

традиционной чувствительности по полю чувствительность в $1/n$ -октавных полосах частот задана на классе сигналов, по свойствам более близким к шумовым, и поэтому более приемлема для измерений подводного шума в соответствии с [3]. Процедура градуировки не требует излучения шумовых сигналов в гидроакустическом бассейне. Для получения чувствительности в $1/n$ -октавной полосе частот достаточно использовать подробную частотную характеристику приемника. Значительно сокращается расстояние между источником звука и приемником УПШ как при градуировке, так и измерении излучаемого судном шума.

Несомненно, что введение в практику нового понятия «чувствительность в $1/n$ -октавной полосе частот», а также конкретизация способа задания чувствительности на классе сигналов с распределенной по частоте мощностью потребуют значительно большего опыта их применения, чем был получен в одной лаборатории. Чтобы уточнить расстояние между приемником и источником звука и оценить возможность градуировки приемника УПШ в лабораторном бассейне заданных размеров необходимо изучить источники рассеяния. К недостаткам подхода следует отнести то, что исследования были ограничены только моделью в виде точечного приемника в окружении локализованных в пространстве эквивалентных источников рассеяния. Вместе с тем часть проблем, связанных со значительной продолжительностью эксперимента по получению подробных частотных характеристик, удалось преодолеть благодаря разработанному во ВНИИФТРИ методу реализации условий свободного поля при излучении в гидроакустическом бассейне с отражающими границами продолжительных линейно-частотно-модулированных и шумовых сигналов [4, 9].

Л и т е р а т у р а

1. **EURAMET TC-AUV ROADMAP: UNDERWATER ACOUSTICS.** Underwater acoustical metrology to support marine technology and sustain the marine environment [Электрон. ресурс]. www.gobokee.org/ebook/euramet-tc-auv-roadmap-underwater-acoustics-underwater-37se1q (дата обращения 01.06.2014 г.).
2. **Marine Strategy Framework Directive 2008/56/EC** of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 [Электрон. ресурс]. www.ec.europa.eu (дата обращения 01.06.2014 г.).
3. **ANSI/ASA S12.64—2009.** Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. Part 1: General Requirements.
4. **Исаев А. Е.** Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: Изд-во ВНИИФТРИ, 2008.
5. **Исаев А. Е.** Применение методов акустической голографии при исследовании гидроакустических измерительных модулей в условиях лабораторного бассейна // Законодательная и прикладная метрология. 2007. № 5. С. 53—57.
6. **IEC 60565 (2006).** Underwater acoustics — Hydrophones — Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz.
7. **Robinson S.** Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks // PL Report CMAM 034. ISSN 1369-6785. 1999.
8. **P50.2.037—2004.** ГСИ. Измерения гидроакустические. Термины и определения.
9. **Исаев А. Е., Матвеев А. Н.** Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне // Акустический журнал. 2009. Т. 55. № 6. С. 727—736.

Дата принятия 10.11.2014 г.

539.1.074

Использование методов спектрометрии нейтронов при измерении дозиметрических величин

П. Ф. МАСЛЯЕВ, С. Г. ФЕДОРОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: fedorov911@gmail.com

Описан алгоритм восстановления спектра нейтронов с использованием нейтронных спектрометров, содержащих различные блоки детектирования, помещенные в шаровой замедлитель. Показаны способы учета и исключения влияния сопутствующего излучения. Описаны преимущества и недостатки различных детекторов, применяемых для дозиметрии нейтронного излучения.

Ключевые слова: нейтронные дозиметрия и спектрометрия, энергетическая зависимость чувствительности.

An algorithm for the recovery of the neutron spectrum using neutron spectrometers with different detection units placed in a ball moderator. Showing methods of accounting and exclude the effect of concomitant radiation. Influencing factors are described, the advantages and disadvantages of the various detectors used in neutron radiation dosimetry.

Key words: neutron dosimetry and spectrometry, sensitivity energy dependence.

Основными величинами, используемыми в дозиметрии нейтронного излучения, являются мощности поглощенной дозы, ее эквивалента и производные от них величины: керма и поглощенная доза в мышечной ткани, амбиентный

(АЭД) и индивидуальный (ИЭД) эквиваленты дозы. Средства измерений (СИ) поглощенной дозы и ее мощности применяются в лучевой терапии и аварийной дозиметрии [1]. Средства измерений АЭД и его мощности служат при контроле

радиационной обстановки, а СИ ИЭД — для обеспечения радиационной безопасности [2].

