



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012147199/07, 06.11.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
06.11.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 06.11.2012

(43) Дата публикации заявки: 20.05.2014 Бюл. № 14

(45) Опубликовано: 10.09.2014 Бюл. № 25

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 99237 U1, 10.11.2010. RU 2079907
C1, 20.05.1997. US 7107287 B2, 12.09.2006, . JP
58165098 A, 30.09.1983

Адрес для переписки:

456770, Челябинская обл., г. Снежинск, ул.
Васильева, 13, ФГУП "РФЯЦ-ВНИИТФ им.
академ. Е.И. Забабахина", Отдел ис, а/я 245, Г.В.
Бакалову

(72) Автор(ы):

Краев Василий Сергеевич (RU),
Казеев Виктор Григорьевич (RU),
Чернухин Юрий Илларионович (RU),
Хмельницкий Дмитрий Владимирович (RU),
Стрельцов Сергей Иванович (RU),
Терехин Владимир Александрович (RU),
Юрков Сергей Иванович (RU),
Давиденко Николай Никифорович (RU),
Яненко Юрий Евгеньевич (RU),
Лобков Юрий Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Российская Федерация в лице Открытого
акционерного общества "Российский концерн
по производству электрической и тепловой
энергии на атомных станциях" (ОАО
"Концерн Росэнергоатом") (RU),
Федеральное государственное унитарное
предприятие "Российский Федеральный
Ядерный Центр - Всероссийский Научно-
Исследовательский Институт Технической
Физики имени академика Е.И. Забабахина"
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.
Забабахина") (RU)(54) НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ ВЫГОРАНИЯ ОТВС РЕАКТОРОВ
НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

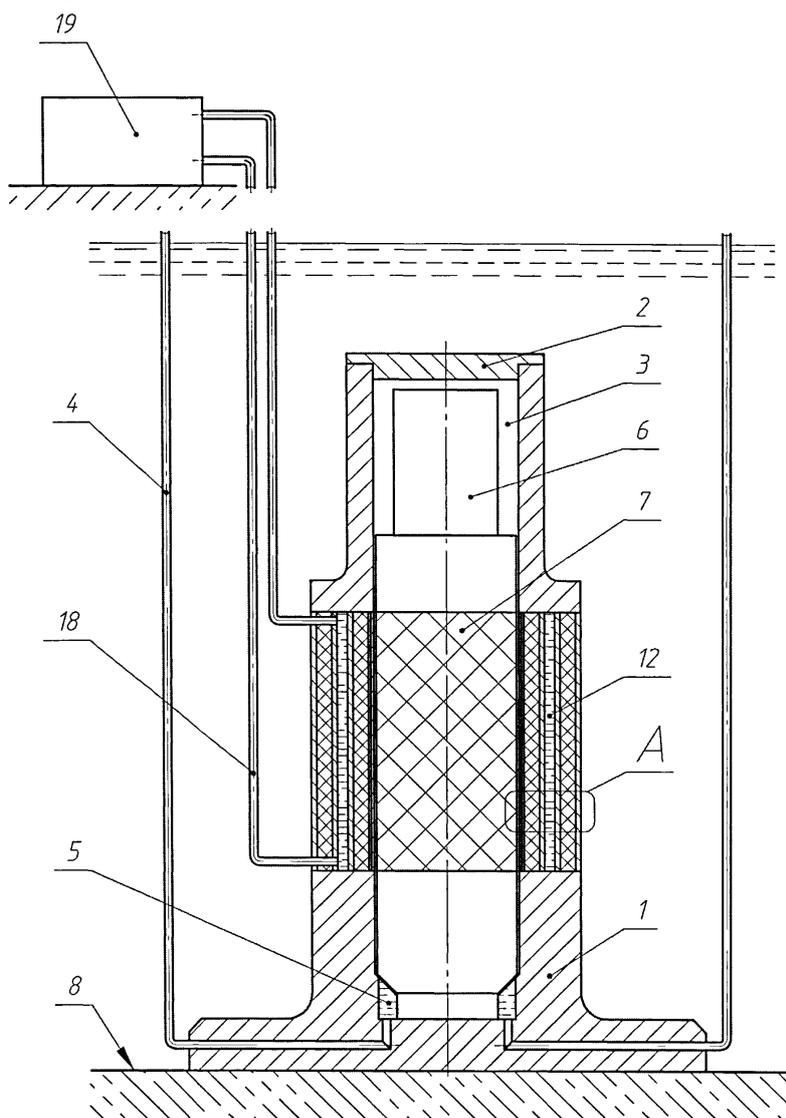
(57) Реферат:

Заявленное изобретение относится к средствам измерения глубины выгорания отработавших тепловыделяющих сборок реакторов на тепловых нейтронах. На дно бассейна выдержки под водой устанавливают диагностический контейнер. В стенке корпуса выполнена кольцеобразная полость с жидким индикаторным веществом, окруженная слоями полипропилена и слоями стали, а также слоем кадмия. Корпус содержит центральную полость, в которой размещают ОТВС. Контейнер закрывают крышкой, удаляют воду из центральной полости с ОТВС, проводят активацию индикаторного вещества, сливают в лабораторную емкость индикаторное вещество, перемешивают и берут пробу. Затем измеряют

среднюю удельную активность индикаторного вещества и определяют интенсивность нейтронного излучения ОТВС и связанную с ней глубину выгорания ОТВС. При этом кольцеобразная полость с жидким индикаторным веществом может состоять из нескольких изолированных друг от друга колец. Далее выявляют глубину выгорания для каждого кольца и составляют профиль выгорания для ОТВС. Техническим результатом является возможность всестороннего охвата индикаторным веществом активной зоны ОТВС, исключение влияния воды на точность измерения, устранение фонового влияния при измерении удельной активности индикаторного вещества, а также повышение

точности определения глубины выгорания ОТВС энергетических реакторов на тепловых нейтронах

без извлечения ОТВС из воды бассейна выдержки. 2 н. и 7 з.п. ф-лы, 3 ил.



