

Обеспечение достоверности измерений параметров нейтронного излучения

Валерий Элезарович Дрейзин¹✉, Дмитрий Иванович Логвинов², Александр Александрович Гримов³, Вячеслав Валерианович Варганов⁴

^{1, 3, 4} Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

¹dreizin-ve@yandex.ru✉

³grimmer2007@yandex.ru

⁴npcvvv@yandex.ru

² ООО «НЕОРАДТЕХ», Курск, Россия, d.i.logvinov@yandex.ru

Аннотация. Обоснована необходимость спектрометрических измерений нейтронных потоков в атомной отрасли для корректной оценки плотности и дозовых характеристик излучения. Указано на несовершенство метрологического и методического обеспечения не только спектрометрических, но и радиометрических измерений произвольных нейтронных потоков. Кратко изложена концепция многодетекторного нейтронного спектрометра реального времени и результаты исследования его прототипа. Для повышения достоверности результатов нейтронных измерений предложена инновационная концепция поверки многодетекторных нейтронных спектрометров реального времени с использованием не одного потока (причём с неизвестным спектром), а нескольких десятков опорных полей с разнообразными и точно известными спектрами. Поверку предложено проводить на разработанном испытательно-поверочном комплексе. Выполнено математическое моделирование создаваемых этим комплексом опорных нейтронных полей с различными формами энергетических спектров. Спектры генерируемых опорных нейтронных полей определены расчётным путём с помощью моделирующих программ Монте-Карло. Создан макет комплекса, который экспериментально опробован при лабораторных испытаниях прототипа многодетекторного нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени. Предложено обучать встраиваемую в многодетекторный нейтронный спектрометр-дозиметр нейронную сеть на расширенном множестве базовых спектров, включающем помимо спектров опорных полей описанные в литературе достоверно известные спектры нейтронных потоков. Представлена процедура формирования множества модельных реализаций обучающей и проверочной выборки, используемых при обучении нейронной сети. Показано, что можно исключить энергетические погрешности предложенного многодетекторного нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени при измерении нейтронных потоков даже при поверке в опорных полях с ограниченным разнообразием форм спектров. Обоснована возможность минимизации энергетических погрешностей существующих нейтронных радиометров-дозиметров при поверке в опорных нейтронных полях разработанного испытательно-поверочного комплекса.

Ключевые слова: нейтронное излучение, спектр, измерение, поверочный комплекс, опорные поля

Для цитирования: Дрейзин В. Э., Логвинов Д. И., Гримов А. А., Варганов В. В. Обеспечение достоверности измерений параметров нейтронного излучения // Измерительная техника. 2021. № 5. С. 53–60. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-5-53-60>

Ensuring the accuracy of neutron radiation measurements

Valery E. Dreyzin¹✉, Dmitry I. Logvinov², Alexander A. Grimov³, Vyacheslav V. Varganov⁴

^{1, 3, 4} Southwest State University, Kursk, Russia

¹dreizin-ve@yandex.ru✉

³grimmer2007@yandex.ru

⁴npcvvv@yandex.ru

² LLC "NEORADTECH", Kursk, Russia, d.i.logvinov@yandex.ru

Abstract. The necessity of spectrometric measurements of neutron fluxes in the nuclear industry for the correct estimation of the radiation density and dose characteristics is justified. It is pointed out that the metrological and methodological support for not only spectrometric, but also radiometric measurements of arbitrary neutron fluxes is imperfect. The concept of a real-time multi-detector neutron spectrometer and the results of the study of its prototype are briefly described. To increase the reliability of the results of neutron measurements, it is proposed to verify a multi-detector neutron spectrometer-dosimeter of real time and existing radiometers-dosimeters of neutron radiation in reference neutron fields with different and reliably known forms of energy spectra. To create reference neutron fields, a neutron test and verification complex was developed and its layout was created. The model was experimentally tested in laboratory tests of a prototype of a multi-detector neutron spectrometer-a real-time dosimeter. It is proposed to train a neural network embedded in a multi-detector neutron spectrometer-dosimeter on an extended set of basic spectra, which includes, in addition to the reference field spectra, reliably known spectra of neutron fluxes described in the literature. The procedure for forming a set of model implementations of training and test samples used in training a neural network is presented. It is shown that it is possible to exclude the energy errors of the proposed multi-detector neutron spectrometer-dosimeter of real time when measuring neutron fluxes, even when checking in reference fields with a limited variety of spectral forms. The possibility of minimizing the energy errors of existing neutron radiometers-dosimeters during verification in the reference neutron fields of the developed test and verification complex is justified.

Keywords: neutron radiation, spectrum, measurement, calibration complex

Введение. Состояние проблемы. Низкая достоверность существующих методов оперативных измерений нейтронных потоков определяется тем, что нейтроны в силу электронейтральности не взаимодействуют с электронными оболочками атомов, а взаимодействуют только с их ядрами. Поэтому ионизация происходит косвенно за счёт вылетающих из ядер при взаимодействии с нейтронами заряженных частиц и гамма-квантов. В результате отсутствует однозначная зависимость амплитуды выходных импульсов существующих нейтронных детекторов от энергии нейтронов, и наблюдается сильная (тысячекратная) зависимость эффективности регистрации нейтронов существующими нейтронными детекторами от их энергии при весьма широком (10 порядков) энергетическом диапазоне нейтронных потоков, используемых в атомной отрасли. Это усугубляется несовершенством существующего методического и метрологического обеспечения нейтронных измерений.

