

3. Варлашкин А.В., Печень Е.В. Опыт создания автоматизированного комплекса для измерения температурных зависимостей сопротивления и экранирующей способности сверхпроводников: Препринт ФИАН РАН. Отделение физики твердого тела № 14, 1999.
4. Самосадный А.В. Набор блочно-модульных решений и методы решения задач построения систем сбора обработки данных аппаратуры автоматизации физического эксперимента с одновременным количественным контролем параметров. — Ядерные изм.-информ. технол., 2007, № 3, с. 73—89.
5. Кошелев А.С., Хоружий В.Х., Овчинников М.А., Пикулина Г.Н. Особенности формирования секционных токов промышленных ионизационных камер КНК-4, КНК-53М и КНК-15-1 в реакторном поле нейтронов и гамма-квантов. — Ядерная физика и инжиниринг, 2013, т. 4, № 11—12, с. 1009—1015.
6. Ульман Д., Хопкрофт Д., Ахо А. Структуры данных и алгоритмы. Пер. с англ. М.: Вильямс, 2000.
7. Йордон Э., Агрила К. Структурные модели в объектно-ориентированном анализе и проектировании. Пер. с англ. М.: Лори, 2007.
8. Раскин Дж. Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем. Пер. с англ. М.: Плюс, 2003.
9. Кошелев А.С., Арапов А.В., Овчинников М.А. Диагностические возможности специализированного ОРУК-реактиметра с токовым детектором нейтронов. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып. 4, с. 39—48.

УДК 539.1.074.88

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ТОРИЕВЫЕ КАМЕРЫ ДЕЛЕНИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

*Басков П.Б., Мосягина И.В., Сахаров В.В., Ивкина О.В., Худин А.С. (АО «ВНИИХТ», г. Москва),
Кириченко Г.П. (АО «КПП «Атомприбор», г. Протвино)*

Наиболее распространенным устройством нейтронной диагностики ядерных энергетических установок с середины 1970-х гг. является ионизационная камера деления. По расположению можно выделить камеры для диагностики нейтронных полей в активной зоне реактора (внутризонные датчики) и датчики первого контура. Очевидно, что регистрация потока нейтронов непосредственно вблизи ТВС является эффективным информационным каналом в дополнение к стандартным диагностическим системам. Вместе с тем размеры областей активной зоны, в которые возможно введение диагностических устройств, ограничены 3—7 мм в зависимости от типа реакторной установки, а температурные нагрузки достигают 600—700 °С.

Для регистрации быстрых нейтронов без использования материалов-замедлителей и, следовательно, без увеличения габаритных размеров изделия в радиаторе камер деления необходимо использовать элементы, делящиеся при захвате быстрых нейтронов. Селективный захват быстрых нейтронов ($E_n > 1,4$ МэВ) осуществляется четно-четными ядрами, среди которых сравнительно большое сечение деления имеют ^{238}U ($\sigma = 0,9423$ б) и ^{232}Th ($\sigma = 0,387$ б).

В настоящей статье приведены результаты технологических разработок образцов радиаторов и камер деления на основе ThO_2 и срав-

нительная оценка их функциональной эффективности с образцами камер на основе ^{238}U . Радиаторы получены низкотемпературным термодеструкционным разложением карбоксилатов металлов, обеспечивающим полислоистую аморфно-нанокристаллическую структуру покрытия [1].

Технология и конструкция радиаторов на основе ThO_2 и U_3O_8 . В промышленном производстве камер деления с середины 1970-х гг. применяется электролитическое осаждение. Однако электролиз имеет значительные ограничения, включая невозможность формирования пленочных покрытий на поверхности трубок диаметром менее 5 мм.

В АО «ВНИИХТ» развивается концепция функциональных материалов для экстремальных условий эксплуатации, базисным принципом которой является переход от моноструктурных (гомогенных) объемов к гетероструктурированным на нано- и микромасштабе. При этом структурирование осуществляется в процессе химических нестационарных низкотемпературных процессов. Данный подход к нейтрон-детектирующим материалам обеспечивает возможности аннигиляции радиационно-индуцированных дефектов, повышает механические характеристики и, следовательно, долговечность радиатора [2].

Основными этапами разработанного технологического процесса являются:

синтез и нанесение пленкообразующего раствора на поверхность электрода;

термическое разложение карбоксилата металла в печи в атмосфере аргона с образованием оксидного слоя;

циклическое повторение этапов нанесения карбоксилата и термолиза с промежуточным гравиметрическим контролем.