Фиг.1

RU 2527489 C2

RU 2527489 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2012147199/07, 06.11.2012

(24) Effective date for property rights:
06.11.2012

Priority:

(22) Date of filing: 06.11.2012

(43) Application published: 20.05.2014 Bull. № 14

(45) Date of publication: 10.09.2014 Bull. № 25

Mail address:

456770, Cheljabinskaja obl., g. Snezhinsk, ul.
Vasil'eva, 13, FGUP "RFJaTs-VNIITF im. akadem.
E.I. Zababakhina", Otdel is, a/ja 245, G.V. Bakalovu

(72) Inventor(s):

Kraev Vasilij Sergeevich (RU),
Kazeev Viktor Grigor'evich (RU),
Chernukhin Jurij Illarionovich (RU),
Khmel'nitskij Dmitrij Vladimirovich (RU),
Strel'tsov Sergej Ivanovich (RU),
Terekhin Vladimir Aleksandrovich (RU),
Jurkov Sergej Ivanovich (RU),
Davidenko Nikolaj Nikiforovich (RU),
Janenko Jurij Evgen'evich (RU),
Lobkov Jurij Mikhajlovich (RU)

(73) Proprietor(s):

Rossijskaja Federatsija v litse Otkrytogo
aktsionernogo obshchestva "Rossijskij kontsern
po proizvodstvu ehlektricheskoy i teplovoj
ehnergii na atomnykh stantsijakh" (OAO
"Kontsern Rosehnergoatom") (RU),
Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe
predpriyatje "Rossijskij Federal'nyj Jadernyj
Tsentr - Vserossijskij Nauchno-Issledovatel'skij
Institut Tekhnicheskoy Fiziki imeni akademika
E.I. Zababakhina" (FGUP "RFJaTs-VNIITF im.
akadem. E.I. Zababakhina") (RU)

(54) **NEUTRON-ACTIVATION METHOD OF MONITORING BURNING OF SPENT FUEL ASSEMBLIES OF THERMAL NEUTRON REACTORS AND APPARATUS THEREFOR**

(57) Abstract:

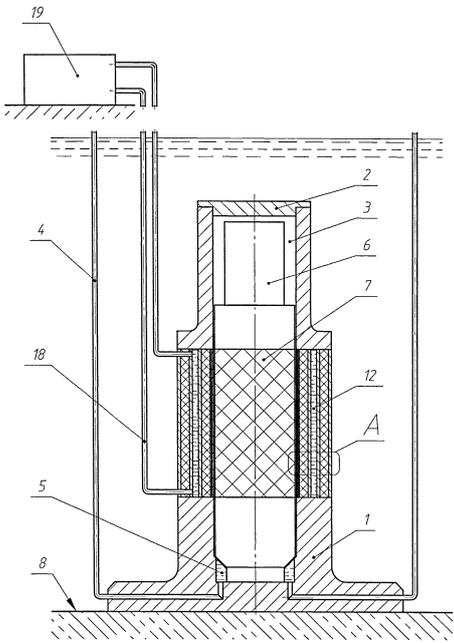
FIELD: physics, atomic power.

SUBSTANCE: present invention relates to means of measuring burn-up of spent fuel assemblies of thermal neutron reactors. A diagnostic container is placed at the bottom of a cooling pond under water. The wall of the housing has an annular cavity with a liquid tracer substance surrounded by polypropylene layers and steel layers, as well as a cadmium layer. The housing has a centre cavity in which spent fuel assemblies are placed. The container is closed with a cover. Water is removed from the centre cavity with the spent fuel assemblies. The tracer substance is activated, drained into a laboratory vessel and stirred. A sample is then collected. The average specific activity of the tracer substance is measured and the neutron radiation intensity of the spent fuel assemblies and the

associated burn-up of the spent fuel assemblies is determined. The annular cavity with the liquid tracer substance can consist of multiple rings insulated from each other. Burn-up is then determined for each ring and a burn-up profile for the spent fuel assemblies is then constructed.

EFFECT: enabling all-round encircling of the core region of the spent fuel assemblies with the tracer substance, excluding the effect of water on measurement accuracy, eliminating background effect when measuring specific activity of the tracer substance and high accuracy of determining burn-up of spent fuel assemblies of thermal neutron reactors without retrieving spent fuel assemblies from the cooling pond.

9 cl, 3 dwg



Фиг. 1

RU 2527489 C2

RU 2527489 C2

Область техники

Изобретение относится к неразрушающим дистанционным методам контроля выгорания топлива отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) реакторов на тепловых нейтронах. В частности, способ и устройство предназначены для измерения 5 глубины выгорания (В) ОТВС реакторов ВВЭР-1000 в диапазоне $V \approx (15 \div 70)$ МВт·сут/кг U в реальных условиях их хранения в бассейнах выдержки, заполненных водой. Глубина выгорания топлива - количество выделившейся энергии в одном килограмме урана, содержавшегося в топливе, за время кампании реактора.

Данные о глубине выгорания отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в активных 10 зонах ОТВС представляют большой интерес для анализа и оптимизации происходящих в них процессов, а также осуществления гарантий МАГАТЭ по нераспространению ядерных материалов, что предъявляет повышенные требования к точности определения этой величины.

Предшествующий уровень техники

15 Существующие к настоящему времени методы контроля выгорания ОЯТ можно разделить на три основных группы: радиохимические методы, гамма (γ) - спектрометрические методы и нейтронные (n) методы.

Радиохимические методы основаны на отборе проб ОЯТ из ОТВС, выделении из них актиноидных элементов (U, Pu, Am, Cm) или индикаторных нуклидов - продуктов 20 деления (Cs, Se, Eu и др.), масс-спектрометрическом, α -спектрометрическом и γ -спектрометрическом определении содержания изотопов этих нуклидов в отобранных пробах и вычислении по этим данным выгорания топлива в каждой из проб. Результаты измерений для проб, проводимые этими методами, характеризуются сравнительно высокой точностью.