Керму нейтронного излучения в мышечной ткани легко рассчитать для известного спектра нейтронов, так как основным процессом взаимодействия с элементами мышечной ткани в области энергий до 10 МэВ является упругое рассеяние, сечения которого достаточно хорошо известны, а также экспериментально определить при измерении поглощенной дозы с помощью набора ионизационных камер или тканезквивалентного пропорционального счетчика с учетом поглощения нейтронов стенками камер или счетчика, при этом тормозным излучением от вторичных заряженных частиц можно пренебречь.

Значения АЭД и ИЭД, называемые операционными величинами [2], являются достаточно адекватными оценками значений нормируемой величины — эффективной дозы [3, 4]. Они являются производными от эквивалента дозы, который определяется как произведение поглощенной дозы и коэффициента качества. Хотя существуют методы раздельного измерения поглощенной дозы нейтронов и коэффициента качества, они не позволяют воспроизвести единицы этих величин на глубине 1 см в сферическом фантоме диаметром 30 см, как это требуется при измерении АЭД, и на глубине 1 см от поверхности плоского фантома размерами $30 \times 30 \times 15$ см в случае измерения ИЭД.

Один из методов измерения АЭД и ИЭД связан с переходом от флюенса нейтронов к значениям этих величин при использовании значений АЭД и ИЭД для единичного флюенса нейтронов различных энергий $H_0^*(10)$ и $H_{P0}(10)$, приведенных в рекомендациях МКРЕ [5].

Таким образом АЭД и ИЭД можно определить как

$$H^*(10) = M \sum_1^m H_{0i}^*(10)(E) F_i(E); \quad (1)$$

$$H_P(10) = M \sum_1^m H_{P0i}(10)(E) F_i(E), \quad (2)$$

где M — коэффициент нормировки; $H_{0i}^*(10)$, $H_{P0i}(10)$ — значения $H_0^*(10)$ и $H_{P0}(10)$, усредненные в интервале энергии $\Delta_i(E)$; $F_i(E)$ — спектр нейтронного излучения по интервалам энергии $\Delta_i(E)$.

В стандарте [6] приведены значения коэффициентов перехода от флюенса нейтронов к АЭД и ИЭД для источников нейтронов AmBe, AmB, ^{252}Cf и ^{252}Cf , размещенного в центре сферы диаметром 30 см, заполненной тяжелой водой. В этом случае вклад в спектр нейтронного излучения, рассеянного в помещении, вычитается при дополнительном измерении с конусом (открытая геометрия), который поглощает нейтронное излучение, выходящее из источника. При использовании источника ^{252}Cf , размещенного в центре сферы диаметром 30 см, конус использовать невозможно. Таким образом, рекомендуемые коэффициенты можно применять только для специальных помещений больших размеров, когда рассеянное излучение незначительно. Поскольку конус экранирует часть помещения, то для помещений малых размеров простого вычитания может оказаться недостаточно. Стандарт [7] допускает передачу единиц АЭД и ИЭД (поверка, калибровка СИ) в открытой геометрии, но в методиках поверки соответствующих средств измерений ре-

комендуется использовать коллимированную геометрию, когда источник нейтронов размещается в полиэтиленовом контейнере с бором, имеющем отверстие в форме конуса [8]. Коллимированная геометрия имеет преимущество перед открытой, так как влияние помещения на спектр ней-



Рис. 1. Набор формирователей

тронов в этих случаях существенно уменьшается из-за ослабления излучения контейнером. Вклад рассеянного излучения, которое образуется, в основном, в контейнере и не зависит от помещения, можно рассчитать методом Монте-Карло [9].

Поля нейтронов, в которых необходимо измерять АЭД и ИЭД, как правило, имеют широкий диапазон энергий нейтронного и сопутствующего излучений. Поэтому должна быть возможность учета или исключения влияния сопутствующего излучения и необходимо знать энергетическую зависимость чувствительности (ЭЗЧ) СИ для оценки неопределенности результата измерений в реальных полях нейтронов, причем ЭЗЧ находят на стадии разработки и испытаний СИ. Ввиду отсутствия моноэнергетических нейтронов во всем требуемом диапазоне энергий ЭЗЧ можно определить для отдельных (типовых) спектров, а также в интегральных экспериментах при использовании источников с различными энергетическими спектрами. Такие спектры нейтронов формируются различными формирователями, некоторые из них показаны на рис. 1. В отдельных случаях энергетические спектры можно рассчитать методом Монте-Карло или измерить с помощью нейтронного спектрометра.

