



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»



МАЛОГАБАРИТНЫЕ ТОРИЕВЫЕ КАМЕРЫ ДЕЛЕНИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

П.Б. Басков, Г.П. Кириченко, В.В. Сахаров, И.В. Мосягина, А.С. Худин

*Юбилейная Научно-техническая конференция, посвященная 65-летию
АО «СНИИП», 17-19 апреля 2017*

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ, ЗАДАЧА

Работа систем управления и защиты (СУЗ) ядерных реакторов основана на контроле нейтронных потоков во внутри- и внезонных областях. Ключевые устройства нейтронного детектирования – *ионизационные камеры деления (ИКД) и ^3He -газоразрядные счетчики.*

Ионизационная камера деления - газонаполненный датчик, предназначенный для измерения потока нейтронов посредством преобразования внешнего n -потока в поток осколков деления ядер, вызывающего ионизацию рабочего газа и последующее объемное токообразование.

Объект исследований: Радиаторы камер деления – функциональные покрытия (толщиной до 1,5 мкм) электродов, содержащие в своем составе нейтрон-делящиеся изотопы (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{232}Th и др.).

Задача: Разработка эффективного радиаторного материала и камеры деления для регистрации нейтронного потока непосредственно вблизи ТВС.

Специфика задачи:

- селективная регистрация «быстрой» компоненты нейтронного спектра;
- диаметр камеры - не более 7 мм;
- температурные нагрузки – более 450 °С;
- вибрационные нагрузки – до 200 Гц.

Селективный захват быстрых нейтронов (с $E_n > 1.4$ МэВ) осуществляется четно-четными ядрами, среди которых сравнительно большие сечения деления имеют изотопы ^{238}U ($\sigma=0.942$ барн) и ^{232}Th ($\sigma=0.387$ барн).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС

Термодеструкционное разложение растворов ВИК-карбоксилатов металлов на поверхности электрода



Полиаслаивание функциональных оксидных наноразмерных слоев



Актинид-оксидный радиатор:

- толщина $\sim 1,2 \div 1,5$ мкм;
- поверхностная плотность 1,0-1,2 мг/см² по функциональному изотопу (²³²Th/²³⁸U);
- структура полислоистая, аморфно-нанокристаллическая



ИЗГОТОВЛЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ

Ториевые радиаторы были синтезированы на внутренних поверхностях трубчатых электродов с $\phi_{\text{внутр}}=2$ мм, длиной 70 мм. Материал радиатора представляет собой полислойное покрытие состава ThO_2 с изотопным содержанием ^{232}Th , близким к 100%. Толщина покрытия составляет $\sim 1,5$ мкм.

Для формирования урановых покрытий использовано сырье изотопной чистоты 99,99998% по ^{238}U . Радиаторами покрывались поверхности трубчатых электродов с $\phi_{\text{внеш}}=3$ и 5 мм, длиной 120 мм. Радиаторное покрытие представляло собой полислойный материал на основе закиси-оксида U_3O_8 с преобладающей кубической модификацией.