25 Недостатком радиохимических методов является большая длительность анализа, трудоемкость и необходимость применения громоздкого и дорогостоящего оборудования, обслуживание которого связано с проведением многочисленных ручных операций в загрязненных условиях. Как всякие разрушающие методы, радиохимические методы малоприспособны для анализа выгорания топлива во всем объеме ОТВС.

30 Гамма (γ) - спектрометрические методы основаны на измерении линейчатых γ -спектров одного или нескольких радиоактивных изотопов - продуктов деления, содержание которых в ОТВС коррелирует с выгоранием ядерного топлива. Гамма-спектрометрические методы относятся к разряду неразрушающих методов, позволяющих характеризовать выгорание ОЯТ во всем объеме ОТВС, имеющих, как правило, очень 35 большие весогабаритные показатели и сложную конструкционную структуру.

В реальных условиях дистанционной спектрометрии γ -излучения цельных крупногабаритных ОТВС (в частности, в реакторах ВВЭР-1000) достижение высокой точности проблематично прежде всего из-за трудноучитываемого эффекта самопоглощения анализируемых γ -квантов. Важным фактором, сильно влияющим на 40 точность определения этим методом выгорания ОТВС, является также большой γ -фон.

Мощность дозы γ -излучения вблизи ОТВС может достигать значений $\sim 10^4$ Р/час. Это фон, вызываемый другими, кроме анализируемых, продуктами деления, а также многократно рассеянным γ -излучением. Он увеличивает «загрузку» регистрирующей 45 аппаратуры, ведет к появлению ложных сигналов в анализируемом энергетическом окне регистрации за счет наложения сигналов от γ -квантов с энергиями, отличными от энергий диагностируемых γ -линий. Как следствие, возникает необходимость применения коллимирующих, сканирующих, фильтрующих и котировочных устройств, использование которых само может стать источником дополнительных погрешностей.

Нейтронные (n) методы основаны на сильной корреляции n-излучения ОТВС тепловых реакторов и глубины выгорания, что обязано спонтанному делению нарабатываемого в них изотопа кюрия-244 (^{244}Cm) с периодом полураспада $T_{\text{Cm}}=18,1$ лет. При $B \geq 15$ МВт сут/кг U, времени выдержки ОТВС после извлечения из активной зоны реактора $t_{\text{в}} \approx$ (3÷15) лет и фиксированном начальном обогащении урана в топливе. Эта связь между интенсивностью n-источников в ОТВС (S_{n}) и глубиной выгорания (B) ОТВС с хорошей точностью описывается степенной функцией:

$$S_{\text{n}} \sim B^{\alpha} \cdot \exp(-\lambda_{\text{Cm}} t_{\text{в}}), \text{ при } \alpha \sim 4 \div 5 \text{ (1) где:}$$

S_{n} (н/с) - интенсивность n-источников в ОТВС,

B (МВт сут/кг U) - глубина выгорания ОТВС,

$\lambda_{\text{Cm}} = 0.69 (T_{\text{Cm}})^{-1}$ - константа радиоактивного распада ^{244}Cm ,

$t_{\text{в}} \approx (3 \div 15)$ лет - время выдержки ОТВС после извлечения из активной зоны реактора, (В.Ф.Фролов. Ядерно-физические методы контроля делящихся веществ. М., Энергоатомиздат, 1989 г.).

α - показатель корреляционной зависимости, который определяется индивидуально для каждого реакторного блока, рассчитан по программам высокого уровня, такой как ПРИЗМА-РИСК (ВНИИТФ) (зарегистрирована в отраслевом фонде алгоритмов и программ ОФАП, акт №687 от 19.11.2009).

Отсюда следует, что в n-методах достижение высокой точности определения глубины выгорания ОЯТ происходит за счет повышения точности измерения интенсивности n-источников - S_{n} .

Достоинством n-методов являются:

- большая чувствительность метода, что обеспечивается высоким значением показателя степени $\alpha \sim 4 \div 5$ в формуле (1);

- высокая представительность контроля среднего выгорания топлива по поперечному сечению ОТВС, что обеспечивается большой проникающей способностью нейтронов деления, то есть пренебрежимо малым их самопоглощением в ОТВС;

- малое влияние истории облучения ОТВС в реакторе на результаты измерений, что обусловлено достаточно большим периодом полураспада изотопа ^{244}Cm ($T_{\text{Cm}} \approx 18,1$ лет)

- основного источника регистрируемых нейтронов - и пренебрежимо малым его выгоранием за время кампании реактора (~3 года);

- слабая чувствительность погрешности определения выгорания ($\sigma_{\text{в}}$) к погрешности нейтронных измерений (σ_{n}): $\sigma_{\text{в}} \sim \alpha^{-1} \sigma_{\text{n}}$, при $\alpha \sim 4 \div 5$, а также к точности задания исходных параметров $t_{\text{в}}$ в формуле (1).

В качестве аналога был выбран принцип нейтронной активации водного раствора марганцевой соли по аналогии с методикой «марганцевый бак», применяемой для прецизионных калибровок нейтронных источников (К.Бекурц, К.Виртц. Нейтронная физика. М., Атомиздат, 1968 г.).

В измерениях по методике «марганцевый бак» контролируемый n-источник помещается в бак с водным раствором сульфата марганца (MnSO_4) на время t_0 , в течение которого производится активация ядер ^{55}Mn в результате радиационного захвата замедлившихся в воде нейтронов с образованием радиоактивного изотопа ^{56}Mn , обладающего удобными для регистрации периодом полураспада $T_{\text{Mn}}=2,58$ ч и энергиями

рождающихся при этом γ -квантов: E_γ , МэВ=0,847 (99); 1,811 (29); 2,110 (15), где в скобках указан квантовый выход в процентах на распад. После активации раствор тщательно перемешивают, берут его часть (пробу) и подвергают γ -спектрометрическому анализу для определения удельной активности (А) изотопа ^{56}Mn . Удельная активность (А) линейно связана с измеряемой интенсивностью (S_n) n -излучения контролируемого источника. Точность измерения этой величины методом «марганцевого бака» составляет $\sim(1\div 2)\%$.

