

Калибровка и поверка многодетекторного нейтронного спектрометра реального времени*

В [1-4] рассмотрены основные проблемы создания многодетекторного нейтронного спектрометра реального времени и проведено его имитационное моделирование с целью определения оптимального состава блока детектирования такого спектрометра. В данной статье констатируется несовершенство существующего метрологического и методического обеспечения не только спектрометрических, но и радиометрических измерений произвольных нейтронных потоков. Для повышения достоверности результатов нейтронных измерений предлагается проводить поверку разрабатываемого многодетекторного нейтронного спектрометра реального времени в опорных нейтронных полях с различной и достоверно известной формой энергетических спектров. Для создания таких опорных нейтронных полей проведена разработка нейтронного испытательно-поверочного комплекса, прототипный образец которого был исследован экспериментально. Но, с учетом ограниченного разнообразия форм спектров опорных нейтронных полей, создаваемых этим комплексом, предлагается обучать нейронную сеть, встраиваемую в нейтронный спектрометр, на более обширном множестве базовых спектров, включающем помимо спектров опорных полей, создаваемых испытательно-поверочным комплексом, достоверно известные спектры нейтронных потоков, найденные в литературе. Показано, что в этом случае энергетические погрешности спектрометра при измерении нейтронных потоков с разнообразной формой спектра будут практически исключены, даже при проведении поверки спектрометра в опорных полях с более узким разнообразием форм спектров.

**В.Э.Дрейзин, Д.И.Логвинов,
А.А.Гримов, А.П.Кузьменко**

(Юго-Западный государственный университет,
г. Курск)

Ключевые слова:

*нейтронный спектрометр, измерение,
метрологическое обеспечение, поверка,
калибровка.*

* Данная публикация является пятой статьей цикла, посвященного разработке многодетекторного нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени.

Состояние проблемы метрологического обеспечения нейтронных измерений

В области метрологии измерений нейтронного излучения имеются следующие основные нормативные документы:

- три государственных первичных эталона потока, плотности потока и мощности дозы [5-7];
- два государственных стандарта по методам и средствам поверки радиометров нейтронов и поверочным установкам для этих целей [8,9].

Ни в одном из них не упоминается измерение энергетического спектра нейтронного излучения, и лишь в [5] и [7] указываются энергии источников моноэнергетических нейтронов (на основе нейтронных генераторов), диапазоны и средние энергии используемых радиоизотопных первичных источников нейтронов, используемых в этих эталонах, но об аттестации и даже просто измерении спектров создаваемых эталонных нейтронных потоков речи не идет. Существующие радиоизотопные образцовые источники нейтронного излучения также не аттестуются по энергетическому спектру излучаемого потока, хотя, конечно, их спектры изучались как с использованием методов математического моделирования, так и экспериментально с применением многословных спектрометров Боннера или использованием метода активационного анализа. А без знания спектров создаваемых нейтронных потоков передача единиц потока и плотности потока поверочным установкам, образцовым и рабочим средствам измерений нейтронного излучения становится проблематичной.

В то же время важность достоверных измерений интегральной плотности нейтронных потоков с разнообразной формой энергетических спектров, их дозовых характеристик и самих спектров не вызывает сомнений. Нейтронное излучение относится к наиболее сильно проникающим видам ионизирующих

излучений, имеет чрезвычайно широкий энергетический диапазон (как минимум, шириной в 10 порядков) и характеризуется высокой биологической опасностью. Взаимодействуя с ядрами атомов биологической ткани, нейтроны превращают их в радиоактивные изотопы, создавая тем самым внутренние долговременные очаги радиации, а биологическая защита от нейтронного излучения весьма громоздка, что исключает возможность эффективной индивидуальной защиты человека.

В настоящее время для измерения нейтронных потоков и определения их дозовых характеристик (мощности поглощенной или эквивалентной дозы) промышленность выпускает лишь нейтронные радиометры, которые должны определять плотность нейтронных потоков, и радиометры-дозиметры, которые должны определять мощность поглощенной или/и эквивалентной дозы. Для их поверки применяются поверочные установки, использующие измерения в открытой геометрии (между источником нейтронов и детектором прибора находится лишь воздух), измерения в широком пучке нейтронов, когда источник нейтронов помещается в рассеивающую сферу из водородсодержащего вещества, или измерения в коллимированном пучке нейтронов, когда источник нейтронов помещается в коллимирующую систему из водородсодержащего материала, формирующую направленный пучок нейтронов. Основные требования к таким поверочным установкам регламентируются в [8], а требования к методикам поверки радиометров-дозиметров на таких установках в [9].

Последний стандарт предусматривает три варианта поверки: в коллимированном пучке нейтронов, в широком пучке нейтронов и в открытой геометрии с использованием замедляющего конуса («тепловой насадки») для поверки 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 поглощенной или эквивалентной дозы, вообще говоря, неправомерна, хотя на практике широко используется за неимением другой. Действительно, реально такой прибор чувствителен только к некоторой части нейтронного потока, но проградуирован по интегральному потоку с учетом коэффициента пропорциональности между измеренной составляющей и интегральным потоком, соответствующего спектру источника, в поле которого осуществлялась калибровка прибора. Причем и этот коэффициент пропорциональности, строго говоря, остается неизвестным, поскольку калибруется установка по образцовому радиометру, который, в свою очередь, калибровался на образцовой поверочной установке (или, в лучшем случае, по государственному эталону), не аттестуемых по энергетическому спектру создаваемых потоков. Поэтому при измерении нейтронных потоков с резко отличающейся формой спектра погрешности измерения плотности потока, а тем более мощности дозы такими приборами могут достигать сотен и даже тысяч процентов.