Необходимость спектрометрических измерений нейтронного излучения осознана давно. Существует метод активационного анализа, освоен промышленный выпуск стандартных наборов активационных индикаторов и созданы многочисленные компьютерные программы обработки результатов активационных измерений с целью вычислительного восстановления спектра исследуемого потока по этим результатам. Уже 60 лет развиваются различные варианты многосферных спектрометров Боннера и соответствующие компьютерные программы вычислительного восстановления спектров исследуемых потоков по результатам измерений с применением сфер – замедлителей нейтронов – разных диаметров. Наиболее полный исторический обзор нейтронной спектрометрии и дозиметрии представлен в работах [1–3]. Использование в указанных методах алгоритмов восстановления

спектров измеряемых нейтронных потоков требует дополнительной информации о типовой форме восстанавливаемого спектра. Анализ неопределённостей, возникающих при вычислительном восстановлении спектра с помощью итерационных процедур [4], показал, что ни один из применяемых алгоритмов не может корректно работать без дополнительной априорной информации об источнике излучения. Однако используемая в применяемых программах для вычислительного восстановления спектра дополнительная информация о типовой форме спектра и последующая коррекция спектра путём итераций не решают проблему метрологического обеспечения измерений нейтронных потоков со спектрами разнообразной формы, особенно в случае оперативных измерений. Поэтому неоднократно предпринимались попытки повысить информативность и достоверность нейтронных измерений путём совершенствования как аппаратуры, так и методик поверки и измерений. Одной из таких попыток можно считать разработку ГНЦ «СНИИП» трёхканального нейтронного радиометра-дозиметра МКС-03С. Блок детектирования этого прибора (БДКС-05С) представляет собой полиэтиленовую сферу диаметром 220 мм, в которую на разную глубину погружены 5 газоразрядных нейтронных детекторов на основе гелия-3. Один из детекторов проходит через центр шара и образует канал быстрых нейтронов. Два других детектора (в другой диаметральной плоскости) размещены на некотором расстоянии от центра шара и образуют канал промежуточных нейтронов. Ещё два детектора размещены вблизи периферии шара и образуют канал тепловых нейтронов. Никакой совместной обработки выходов этих каналов в приборе не предусмотрено. Для всех трёх каналов в техническом описании прибора представлены их спектральные характеристики (рис. 1). Заметим, что в данных характеристиках отсутствует весь промежуточный диапазон энергий, чувствительность канала быстрых нейтронов увеличена в четыре раза, а все три измерительных канала в той или иной мере чувствительны ко всем трём поддиапазонам энергий нейтронов. Основным недостатком, который нивелирует информационное преимущество этого прибора, является несовершенство используемой методики поверки. Прибор поверяют на установке с плутоний-бериллиевым источником, который с помощью телемеханической системы можно устанавливать на различных задаваемых расстояниях от детектора поверяемого прибора. При этом поверяют только каналы тепловых и быстрых нейтронов. При поверке канала тепловых нейтронов измерения проводятся в открытой геометрии, т. е. капсула с источником нейтронов устанавливается на заданном расстоянии от детектора поверяемого прибора, с использованием метода кадмиевой разности (первое измерение проводится без кадмиевого экрана, второе с кадмиевым экраном, устанавливаемым между источником нейтронов и детектором и из результата первого измерения вычитается результат второго). При поверке канала быстрых нейтронов также проводится два измерения: полного потока и потока, измеренного при установке между источником и детектором так называемой тепловой насадки – полиэтиленового усечённого конуса, который должен не пропустить к детектору быструю составляющую

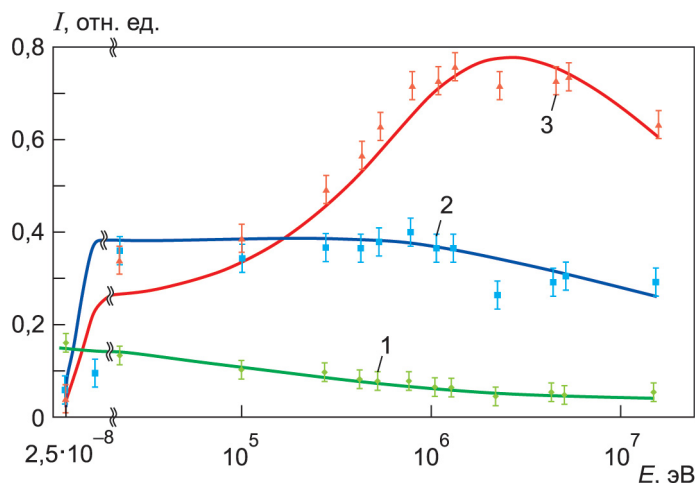


Рис. 1. Спектральные характеристики трёх каналов блока детектирования БДКС-05С:

1–3 – соответственно канал тепловых, канал промежуточных, канал быстрых нейтронов

Fig. 1. Spectral characteristics of three channel soft he BDKS-05S detection unit:

1–3 – respectively, the thermal channel, the intermediate channel, and the fast neutron channel

нейтронного потока. Как и все другие действующие методики поверки нейтронных радиометров-дозиметров, указанная методика базируется на до сих пор действующем в РФ стандарте ГОСТ 8.355-79 «Радиометры нейтронов. Методы и средства поверки». Этот стандарт предусматривает три варианта поверки: в коллимированном пучке нейтронов; в широком пучке нейтронов и в открытой геометрии с использованием замедляющего конуса (тепловой насадки) для радиометров быстрых нейтронов.

Поскольку все применяемые в нейтронных радиометрах и дозиметрах детекторы имеют весьма ограниченный энергетический диапазон, то оценка по их откликам интегральной плотности измеряемого потока нейтронов или мощности поглощённой или эквивалентной дозы, вообще говоря, неправомерна, хотя на практике широко используется. Действительно, такой прибор реально чувствителен только к некоторой части нейтронного потока, но проградуирован по интегральному потоку с учётом коэффициента пропорциональности между измеренной составляющей и интегральным потоком. Этот поток соответствует спектру источника, в поле которого калибровали прибор. Но нейтронные потоки, создаваемые в поверочных установках, не аттестуются по энергетическому спектру, а при измерении нейтронных потоков с резко отличающейся формой спектра погрешности могут достигать сотен и даже тысяч процентов.