Недостатком способа являются весогабаритные характеристики диагностируемой ОТВС, ее сложная структура и большое содержание делящихся материалов. Поэтому непосредственно использовать эту методику для измерений интенсивности n -излучения ОТВС в условиях бассейна выдержки невозможно.

В качестве прототипа для устройства была выбрана измерительная установка, реализующая нейтронный метод контроля выгорания ОТВС. Она представляет собой несущую конструкцию в виде плиты с центральным отверстием, обеспечивающим прохождение через него ОТВС (С.А. Андрущечко и др. Известия Вузов. Ядерная энергетика, №2, с.60-70, 2004 г.). На плите с центральным отверстием устанавливаются два или более нейтронных детекторов, как правило, в виде камер деления. Такие измерительные установки оснащены соответствующими приводами, которые позволяют производить аксиальное сканирование нейтронного потока контролируемых ОТВС путем их непрерывной или дискретной протяжки через детектирующие устройства непосредственно в бассейне выдержки. После чего результаты нейтронного сканирования ОТВС обрабатывают, усредняют по высоте ОТВС и определяют среднее выгорание топлива в контролируемой ОТВС.

Недостатком для подобных измерительных устройств, реализующих n -метод, является слишком большая погрешность определения глубины выгорания ОТВС реакторов ВВЭР-440. Погрешность составила $\sigma_B \approx (11-14)\%$ (2σ), чему соответствует погрешность n -измерений $\sigma_n \approx 30\%$.

В качестве прототипа предлагаемого способа была выбрана методика «Вилка», разработанная в LANL (Fork system) для контроля выгорания ОТВС энергетических реакторов (R.I.Ewing. Burnup verification measurements at USA nuclear utilities using the Fork-system. ICNC-95. Albuquerque. USA. v.II, p.64-68, 1995). В этой методике измеряют n -излучения ОТВС камерами деления, размещенными на рычагах несущей конструкции, выполненной в виде вилки. Сканируют активную зону ОТВС, протягивая ее между рычагами вилки непосредственно в бассейне выдержки.

Основным недостатком существующих измерительных установок является сильное влияние, оказываемое внешней средой, на показания нейтронных детекторов при типовых условиях измерений в бассейне выдержки, заполненном, как правило, борированной водой. Это приводит, во-первых, к изменению коэффициента размножения нейтронов в системе, состоящей из бассейна выдержки, измерительных установок, ОТВС, причем, зависимым от выгорания ОТВС образом. Во-вторых, к замедлению и поглощению нейтронов на их пути к детекторам, что затрудняет интерпретацию получаемых результатов измерений.

К недостаткам относится также существенное влияние сильного ($\sim 10^4$ Р/час) и переменного вдоль оси ОТВС γ -фона на работу нейтронных детекторов и определенные трудности, связанные с достижением необходимой точности юстировки ОТВС относительно детекторов при сканировании их нейтронного потока.

Эти факторы приводят к необходимости введения многочисленных и часто трудно

учитываемых поправок при обработке результатов измерений, что отражается на точности контроля выгорания исследуемых ОТВС.

Раскрытие изобретения.

5 Задачей изобретения является повышение точности нейтронно-активационного способа приборного контроля глубины выгорания ОТВС энергетических реакторов на тепловых нейтронах без извлечения ОТВС из воды бассейна выдержки.

Технический результат заключается в одновременном, всестороннем окружении активной зоны ОТВС индикаторным веществом, устранении помех от воды между активной зоной ОТВС и индикаторным веществом при его активации, устранении 10 фоновых влияний при измерении удельной активности индикаторного вещества в лабораторных условиях.

Указанный технический результат достигается тем, что в нейтронно-активационном способе контроля выгорания ОТВС реакторов на тепловых нейтронах, заключающемся в перемещении ОТВС под водой к месту измерения до сближения активной зоны ОТВС с нейтронно-чувствительным элементом, определении интенсивности (S_n) нейтронного 15 излучения ОТВС, расчете выгорания по известной зависимости между выгоранием и интенсивностью $B(S_n)$, согласно изобретению на дно бассейна выдержки под водой устанавливают диагностический контейнер с кольцеобразной полостью в стенке корпуса, заполненной жидким индикаторным веществом, и центральной полостью, в которую 20 помещают и фиксируют ОТВС. Закрывают контейнер, затем удаляют воду из центральной полости с ОТВС и проводят активацию индикаторного вещества в течение фиксированного времени. Сливают индикаторное вещество, перемешивают его, берут из него пробу, по которой измеряют среднюю удельную активность индикаторного вещества. С учетом калибровки измерительной установки определяют интенсивность 25 нейтронного излучения (S_n) и связанную с ней глубину выгорания (B) ОТВС.

Расположение индикаторного вещества в кольцеобразной полости в стенке контейнера позволяет одновременно и всесторонне окружить активную зону ОТВС по ее боковой стороне. Удаление воды из ДК, не поднимая ОТВС на поверхность воды, 30 позволяет устранить влияние воды на коэффициент умножения ОТВС и тем самым на измеряемую интенсивность источников нейтронов в ОТВС в способе контроля глубины выгорания.

Слив индикаторного вещества и дальнейшее его исследование вне бассейна выдержки позволяет исключить сильный γ -фон от диагностируемой ОТВС. Все это позволяет 35 повысить точность способа контроля глубины выгорания ОТВС.

Можно измерять удельную активность индикаторного вещества гамма-спектрометром. Это дополнительно улучшает точность способа контроля глубины выгорания.

