

Контроль идентичности образцов поглощающих материалов

В. Н. БОГОМОЛОВ*, М. П. ЗЫБИН*, В. Д. СЕВАСТЬЯНОВ**

* ГНЦ Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского, Обнинск, Россия,

** Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: sevast@vniiftri.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований, доказывающих возможность применения устройств типа сигма-призма для контроля идентичности образцов поглощающих материалов, используемых в ядерных реакторах. Контроль предложено осуществлять относительным методом путем сравнения проверяемого изделия с эталонным образцом.

Ключевые слова: поглощающие материалы, сигма-призма.

The results of experimental studies, proving the possibility of application of the sigma-prizm type devices to control the identity of absorbing materials samples used in nuclear reactors are presented. It is proposed to realize this control by the comparison of verifiable item with a reference sample.

Key words: absorbing materials, sigma-prizm.

В некоторых метрологических задачах предъявляются повышенные требования к точности определения вольт-амперных и частотных характеристик нейтронных детекторов, контролируемых эксплуатационные параметры ядерных реакторов. Знание этих характеристик крайне необходимо для вновь проектируемых систем контроля реакторных установок. К таким характеристикам относятся: абсолютная чувствительность детектора к плотности потока нейтронов определенного энергетического спектра, средний заряд, возникающий при регистрации нейтрона, наклон вольт-амперной характеристики и др. Для определения указанных характеристик требуются устройства с аттестованными нейтронными характеристиками.

До настоящего времени в нейтронно-физических лабораториях мира для решения многих прикладных задач используется способ получения тепловых нейтронов с применением радиоизотопных источников быстрых нейтронов по реакциям (α, n), (γ, n) либо источников спонтанного деления ядер. Такие источники нейтронов (НИ) весьма удобны в обращении, их интенсивность практически не меняется в ходе эксперимента. До появления ядерных реакторов именно при помощи НИ, помещаемых в замедлители установок, изучались их диффузионные свойства. Как показала практика, при соблюдении определенных условий эти установки можно использовать для решения ряда метрологических задач, в частности, градуировки и поверки систем управления и защиты ядерных установок.

Метрологический стенд поверки измерительных каналов (МСПИК) представляет собой замедляющую сборку из графита, смонтированную на опорной металлоконструкции в здании Физико-энергетического института. Он предназначен для определения характеристик измерительных каналов (ИК) секторной системы контроля герметичности оболочек (ССКГО) тепловых поглощающих элементов (ТВЭЛ) реактора БН-800. Особенность этих ИК состоит в том, что они должны фиксировать изменение относительно низких значений плотности потоков нейтронов и в то же время быть работоспособными при их высоких значениях. Поэтому поверку ИК

следует проводить в аттестованных нейтронных полях, отличающихся плотностью потока на два и более порядков. При этом наибольшие трудности возникают с поверкой радиометров нейтронов с ионизационными камерами при малых плотностях потока нейтронов, поскольку их аттестация с необходимой погрешностью (не более 10 %) в диффузном поле, которое реализуется в графитовой призме МСПИК, является сложной и очень трудоемкой технической задачей.

Габаритные размеры МСПИК определяет металлический каркас, во внутреннем пространстве которого размещены в два слоя 286 графитовых блоков, каждый 200×200×600 мм. Они образуют среду объемом 2600×2200×1200 мм, замедляющую нейтроны радиоизотопного источника быстрых нейтронов. В кладке графита имеются блоки сплошные и с цилиндрическими вертикальными отверстиями диаметрами 43 и 66 мм, а также несколько блоков с отверстиями диаметром от 20 до 90 мм. Блоки с отверстиями предназначены для размещения детекторов поверяемых ИК и датчиков мониторинговых измерительных каналов (МИК). Расположение отверстий в графитовой призме представлено картограммой (рис. 1). Графитовая сборка опирается на промежуточный опорный лист из алюминия толщиной 3 мм, нижнюю защиту из борированного полиэтилена толщиной 60 мм и на опорную плиту из конструкционной стали толщиной 10 мм. По периметру она окружена биологической защитой из борированного полиэтилена толщиной 60 мм. Общая масса графита 13 т.