Поскольку преимущественно используемые в поверочных установках радиоизотопные источники нейтронов излучают лишь быстрые нейтроны, а используемые в большинстве нейтронных радиометров-дозиметров детекторы имеют преимущественную чувствительность к медленным нейтронам, то стандартом [9] предусмотрено использование либо шарового замедлителя нейтронов из водородсодержащего вещества, надеваемого на источник (поверка в широком пучке нейтронов), либо коллимирующей системы (поверка в коллимированном пучке нейтронов с использованием поверочных установок типа УКПН), либо замедляющего конуса («тепловой насадки»), уста-

навливаемого между источником и детектором при поверке радиометров быстрых нейтронов.

В первом случае прошедший через шаровой замедлитель поток нейтронов будет содержать кроме быстрых и промежуточные, и тепловые нейтроны. При этом для выделения из потока тепловых нейтронов используется метод кадмивой разности.

Во втором случае считалось, что зарегистрированный детектором, установленным на осевой линии коллиматора, поток нейтронов определяется лишь прямым потоком нейтронов, прошедших через канал коллиматора, без учета нейтронов, рассеянных в веществе коллиматора, а также нейтронов, вышедших из коллимирующей системы через ее боковые поверхности в окружающее пространство и вторично отраженных от стен, пола и потолка помещения, часть из которых попадает в детектор.

В третьем случае подразумевалось, что прошедшие через замедляющий конус нейтроны потеряют большую часть своей энергии, и до детектора будут доходить лишь медленные нейтроны (тепловой и промежуточной энергий). Соответственно, вычитая из результата измерений без конуса результат измерений с конусом, получаем поток быстрых нейтронов, используемый для поверки радиометров-дозиметров быстрых нейтронов.

В соответствии с данным стандартом расчет расстояний между источником и детектором, при которых должны обеспечиваться задаваемые значения плотности потока нейтронов, базируется на законе обратных квадратов ослабления потока от точечного источника. В то же время, данный стандарт совершенно не учитывает 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 отраженные нейтроны – создают основную долю регистрируемых нейтронов тепловой и промежуточной энергии.

Еще более явной является некорректность регламентируемой данным стандартом 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, рассеивает их, а поглощает он как раз преимущественно нейтроны более низких энергий. Причем основная часть потерявших часть своей энергии рассеянных конусом нейтронов выходит из него во все стороны через боковую поверхность конуса, вторично рассеивается стенами помещения, и какая-то доля вторично отраженных от них нейтронов попадает в детектор. При этом плотность прямого потока, прошедшего через замедляющий конус и дошедшего до детектора, уменьшается не в три, а в десятки раз, а тепловые и промежуточные нейтроны, регистрируемые детектором – это рассеянные нейтроны, вторично отраженные от стен, пола и потолка помещения. К этому следует добавить, что при реальных измерениях, с использованием откалиброванных по данной методике приборов, не применяется ни метод кадмиевой разности, ни замедляющий конус.

Все эти недостатки существующих методик поверки осознавались рядом специалистов. Поэтому предпринимались неоднократные попытки усовершенствовать действующие методики поверки. В частности, в [10-12] предлагалось учесть потоки рассеянных нейтронов, вторично отраженных от стен, пола и потолка помещения. Однако кардинально решить про-

блему это не могло. Во-первых, при использовании коллимирующей системы или замедляющего конуса закон обратных квадратов перестает работать даже в ограниченном диапазоне расстояний между источником и детектором, а во-вторых, остается нерешенной главная проблема – несоответствие спектра нейтронных потоков, получаемых на поверочной установке, со спектрами реальных нейтронных потоков, с которыми приходится иметь дело в практических измерениях. Не решает проблему и составление обширной библиотеки энергетических спектров различных нейтронных источников, предпринятое МАГАТЭ [13]. Эти материалы частично дублируются в русскоязычном издании [14]. Как они могут помочь при проведении калибровки конкретных приборов, остается неясным, упоминаний об этом нет.

Погрешности поверяемого прибора определяются относительно того потока, который создается конкретной поверочной установкой. Реальный спектр этого потока остается неизвестным (в установках, использующих измерения в открытой геометрии, он зависит от спектра излучения используемого первичного источника нейтронов, но с поправкой за счет нейтронов, отраженных от стен, пола и потолка помещения, которая как раз и формирует содержание в детектируемом потоке тепловой и промежуточной составляющих). В случае же использования измерений в широком и коллимированном пучке нейтронов, спектр доходящих до детектора нейтронов искажается еще сильнее за счет их рассеяния, замедления и частичного поглощения веществом рассеивающего шара или коллиматора. Но погрешности прибора при поверке определяются именно относительно этого неизвестного спектра. Реальные же погрешности при измерении потоков с другими формами спектра могут оказаться в десятки раз больше. Совершенно очевидно, что даже для нейтрон-

ных радиометров и радиометров-дозиметров существующие методики поверки и применяемые в них поверочные установки являются ущербными. Тем более их невозможно использовать для поверки нейтронных спектрометров.

Радикальное решение проблемы поверки создаваемых многодетекторных нейтронных спектрометров реального времени состоит в проведении ее в опорных нейтронных полях с различной и достоверно известной формой энергетических спектров.