Можно заполнять индикаторным веществом кольцеобразную полость в стенке 40 контейнера, состоящую из отдельных, изолированных друг от друга колец, внутри стенки боковой поверхности цилиндрического диагностического контейнера. После облучения индикаторное вещество из каждого кольца сливают отдельно, определяют глубину выгорания для каждого кольца, составляют профиль глубины выгорания для активной зоны ОТВС. Профиль выгорания при этом более точный, чем в прототипе, 45 из-за всестороннего охвата активной зоны ОТВС индикаторным слоем.

Задачей изобретения является создание устройства, определяющего с повышенной точностью глубину выгорания ОТВС энергетических реакторов на тепловых нейтронах без извлечения ОТВС из воды бассейна выдержки.

Технический результат заключается в одновременном, всестороннем схватывании индикаторным веществом активной зоны ОТВС, избавлении от влияния воды на точность измерения, устранении фоновых влияний при измерении удельной активности индикаторного вещества.

5 Технический результат достигается тем, что в устройстве для контроля выгорания ОТВС, содержащем чувствительный к нейтронному излучению элемент, окруженный слоями полиэтилена и кадмия, согласно изобретению устройство выполнено в виде диагностического контейнера, состоящего из крышки и корпуса с центральной полостью для размещения ОТВС и кольцеобразной полостью в боковой стенке корпуса, которая
10 окружена слоями кадмия и водородосодержащего вещества. Контейнер соединен с детектирующим блоком для измерения удельной активности индикаторного вещества, при этом чувствительный к нейтронному излучению элемент выполнен в виде жидкого индикаторного вещества, помещенного в кольцеобразную полость в боковой стенке корпуса диагностического контейнера.

15 Кольцеобразная полость конструктивно расположена вокруг активной зоны ОТВС, одновременно и всесторонне охватывает ее. Кольцеобразная полость окружена слоями кадмия и водородосодержащего вещества. При этом чувствительный к нейтронному излучению элемент представлен в виде жидкого индикаторного вещества, заполняющего кольцеобразную полость. Чувствительный элемент является жидкостью, принимающей
20 форму кольцеобразной полости, в которую она налита, а значит, также охватывает активную зону ОТВС.

Индикаторное жидкое вещество может быть выполнено в виде водного раствора сульфата марганца.

Измеритель интенсивности нейтронного излучения может быть выполнен в виде
25 гамма-спектрометра. Это дополнительно повышает точность нейтронно-активационного способа.

Водородосодержащее вещество может быть выполнено из полипропилена.

Боковая стенка корпуса диагностического контейнера может быть выполнена многослойной, состоящей из внешнего слоя стали, слоя пропропилена, слоя стали,
30 полости для индикаторного вещества, слоя стали, слоя полипропилена, внутреннего слоя стали, слоя кадмия. Слои стали придают контейнеру прочность. Слои полипропилена замедляют быстрые нейтроны. Слой кадмия пропускает поток быстрых нейтронов от ОТВС к индикаторному веществу, но уменьшает поток тепловых нейтронов извне на ОТВС. Это уменьшает фоновый источник нейтронов в ОТВС из-
35 за делений на уране. В следствие чего индикаторный раствор активизируется в точном соответствии с выгоранием ОТВС. Все это повышает точность определения интенсивности нейтронных источников в ОТВС.

Центральная полость корпуса диагностического контейнера может быть снабжена трубами для отвода воды из контейнера. Отсутствие воды между ОТВС и индикаторным
40 веществом устраняет помехи, а значит повышает точность определения интенсивности нейтронных источников в ОТВС.

Кольцеобразная полость контейнера может быть снабжена трубами. Такое решение позволяет помещать в кольцеобразную полость жидкое индикаторное вещество и удалять его для дальнейшего исследования. Измерение активности индикаторного
45 вещества производится в лабораторных условиях, где нет фоновых влияний от бассейна выдержки и других ОТВС. Это дополнительно повышает точность устройства.

Варианты осуществления изобретения.

Как показано на фиг.1, диагностический контейнер состоит из корпуса 1, на который

сверху установлена крышка 2. Внутри корпуса 1 расположена центральная полость 3. Корпус 1 снабжен трубами 4 для отвода и подвода воды 5 из бассейна выдержки. Средняя часть корпуса 1 выполнена многослойной. Внутри корпуса 1 установлена диагностируемая ОТВС 6, средняя часть которой является активной зоной 7. Корпус 1 стоит на дне 8 бассейна выдержки.

Как показано на фиг.2, многослойная средняя часть корпуса 1 состоит из следующих слоев. Внешний слой стали 9, слой полипропилена 10, слой стали 11, кольцеобразная полость, заполненная жидким индикаторным веществом 12, слой стали 13, слой полипропилена 14, слой стали 15, слой кадмия (Cd) 16.

Слои из нержавеющей стали 11 и 13 составляют оболочку кольцеобразной полости с индикаторным веществом 12. Слои 9 и 15 образуют наружную и внутреннюю обечайки диагностического контейнера.

В качестве индикаторного вещества 12 в конкретном варианте исполнения используется водный раствор сульфата марганца ($MnSO_4$). Индикаторное вещество 12 размещается между двумя слоями водородосодержащего материала, в данном случае полипропилена 10 и 14. Полипропилен 10 и 14 замедляет нейтроны, испускаемые активной зоной 7 ОТВС 6, и тем самым повышает чувствительность способа. Чувствительность - число реакций активации марганца в конкретной установке на один нейтрон, испущенный из ОТВС. Полипропилен 10 и 14 замедляет нейтроны, в результате повышается вероятность того, что нейтрон вызовет реакцию активации в индикаторном веществе 12.

Слой поглотителя нейтронов - кадмий 16, размещается на внутренней стенке корпуса 1 и служит для уменьшения нейтронной связи между активной зоной 7 ОТВС 6 и ее внешним окружением. Это ослабляет влияние окружения на результаты измерений и способствует повышению их точности.