Поскольку основные радиоизотопные источники нейтронов в поверочных установках излучают только быстрые нейтроны, а применяемые в большинстве нейтронных радиометров-дозиметров детекторы чувствительны преимущественно к медленным нейтронам, то в ГОСТ 8.355-79 предусмотрено использование следующих устройств: шарового замедлителя нейтронов из водородсодержащего вещества, надеваемого на источник при поверке в широком пучке нейтронов; поверочных установок типа УКПН (УКПН – установка коллимированного пучка нейтронов) при поверке в коллимированном пучке нейтронов; замедляющего конуса (тепловой насадки), устанавливаемого между источником и детектором при поверке радиометров быстрых нейтронов.

При поверке в широком пучке нейтронов их поток, прошедший через шаровой замедлитель, кроме быстрых будет содержать и промежуточные, и тепловые нейтроны. Для выделения тепловых нейтронов из такого потока служит описанный выше метод кадмиевой разности. При поверке в коллимированном пучке нейтронов учитывается лишь прямой поток нейтронов, прошедших через канал коллиматора и достигших детектора, без учёта нейтронов, рассеянных в веществе коллиматора, а также нейтронов, вышедших из коллимирующей системы через её боковые поверхности в окружающее пространство и вторично отражённых от стен, пола и потолка помещения, часть из которых попадает в детектор. При поверке радиометров быстрых нейтронов подразумевается, что прошедшие через замедляющий конус нейтроны потеряют большую часть своей энергии, и до детектора будут доходить лишь медленные нейтроны (тепловой и промежуточной энергий). При вычитании из результата измерений без конуса результата измерений с конусом получают поток быстрых нейтронов.

Согласно ГОСТ 8.355-79 расчёт расстояний между источником и детектором, при которых должны обеспечиваться задаваемые значения плотности потока нейтронов, базируется на законе обратных квадратов ослабления потока от точечного источника (учитывается расстояние от геометрического центра капсулы с источником нейтронов до геометрического центра чувствительной области детектора нейтронов). В то же время в данном стандарте не учитывается тот факт, что и шаровой замедлитель, и коллиматор, и, тем более, тепловая насадка не только замедляют нейтроны, но и рассеивают и частично поглощают их, и часть этих рассеянных нейтронов, вторично отражаясь от стен, пола, потолка помещения, и теряя при этом дополнительную порцию энергии, достигает детектора и регистрируется им. Именно эти, рассеянные и вторично отражённые нейтроны, создают основную долю регистрируемых тепловых нейтронов.

Ещё более явной является некорректность регламентируемой ГОСТ 8.355-79 методики поверки радиометров быстрых нейтронов. На самом деле полученная разность результатов измерений без замедляющего конуса и с конусом вовсе не определяет составляющую быстрых нейтронов в первоначальном потоке. Ведь замедляющий конус не отсекает и не поглощает быстрые нейтроны, а лишь замедляет и рассеивает их. Причём большая часть потерявших часть энергии нейтронов, рассеянных конусом, выходит во все стороны через боковую поверхность конуса, вторично рассеивается стенами помещения, и какая-то доля этих нейтронов попадает в детектор. При этом плотность прямого потока, прошедшего через замедляющий конус и дошедшего до детектора, уменьшается не в три раза, а в десятки раз, а регистрируемые детектором тепловые и промежуточные нейтроны – это рассеянные нейтроны, вторично отражённые от стен, пола и потолка помещения. Заметим, что при реальных измерениях откалиброванными по данной методике приборами не применяется ни метод кадмиевой разности, ни замедляющий конус.

Предпринимались неоднократные попытки усовершенствовать действующие методики поверки, в частности, авторы работ [5–7] предлагали учитывать потоки рассеянных нейтронов, вторично отражённых от стен, пола и потолка помещения. Однако это не могло кардинально решить проблему. Во-первых, при использовании коллимирующей системы или замедляющего конуса закон обратных квадратов перестаёт работать даже в ограниченном диапазоне расстояний между источником и детектором. Во-вторых, остаётся нерешённой главная проблема – несоответствие спектра нейтронных потоков, получаемых на поверочной установке со спектрами реальных нейтронных потоков при практических измерениях. Не решает проблему и составление обширной библиотеки энергетических спектров различных нейтронных источников, предпринятое МАГАТЭ [8]. Эти материалы частично дублируются в [9]. Но остаётся неясным, как эти материалы могут помочь при калибровке конкретных приборов. При этом в [8] неоднократно указывается, что приведённые спектры нельзя рассматривать как эталонные в силу неопределённостей как расчётных, так и экспериментальных методов их определения.

Цель настоящей работы – анализ концепции поверки разрабатываемых нейтронных спектрометров реального времени на создаваемом испытательно-поверочном комплексе, генерирующем множество опорных нейтронных полей с различными формами энергетических спектров.

Постановка задачи. Кардинальный путь повышения достоверности измерений нейтронных потоков с разнотипной формой спектра – переход к спектрометрическим измерениям. Это особенно важно в дозиметрии, поскольку для достоверного определения мощностей поглощённой и эквивалентной доз необходимо не только правильно оценить интегральную плотность излучения, но и знать его энергетический спектр. Ведь в основе дозиметрии лежит оценка энергии, поглощённой биологической тканью при её облучении ионизирующим излучением любого вида. Данная оценка будет зависеть не только от интегральной плотности излучения, но и от его энергетического спектра. Поэтому возникла необходимость разработки нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени и его метрологического обеспечения.