Создание опорных нейтронных полей с различной формой энергетических спектров от первичного радиоизотопного источника нейтронов

Для создания таких опорных полей достаточно использовать коллимирующую систему, в канал которой помимо первичного радиоизотопного источника нейтронов поочередно помещаются диски-замедлители нейтронов из водородсодержащего материала различной толщины. Прототипный вариант такой установки исследовался экспериментально и показал возможность получения опорных полей с достаточно разнообразными формами энергетических спектров [15]. В настоящее время разработана конструкторская документация на промышленный вариант такой установки, в котором устранены выявленные недостатки прототипного образца (увеличена толщина и длина коллимирующей трубы, наружная поверхность всей коллимирующей системы покрыта кадмиевым экраном, а ее выходной торец закрывается съемным кадмиевым экраном, что позволяет при прочих равных условиях удвоить число создаваемых опорных полей). С учетом того, что при изменении расстояния между источником нейтронов и точкой детектирования помимо плотности потока изменяется и его энергетический спектр (за счет изменения доли регистрируемых рас-

сеянных нейтронов, вторично отраженных от стен, пола и потолка помещения), такая установка позволяет получить свыше ста опорных нейтронных полей с различной формой энергетических спектров.

Но необходимо не просто получить эти опорные поля, но и достоверно определить их энергетические спектры. Это возможно тремя путями.

1. Измерением энергетических спектров этих полей с использованием метода активационного анализа.

2. Измерением их с использованием многошарового спектрометра Боннера.

3. Расчетным путем с использованием моделирующих программ взаимодействия нейтронов с веществом на основе метода Монте-Карло.

Все три пути достаточно трудоемки и малопроизводительны, а главное, не имеют полностью аттестованного метрологического обеспечения. Поэтому выбор должен быть основан на оценке возможных неопределенностей результатов при использовании каждого из них.

Первый путь – метод активационного анализа – долгое время был единственным методом измерения спектров произвольных потоков нейтронного излучения, широко применялся и до настоящего времени является единственным методом внутриреакторных измерений спектров нейтронных потоков [16-18]. Суть его состоит в использовании определенных наборов веществ-индикаторов, которые при облучении нейтронами превращаются в радиоактивные изотопы. Измеряя наведенную в них за определенное время облучения нейтронами активность с использованием гамма-спектрометров, можно оценить плотность и энергетический спектр измеряемого потока нейтронов. Различные вещества-индикаторы имеют различные зависимости сечений реакций с нейтронами от энергии этих нейтронов. Это позволяет подбирать такие наборы этих

индикаторов, по результатам активации которых в измеряемом нейтронном потоке удастся вычислительным путем с помощью специальных программ восстанавливать спектр этого потока. Результаты восстановления (развертки) спектра при использовании различных программ восстановления неоднозначны и зависят от используемых математических методов, алгоритмов и принятых математических моделей типовых спектров. Основным недостатком активационного анализа является трудоемкость измерительных процедур и низкая производительность. Это лабораторный метод, и его реализация требует, как правило, нескольких суток для проведения цикла измерений одного потока. Хотя для разработки метрологического обеспечения этого метода были приложены значительные усилия, самый важный этап его реализации – восстановление спектра исследуемого потока по результатам измерения активностей образовавшихся под действием нейтронов радиоактивных изотопов – выполняется чисто вычислительным путем с привлечением априорной дополнительной информации о типичной форме спектра и его фрагментов. Оценить неопределенность результатов восстановления спектра сложно, а к ней еще добавляются погрешности определения спектральных чувствительностей индикаторов в зависимости от энергии нейтронов и погрешности измерения активности образовавшихся под действием нейтронов радиоактивных изотопов.

Второй путь – измерение спектров опорных полей многошаровым спектрометром Боннера [19-21] – также не имеет должного метрологического обеспечения. Суть метода состоит в принудительном изменении спектральной чувствительности используемого нейтронного детектора путем его последовательного помещения в шаровые замедлители нейтронов из водородсодержащего вещества различных диаметров (от 5 до 50 см). В зависимости

от толщины стенки шарового замедлителя потери энергии попадающих в детектор нейтронов различны, а значит, спектральная характеристика детектора с каждым надетым на него шаром будет различной. Отклики детектора с каждым шаром-замедлителем обрабатываются на ЭВМ по программам, аналогичным программам, применяемым в активационном анализе, но к неопределенности восстановления спектра добавляются еще более значительные неопределенности получения вычислительным путем спектральных чувствительностей детектора с различными сферами-замедлителями нейтронов.

Третий путь состоит в непосредственном вычислении спектров опорных нейтронных полей в точках измерения путем использования моделирующих программ взаимодействия нейтронов с веществом при конкретных геометриях измерений. Для этого используются хорошо апробированные в ядерной физике программы статистического моделирования, использующие метод Монте-Карло. Существует несколько программных пакетов, позволяющих проводить такие вычисления для самых разнообразных геометрий измерения и взаимодействующих с нейтронами веществ. Наиболее точным для расчетов переноса нейтронного излучения считается программный комплекс *MCNPX*. Но наиболее универсальной (пригодной для всех видов ионизирующих излучений) и наиболее широко используемой в ядерной физике и при проектировании различных ядерных установок является библиотека программ *GEANT-4*. Этот программный пакет регулярно совершенствуется, обновляется и находится в свободном доступе. Учитывая эти его преимущества, были проведены специальные сравнительные исследования результатов расчетов с помощью программных пакетов *MCNPX* и *GEANT-4* [22], которые показали согласование их результатов в пределах 3–5% при оценке отклика детектора в энергетичес-

ком диапазоне $0,025-20 \cdot 10^6$ эВ и в пределах 1% для диапазона энергий $100-5 \cdot 10^6$ эВ. Для оценки точности этих программных комплексов там же проведено сравнение симуляций спектра источника ^{252}Cf из стандарта ISO-8529-1.2001 «*Reference neutron radiations – Part1: Characteristics and methods of production*» [23]. Для программного комплекса *MCNPX* рассогласование составляет менее 2,5%, для *GEANT-4* – 5,3–6,5%. Таким образом, использование библиотеки программ *GEANT-4* для расчетов спектров опорных нейтронных полей обеспечивает достаточную для практики точность и позволяет получать спектры не только нейтронной, но и гамма-составляющей смешанного излучения.