Для получения информации об аксиальном распределении источников нейтронов в активной зоне 7 ОТВС 6 и, следовательно, глубины выгорания в ней топлива, кольцеобразная полость с индикаторным веществом 12 разбивается на несколько кольцеобразных секций 17, как показано на фиг.3. В этом случае усреднение активации раствора индикаторного вещества 12 проводится по объему каждой отдельной секции 17.

Способ осуществляется следующим образом. На дно 8 бассейна выдержки устанавливается корпус 1. ОТВС 6 поднимают над дном 8, не доставая из воды бассейна выдержки, загружают в центральную полость 3 корпуса 1. Сверху на корпус 1 устанавливают крышку 2. Из центральной полости 3 через трубы 4 удаляют воду. В кольцеобразную полость корпуса 1 заливают индикаторное вещество 12. В течение времени $t_0=10\div 15$ мин индикаторное вещество 12 активируется.

Быстрые нейтроны, испускаемые активной зоной 7 ОТВС 6, проходят через слой кадмия 16, замедляются слоями пропилен 10 и 14, попадают в индикаторное вещество 12 и активируют его. Это увеличивает чувствительность устройства, а следовательно, точность измерения глубины выгорания.

Слой кадмия 16 пропускает быстрые нейтроны от активной зоны 7 в сторону индикаторного вещества 12, но не пропускает замедлившиеся полипропиленом 10 и 14 нейтроны в обратную сторону. Это препятствует возникновению быстрых нейтронов от деления ядер делящихся изотопов, которые не связаны с истинным выгоранием ОТВС 6 в активной зоне 7 и не характеризуют выгорание ОТВС 6. Это также увеличивает точность соответствия глубины выгорания ОТВС 6 и активирования индикаторного вещества 12.

По окончании времени активации индикаторное вещество 12 откачивают через трубы 18 из кольцеобразной полости 12 корпуса 1 в емкость, находящуюся в радиационно безопасном месте. Активированное индикаторное вещество 12 сливают в баллоны-хранилища и тщательно перемешивают. Забирают пробы индикаторного вещества 12. Проводят γ -спектрометрическое определение их удельной активности блоком для измерения удельной активности 19. Активированное индикаторное вещество 12 выдерживается в баллонах-хранилищах перед повторным использованием в течение времени, необходимого для восстановления первоначальных свойств индикаторного вещества 12.

Функциональная связь между измеренной удельной активностью пробы (A_{Mn}), и интенсивностью n -излучения контролируемой ОТВС (S_n) определяется соотношением:

$$A_{Mn} = \lambda_{Mn} \cdot q_{n\gamma} \cdot S_n \cdot t_0, \quad (2), \text{ где:}$$

A_{Mn} , (Бк/л) - измеренная удельная активность пробы,

$\lambda_{Mn}=0,69 (T_{Mn})^{-1}$ - константа радиоактивного распада ^{56}Mn ,

$q_{n\gamma}$ (1/н·л) - число реакций радиационного захвата нейтронов ядрами ^{55}Mn в одном литре раствора индикаторного вещества, нормированное на один нейтрон, испущенный при спонтанном делении ^{244}Cm в ОТВС (чувствительность измерительной установки),

S_n (н/с) - интенсивность n -излучения контролируемой ОТВС,

t_0 (мин) - время активации раствора индикаторного вещества в диагностическом контейнере.

Чувствительная измерительная установка включает в себя диагностический контейнер и блок для измерения удельной активности 19 (показано на фиг.1).

Величина $q_{n\gamma}$ может быть рассчитана по нейтронно-физическим программам высокого уровня или определена в результате калибровки измерительной установки предлагаемой методики с применением эталонных источников нейтронов. Проведенные расчетные исследования с моделью измерительной установки для контроля ОТВС ВВЭР-1000 показали, что при выбранной конфигурации слоев диагностического контейнера и принятых условиях применения предлагаемого способа эта величина практически инвариантна (разброс в ее значениях не превышал $\sim 2\%$) по отношению к изменению в широком эксплуатационном диапазоне выгорания ОТВС и связанного с ним изменения изотопического состава ОЯТ, пространственного распределения n -источников по высоте активной зоны, включая условия измерения с точечным эталонным источником при калибровке измерительной установки, температуры воды в бассейне выдержки и концентрации в ней борной кислоты. Ее значение для исследованной модели измерительной установки при концентрации сульфата марганца в водном растворе индикаторного вещества $C=400$ г/л оказалось равным $q_{n\gamma} \approx (8,65 \pm 0,19) \cdot 10^{-4}$ 1/н·л.

Из чего следует, что при контроле сборок с выгоранием топлива $V \approx (15 \div 50)$ МВт·сут/кг·У, чему соответствует $S_n \approx (2 \cdot 10^6 \div 4 \cdot 10^8)$ н/с ТВС, и $t_0=10$ мин для ожидаемого значения удельной активности индикаторного вещества будем иметь $A \approx (10^2 \div 2 \cdot 10^4)$ Бк/л. Это гарантирует ее измерение существующими техническими средствами с погрешностью не более $\sim 2\%$. В результате, согласно формуле (2), для суммарной погрешности определения интенсивности n -излучения ОТВС предлагаемым методом получим $\sigma_n \sim (3 \div 4)\%$.

Таким образом, предлагаемый нейтронно-активационный метод контроля выгорания ОТВС существенно уменьшает погрешность нейтронных измерений по сравнению с другими методами.

5 Такая погрешность (σ_n) делает предлагаемый метод перспективным для решения одной из важных задач обеспечения гарантий МАГАТЭ по нераспространению ядерных материалов - задачи отдельного дистанционного определения содержания изотопов плутония ($^{239-242}\text{Pu}$) в ОТВС.

10 В доступных источниках информации не обнаружено технических решений, содержащих совокупно признаки, сходные с отличительными признаками заявляемого нейтронно-активационного метода. Следовательно, изобретение соответствует критерию «новизна».

15 В располагаемых нами источниках информации отсутствуют сведения о влиянии имеющихся в заявленном изобретении отличительных признаков в совокупности на достижение заявленного технического результата. На основании этого изобретение соответствует критерию «изобретательский уровень».