Концепция построения и основные результаты исследования многодетекторного нейтронного спектрометра-дозиметра описаны в работах [11, 12]. В настоящее время разрабатывается промышленный многодетекторный нейтронный спектрометр-дозиметр реального времени, в состав которого входят сцинтилляционные детекторы с различными спектральными характеристиками. Для получения различных спектральных характеристик сцинтилляционных нейтронных детекторов существует четыре способа: изменение толщины сцинтиллятора (что влияет на эффективность регистрации нейтронов различной энергии); добавление бора-10 в состав полистирольного сцинтиллятора (что резко повышает его чувствительность к нейтронам низких энергий); покрытие сцинтиллятора фильтром, содержащим вещества, активно поглощающие нейтроны низких энергий (бор, кадмий, гадолиний); использование многопороговой амплитудной дискриминации выходных импульсов детекторов (что позволяет от одного детектора получать несколько параллельных измерительных каналов с различными спектральными характеристиками).

К основным прогнозируемым характеристикам многодетекторного нейтронного спектрометра-дозиметра относятся плотность измеряемых потоков $10\text{--}10^5\text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$ и время измерений от пяти минут до долей секунды (соответственно для нижнего и верхнего пределов плотности измеряемого потока). Предполагается, что конструкция прибора массой до 5 кг моноблочная, на цветной знакографический дисплей по результатам измерений должны выводиться в цифровом и/или графическом виде интегральная плотность и спектр измеряемого потока (в виде значений спектральных плотностей по принятым энергетическим интервалам), а также значения мощности поглощённой и эквивалентной доз.

Для поверки не только разрабатываемого нейтронного спектрометра-дозиметра, но и существующих радиометров-дозиметров нейтронного излучения требуется создать испытательно-поверочный комплекс. При этом методики поверки радиометров-дозиметров не должны вносить

дополнительных погрешностей, помимо тех, которые невозможно избежать при радиометрическом методе измерений.

Разработка промышленного испытательно-поверочного комплекса. Этот комплекс должен состоять из аппаратной части, методического и программного обеспечения. В аппаратную часть входят следующие устройства:

типовая поверочная нейтронная установка для измерений в открытой геометрии, включающая образцовый радиоизотопный источник нейтронного излучения и измерительную линейку, по направляющим которой с помощью телемеханической системы можно перемещать источник нейтронов, чтобы устанавливать его на различные задаваемые расстояния от поверяемого прибора или исследуемого детектора;

коллиматорная система, перемещаемая на задаваемое расстояние от детектора поверяемого прибора, в которой находится капсула с источником нейтронов, и набор дисков – замедлителей нейтронов различной толщины из водородсодержащего материала, помещаемых в канал коллиматорной системы;

образцовый детектор тепловых нейтронов с точно известной эффективностью;

съёмные кадмиевые экраны, надеваемые на выходной торец коллиматора и образцовый детектор тепловых нейтронов, для измерения тепловой составляющей нейтронных потоков методом кадмиевой разности;

компьютерная система автоматизированного управления процедурой поверки или испытаний, регистрации результатов измерений, их математической обработки, представления результатов в удобном для оператора виде и автоматического формирования протокола поверки или испытаний с его распечаткой и хранением в архивной памяти.

Методическая часть должна включать следующие методики: метрологической аттестации испытательно-поверочного комплекса; поверки нейтронных спектрометров-дозиметров; поверки нейтронных радиометров-дозиметров в создаваемых на установке опорных нейтронных полях; экспериментальных исследований спектральных характеристик нейтронных детекторов.

Программная часть должна содержать базу данных спектров опорных нейтронных полей, получаемых на установке на расстояниях 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0 и 5,0 м от источника нейтронов для замедляющих дисков толщиной 0 (диск отсутствует); 10; 20; 30; 50; 80; 120 и 180 мм без кадмиевого экрана и с кадмиевым экраном на выходном торце коллиматорной трубы, а также базы данных расчётных нормированных спектров нейтронных опорных полей, создаваемых установкой, и достоверно известных спектров нейтронных полей, найденных в литературе. Также в программную часть входят следующие программы: формирования по указанным базам данных обучающей и поверочной выборки, используемых для обучения нейронной сети нейтронного спектрометра-дозиметра; обучения нейронной сети, встраиваемой в спектрометр-дозиметр для вычислительного восстановления спектров измеряемых нейтронных потоков; управления поверкой нейтронных спектрометров-дозиметров; управления поверкой нейтронных радиометров-дозиметров; экспериментального определения

методических погрешностей нейтронных спектрометров-дозиметров и радиометров-дозиметров по результатам поверки; экспериментального определения спектральных характеристик нейтронных детекторов; формирования паспорта поверки нейтронных спектрометров-дозиметров и радиометров-дозиметров.

В качестве программного моделирующего комплекса выбран комплекс GEANT-4, поскольку он является наиболее универсальным, доступным (находится в свободном доступе) и регулярно совершенствуемым. Наиболее точным для расчётов переноса нейтронного излучения считается программный комплекс MCNPX, однако специально проведённое сравнительное исследование результатов расчётов с помощью комплексов MCNPX и GEANT-4 [13] показало согласование этих результатов в пределах 3–5 % при оценке отклика детектора в энергетическом диапазоне $0,025\text{--}20 \cdot 10^6$ эВ и в пределах 1 % для диапазона энергий $100\text{--}5 \cdot 10^6$ эВ. Для оценки точности этих программных комплексов в [13] проведено сравнение симуляций спектра источника ^{252}Cf из стандарта ISO 8529-1:2001 "Reference neutron radiations – Part 1: Characteristics and methods of production ^{252}Cf ". Для программного комплекса MCNPX рассогласование составляет менее 2,5 %, для GEANT-4 – 5,3–6,5 %. Таким образом, использование комплекса GEANT-4 для расчётов спектров опорных нейтронных полей обеспечивает достаточную для практики точность и позволяет получать спектры не только нейтронной, но и гамма-составляющей смешанного излучения.