Сравнивая по достоверности все три рассмотренных подхода к определению спектров опорных нейтронных полей, создаваемых испытательно-поверочным комплексом, предпочтение, несомненно, следует отдать третьему подходу. В самом деле, спектральные характеристики индикаторов в активационном анализе и детектора в сочетании с различными шарами-замедлителями нейтронов во втором подходе рассчитываются с помощью идентичных (или аналогичных) программных пакетов, используемых в третьем подходе. Следовательно, неопределенность этих расчетов будет примерно одинаковой. Но при активационном анализе к ней добавляются погрешности определения спектральных характеристик каждого из использованных индикаторов, которые также находятся вычислительным путем (т. к. не существует нейтронных источников моноэнергетических нейтронов с плавным регулированием их энергии) и погрешности измерения наведенной активности индикаторов после экспонирования в исследуемом потоке нейтронов. Аналогично при использовании многошарового спектрометра неопределенность складывается из неопределенности расчета спектральных характеристик детек-

тора в совокупности с различными шарами-замедлителями нейтронов и неопределенности вычислительного восстановления спектров по откликам детектора с различными шарами. В третьем же подходе имеет место лишь первая составляющая неопределенности, и при использовании программного пакета *GEANT-4* на основе многолетнего опыта его применения для аналогичных расчетов ее можно оценить в 5–6%, что вполне приемлемо для практики.

Таким образом, для реализации расчетов спектров опорных нейтронных полей необходимо задать спектральный состав моделируемого первичного источника нейтронов, геометрию, размеры и вещественный состав коллимирующей системы, толщину помещаемых в ее канал дисков-замедлителей нейтронов, геометрию помещения, в котором располагается установка, материал стен, пола и потолка помещения, расстояния между источником нейтронов и точками измерения, в которые будут помещаться детекторы поверяемого прибора, а также расположение в помещении элементов установки при задаваемых расстояниях от первичного источника нейтронов. Спектры излучения используемых в поверочных установках образцовых радиоизотопных источников нейтронов хорошо изучены и приведены в ряде литературных источников (например, в [23]). За счет вариаций конструкции корпуса и состава сложных источников типа $\text{Pu-}\alpha\text{-Be}$ их реальные спектры могут несколько отличаться от эталонных. Но если знать конструкцию и состав источника, то его спектр можно рассчитать, используя ту же библиотеку программ. В любом случае усредненную по шкале энергий погрешность спектральной плотности первичного источника нейтронов можно оценить величиной, не превышающей 3–5%.

Из первичного источника нейтронов (капсулы образцового радиоизотопного источника) моделируется излучение нейтронов соответствующего энергетического состава с равно-

вероятным направлением их скорости во все стороны. А далее прослеживаются все взаимодействия этих нейтронов с ядрами атомов окружающих объектов и их последствия. Понятно, что детектора достигает лишь малая часть излученных из первичного источника нейтронов. При этом, как уже было сказано ранее, учитываются прямые нейтроны, прошедшие через коллимирующую систему,

включая нейтроны, рассеянные самой коллимирующей системой и помещенными в ее канал замедляющими дисками, и рассеянные коллиматором нейтроны, вышедшие из нее в наружное пространство (в том числе и через боковые поверхности коллиматора) и вторично отраженные от стен, пола и потолка помещения, часть из которых попадает в детектор. При каждом взаимодействии с ядрами атомов

окружающего вещества будет поглощаться часть энергии нейтронов и меняться направление его скорости, а часть высокоэнергичных нейтронов будет поглощаться ядрами с излучением вторичных частиц и гамма-квантов. Чтобы получить представительное число нейтронов, достигающих детектора, по которому можно сформировать достоверный спектр потока, приходится «запускать» большое число (сотни миллионов) нейтронов. Поэтому такие расчеты требуют огромных вычислительных ресурсов (один расчет требует сотен часов машинного времени на современных ПК).

Примеры получаемых на испытательно-поверочном комплексе спектров опорных нейтронных полей приведены на рис.1–3. На рис.1 представлены спектры опорных нейтронных полей, получаемые от плутоний-бериллиевого источника для различных толщин замедляющих дисков при расстоянии до точки детектирования в 1 м. Из него следует, что формы получае-