Промышленная применимость.

20 Реализация предлагаемого способа возможна, так как он основан на применении технологий, хорошо освоенных современной промышленностью. Материалы, используемые в предлагаемом способе и устройстве, на сегодняшний день известны и используются в атомной промышленности. Способ и устройство могут применяться для измерения глубины выгорания ОТВС реакторов ВВЭР-1000 в диапазоне $B \approx (15 \div 70)$ МВт-сут/кг U в реальных условиях их хранения в бассейнах выдержки, без извлечения ОТВС из воды. Это подтверждает промышленную применимость предлагаемого
25 способа и устройства.

Формула изобретения

1. Нейтронно-активационный способ контроля выгорания ОТВС реакторов на тепловых нейтронах, заключающийся в перемещении ОТВС под водой к месту измерения до сближения активной зоны ОТВС с нейтронно-чувствительным элементом,
30 определении интенсивности (S_n) нейтронного излучения ОТВС, расчете выгорания по известной зависимости между выгоранием и интенсивностью $B(S_n)$, отличающийся тем, что на дно бассейна выдержки под водой устанавливают диагностический контейнер с кольцеобразной полостью в стенке корпуса, заполненной жидким индикаторным
35 веществом, и центральной полостью, в которую помещают и фиксируют ОТВС, закрывают контейнер, затем удаляют воду из центральной полости с ОТВС и проводят активацию индикаторного вещества в течение фиксированного времени, сливают индикаторное вещество, перемешивают его, берут из него пробу, по которой измеряют среднюю удельную активность индикаторного вещества, с учетом калибровки
40 измерительной установки определяют интенсивность нейтронного излучения ОТВС (S_n) и связанную с ней глубину выгорания ОТВС (B).

2. Нейтронно-активационный способ контроля выгорания ОТВС по п.1, отличающийся тем, что заполняют индикаторным веществом кольцеобразную полость в стенке корпуса контейнера, состоящую из отдельных, изолированных друг от друга
45 колец.

3. Нейтронно-активационный способ контроля выгорания ОТВС по п.2, отличающийся тем, что после облучения раствор индикаторного вещества из каждого кольца сливают отдельно, определяют глубину выгорания ОТВС для каждого кольца,

составляют профиль выгорания для активной зоны ОТВС.

4. Устройство для контроля выгорания ОТВС, содержащее чувствительный к нейтронному излучению элемент, окруженный слоями полиэтилена и кадмия, отличающееся тем, что устройство выполнено в виде диагностического контейнера, состоящего из крышки и корпуса с центральной полостью для размещения ОТВС и кольцеобразной полостью в боковой стенке корпуса, которая окружена слоями кадмия и водородосодержащего вещества, контейнер соединен с детектирующим блоком для измерения удельной активности индикаторного вещества, при этом чувствительный к нейтронному излучению элемент выполнен в виде жидкого индикаторного вещества, помещенного в кольцеобразную полость в боковой стенке корпуса диагностического контейнера.

5. Устройство для контроля выгорания ОТВС по п.4, отличающееся тем, что жидкое индикаторное вещество выполнено в виде водного раствора сульфата марганца.

6. Устройство для контроля выгорания ОТВС по п.4, отличающееся тем, что водородосодержащее вещество выполнено из полипропилена.

7. Устройство для контроля выгорания ОТВС по п.4, отличающееся тем, что боковая стенка корпуса диагностического контейнера выполнена многослойной, состоящей из внешнего слоя стали, слоя полипропилена, слоя стали, полости для индикаторного вещества, слоя стали, слоя полипропилена, внутреннего слоя стали, слоя кадмия.

8. Устройство для контроля выгорания ОТВС п.4, отличающееся тем, что центральная полость корпуса диагностического контейнера снабжена трубами для удаления воды из контейнера.

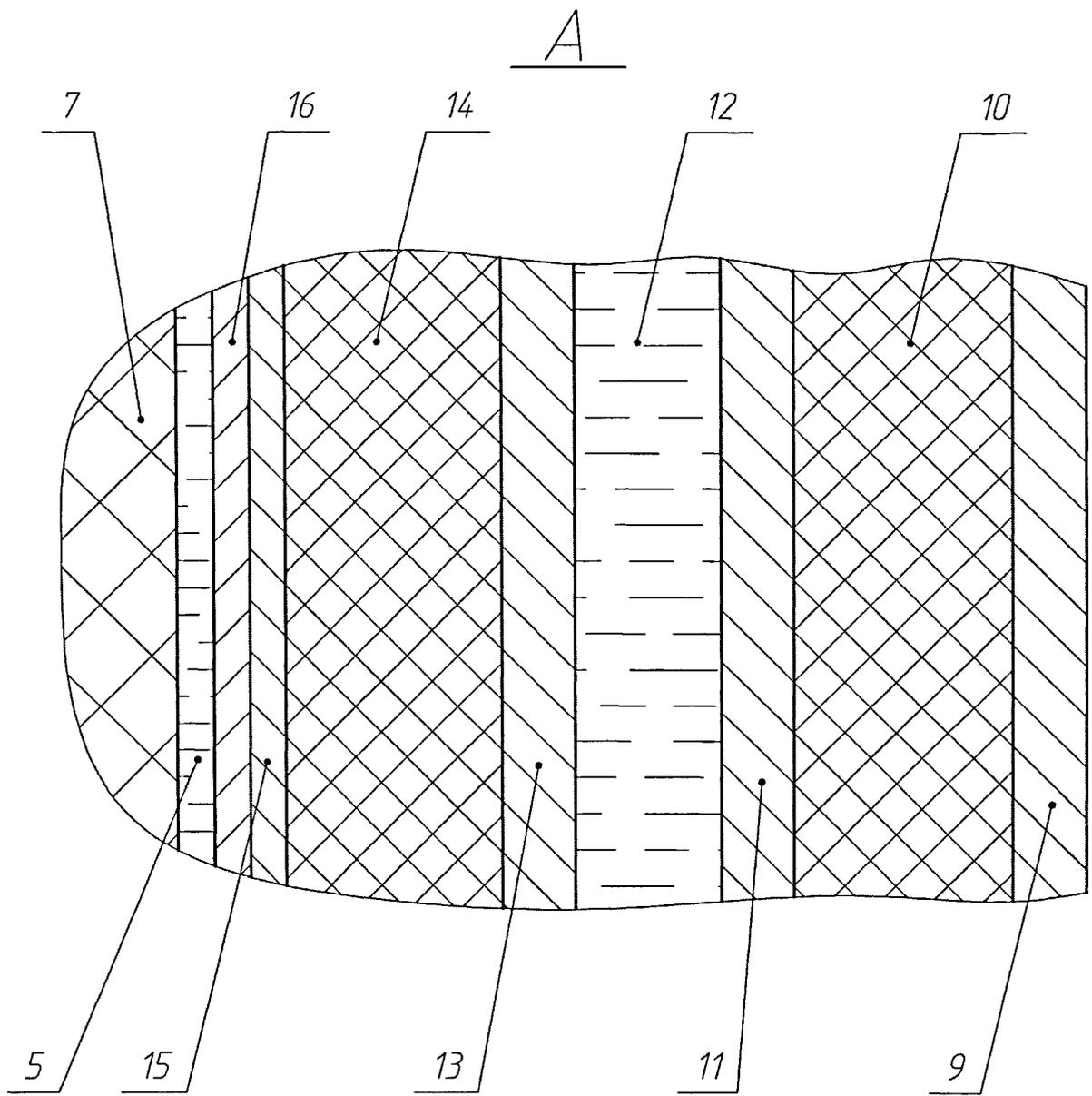
9. Устройство для контроля выгорания ОТВС п.4, отличающееся тем, что кольцеобразная полость корпуса диагностического контейнера снабжена трубами для заливки и удаления индикаторного вещества.