Во всех случаях определение спектра нейтронов (восстановление спектра) $F(E)$, поступающих от радионуклидных источников, сводится к решению системы интегральных уравнений

$$R_i = \sum_1^I w_i(E) F_i(E), \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (3)$$

где R_i — показания спектрометра с i -м блоком детектирования; $w_i(E)$ — чувствительности спектрометра при энергии E , усредненной в интервале $\Delta_i E$.

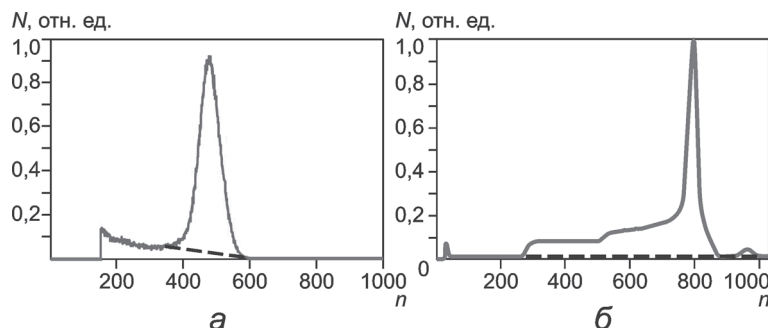


Рис. 2. Спектры импульсов (сплошные кривые) от взаимодействия нейтронов, прошедших до центра замедлителя диаметром 20 см, со сцинтиллятором LiI диаметром и высотой 8 мм (а) и от сферического пропорционального счетчика, наполненного газом BF_3 (б); N — количество частиц в канале, n — номер канала; пунктир — уровень фона и сопутствующее гамма-излучение

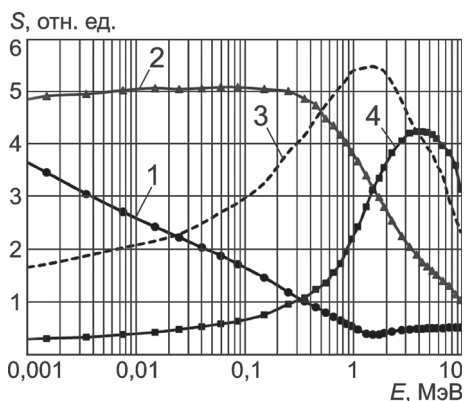


Рис. 3. Энергетические зависимости чувствительности S для детектора тепловых нейтронов при размещении его в полиэтиленовых замедлителях диаметрами 70; 120; 200; 300 см — соответственно кривые 1—4

Решение (3) находится в итерационном процессе по методу максимального правдоподобия [9]:

$$F_{it}(E) = F_{i(t-1)}(E) \frac{1}{\sum_1^l a_i(E)} \left/ \frac{\sum_1^m (a_i(E) F_{i(t-1)}(E))}{\sum_1^m a_i(E)} \right. \quad (4)$$

где $a_i(E) = \frac{w_i(E)}{R_i} \left/ \frac{\sum_1^l w_i(E)}{\sum_1^l R_i} \right.$

Значение коэффициента нормировки определяется как

$$M = D_n \left/ \sum_1^l \left(\frac{K_{zi}}{K_{oi}}(E) K_{oi}(E) F_i(E) \right) \right. \quad (5)$$

где D_n — измеренное значение поглощенной дозы в мышечной ткани на глубине 3 мм; K_{zi}/K_{oi} — отношение расчетных значений кермы нейтронов в мышечной ткани на глубине 3 мм без поглощения; K_{oi} — рекомендованное значение кермы нейтронов в мышечной ткани без поглощения [1].