В результате нестационарных процессов термодеструкции пленкообразующего раствора металла (уран, торий и др.) на поверхности электрода формируется многослойное оксидное покрытие с преобладающей аморфной фазой и областями нанокристаллических образований (20—30 нм).

Ториевые радиаторы были синтезированы на внутренних поверхностях трубчатых электродов диаметром 2 мм, длиной 70 мм. Материал радиатора представляет собой полислойное покрытие состава ThO_2 с изотопным содержанием ^{232}Th , близким к 100%, толщиной ~1,5 мкм. Для формирования ураноксидных покрытий использовано сырье изотопной чистоты 99,99998% по ^{238}U . Радиатором является полислойный материал на основе U_3O_8 с преобладающей кубической структурой, нанесенной на поверхность трубчатых электродов внешним диаметром 3 и 5 мм, длиной 120 мм.

Исследования образцов радиаторов включали испытания на стойкость к термоциклическим (в диапазоне 200—750 °С, «шоковом» нагреве, числе циклов не менее 15) и вибрационным нагрузкам (в диапазоне 2—200 Гц, ускорении $\pm 0,7g$, числе циклов не менее 15). Шоковый термоцикл осуществлялся опусканием образца электрода с радиатором внутрь разогретой до 750 °С печи, выдержке 5 мин, после чего образец охлаждали на воздухе до комнатной температуры и взвешивали. Процесс повторяли многократно. Термостойкость оценивали по критическим гравиметрическим потерям — $(\Delta m/m_0)100\%$ (не более 3% массы радиатора).

Покрытия на стойкость к вибрационным нагрузкам испытывали на специализированном стенде методом качающейся частоты — путем воздействия синусоидальной вибрации при непрерывном изменении частоты с единой скоростью во всем диапазоне частот от нижнего значения до верхнего и обратно к минимальной

через 10 мин (цикл качания). Условия виброиспытаний соответствуют ГОСТу 25504—82 в части проверки на соответствие требованиям к закрытым источникам ионизирующего излучения по 3-му классу прочности. Критерием вибрационной прочности являлись аналогично термоиспытаниям потери массы радиатора не более 3% (табл. 1).

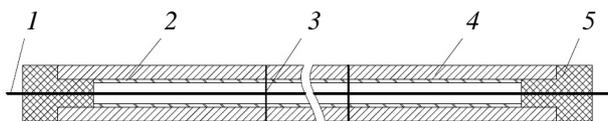
Т а б л и ц а 1. Характеристики разработанных материалов радиатора

Параметр	Радиатор на основе	
	ThO_2	U_3O_8
Изотопный состав (по функциональному элементу), %	^{232}Th , 100	^{238}U , 99,99998 ^{235}U , 0,00002
Фазовый состав	Аморфно-нанокристаллический	
Толщина, мкм	1,3—1,5	1,3—1,5
Полислойность, число слоев	25—35	15—20
Термостойкость, °С	450*—750	450*—650
Вибростойкость, Гц	0—200	0—200

*Нижний диапазон термоциклических испытаний.

Достижения высокой термостойкости радиаторов связывается с их аморфно-нанокристаллической структурой и полислойностью. Основной технологии гетероструктурных материалов является низкотемпературный гетерофазный синтез. Отметим также более высокую температурную устойчивость аморфной фазы ThO_2 термодеструкционного происхождения в сравнении с U_3O_8 [3]. В целом квазикомпозитное структурирование на наноуровне применительно к радиаторному материаловедению относится к одному из важнейших путей его инновационного развития [4].

Изготовление и испытания опытных образцов малогабаритных камер деления. Конструкция малогабаритной ториевой камеры деления представляла собой цилиндрическую последовательную сборку из электродов диаметром 3 мм, на внутреннюю сторону которых нанесен радиатор на основе ThO_2 . Корпусом камеры являлась внешняя сторона электродов (рис. 1). Образец камеры с радиатором ^{238}U состоит из сборки трех наборов коаксиально соединенных электродов диаметром 3 и 5 мм. При этом радиатор был сформирован на внешней и внутренней поверхности электрода диаметром 3 и 5 мм соответственно.