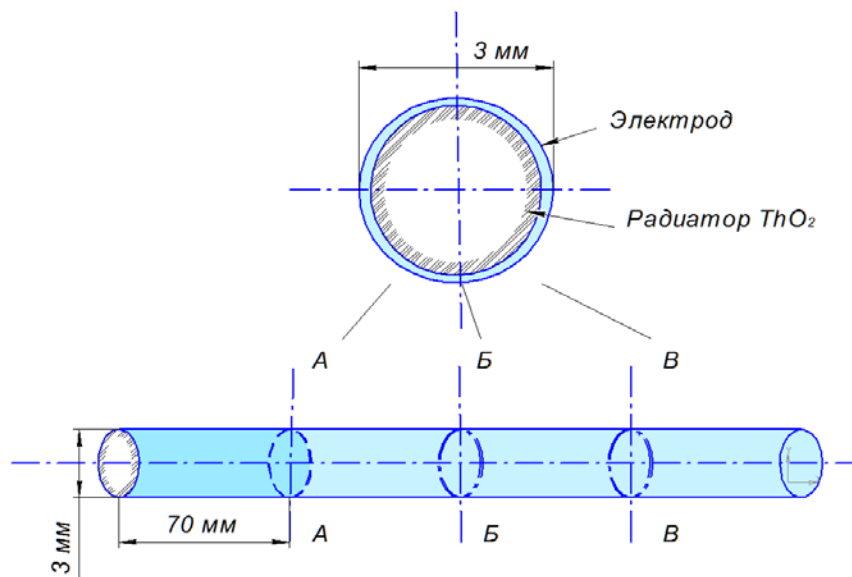


Схема электродной сборки в ториевой камере

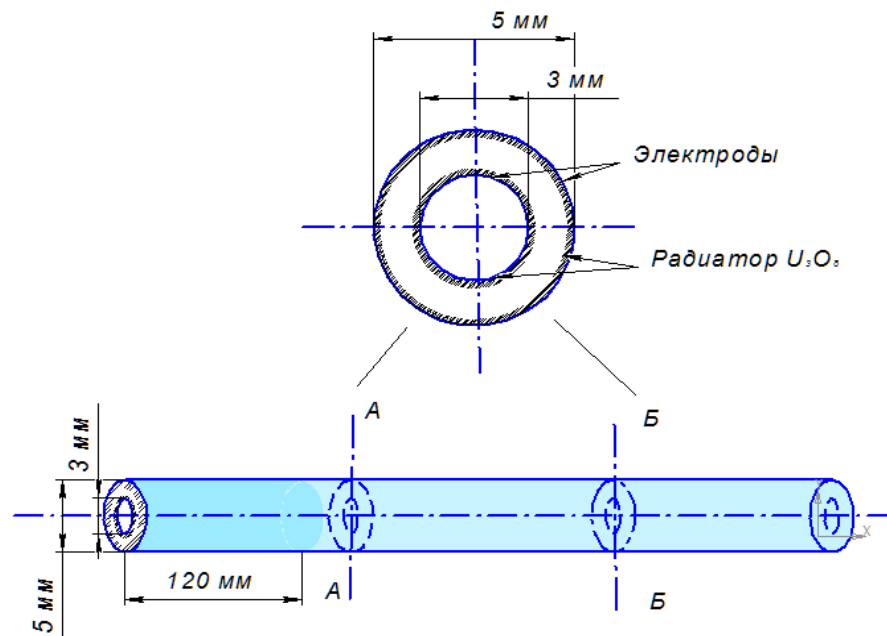


Схема электродной сборки в уран-238-оксидной камере

ИСПЫТАНИЯ РАДИАТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Стендовые механические испытания экспериментальных образцов радиаторных покрытий включали испытания на стойкость к термоциклическим (в диапазоне 200÷750 °С, при «шоковом» нагреве, кол-во циклов - не менее 15) и вибрационным (в диапазоне 2÷200 Гц, ускорение ±0,7g, кол-во циклов - не менее 15) нагрузкам.

Таблица 1 - Характеристики разработанных радиаторных материалов

Наименование параметра	Ториевый радиатор	Уран-238-оксидный радиатор
Химический состав	ThO ₂	U ₃ O ₈
Изотопный состав (по функциональному элементу)	²³² Th ≈ 100%	²³⁸ U=99.99998% ²³⁵ U=0.00002%
Фазовый состав	аморфно-нанокрист.	аморфно-нанокрист.
Толщина, мкм	1,3÷1,5	1,3÷1,5
Полислойность, кол-во слоев	25÷35	15÷20
Термостойкость, °С	450* ÷750	450* ÷650
Вибростойкость, Гц	до 200	до 200

* Нижний диапазон термоциклических испытаний составлял 450 °С

ИСПЫТАНИЯ КАМЕР ДЕЛЕНИЯ

Физико-механические испытания (в соответствии с ГОСТ Р 52931- 2008):

- испытания на виброустойчивость: 10-120 Гц с ускорением до 8 g;
- испытания на ударопрочность ускорение 5g, длительность импульса 10-15 мс, число ударов в каждом положении 20, частота следования ударов 40-80 мин;
- температурные испытания по проверке сопротивления изоляции, ЛВС и герметичности при 450°C.

Функциональные испытания опытных образцов малогабаритных камер деления проведены на импульсном реакторе БАРС-6 (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ») при воздействии потока быстрых нейтронов плотностью до 10^{10} н/см²с.

Таблица 2 – Чувствительность образцов малогабаритных камер к потоку нейтронов

Тип МКД	Чувствительность к потоку быстрых нейтронов ($1 \cdot 10^{10}$ нейтр./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$))		Чувствительность к потоку тепловых нейтронов ($1 \cdot 10^6$ нейтр./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$))
	Абсолютная чувствительность, имп./(нейтр./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$))	В пересчете на ед.площади поверхности радиатора, имп./(нейтр./с)	
ИКД-Th	$2,54 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$	-
ИКД-U-238	$4,22 \cdot 10^{-3}$	$6,22 \cdot 10^{-5}$	$1,94 \cdot 10^{-4}$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таблица 3 - Сравнительные характеристики малогабаритных камер деления на основе ^{232}Th и ^{238}U