Неопределенность значений энергетического спектра нейтронов, полученного при решении (3), в значительной степени зависит от выбранного алгоритма восстановления спектра, погрешности измерения R_i , чувствительности СИ к сопутствующим излучениям, анизотропии чувствительности, вида зависимости чувствительности от энергии нейтронов и

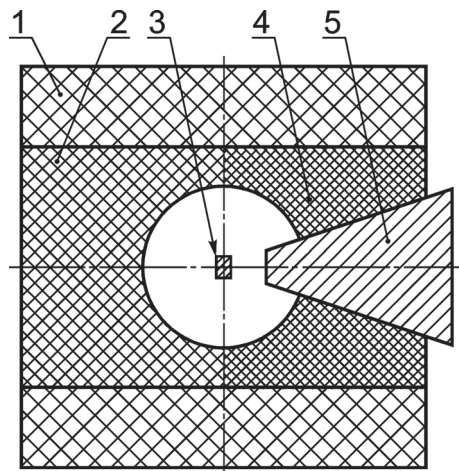


Рис. 4. Контейнер установки УКПН-1М:

1 — контейнер диаметром и высотой 50 см; 2, 4 — задний и передний формирователи поля, соответственно; 3 — источник; 5 — конус для учета вклада рассеянного излучения

ее неопределенности. Поэтому важен выбор блока детектирования СИ (спектрометра нейтронов), который состоит из детектора нейтронов и технических средств, обеспечивающих его работу.

Наибольшее распространение получили спектрометры с детекторами тепловых нейтронов, окруженными шарами различных диаметров из полиэтилена [10]. В качестве детекторов тепловых нейтронов используются сцинтилляторы, чувствительные к тепловым нейтронам, такие как LiI (сечение для ^6Li — 938,47 барн), на основе литиевого стекла, поликристаллический ZnS, смешанный с порошком LiF и помещенный в прозрачный водородосодержащий материал, например, оргстекло, а также пропорциональные счетчики, наполненные газами ^3He (сечение для ^3He — 5316,0 барн) или BF_3 (сечение для ^{10}B — 3842,56 барн).

Для регистрации быстрых нейтронов используют пластмассовые или жидкие сцинтилляторы с разделением импульсов от нейтронов и гамма-излучения по форме импульса, поликристаллический сцинтиллятор ZnS, помещенный в прозрачный водородосодержащий материал, а также пропорциональные счетчики, наполненные водородом.

Сцинтиллятор LiI при достаточной чувствительности имеет малые размеры, что дает возможность иметь полость малых размеров в шаре-замедлителе, однако чувствительность к гамма-излучению требует специальных методов обработки результатов измерений. На рис. 2, а приведен полученный на амплитудном анализаторе спектр импульсов от взаимодействия нейтронов, прошедших до центра замедлителя диаметром 20 см, с сцинтиллятором LiI диаметром и высотой по 8 мм. Импульсы слева от пика, вызванного взаимодействием ^6Li с тепловыми нейтронами, в основном, обусловлены ядрами отдачи, возникающими при упругом рассеянии, и электронами, которые образуются при взаимодействии с гамма-излучением. Эти последние вычитаются из пика, обусловленного взаимодействием сцинтиллятора с тепловыми нейтронами. Следует иметь в виду, что вклад гамма-излучения меняется при использовании замедлителей различных диаметров из-за его взаимодействия с материалом замедлителя.

Счетчик диаметром 50,8 мм, наполненный BF_3 , как следует из рис. 2, б, при большой чувствительности к тепловым нейтронам обладает меньшей чувствительностью к гамма-излучению. Недостаток этого детектора — большой размер, что приводит к большой массе замедлителя. В обоих случаях за результат измерений принимается скорость счета импульсов, обусловленная разностью между двумя кривыми.

Чувствительность блоков детектирования с детектором тепловых нейтронов и замедлителями разных диаметров пропорциональна количеству тепловых нейтронов, достигающих центра замедлителей, поэтому зависимость чувствительности от энергии можно рассчитать методом Монте-Карло. На рис. 3 показаны ЭЗЧ для детектора тепловых нейтронов при размещении его в замедлителях разных диаметров из полиэтилена. При энергиях нейтронов более 6—8 МэВ неопределенность восстановленного спектра нейтронов с помощью спектрометра с шаровыми замедлителями существенно возрастает из-за подобия ЭЗЧ от энергии нейтронов при разных диаметрах замедлителей. Диапазон по энергии нейтронов частично можно расширить включением в состав спектрометра комбинированных замедлителей с использованием в них материалов с большим сечением неупругого рассеяния.