В качестве штатного источника быстрых нейтронов используется НИ $^{238}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ с потоком нейтронов $(1,20 \pm 0,08) \cdot 10^8$ нейтр./с на 21.11.2011 г. Электрический привод позволяет перемещать пенал с НИ по транспортному шлангу из защитного контейнера в графитовую сборку и обратно. По проекту на этом стенде предусмотрено применение НИ с потоками $5 \cdot 10^4$ — $3 \cdot 10^9$ нейтр./с и размещение источника по центру блока G6 или L6. По высоте призмы в диапазоне 0 — 1200 мм НИ можно располагать в любом месте. При аттестации МСПИК источник находился в геометрическом центре графитовой призмы.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N
1							2						
2							4						
3							2						
4							2				2		
5							3				3		
6	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2
7							3				3		
8							2			7	2		
9							2			7			
10			5		6		2						
11	4						2						

Рис. 1. Картограмма расположения графитовых блоков с отверстиями в графитовой кладке МСПИК:

1 — блоки со сквозными отверстиями диаметром $d = 25$ мм для размещения радиоизотопных источников нейтронов; 2 — блоки с отверстиями $d = 43$ или 66 мм на глубину до 1200 мм; 3 — блоки для размещения детекторов МИК с отверстиями $d = 53$ мм на глубину 930 мм; 4 — блоки с отверстиями $d = 43$ или 66 мм на глубину до 600 мм; 5 — блок с отверстием $d = 43$ или 66 мм и двумя отверстиями $d = 25$ мм на глубину 600 мм; 6 — блок с отверстием $d = 25$ или 90 мм на глубину до 1200 мм; 7 — отверстия $d = 30$ мм и глубиной 600 мм находятся на стыке блоков $K8$ и $K9$ по центру линии K

Для расширения диапазона плотности потока нейтронов в исследуемых каналах МСПИК при поверке ИК ССКГО реактора БН-800 на стенде предусмотрено использовать кроме штатного НИ также нейтронный источник $^{238}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ с потоком $(2,28 \pm 0,09) \cdot 10^6$ нейтр./с на 21.11.2011 г. Его размещают в центре графитовой призмы на месте штатного источника после переноса последнего в защитный контейнер.

Всего в графитовой кладке МСПИК имеется 17 отверстий, в которых могут находиться детекторы поверяемых ИК, три из них в блоках $D6$, $E6$ и $F6$ с аттестованными значениями плотности потока нейтронов соответственно $0,58 \cdot 10^5$; $1,35 \cdot 10^5$ и $3,26 \cdot 10^5$ нейтр. $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Аттестация полей нейтронов в них проведена специалистами ВНИИФТРИ.

Для контроля плотности потока нейтронов в исследуемых точках призмы используются два МИК, выполненных на базе ионизационных камер КНК56М, работающих в токовом режиме, и регистрирующих приборов типа ТИМ-4. На камеры подается напряжение от источников питания СВИП-4. Из-за конструктивных особенностей детекторов МИК их центр (по чувствительной области) установлен со смещением вверх на 90 мм относительно центральной горизонтальной (X , Y) плоскости призмы. Два МИК установлены с целью повышения эксплуатационной надежности МСПИК. Местоположение детекторов этих каналов в графитовой призме по оси Y симметрично относительно НИ, поэтому их токи практически идентичны.

Термометрический канал, состоящий из термометра сопротивления РТ 100 и измерителя ADVANTECH ADAM-3013, служит для контроля температуры графитовой кладки. Ее знание необходимо для коррекции показаний МИК вслед-

ствие изменения тепловой составляющей спектра нейтронов, обусловленной температурой замедляющей среды. Для контроля радиационной обстановки на МСПИК используется прибор УИМ2-2 с датчиками БДМГ-41 и УДБН-02Р. На стенде размещены блоки детектирования систем управления, сигнализации и блокировок, которые обеспечивают безопасную работу с НИ. Все электронное оборудование указанных систем смонтировано в шкафу, из которого сигналы мониторинговых, термометрических и поверяемых ИК передаются по линиям связи на рабочее место экспериментатора. Сбор информации, ее первоначальная обработка, архивирование и выдача результатов измерений выполняются включенным в локальную сеть персональным компьютером с набором специализированных программ.