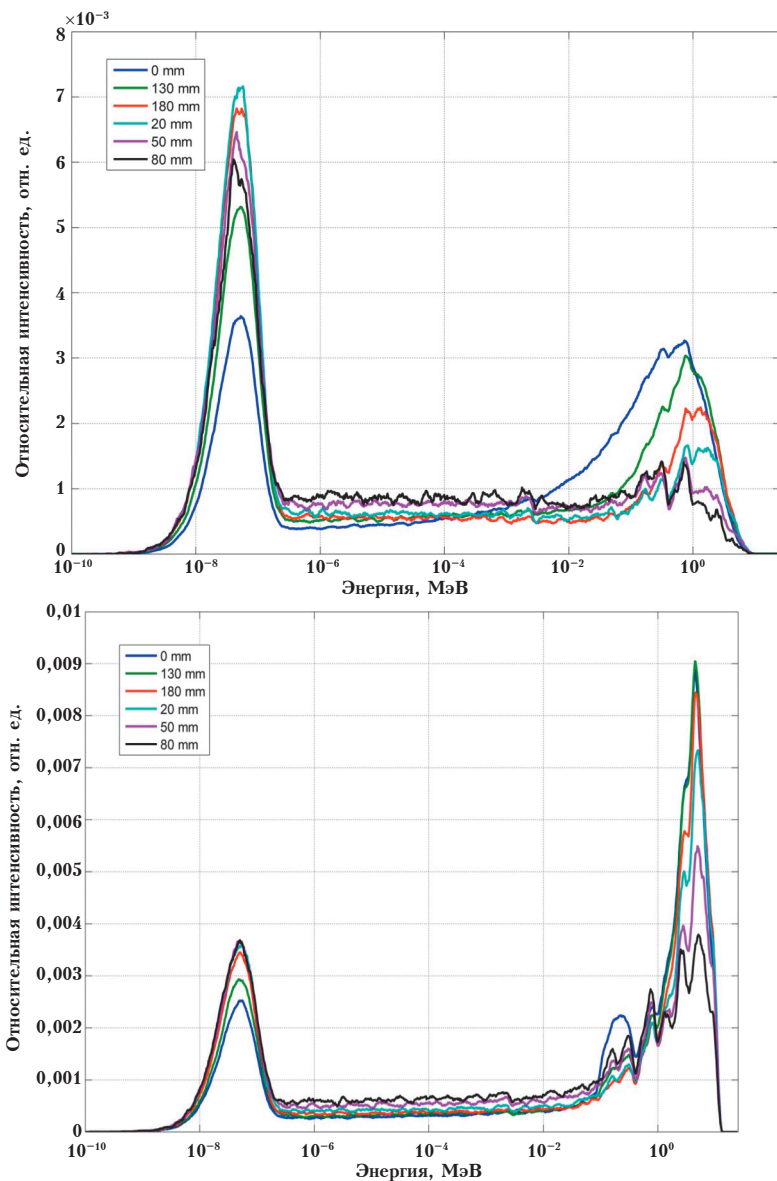


Рис.1. Примеры спектров некоторых опорных нейтронных полей, получаемых на испытательно-поверочном комплексе от плутоний-бериллиевого источника при различных толщинах замедляющих дисков при расстоянии между источником и точкой детектирования в 1,0 м без кадмиевого экрана (вверху) и с кадмиевым экраном (внизу).

мых спектров достаточно разнообразны. С увеличением толщины замедляющих дисков, помещаемых в канал коллиматора, существенно уменьшается пик быстрых нейтронов и растет пик тепловых, а наличие кадмиевого экрана на коллиматоре существенно уменьшает пик тепловых нейтронов.

На рис.2 приведены спектры опорных нейтронных полей, получаемые при тех же усло-

виях, но с использованием калифорниевого первичного источника нейтронов. Как видим, их формы близки формам спектров, получаемых при использовании плутоний-бериллиевого источника. Поэтому использовать оба источника при проведении проверок нерационально, т. к. это существенно усложняет ее процедуру. К тому же срок службы калифорниевого источника ограничен.