Эта цель достигается также включением в состав спектрометра блока детектирования, ЭЗЧ которого в области быстрых нейтронов существенно иная, чем для детектора тепловых нейтронов, размещенного в шаровом замедлителе. Таким блоком является поликристаллический сцинтиллятор ZnS, помещенный в прозрачный водородосодержащий материал, при этом регистрируется скорость счета импульсов с дискриминацией импульсов по амплитуде от фона и сопутствующего гамма-излучения. Для этих блоков детектирования ЭЗЧ нужно определять индивидуально, так как в детекторах можно использовать поликристаллический сцинтиллятор ZnS с различной дисперсностью.

Для этих целей перспективен блок детектирования с пластмассовым или жидким сцинтиллятором и системой разделения импульсов от нейтронов и гамма-излучения по их форме. Работа в этом направлении в настоящее время проводится во ВНИИФТРИ.

При отсутствии источников моноэнергетических нейтронов ЭЗЧ детекторов быстрых нейтронов получают в результате решения системы интегральных уравнений, где в качестве ядер уравнений используют спектры нейтронов от радионуклидных источников, включая спектры, моделируемые различными формователями. Система интегральных уравнений имеет вид

$$A_i = \sum_1^m F_j(E) w_j(E), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

где A_i — скорость счета импульсов для i -го спектра нейтронов.

Для создания спектров нейтронов, используемых в (6), применяли контейнер установки УКПН-1М, показанный на рис. 4. В контейнер можно помещать как коллиматор, так и

формователи различных энергетических спектров нейтронов. Эти спектры также могут служить для сравнительных измерений дозиметрических характеристик нейтронных полей (спичений) различными СИ.

Л и т е р а т у р а

1. **ICRU Report 26.** Neutron Dosimetry for Biology and Medicine. 1977.
2. **МУ 2.6.1.25—2000.** Методические указания. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования.
3. **ICRP Publication 60.** Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. 1991.
4. **СанПиН 2.6.1.2523—09.** Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).
5. **ICRU Report 57.** Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. 1998.
6. **ISO 8529-1:2001.** Reference neutron radiation. Pt. 1: Characteristics and methods of production.
7. **ГОСТ 8.521—84.** ГСИ. Установки поверочные нейтронного излучения. Методика поверки.
8. **Масляев П. Ф.** Формирование полей нейтронов от радионуклидных источников нейтронов // АНРИ. 2012. № 2. С. 32—38.
9. **Крамер-Агеев Е. А., Трошин В. С., Тихонов Е. Г.** Активационные методы спектрометрии нейтронов. М.: Атомиздат, 1976.
10. **Bramblett R. L., Ewing R. I., Bonner T. W.** A new type of neutron spectrometer // Nucl. Instrum. Methods. 1960. № 9. P. 1—12.

Дата принятия 10.11.2014 г.

006.91:541.182.4/.65:620.3

Методы и средства измерений дисперсных параметров частиц взвесей субмикронного и нанометрового диапазонов

Е. В. ЛЕСНИКОВ, М. В. БАЛАХАНОВ, Д. М. БАЛАХАНОВ

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

Рассмотрены основные алгоритмы обработки автокорреляционных функций для метода динамического рассеяния света, как наиболее эффективного при определении размеров частиц. Предложены алгоритмы обработки функций для случая полидисперсного распределения частиц. Приведены результаты измерений параметров частиц в водных средах, в частности, в природных минеральных водах, предложена методика их идентификации.

Ключевые слова: частицы, дисперсные параметры, наноразмеры, минеральные воды, эталон.

The basic algorithms of processing of the autocorrelation functions for the method of dynamic light scattering as the most effective in the determination of particle sizes are given. The capabilities of processing algorithms in the case of the polydisperse particle distribution explored. Experimental measurements results for particles in aqueous media, particularly in natural mineral waters are given, the method of identifying them is proposed.

Key words: particles, dispersive parameters, nanosizes, mineral water, etalon.

В связи с более широким применением нанотехнологий в различных областях, таких как биология, медицина, энергетика, электроника, оптика и фотоника, актуализируется за-

дача измерений дисперсных параметров аэрозолей и частиц взвесей нанометрового диапазона. После утверждения Государственного первичного эталона единиц дисперсных