По расчётным непрерывным спектрам опорных нейтронных полей определяют усреднённые по задаваемым энергетическим интервалам спектральные плотности, т. е. непрерывные спектры заменяют ступенчатыми. При этом спектры опорных полей, получаемые для разных расстояний между источником и детектором, должны быть рассчитаны заранее, поскольку закон обратных квадратов для расчёта изменения плотности потока при изменении расстояния между источником и детектором уже не будет действовать. В данном комплексе будут рассчитаны спектры опорных нейтронных полей для расстояний между источником и детектором 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0 и 5,0 м, что позволит перекрыть широкий диапазон пределов измерений поверяемых приборов. На рис. 2 приведены спектры некоторых опорных нейтронных полей, получаемых на этом комплексе при расстоянии до источника нейтронов 1 м и различных толщинах замедляющих дисков, устанавливаемых в канал коллиматора, с использованием плутоний-бериллиевого и калифорниевых первичных источников нейтронов, а на рис. 3 – спектры опорных полей, получаемых от плутоний-бериллиевого источника при различных расстояниях между источником и детектором при отсутствии замедляющих дисков в коллиматоре.

Формирование обучающей и проверочной выборок модельных спектров для обучения нейронной сети спектрометра. Для поверки нейтронных спектрометров-дозиметров вполне достаточно существующих разнообразных спектров, создаваемых комплексом опорных нейтронных полей. Но для обучения нейронной сети, встраиваемой в разрабатываемый нейтронный спектрометр для восстановления спектров измеряемых нейтронных полей, разнообразие форм спектров этих опорных полей явно уже возможного разнообразия форм

спектров измеряемых нейтронных потоков. Теория нейронных сетей однозначно утверждает, что если сеть обучена на выборке с более широким разнообразием восстанавливаемых зависимостей, то неопределённость восстановления зависимостей, полученная для любой подвыборки с более узким разнообразием, не может превышать неопределённости для более широкой выборки, т. е. неопределённость восстановления зависимостей, полученная по более широкой выборке, будет достоверно характеризовать неопределённость для любой части выборки. В соответствии с этим положением базу данных спектров, по которой формируются обучающая и проверочная выборки модельных спектров, желательно существенно

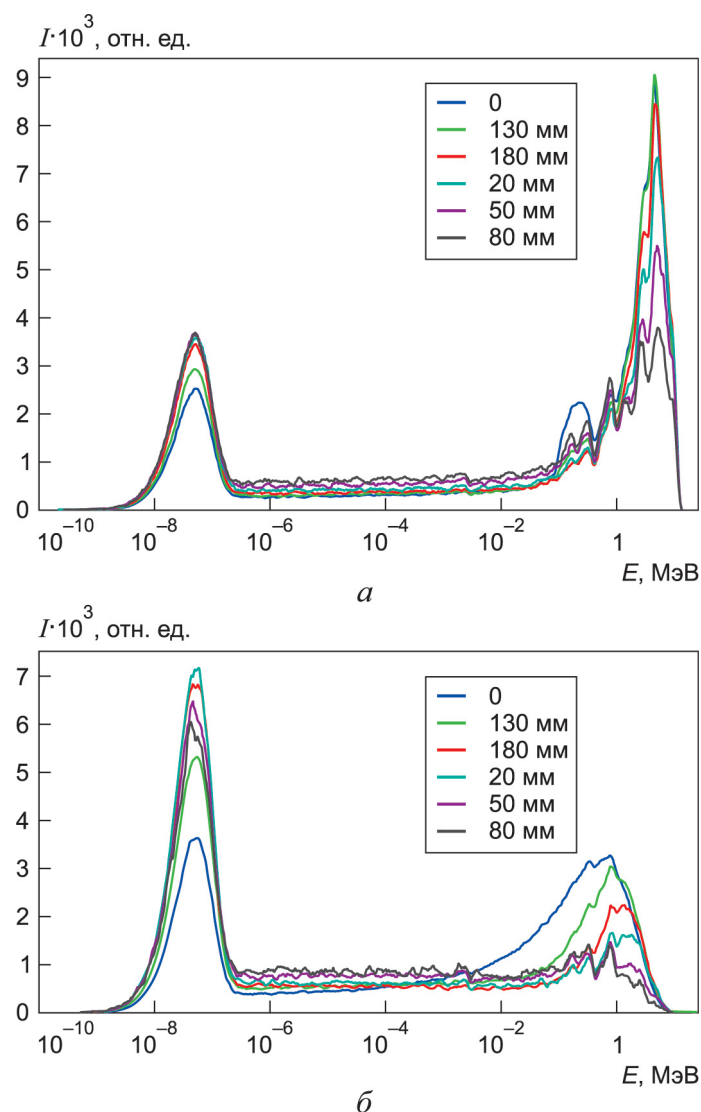


Рис. 2. Формы спектров некоторых опорных нейтронных полей, получаемых на испытательной установке ИЛ-1М2 с плутоний-бериллиевым источником (вверху) и калифорниевым источником (внизу) при различных толщинах замедляющих дисков и расстоянии между источником и детектором 1 м

Fig. 2. Forms of the spectra of some reference neutron fields obtained at the IL-1M2 test facility with a plutonium-beryllium source (top) and a California source (bottom) at different thicknesses of the decelerating disks and a distance between the source and the detector of 1 m