Для изменения тепловой составляющей спектра (увеличения доли тепловых нейтронов) в поле нейтронов внутри блока $F6$ используется вставка из полиэтилена, представляющая собой полый цилиндр высотой 1200 мм, наружным 66 и внутренним 43 мм диаметрами, которая вставляется в цилиндр вместо штатного графитового цилиндра такого же размера. Этот полый цилиндр можно размещать в любом отверстии призмы аналогичного размера. Аттестация плотности потока нейтронов в отверстии со вставкой из полиэтилена выполнена только для блока $F6$ во всем диапазоне энергий нейтронов $3,91 \cdot 10^5$ нейтр. $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и тепловых нейтронов $1,23 \cdot 10^5$ нейтр. $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Повторяемость и сходимость показаний МИК. Исследовали влияние местоположения НИ в призме по высоте на токи МИК, которое оказалось значимым. В связи с этим было разработано специальное устройство, обеспечивающее установку НИ с точностью до миллиметра при фиксированном положении в графитовой призме. Для МСПИК выявлена также высокая чувствительность тока МИК к поглощающим материалам, размещаемым в отверстиях графитовой призмы.

В обоснование того, что МИК работают стабильно, была выполнена серия экспериментов по определению сходимости результатов измерений — величины, характеризующей стабильность показаний мониторинговых каналов при неизменных условиях измерений [1, 2]. Сходимость характеризует близость средних значений результатов измерений в разных сериях. Это означает, что выборки взяты из одной генеральной совокупности. Соответствие распределений выборок нормальному закону проверяли по набору критериев, предназначенных для выявления отклонения распределения от нормального. Для этого использовали нормированное среднее абсолютное отклонение, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса с уровнем значимости $0,05$ [3]. Проверка на нормальность всех выборок в данных экспериментах показала, что значения параметров распределений соответствуют критериям даже с более строгим уровнем значимости $(0,1)$. Выборочная проверка на нормальность по критерию χ^2 также не подтвердила неправомочность гипотезы о нормальном распределении выборок.

Сходимость оценивали по t -критерию Стьюдента, предназначенному для сравнения средних значений двух выборок («двухвыборочный критерий»). Парно проверяли гипотезу о равенстве средних значений сил токов МИК, полученных в разных сериях экспериментов и в разные дни, общим числом 8. Число таких сравнений равнялось числу сочетаний из числа серий по два. Собственно t -критерий

для сравнения средних арифметических \bar{x}_i и \bar{x}_j , полученных в i -й и j -й сериях экспериментов, каждая из которых

имела для простоты идентификации фиксированный объем $n = 3500$, вычисляется по формуле [4]:

$$t = (\bar{x}_i - \bar{x}_j) \sqrt{n/2} / \sqrt{(n-1)(S_{x_i}^2 + S_{x_j}^2) / (2n-2)}, \quad (1)$$

где $S_{x_i, j}^2$ — выборочные дисперсии для i -й и j -й серий, состоящих из n измерений каждая,

$$S_{x_i, j}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i, j=1}^n (x_{i, j} - \bar{x})^2. \quad (2)$$

Если абсолютное значение t -критерия, полученного по (1), меньше значения квантиля t -распределения Стьюдента с числом степеней свободы $(2n - 2)$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$, то результаты наблюдений считаются не противоречащими гипотезе о равенстве средних значений сил токов МИК [4]. Для исследуемых выборок модуль t -критерия находился в диапазоне 0,1 — 1,5 (критическое значение 1,96) и не превышал критического значения 1,645 даже для уровня значимости 0,1.

Средние квадратические отклонения сил токов мониторинговых каналов, полученные в этих сериях, находились в диапазоне 0,07 — 0,12 % их средних значений, фиксировавшихся на уровне $1,4374 \cdot 10^{-8}$ А.