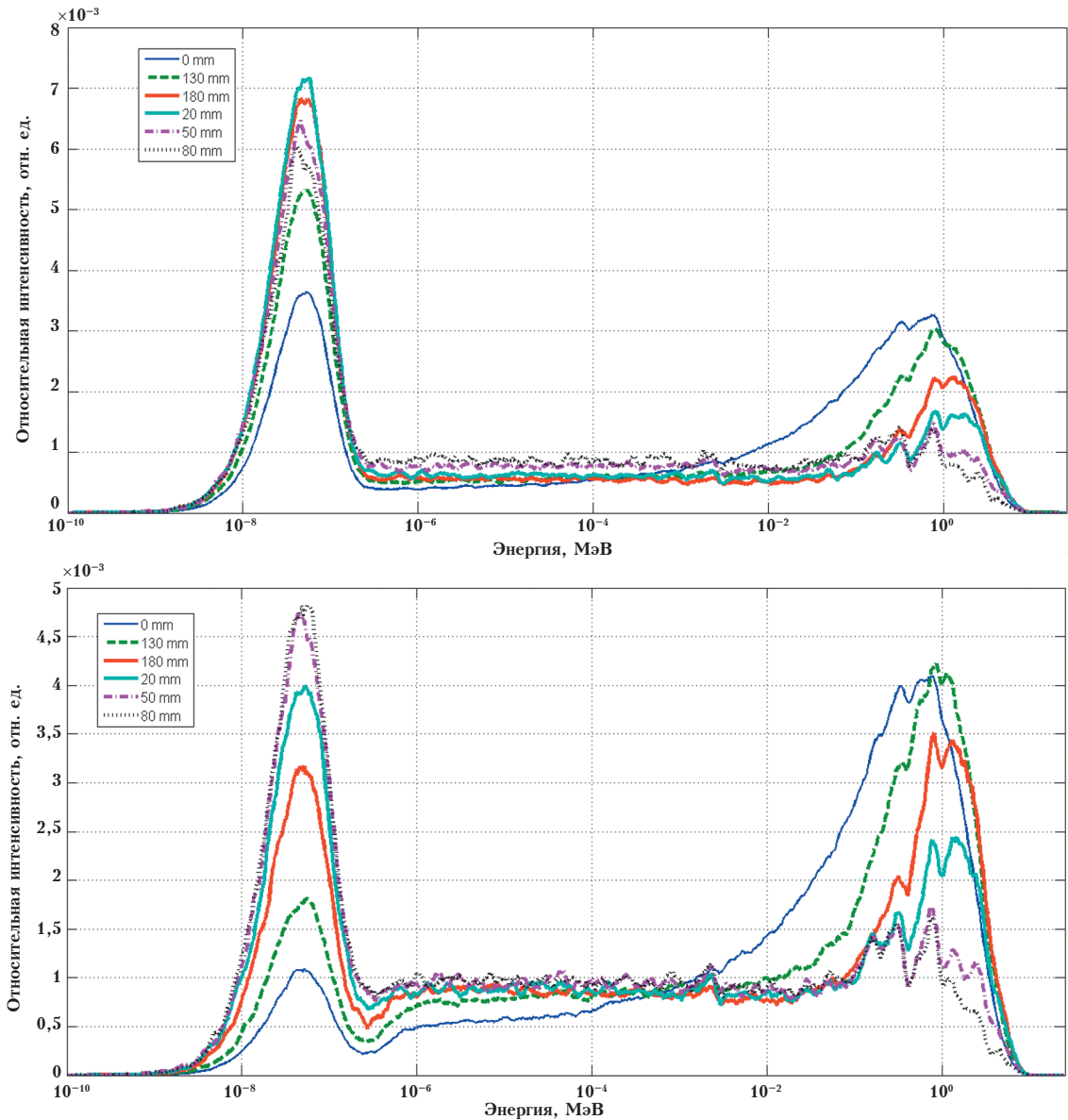


Рис.2. Формы спектров некоторых опорных нейтронных полей, получаемых на испытательной установке ИЛ-1М2 от калифорниевого источника при различных толщинах замедляющих дисков при расстоянии между источником и детектором 1 м без кадмиевого экрана (вверху) и с кадмиевым экраном (внизу).

На рис.3 приведены формы спектров опорных полей, получаемые при изменении расстояния от источника нейтронов до точки детектирования при отсутствии замедляющих дисков в коллимирующей системе.

Он подтверждает, что с изменением расстояния до точки детектирования изменяется не только плотность потока, но и форма спектра (наиболее заметно изменяется пик быстрых нейтронов и его соотношение с пиком тепловых нейтронов). При наличии замедляющих дисков в коллиматоре изменения спектров при изменении расстояний становятся еще более заметными (следует напомнить, что на всех этих рисунках спектры приведены в нормированном к интегральной плотности потока виде).

Поскольку энергетический диапазон измеряемых нейтронных потоков чрезвычайно широк, а количество измерительных каналов спектрометра с различными спектральными характеристиками ограничено (в пределах одного десятка), то и измеренные им спектры

должны представляться в ступенчатом виде – среднеинтервальными значениями спектральных плотностей в энергетических интервалах, на которые поделен весь энергетический диапазон измеряемых нейтронных потоков. Соответственно и спектры создаваемых испытательно-поверочным комплексом опорных нейтронных полей также должны представляться в ступенчатом виде для тех же энергетических интервалов. При определении границ энергетических интервалов необходимо обеспечить их согласование с общепринятыми границами между тепловыми, промежуточными и быстрыми нейтронами (что было рассмотрено в [4]).

Однако расчетным путем можно получить только нормированные (относительно интегральной плотности потока) значения спектральных плотностей опорных нейтронных полей. А при поверке необходимо использовать их абсолютные значения. Однако достоверно измерить плотность интегрального потока с произвольным спектром нечем (пока

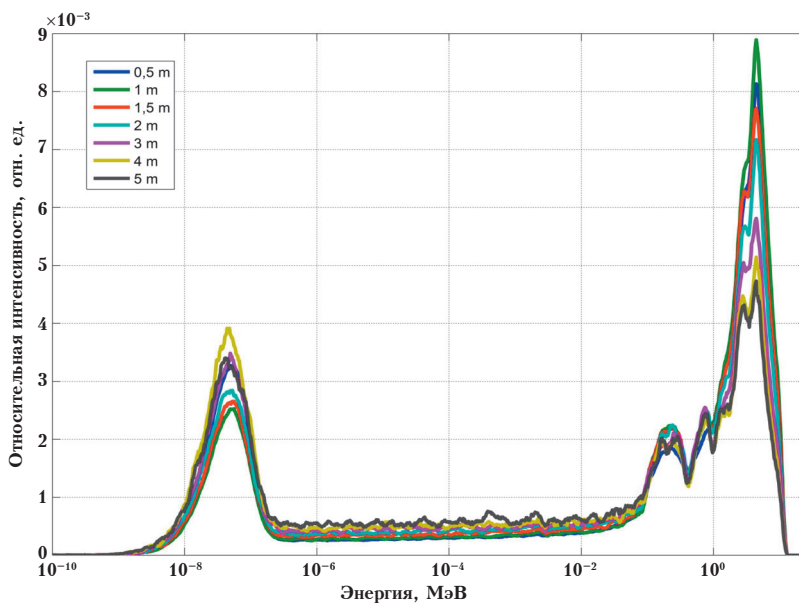


Рис.3. Спектры опорных нейтронных полей, получаемых на испытательно-поверочном комплексе от плутоний-бериллиевого источника при различных расстояниях между источником нейтронов и точкой детектирования при отсутствии замедляющих дисков в коллимирующей системе.

нет образцового нейтронного спектрометра), а расчетным путем (с помощью моделирующих программ) определить их абсолютные значения невозможно, т. к. при моделировании «запускается» произвольное число нейтронов и его невозможно достоверно сопоставить с реальным числом нейтронов, испущенных источником за время измерения.