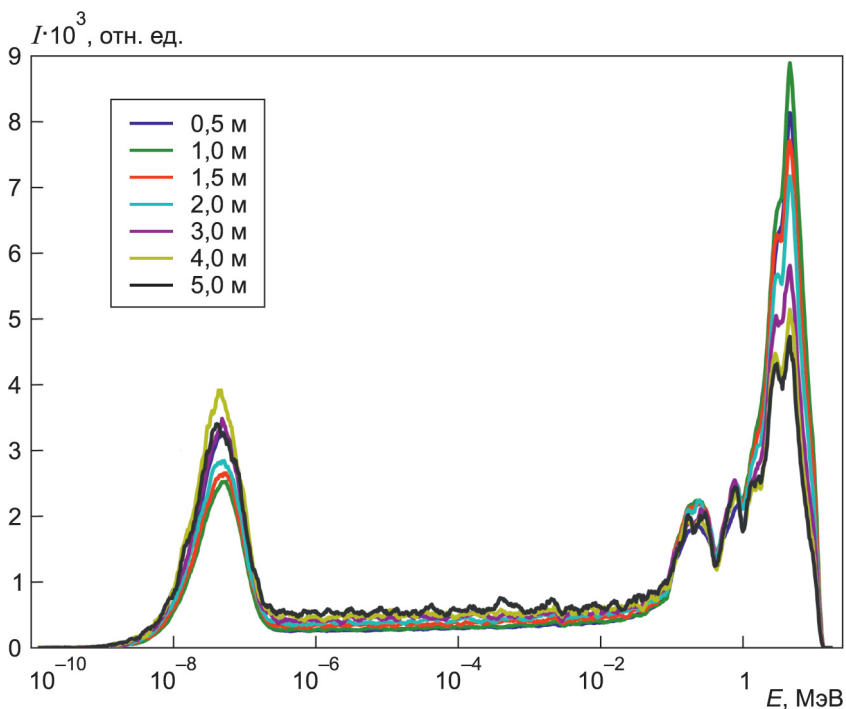


Рис. 3. Формы спектров опорных нейтронных полей, получаемых на испытательном комплексе ИЛ-1М2 с плутоний-бериллиевым источником при различных расстояниях между источником и детектором и отсутствии замедляющих дисков в коллиматоре

Fig. 3. Forms of the spectra of some reference neutron fields obtained at the IL-1M2 test complex with a plutonium-beryllium source at different distances between the source and the detector and the absence of decelerating disks in the collimator

расширить за счёт достоверно известных спектров, найденных в литературе. Можно отдельно оценить неопределённость по всей обучающей выборке и по той её части, которая формируется опорными нейтронными полями поверочного комплекса, поэтому при проверке достаточно убедиться, что экспериментально полученная неопределённость не превышает расчётной для данной подвыборки. Но в паспорт прибора должна записываться неопределённость не для экспериментальной подвыборки, а для всей обучающей выборки.

Все базовые спектры (как экспериментально полученные на поверочной установке, так и найденные в литературе) нормируются относительно интегрального значения плотности потока, поскольку для обучения нейронной сети важна форма спектра, а не абсолютные значения спектральной плотности. Затем формы базовых спектров преобразуются из непрерывной в ступенчатую путём вычисления среднеинтервальных значений спектральной плотности по принятым энергетическим интервалам. По этим базовым спектрам формируются модельные спектры обучающей и проверочной выборок путём прибавления к среднеинтервальным спектральным плотностям каждого базового спектра случайной величины со средним квадратическим отклонением (СКО) 10 %. Это позволяет имитировать инструментальные погрешности и вносить дополнительное разнообразие форм модельных спектров. В результате для каждого базового спектра формируется 30 модельных спектров, 20 из них случайным образом отбираются

в обучающую выборку, а 10 остальных – в проверочную. В настоящее время для формирования обучающей и проверочной выборок предполагается использовать 70 базовых спектров (30 создаваемых комплексом и 40 взятых из литературы). Тогда объём обучающей выборки составит 1400 реализаций, а проверочной – 700, что обеспечит высокую статистическую достоверность процедуры обучения нейронной сети. Таким образом, при проверке нейтронных спектрометров с использованием обученной на данных выборках нейронной сети в опорных нейтронных полях, создаваемых данным комплексом, будут практически полностью исключены энергетические погрешности этих спектрометров.

Экспериментальные исследования. Для экспериментальной проверки прототипа спектрометра-дозиметра реального времени на базе блока детектирования БДКС-05С разработан и изготовлен макет измерительного блока, а в качестве блока вторичной вычислительной обработки, реализующей обученную нейронную сеть, использован персональный компьютер (ПК). На ПК наиболее удобно эмулировать нейронную сеть, отладить программное обеспечение и проанализировать полученные экспериментальные результаты. Поэтому для макетного образца прибора такое решение подходит, так как обеспечивает максимальную гибкость алгоритмов системы, экономичность и простоту реализации. Измерительный блок представляет собой одноплатное устройство. Блок схемотехнически избыточен, так как рассчитан на возможное применение с перспективным блоком детектирования, имеющим до восьми измерительных каналов. Измерительный блок состоит из восьми каналов усилителей-формирователей, 8-разрядного микроконтроллера, энергонезависимой памяти, узла гальванической развязки интерфейса RS-232 на оптронах.

Специальное программное обеспечение ПК обеспечивает решение следующих задач: расчёт интенсивности поступающих с выходов измерительных каналов импульсных последовательностей (скорости счёта) по алгоритму скользящего среднего; расчёт спектра и интегральной плотности нейтронного излучения по заранее введённой нейросетевой модели; вывод результатов на дисплей в цифровой и графической форме, восстановление непрерывной формы спектра по найденным усреднённым спектральным плотностям методом сплайн-аппроксимации.

Для экспериментального исследования прототипа спектрометра необходимо измерить энергетические спектры нейтронных потоков с разнообразными по форме и точно известными спектрами. В связи с отсутствием нейтронных источников с метрологически аттестованными энергетическими спектрами (не считая уникальных времяпролётных установок, на которых энергию нейтронов можно измерять прямым методом – измеряя их скорость в вакуумном канале) разработана установка для создания опорных нейтронных полей со спектрами различной формы. Установка создана на базе действующего

в лаборатории радиационных измерений АО «Курский завод «Маяк» испытательного стенда ИЛ-1 для поверки нейтронных радиометров-дозиметров. Разработана дополнительная оснастка к этому стенду, включающая коллимирующую систему из водородсодержащего материала, куда помещается капсула с радиоизотопным источником нейтронов, и в полость которой можно вставлять замедлители нейтронов в виде парафиновых дисков различной толщины.