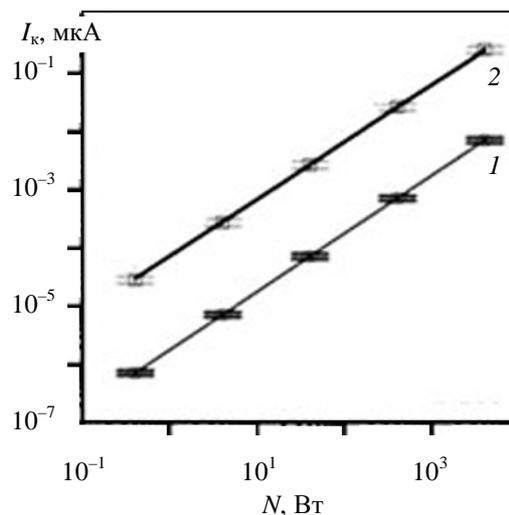


Р и с. 1. Малогабаритная ториевая камера деления: 1 — электродная нить; 2 — радиаторное покрытие (ThO_2); 3 — сварной шов; 4 — сегмент электрода ($z = 4$); 5 — изоляционный элемент

Опытные образцы камер деления изготавливали путем вакуумной сварки электродов между собой. Предварительно электролизом удаляли материал радиатора с технологических концевых участков трубок длиной 2 мм. После сборки и сварки электродных систем, установки изоляционных элементов полость камеры заполняли рабочим газом (смесь Ar , N_2 и He) давлением 0,304 МПа. Малогабаритные камеры деления с опытными образцами трубчатых электродов имели общую площадь чувствительного покрытия 17,6 (^{232}Th) и 67,8 cm^2 (^{238}U). При этом чувствительность пересчитывалась на единицу площади радиатора.

Физико-механические исследования проводились в соответствии с ГОСТом Р 52931—2008 и включали испытания на вибро-, ударопрочность и термостойкость. Испытания на вибрационную стойкость проведены на электродинамическом вибростенде в диапазоне частот 10—120 Гц для условий группы V4, на ударопрочность при следующих параметрах: ускорение 5g, длительность импульса 10—15 мс, число ударов в каждом положении 20, частота следования ударов 40—80 мин. При термоиспытаниях обеспечивали равномерный нагрев до 450 °С с вертикальным градиентом температуры не более 10 °С.

Функциональные испытания опытных образцов малогабаритных камер деления были проведены на импульсном реакторе БАРС-6 (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ») при воздействии потока быстрых нейтронов плотностью до $10^{10} \text{ c}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ в двух вариантах: при непосредственном размещении камеры деления между активными зонами и предварительном размещении образцов в полиэтиленовом блоке ЭУС-16. В первом случае камера деления подвергается облучению потоком быстрых, во втором — медленных нейтронов плотностью в 100 раз меньше исходной. На первом этапе испытаний реактор выводился на мощность, при которой плотность потока быстрых нейтронов составляла $10^6 \text{ c}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, измерялись скорость счета импуль-



Р и с. 2. Зависимость тока камер деления на основе ^{232}Th (1) и ^{238}U (2) от мощности реактора

сов и вольт-амперная характеристика. Предварительно установлено, что диапазон 150—250 В является оптимальным для линейного режима работы камер деления.

При определении радиационной чувствительности образцы размещали непосредственно между активными зонами и облучали в течение 30 мин. Данные с камер деления сравнивали с активационными детекторами, размещенными на корпусе камеры. Чувствительность камер деления на основе ^{232}Th и ^{238}U составила $2,54 \cdot 10^{-4}$ и $4,22 \cdot 10^{-3}$ имп./($\text{c}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) соответственно, в пересчете на единицу площади радиатора $0,14 \cdot 10^{-4}$ и $0,62 \cdot 10^{-4}$ имп./ c^{-1} . По результатам измерения скорости счета импульсов была установлена линейная зависимость тока камер от мощности реактора (рис. 2).

По соотношению скорости счета импульсов при напряжении питания 250 В была определена относительная чувствительность образцов малогабаритных камер (в полиэтиленовом блоке) к потоку тепловых нейтронов (табл. 2).

