевым

топливом ($^{235}\text{U}_\alpha$ $^{238}\text{U}_\beta$ $^{232}\text{Th}_{1-\alpha-\beta}$) O_2 с возможностью перехода в следующих кампаниях к работе на торий-уран-плутониевом топливе равновесного изотопного состава, для чего наработанные в процессе одной кампании актиноиды, включающие делящиеся

5 изотопы ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu , используют в качестве материала, способного к ядерному делению при формировании загрузки для следующей кампании, добавляя по окончании каждой кампании к выгруженному из активной зоны реактора облученному торий-уран-плутониевому топливу на старте последующей кампании необходимое для обеспечения дальнейшего рециклирования актиноидов количество сырьевого тория,

10 при этом в случае содержания в облученном топливе актиноидов, включающих делящиеся изотопы в недостаточном для достижения критического состояния при загрузке последующей кампании количестве, осуществляют обогащение топлива по крайней мере по одному из делящихся изотопов, а если их содержание превышает

15 необходимое количество, то излишки убирают, причем в качестве замедлителя и теплоносителя при старте всех кампаний используют тяжелую воду D_2O с последующим разбавлением ее в течение кампании легкой водой H_2O при отношении объемов вода/топливо в активной зоне реактора не более 1,23, отличающийся тем, что для первоначальной загрузки активной зоны реактора используют топливо с высоким

20 обогащением по изотопу ^{235}U ($^{235}\text{U}>90\%$, $^{238}\text{U}<10\%$), а по окончании первых трех кампаний выгруженное из активной зоны реактора облученное торий-уран-плутониевое топливо перерабатывают, понижая содержание изотопа ^{236}U в уране до менее чем 2 % мас.

25

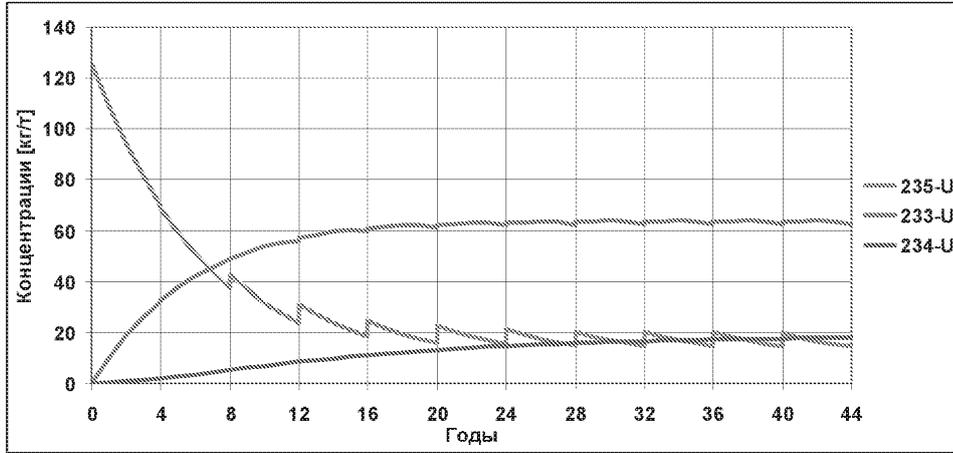
30

35

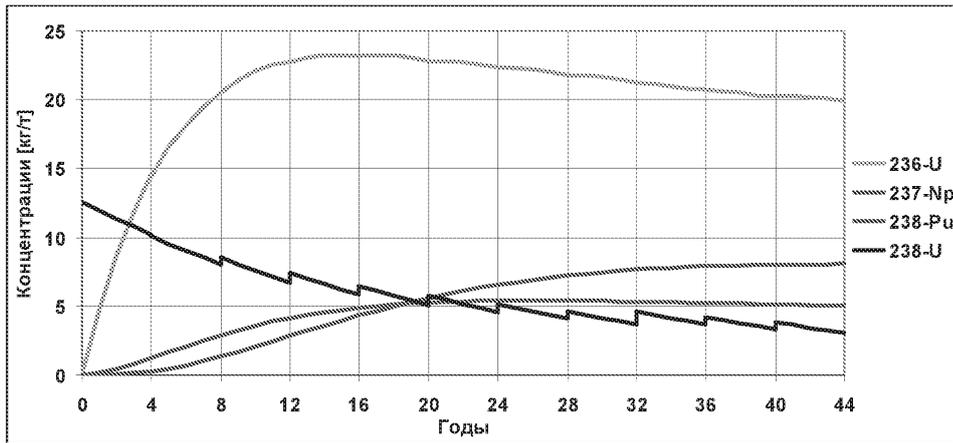
40

45

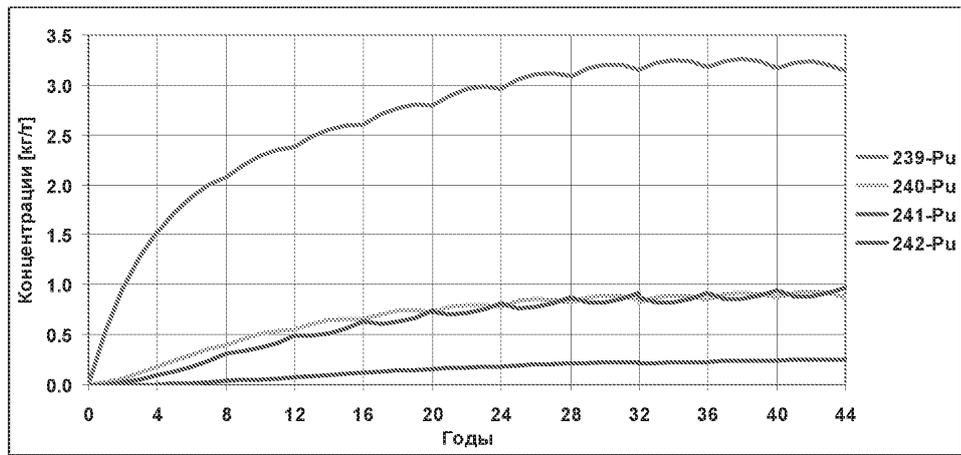
Способ эксплуатации ядерного реактора в замкнутом ториевом топливном цикле



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг.3