Спектры всех возможных вариантов этих полей рассчитывали с помощью библиотеки программ GEANT-4. Всего от одного источника можно получить более 30 опорных полей с различной формой спектра. Некоторые из них для замедляющих дисков разных толщин показаны на рис. 4.

По результатам измерений, полученных на указанной выше установке опорных нейтронных полей с помощью макетного образца спектрометра, среднеквадратичная погрешность (СКП) измеренных значений среднеинтервальных плотностей составляет 3,4 %. Максимальные погрешности определения интервальных плотностей для отдельных интервалов опорных полей не превышают 6 % и лишь для тех интервалов, в которых наблюдаются наиболее сильные изменения спектральной плотности, достигают 10–13 %. Заметим, что нейронная сеть обучалась только на выборке, сформированной из базовых спектров опорных нейтронных полей, получаемых на данной установке, с добавлением к среднеинтервальным спектральным плотностям случайной величины с СКО 10 % (как описано выше) и без учёта базовых спектров из литературы.

Однако реализация промышленного нейтронного спектрометра-дозиметра на базе этого блока детектирования имеет ряд существенных недостатков: большие для носимого прибора массогабаритные характеристики блока детектирования БДКС-05С (массой 14 кг); малое число (всего три) измерительных каналов с невысокими спектральными селективностями, что ограничивает возможности восстановления спектра в более детальном виде; существенный разброс характеристик и малый ресурс используемых газоразрядных детекторов.

При поверках нейтронных спектрометров и радиометров в опорных нейтронных полях с разнообразной формой спектра существенно усложняются процедуры поверки и ещё более усложняется математическая обработка их результатов. Поэтому для повышения производительности поверок и исключения субъективных ошибок при обработке результатов необходимо максимально автоматизировать поверочные процедуры и последующую математическую обработку результатов измерений, для чего в состав поверочной установки необходимо включить компьютерную систему управления с соответствующим программным обеспечением.

Закключение. Для реализации предложенного метода поверки создаваемого нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени в опорных нейтронных полях с различной формой энергетических спектров разработан

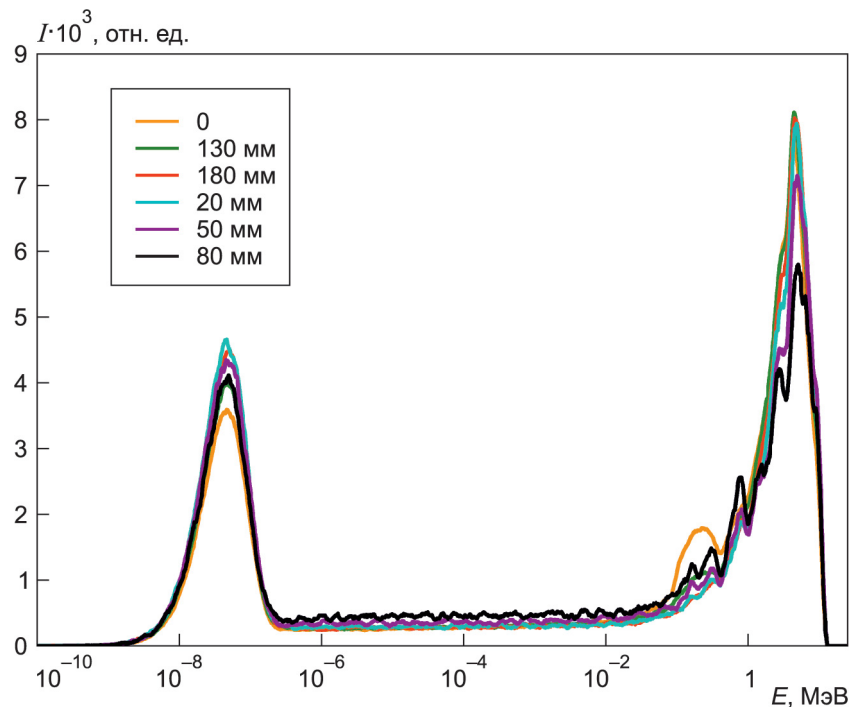


Рис. 4. Энергетические спектры некоторых опорных нейтронных полей, полученных на установке ИЛ-1М1

Fig. 4. Energy spectra of some reference neutron fields obtained at the IL-1M1 facility

испытательно-поверочный комплекс. Для получения опорных потоков с необходимым диапазоном вариаций плотности потока вместо применения закона обратных квадратов для расчёта ослабления потока с увеличением расстояния между источником нейтронов и детектором используются заранее рассчитанные значения плотности и энергетические спектры опорных нейтронных полей на выбранных расстояниях между источником нейтронов и детектором.

Поскольку проблематично с высокой достоверностью измерить интегральную плотность создаваемых поверочной установкой опорных нейтронных потоков в широком диапазоне энергий, что необходимо для перехода от нормированных спектральных плотностей опорных нейтронных полей к их абсолютным значениям, то предложено использовать метод кадмиевой разности для сопоставления с высокой достоверностью тепловых составляющих виртуальных (расчётных) потоков с реальными (измеренными) потоками, создаваемыми комплексом. Полученные положительные результаты экспериментального исследования разработанного прототипа нейтронного спектрометра на макете поверочной установки, создающей опорные нейтронные поля с различной формой спектра, позволили спроектировать промышленный автоматизированный испытательно-поверочный комплекс для поверки не только создаваемого многодетекторного нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени, но и существующих нейтронных радиометров-дозиметров. Такая поверка обеспечит минимизацию энергетических погрешностей указанных приборов.