Обсуждение результатов. Испытания показывают, что чувствительность камеры на основе ^{238}U к потоку быстрых нейтронов выше — с учетом площади радиатора примерно в 4,4 раза. Это обусловлено, в основном, разницей сечений (n, f)-деления ядер ^{238}U и ^{232}Th . Вместе с тем степень селективности определения быстрых нейтронов камерой на основе ^{238}U значительно уступает ториевой, которая показала почти полную индифферентность к нейтронам энергией ниже 1 МэВ. Это объясняется изотопным составом радиаторов: торий не имеет природных долгоживущих изотопов, кроме ^{232}Th , в

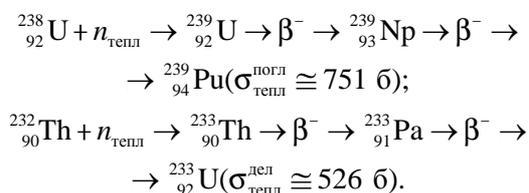
Т а б л и ц а 2. Скорость счета импульсов и чувствительность камер в поле тепловых нейтронов при плотности потока $10^6 \text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$

Параметр	Камера деления на основе	
	^{238}U	^{232}Th
Средняя скорость счета*, имп./с	$1,94\cdot 10^2 \pm 16\%$	<1
Чувствительность, имп./($\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$)	$1,94\cdot 10^{-4} \pm 16\%$	< 10^{-6}

*По результатам восьми измерений.

то время как образцы обедненного урана содержат $\sim 0,00002\%$ ^{235}U с сечением деления под действием тепловых нейтронов $\sigma \sim 580$ б. Наличие примеси ^{235}U в радиаторе на основе ^{238}U обуславливает паразитную составляющую информативного сигнала.

Известно, что под действием тепловых нейтронов ядра ^{238}U и ^{232}Th не делятся, однако они могут поглощать нейтроны с вероятностью $\sigma_{\text{тепл}}^{\text{полг}}(^{238}\text{U}) \sim 2,7$ б, $\sigma_{\text{тепл}}^{\text{полг}}(^{232}\text{Th}) \sim 7,4$ б. Образующиеся новые ядра в результате β -распада переходят в чувствительные для тепловых нейтронов изотопы:



Т а б л и ц а 3. Характеристики малогабаритных камер деления

Параметр сравнения	Камера деления на основе	
	ThO_2	U_3O_8
Сечение деления функционального изотопа в области $E_n \sim 1\text{—}20$ МэВ, б	0,387	0,942
Собственная эффективность (n, f)-конвертации быстрых нейтронов на единицу площади материала радиатора, 10^{-4} , %	1,32	10,95
Изотопное отравление за 3 года, %:		
$\Phi_n = 10^8 \text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$	$7,001\cdot 10^{-8}$	$2,554\cdot 10^{-8}$
$\Phi_n = 10^{10} \text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$	$7,001\cdot 10^{-6}$	$2,555\cdot 10^{-6}$
$\Phi_n = 10^{12} \text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$	$7,001\cdot 10^{-4}$	$2,555\cdot 10^{-4}$
Чувствительность к потоку быстрых нейтронов:		
имп./($\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$)	$2,54\cdot 10^{-4}$	$4,22\cdot 10^{-3}$
в пересчете на единицу площади радиатора, имп./ с^{-1}	$0,14\cdot 10^{-4}$	$0,62\cdot 10^{-4}$
Чувствительность к потоку тепловых нейтронов, имп./($\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$)	< 10^{-6}	$1,94\cdot 10^{-4}$
Температурная прочность, не менее $^{\circ}\text{C}$	450	450
Вибрационная прочность, не менее Гц	120	120
Ударопрочность, не менее	5g	5g

Образование чувствительных к тепловым нейтронам ядер в материале радиатора неизбежно приводит к появлению паразитной составляющей в электрическом сигнале камеры, что снижает его информативность, а также пропорциональность регистрируемому потоку. Скорость образования $^{239}_{94}\text{Pu}$ и $^{233}_{92}\text{U}$ в соответствующих радиаторах, т.е. изотопного отравления можно оценить по формуле, которая фактически является уравнением выгорания функциональных ядер под действием тепловых нейтронов:

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

где $N_{\text{Th/U}}$ — число атомов $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ на единицу площади; σ — сечение захвата тепловых нейтронов; Φ_n — плотность нейтронного потока.