30

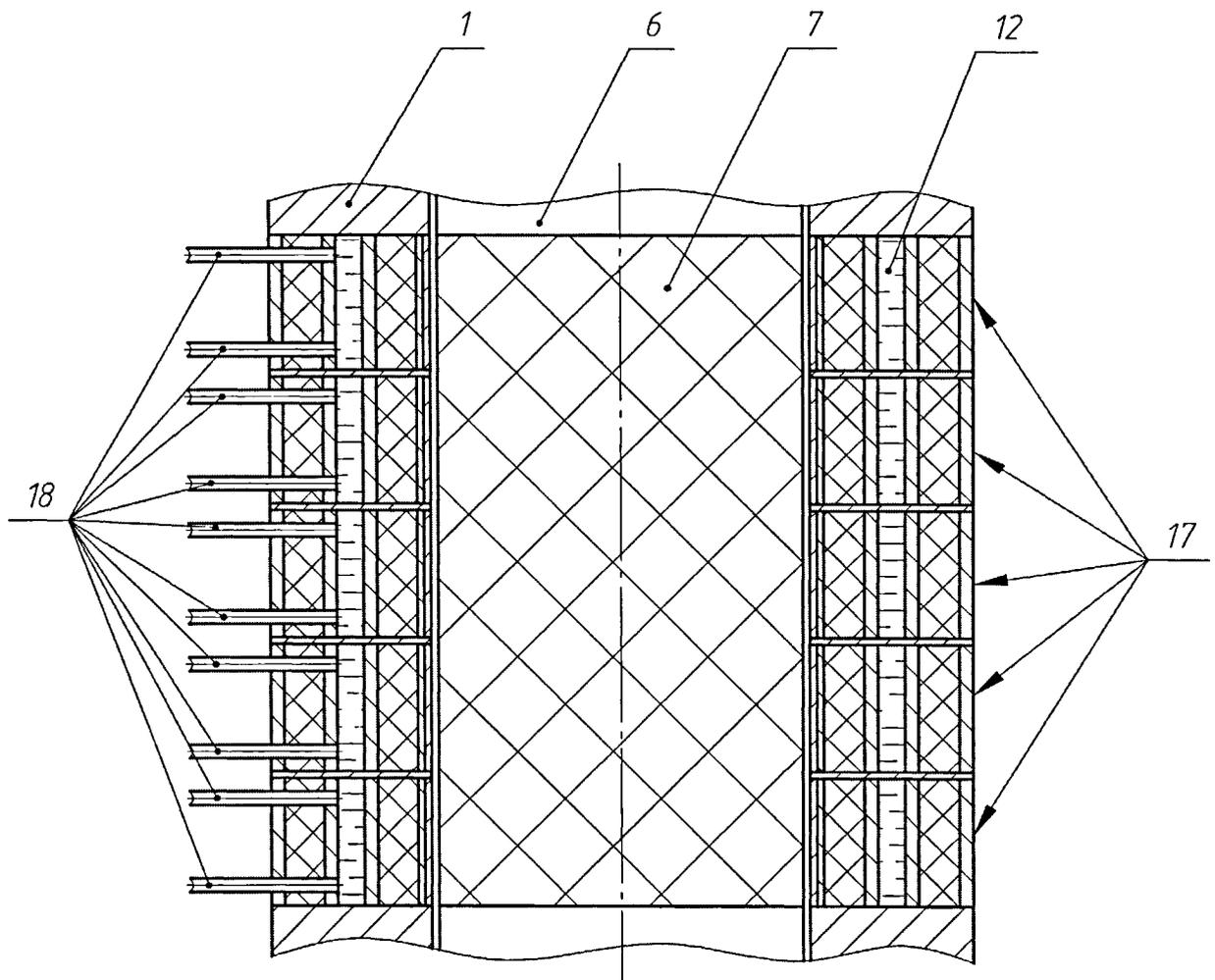
35

40

45



Фиг.2



Фиг.3