При поверке нейтронных спектрометров-дозиметров в опорных нейтронных полях, создаваемых предлагаемым

испытательно-поверочным комплексом, можно практически полностью устранить дополнительные энергетические погрешности определения интегральной плотности измеряемых потоков и их спектральных составляющих, возникающие из-за несоответствия спектров опорных нейтронных полей, создаваемых комплексом и произвольных измеряемых полей при реальных измерениях. Соответственно исключаются энергетические погрешности определения мощности поглощённой и эквивалентной доз, вычисляемые по измеренному спектру. При проверке существующих радиометров-дозиметров энергетические погрешности измерения плотности потока и дозовых характеристик принципиально не могут быть исключены. Однако при проверке в опорных нейтронных полях с различными формами спектров эти погрешности можно минимизировать – усреднить для всех опорных полей, создаваемых испытательно-поверочным комплексом. В настоящее время на действующих поверочных установках погрешности определяются лишь для единственного спектра нейтронного потока, создаваемого той установкой, на которой калибровался прибор. А при измерении реальных потоков с другой формой спектра эти погрешности могут достигать сотен и тысяч процентов, но определить их пока не представлялось возможным. Проверка на предлагаемом комплексе позволит определить погрешности измерения плотности потока и дозовых характеристик для нескольких десятков опорных потоков с различными формами спектров и усреднить их.

Список литературы

1. Brooks F. D., Klein H., Neutron Spectrometry – historical review and present status, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2002, A476, pp. 1–11.
2. Thomas D. I., *Spectrometry for Radiation Protection Dosimetry*, 2004, vol. 110, no. 1–4, pp. 141–149.
3. Брегадзе Ю. И., Степанов Э. К., Ярына В. П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1990. 262 с.
4. Matske M., Propagation of uncertainties in unfolding procedures, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2002, A476, pp. 230–241.
5. Азупов В. А., Бальяева Р. Р., Копейкина Е. С., Меняйло Н. П. Унифицированная методика аттестации типовых эталонных установок нейтронного излучения // АНРИ. 2013. № 1 (72). С. 21–27.
6. Масляев П. Ф. Формирование полей нейтронов от радионуклидных источников нейтронов // АНРИ. 2012. № 4 (71). С. 32–38.
7. Масляев П. Ф. Учёт влияющих факторов при проверке установок с радионуклидными источниками нейтронного излучения // АНРИ. 2016. № 2(85). С. 2–9.
8. *Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes*, Technical report series no. 403, Supplement to Technical Reports Series no. 318, IAEA, Vienna, 2001.
9. Севастьянов В. Д. Моделирующие опорные поля нейтронов для метрологического обеспечения нейтронных

измерений на ядерно-физических установках РФ: монография / Под ред. докт. техн. наук, проф. С. И. Донченко. Менделеево: ВНИИФТРИ. 2015.

10. Shikoh Itoh, Toshiharu Tsunoda, Neutron Spectra Unfolding with Maximum Entropy and Maximum Likelihood, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1989, no. 26(9), pp. 833–843.
11. Дрейзин В. Э., Гримов А. А., Логвинов Д. И. Многодетекторный нейтронный спектрометр реального времени // Журнал прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83. № 3. С. 462–468.
12. Дрейзин В. Э., Логвинов Д. И., Гримов А. А. Сцинтилляционные нейтронные детекторы с разнообразными спектральными характеристиками // Журнал прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83. № 6. С. 953–958.
13. Van der Ende B. M., Atanachovich J., Erlandson A., *Nucl. Instrum. Method. Phys. Res. A*, 2016, no. 820, pp. 40–47.

References

1. Brooks F. D., Klein H., Neutron Spectrometry – historical review and present status, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2002, A476, pp. 1–11.
2. Thomas D. I., *Spectrometry for Radiation Protection Dosimetry*, 2004, vol. 110, no. 1–4, pp. 141–149.
3. Bregadze Yu. I., Stepanov E. K., Yaryna V. P., *Prikladnaya metrologiya ioniziruyushchih izluchenij*, Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 262 p. (In Russ.)
4. Matske M., Propagation of uncertainties in unfolding procedures, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2002, A476, pp. 230–241.
5. Agupov V. A., Balyaeva R. R., Kopejkina E. S., Menyailo N. P., The unified technique of certification of typical reference installations of neutron radiation, *ANRI*, 2013, no. 1 (72), pp. 21–27. (In Russ.)
6. Maslyayev P., Formation of fields of neutrons from radionuclide sources of neutrons, *ANRI*, 2012, no. 4 (71), pp. 32–38. (In Russ.)
7. Maslyayev P., The account of influencing factors at checking installations with radionuclide sources of neutron radiation, *ANRI*, 2016, no. 2 (85), pp. 2–9. (In Russ.)
8. *Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes*, Technical report series no. 403, Supplement to Technical Reports Series no. 318, IAEA, Vienna, 2001.
9. Sevastyanov V. D., *Modeliruyushchie opornye polya neytronov dlya metrologicheskogo obespecheniya neytronnyh izmerenij na yaderno-fizicheskikh ustanovkakh RF*, ed. Prof. S. I. Donchenko, Mendeleev, VNIIFTRI Publ., 2015. (In Russ.)
10. Shikoh Itoh, Toshiharu Tsunoda, Neutron Spectra Unfolding with Maximum Entropy and Maximum Likelihood, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1989, no. 26(9), pp. 833–843.
11. Dreyzin V. E., Grimov A. A., Logvinov D. I., *J. Appl. Spectr.*, 2016, vol. 83, pp. 454–459. (In Russ.)
12. Dreyzin V. E., Logvinov D. I., Grimov A. A., *J. Appl. Spectr.*, 2016, vol. 83, pp. 1001–1006. (In Russ.)
13. Van der Ende B. M., Atanachovich J., Erlandson A., *Nucl. Instrum. Method. Phys. Res. A*, 2016, no. 820, pp. 40–47.

Статья поступила в редакцию 10.09.2020; принята к публикации 03.03.2021.