Такая сходимость наряду с высокой чувствительностью токов МИК к наличию поглотителей в рабочих отверстиях позволяет использовать МСПИК не только по прямому назначению — для проверки ИК, но и для сравнения поглощающей либо замедляющей способности идентичных по геометрическим размерам образцов материалов, изготовленных для активных зон ядерных реакторов. Таким образом, можно осуществлять сравнительные (сличение образца с рабочим эталоном [2]) измерения статистического «веса» изделий, загружаемых в активную зону, выполнять технический контроль подобных изделий на заводе-изготовителе, а также приемочный контроль на атомной электростанции, если того потребуют обстоятельства. Подобные измерения сейчас проводят на критических стендах и реакторах-прототипах, что определяет высокую стоимость таких работ. Поскольку для данной работы на МСПИК в условиях радиационной безопасности требуется значительно меньше специалистов, ее можно выполнить в несколько раз быстрее и существенно дешевле. Кроме того, при соответствующей организации работ подобные измерения даже при простом повторении экспериментов могут давать более точные результаты контроля на соответствие поглощающих (замедляющих) свойствверяемого образца рабочему эталону.

Результаты экспериментов по изучению влияния поглотителей из карбида бора на силу тока МИК. Провели две серии экспериментов. В качестве поглотителей использовали 22 блока из горячепрессованного карбида естественного бора наружным диаметром 35 и высотой 21 мм, средней массой 35,1 г. Их помещали в контейнер — алюминиевую заглушенную снизу трубу наружным диаметром 40 и внутренним 35,5 мм, которую устанавливали в цилиндр *H6* с опорой на глубине 600 мм (половина высоты графитовой призмы) на графитовую пробку.

В первой серии экспериментов изучали влияние высоты столба поглотителя, набираемого из карбидборных блоков, на силу тока МИК. Для этого наращивали высоту поглотите-

ля, устанавливая в контейнер разное количество блоков (от 0 до 22). Результаты эксперимента приведены на рис. 2, где по оси абсцисс отложено количество m поглощающих блоков, а по оси ординат — средние значения I сил токов МИК с доверительными интервалами погрешности, вычисленными для 5 %-го уровня значимости. Кривая аппроксимации описывается выражением

$$I(n) = 0,165883 \exp(-0,092384m) + 1,265403.$$

Приведенная зависимость указывает на ожидаемое экспоненциальное снижение «веса» (влияния на силу тока МИК) блока поглотителя при его удалении от центральной плоскости призмы. Из этого эксперимента также следует, что каждый из 22 блоков вносит ощутимый вклад в изменение силы тока МИК, а потому их количество в контейнере после привязки к данной зависимости можно надежно определять с вероятностью не ниже 0,95.

Во втором эксперименте изучали влияние («вес») поглощающего блока на силу тока МИК в зависимости от его положения относительно центральной плоскости призмы. Блоки поглотителя в контейнере фиксировали тонкими подставками из алюминия, воздействие которых выявляли специальными экспериментами, и хотя оно было незначительным (2—3 % эффекта поглощающего блока), его учитывали введением соответствующих поправок. В этом эксперименте находили также чувствительность детектора МИК к местоположению поглощающего блока. Результаты эксперимента представлены на рис. 3, где по оси абсцисс отложено расстояние между нижней плоскостью поглощающего блока, находящегося в контейнере, и центральной плоскостью (*XУ*) графитовой призмы, а по оси ординат — сила тока МИК с доверительными интервалами, вычисленными для 5 %-го уровня значимости.

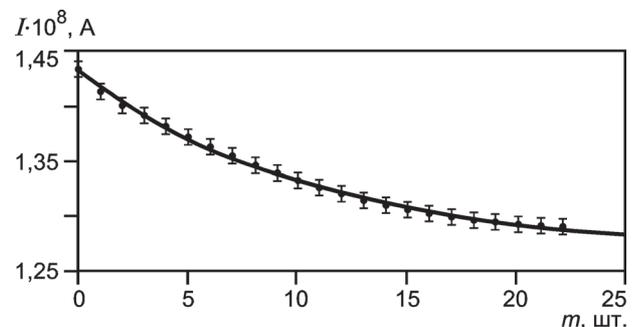


Рис. 2. Зависимость силы тока I мониторингового канала от количества m поглощающих блоков в контейнере