Решение этой проблемы состоит в том, чтобы определить коэффициент соответствия между нормированными и абсолютными значениями спектральных плотностей опорных потоков. Такое

возможно путем измерения тепловых составляющих этих потоков (как это было сделано в самом спектрометре [2]), но в данном случае для этого используется образцовый радиометр, чувствительный к низкоэнергетическим нейтронам и снабженный съемным кадмиевым экраном. Такой радиометр может быть выполнен на базе полистирольного детектора, в сцинтиллятор которого добавлен бор-10, активно взаимодействующий с низкоэнергетическими нейтронами с вылетом альфа-частицы. Сцинтиллятор необходимо выполнить достаточно тонким (не толще 5 мм), чтобы он был нечувствителен к сопутствующему гамма-излучению [3]. Его эффективность к тепловым нейтронам достаточно достоверно (с погрешностью не более 5%) может быть определена расчетным путем с использованием той же библиотеки программ *GEANT-4*. Это позволяет, используя метод кадмиевой разности, с той же достоверностью определять абсолютное значение плотности тепловой составляющей каждого опорного нейтронного потока $\Phi_{изм\ i}^T$:

$$\Phi_{изм\ i}^T = \frac{N_{изм\ i}^{бк} - N_{изм}^к}{S_{сц} T_u} \epsilon_D^T, \quad (1)$$

где $N_{изм\ i}^{бк}$ и $N_{изм}^к$ – число зарегистрированных импульсов детектором без кадмиевого экрана и с кадмиевым экраном; ϵ_D^T – эффективность детектора образцового радиометра к тепловым нейтронам; $S_{сц}$ – площадь сечения сцинтиллятора детектора образцового радиометра; T_u – время измерения (оно должно быть одинаковым при измерениях с детектором без кадмиевого экрана и с кадмиевым экраном).

Сопоставляя измеренную образцовым радиометром плотность тепловой составляющей i -го опорного потока с расчетной нормированной плотностью тепловой составляющей того же опорного потока $\Phi_{расч\ i}^T$, получаем коэффициент соответствия между ними:

$$K_i^T = \frac{\Phi_{изм\ i}^T}{A_{i\ расч}^T}, \quad (2)$$

где $A_{i\ расч}^T = \sum_{ij}^k A_{ij}$ – нормированное расчетное значение тепловой составляющей i -го потока, определяемое при расчете спектров опорных нейтронных полей; K – количество энергетических интервалов в тепловой части i -го потока.

Этот коэффициент соответствия будет одинаков для всех спектральных составляющих данного потока, т. е. $K_i^T = K_i$. Поэтому, зная расчетные нормированные спектральные составляющие всех опорных нейтронных полей A_{ij} , и умножая их на полученный для данного опорного потока коэффициент соответствия, получаем абсолютные значения плотности спектральных составляющих этого потока:

$$\Phi_{ij\ abc} = A_{ij} \cdot K_i. \quad (3)$$

Просуммировав спектральные составляющие потока по всем энергетическим интервалам, получаем интегральную плотность данного нейтронного потока:

$$\Phi_{i\ abc} = \sum_{j=1}^m \Phi_{ij}. \quad (4)$$

Таким образом, неопределенность получения абсолютных значений и спектральных составляющих, и интегральной плотности потока опорных нейтронных полей можно оценить той же величиной в 5–6 % (при суммировании спектральных составляющих погрешности погрешность результата определяется среднеквадратической величиной).

Чтобы иметь возможность проводить поверку спектрометра на различных пределах измерения по плотности потока, необходимо изменять расстояния между источником нейтронов и точкой детектирования. Но, поскольку при использовании коллимирующей системы закон обратных квадратов ослабления потока с изменением расстояния до источника перестает работать и, к тому же, с изменением расстояния будет изменяться не только плотность интегрального потока, но и его энергетический спектр, то необходимо заранее рассчитать все опорные

нейтронные поля для различных расстояний между источником нейтронов и точкой детектирования, и эти результаты должны храниться в постоянной памяти управляющего компьютера испытательно-поверочного комплекса.

С учетом всех рассмотренных требований проведена разработка испытательно-поверочного комплекса для осуществления поверки разрабатываемого многодетекторного нейтронного спектрометра реального времени.

Разработка промышленного испытательно-поверочного комплекса

Создаваемый испытательно-поверочный комплекс должен состоять из аппаратной части, методического и программного обеспечения.

Аппаратная часть состоит из:

- типовой поверочной нейтронной установки для проведения измерений в открытой геометрии, включающей: образцовый радионуклидный источник нейтронного излучения, измерительную линейку, по направляющим которой с помощью телемеханической системы может перемещаться источник нейтронов, что позволяет устанавливать источник на различные задаваемые расстояния от поверяемого прибора;
- коллимирующей системы, куда должна помещаться капсула с источником нейтронов, и набора дисков-замедлителей нейтронов толщиной 10, 20, 30, 50, 80, 130 и 180 мм из водородсодержащего материала, поочередно помещаемых в канал коллимирующей системы, которая должна перемещаться вместе с помещенным в нее источником нейтронов на задаваемое расстояние от детектора поверяемого прибора;
- образцового радиометра тепловых нейтронов с точно известной эффективностью к ним;
- съемного кадмиевого экрана, надеваемого на выходной торец коллиматора, и съемного кадмиевого экрана, надеваемого на образцовый радиометр тепловых нейтронов, что

позволит проводить измерение тепловой составляющей нейтронных потоков методом кадмиевой разности;

- компьютерной системы 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:

методику метрологической аттестации самого испытательно-поверочного комплекса, методику проведения поверки и калибровки нейтронных спектрометров-дозиметров.

Программная часть должна включать: базу данных расчетных нормированных спектров нейтронных опорных полей, создаваемых установкой; базу данных достоверно известных спектров различных нейтронных источников, найденных в литературе; программу формирования по ним обучающей и поверочной выборок, используемых для обучения нейронной сети нейтронного спектрометра; программу обучения нейронной сети, встраиваемой в спектрометр для вычислительного восстановления спектров измеряемых нейтронных потоков; программу управления проведением поверки нейтронных спектрометров; программу формирования паспорта поверки нейтронных спектрометров.