По уравнению можно определить процент выгорания, т.е. изотопного отравления радиатора:

$$\begin{aligned}
 \xi_{\text{Th/U}} &= \frac{N_{\text{Th/U}}^0 - N_{\text{Th/U}}}{N_{\text{Th/U}}^0} 100\% = \\
 &= 100\% [1 - \exp(-\sigma_{\text{Th/U}}^{\text{тепл}} \Phi_n t)].
 \end{aligned}$$

Расчетные данные об изотопном отравлении ториевых и урановых радиаторов приведены в табл. 3.

Паразитный электрический сигнал, образующийся в результате деления ядер ^{239}Pu и ^{233}U

под действием тепловых нейтронов, можно оценить по формуле

$$I = I_1 \Phi_n S \varphi(\text{Pu}^{233}\text{U}) p,$$

где I_1 — ионизационный ток в камере при единичном акте нейтронной конвертации (для осколков деления тяжелых ядер $I_1 \sim 4,3 \cdot 10^{-13}$ Кл); S — площадь радиатора, см²; $\varphi(\text{Pu}^{233}\text{U})$ — собственная эффективность нейтронной конвертации ядер $^{239}\text{Pu}/^{233}\text{U}$; p — давление рабочего газа.

В большинстве случаев нижней границей чувствительности для аппаратуры обработки сигнала камер деления является ток $5 \cdot 10^{-13}$ Кл. Величина $\varphi(\text{Pu}^{233}\text{U})$ зависит от концентрации соответствующих ядер в радиаторе и увеличивается с течением времени, обуславливая изотопное отравление материала. Расчеты показывают, что в течение 3 лет эксплуатации камеры при потоке нейтронов плотностью до 10^{12} с⁻¹·см⁻² количества ядер $^{239}\text{Pu}/^{233}\text{U}$ недостаточно для регистрации сигнала от их деления. Однако исходная примесь ^{235}U в урановом радиаторе приводит к шумовому сигналу $3 \cdot 10^{-13}$ Кл, что находится на границе чувствительности аппаратуры (см. табл. 3).

В заключение отметим области эффективного использования радиаторов на основе ^{232}Th и ^{238}U для обеспечения внутризонного нейтронного мониторинга. Малогабаритные камеры на основе ^{238}U целесообразны при единичном

кратковременном измерении потока быстрых нейтронов вследствие их относительно высокой чувствительности. Для систем длительного использования перспективны камеры на основе ThO_2 ввиду высокой степени селективности их сигнала (до 100%) и низкой интенсивности изотопного отравления.

Исследование и разработка новых типов радиаторов, технологии их получения и создание на их основе специальных ионизационных камер деления осуществлялись в рамках ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010—2015 годов и на перспективу до 2020 года».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахаров В.В., Фролов Н.Н., Басков П.Б. и др. Химико-материаловедческие аспекты термодеструкционного синтеза ураноксидных радиаторов камер деления. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2014, № 3, с. 57—63.
2. Сахаров В.В., Басков П.Б., Мосягина И.В. и др. Химический синтез нейтрон-детектирующих ультратонких оптических материалов. — Там же, 2012, № 4, с. 130—142.
3. Сахаров В.В., Данилевич Т.И., Ключников В.М. и др. Топохимическое получение гидроокиси тория. — Радиохимия, 1974, т. 16, № 1, с. 74—80.
4. Егоров А.В., Басков П.Б., Сахаров В.В., Мосягина И.В. Ураноксидный радиатор ионизационной камеры деления. Патент РФ 152036, заявка 2014134956/07 от 26.08.2014, МПК H01J 47/02. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2015, № 12.

УДК 621.039.58

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ АЭС КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Коротков А.С., Турлова А.В. (ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.),
Косов А.Д., Орехов А.А. (АО «ВНИИАЭС», г. Москва)

В настоящее время радиационный контроль обеспечивается единой государственной автоматизированной системой мониторинга радиационной обстановки (ЕГАСМРО). Одной из ее составляющих является сеть автоматизированных систем контроля радиационной обстановки в районе расположения АЭС (АСКРО), которая функционирует при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и авариях. Необходимость АСКРО стала очевидной после аварии на Чернобыльской АЭС, когда

решения по защите населения принимались в отсутствие исчерпывающей информации о радиационной обстановке на местности. Авария дала импульс к развитию систем поддержки принятия решений, основанных на модельных расчетах и автоматизированном контроле радиационной обстановки на местности, как в нашей стране, так и за рубежом.

Авария на АЭС «Фукусима-1» (Япония), приведшая к радиационному загрязнению окружающей среды и эвакуации населения, подтвер-