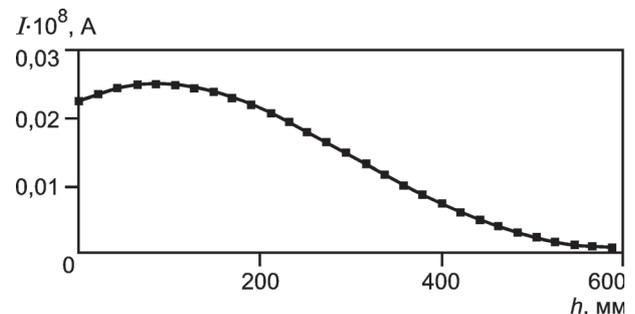


Рис. 3. Влияние блока поглотителя на силу тока I мониторингового измерительного канала в зависимости от высоты h его положения в призме

Данный эксперимент доказывает, что «вес» блока зависит не только от его местоположения в призме, но и от размещения относительно геометрического центра радиатора детектора МИК: наличие поглотителя в рабочих полостях графитовой призмы установки МСПИК можно надежно зафиксировать по изменению силы тока МИК.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы. Данную установку в существующей комплектации источниками нейтронов и МИК можно использовать не только по прямому назначению для поверки ИК по плотности потока нейтронов, но и для контроля идентичности (фактически, соответствия заданным параметрам) реакторного оборудования, применяемого в качестве поглотителей нейтронов в ядерных энергетических установках. При этом для выполнения процедуры сравнения достаточно одного образца в качестве рабочего эталона. Такой подход при определенных условиях позволит отказаться от трудоемких, а потому дорогих и потенциально ядерно-опасных экспериментов на критических стендах на предприятиях — изготовителях оборудования. Подобную методику после дополнительных исследований можно использовать и для контроля идентичности состава твэлов.

На МСПИК целесообразно реализовать методику определения мертвого времени импульсных ИК при помощи двух источников, позволяющую, как показали предварительные эксперименты, находить этот важный параметр с незначительной погрешностью (несколько процентов). Также установка может использоваться в учебных целях для проведения лабораторных работ по ядерной и нейтронной физике, определения чувствительности детекторов к нейтронному излучению, поверки дозиметров и т. п.

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ Р ИСО 5725-1—2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные положения и определения.
2. **РМГ 29—99.** ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
3. **Большев Л. В., Смирнов Н. В.** Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. С. 55—58.
4. **Мюллер П., Нойман П., Шторм Р.** Таблицы по математической статистике. М.: Финансы и статистика, 1982. С. 128—129.

Дата принятия 11.09.2012 г.

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

616-71:616.5

Метод неинвазивного определения оптических и микрофизических параметров кожи человека

С. А. ЛЫСЕНКО, М. М. КУГЕЙКО

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: lisenko@bsu.by, kugeiko@bsu.by

Разработан метод неинвазивного определения оптических и микрофизических параметров кожи. Оценены погрешности восстановления этих параметров в условиях их общей вариативности. Показано, что совместная интерпретация результатов спектральных и пространственных измерений диффузного отражения от кожи позволяет существенно повысить точность восстановления ее параметров по сравнению со случаями раздельной интерпретации.

Ключевые слова: кожа, оптические и микрофизические параметры, диффузное отражение, обратная задача, множественные регрессии.

A method is developed for noninvasive determination of optical and microphysical parameters of skin. The errors of retrieval of skin's parameters in terms of their total variance are estimated. It is shown that simultaneous interpretation of the spatial and spectral measurements of skin diffuse reflection improves the accuracy of its parameters restoration in comparison to the cases of separate interpretation.

Key words: skin, optical and microphysical parameters, diffuse reflection, inverse problem, multiple regressions.

Диагностика опухолевых заболеваний — одна из актуальнейших задач современной онкологии и хирургии. Правильный диагноз на ранних этапах заболевания в сочетании с эффективными методами лечения позволяет повысить вероятность благоприятного исхода лечения и улучшить качество жизни онкологических больных.

Известно, что нормальная ткань и опухоли различаются по своим оптическим параметрам. В связи с этим оптичес-

кие методы обнаружения опухолевых новообразований способны в ряде случаев заменить или дополнить применяемую в онкологии инвазивную биопсию. Среди них наиболее простыми и эффективными являются методы спектроскопии диффузного отражения. Исходной информацией в этих методах служат значения коэффициента диффузного отражения (КДО) биологической ткани, измеряемые либо с использованием спектрофотометра с интегрирующей сферой