Параметр сравнения	МКД на основе ThO_2	МКД на основе U_3O_8
Сечение деления функционального изотопа в области $E_n \sim 1 \div 20$ МэВ, барн	0,387	0,9423
Собственная эффективность (n,f)-конвертации быстрых нейтронов на ед.пл. радиатора, %	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$10,95 \cdot 10^{-4}$
Величина изотопного отравления за три года, %		
при n-потоке 10^{10} нейтр/(см ² ·с)	$7,001 \cdot 10^{-6}$	$2,555 \cdot 10^{-6}$
при n-потоке 10^{12} нейтр/(см ² ·с)	$7,001 \cdot 10^{-4}$ *	$2,555 \cdot 10^{-4}$ *
Чувствительность к потоку быстрых нейтронов, имп./((нейтр/(см ² ·с)))	$2,54 \cdot 10^{-4}$	$4,22 \cdot 10^{-3}$
Чувствительность к потоку тепловых нейтронов, имп./((нейтр/(см ² ·с)))	-	$1,94 \cdot 10^{-4}$
Чувствительность к потоку быстрых нейтронов в пересчете на ед.пл. радиатора, имп./((нейтр/с))	$0,14 \cdot 10^{-4}$	$0,62 \cdot 10^{-4}$
Температурная прочность, не менее °С	450	450
Вибрационная прочность, не менее Гц	120	120
Ударопрочность, не менее	5g	5g

* При пересчете на эл.сигнал является граничной величиной чувствительности регистрирующей аппаратуры

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Проведенные исследования делают возможным определение областей эффективного использования торий-оксидного и уран-238-оксидного радиаторов для обеспечения внутризонного нейтронного мониторинга в зависимости от различных задач диагностики:

- Для единичных кратковременных измерений быстрых нейтронов: МКД на основе ^{238}U вследствие их относительно высокой чувствительности.

- Для решения задач долговременной нейтронной диагностики: МКД на основе ThO_2 ввиду высокой степени селективности сигнала (до 100%) и низкой интенсивности изотопного «отравления» материала. Кроме того, запас температурной стойкости ториевого радиатора оценивается нами выше $1000\text{ }^\circ\text{C}$ вследствие высокой устойчивости аморфной фазы, кубической структуры образующихся нанокристаллитов и устойчивой степени окисления (IV), в отличие от урана, имеющего диапазон (II)-(VI).

В целом разработанные опытные процессы термодеструкционного полислойного синтеза радиаторных материалов и малогабаритные камеры деления на их основе могут стать базисом в области инновационного развития систем внутризонной диагностики реакторных установок

*Спасибо
за внимание!*



Приложение. Расчетный базис

- Собственная эффективность (n,f)-конвертации быстрых нейтронов на ед.пл. радиатора:

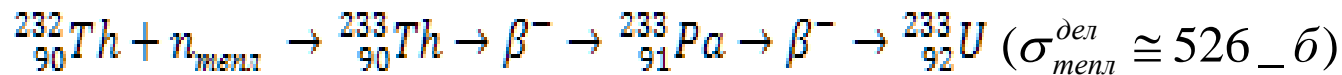
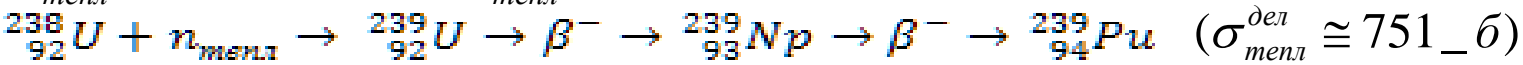
$$\varepsilon(x_i) = (1 - \exp(-\Sigma_i \cdot x_i)) \cdot 100\%$$

где x_i – толщина радиатора, Σ_i – макроскопическое сечение деления функционального изотопа радиатора ($^{232}\text{Th} / ^{238}\text{U}$)

$$\Sigma_i = \frac{\rho_i \cdot N_A \cdot n_i}{M_i} \cdot \sigma_i$$

- Величина изотопного отравления:

$$\sigma_{\text{тепл}}^{\text{погл}} (^{238}\text{U}) \approx 2,7 \text{ барн}, \quad \sigma_{\text{тепл}}^{\text{погл}} (^{232}\text{Th}) \approx 7,4 \text{ барн}$$



$$\frac{dN_{\text{Th/U}}}{dt} = -N_{\text{Th/U}} \cdot \sigma_{\text{Th/U}}^{\text{тепл}} \cdot \Phi_n$$

где $N_{\text{Th/U}}$ – число атомов тория/урана-238 на ед. площади; σ – сечение захвата тепловых нейтронов для $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$; Φ_n – плотность нейтронного потока

Процент «выгорания» (изотопного отравления):

$$\xi_{\text{Th/U}} = \frac{N_{\text{Th/U}}^0 - N_{\text{Th/U}}}{N_{\text{Th/U}}^0} \cdot 100\% = 100\% \cdot (1 - \exp(-\sigma_{\text{Th/U}}^{\text{тепл}} \cdot \Phi_n \cdot t))$$