По расчетным непрерывным спектрам опорных нейтронных полей, получаемых для задаваемых расстояний между источником нейтронов и детекторами поверяемого спектрометра в 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0, 4,0 и 5,0 м, хранящимся в памяти управляющего компьютера комплекса, определяются усредненные по задаваемым энергетическим интервалам: 0,001–0,025 эВ, 0,025–0,1 эВ, 0,1–0,5 эВ, 0,5–2,0 эВ, 2,0–20 эВ, 20–500 эВ, 0,5–10 кэВ, 10–50 кэВ, 50–200 кэВ, 0,2–0,5 МэВ,

0,5–2 МэВ, 2–10 МэВ, 10–20 МэВ [4] спектральные плотности, т. е. непрерывные спектры заменяются ступенчатыми. Эти ступенчатые спектры всех опорных нейтронных полей также хранятся в памяти управляющего компьютера комплекса и используются при проведении поверки спектрометра.

Поверка нейтронных спектрометров

Процедура поверки нейтронного спектрометра с помощью создаваемого испытательно-поверочного комплекса должна проходить следующим образом:

- поверяемый спектрометр устанавливается на платформу для поверяемого прибора таким образом, чтобы горизонтальная ось его детекторов совпадала с осью канала коллимирующей системы, а сам спектрометр соединяется информационным кабелем с управляющим компьютером испытательно-поверочного комплекса, располагающегося в защищенном от излучения помещении;
- в канал коллимирующей системы помещается один из дисков-замедлителей нейтронов (одно из измерений проводится при отсутствии дисков-замедлителей нейтронов и снятым с торца коллимирующей трубы кадмиевым экраном).

Последующая процедура проводится оператором дистанционно из защищенного от излучения помещения:

- по команде оператора капсула с первичным источником нейтронов с помощью телемеханической системы извлекается из бункера и доставляется в коллимирующую систему;
- с помощью телемеханической системы тележка с коллимирующей системой перемещается на одно из задаваемых расстояний от детекторов поверяемого спектрометра;
- по команде оператора начинается измерение, управление которым производится встроенным в спектрометр микроконтроллером автоматически;

- результаты измерения транслируются из спектрометра в управляющий компьютер испытательно-поверочного комплекса;
- управляющий компьютер производит сравнение полученных результатов с хранящимися в его памяти расчетными значениями нормированных и абсолютных спектральных плотностей, а также мощности ambientного эквивалента дозы для данного опорного нейтронного потока, вычисляет ошибки, проводит их статистическую обработку, отображает результаты на дисплее и заносит их в долговременную память;
- по завершении измерений оператор дает команду на перемещение тележки с коллимирующей системой на другое расстояние и повторяется вся процедура измерений;
- когда проведены измерения при всех задаваемых расстояниях, оператор дает команду на транспортировку источника нейтронов в бункер, и после ее выполнения заменяет диск-замедлитель нейтронов или надевает на выходной торец коллиматора кадмиевый экран, выходит в защищаемое помещение и повторяет весь цикл измерений при всех расстояниях между источником нейтронов и детекторами поверяемого спектрометра-дозиметра.

Когда проведены измерения для всех опорных нейтронных полей, оператор вводит с клавиатуры управляющего компьютера служебную информацию, необходимую для протокола поверки, и дает команду на его автоматическое формирование с выводом его на печать и сохранением в архивной памяти.

Таким образом, поверка производится последовательно по всем опорным нейтронным полям, формируемым испытательно-поверочным комплексом.

Для проведения поверки нейтронных спектрометров разнообразия форм спектров опорных нейтронных полей, создаваемых этим комплексом для всех расстояний между

источником нейтронов и детекторами спектрометра, вполне достаточно. Но для обучения нейронной сети, встраиваемой в разрабатываемый спектрометр, разнообразие форм спектров этих опорных полей явно уступает возможному разнообразию форм спектров измеряемых нейтронных потоков. Поэтому многообразие форм спектров, по которым обучается нейронная сеть, желательно расширить. Именно по расширенному многообразию спектров должна проводиться калибровка спектрометров.

Калибровка спектрометров с вычислительным восстановлением спектров измеряемых нейтронных потоков с помощью заранее обученной нейронной сети

Для обучения нейронной сети, встраиваемой в нейтронный спектрометр, создается отдельная база данных спектров нейтронных потоков, состоящая из 30 наиболее разнообразных по форме спектров опорных нейтронных полей, формируемых испытательно-проверочным комплексом, и 40 наиболее разнообразных спектров различных нейтронных источников, найденных в литературе. Эти базовые спектры, заданные в непрерывной форме и нормированные на интегральную плотность соответствующих потоков, также хранятся в постоянной памяти управляющего компьютера.

Все эти базовые спектры из непрерывной формы преобразуются в ступенчатую путем вычисления среднеинтервальных значений спектральной плотности по тем же энергетическим интервалам, которые используются в спектрометре. В этом виде они также сохраняются в постоянной памяти управляющего компьютера. Далее по этим базовым спектрам формируются модельные спектры обучающей и проверочной выборок путем прибавления к среднеинтервальным спектральным плотностям каждого базового спектра случайной величины со среднеквадратическим отклонением, равным 10% [4]. Это позволяет имитиро-

вать стохастический разброс спектральных плотностей реальных нейтронных потоков и дополнительно разнообразит формы этих модельных спектров. Таким путем по каждому базовому спектру формируется 30 модельных спектров, 20 из которых случайным образом отбираются в обучающую выборку, а 10 остальных – в проверочную. В итоге объем обучающей выборки получается равным 1400 реализаций, а проверочной 700, что обеспечивает высокую статистическую достоверность процедуры обучения нейронной сети. Полученное разнообразие форм спектров обучающей выборки с высокой вероятностью перекрывает возможное разнообразие форм спектров измеряемых потоков. Поэтому с той же вероятностью погрешности измерения спектральных составляющих измеряемого нейтронного потока не превысят погрешность, усредненную для всей обучающей выборки. Следовательно, в качестве нормируемой погрешности спектрометра надо использовать не погрешности, определяемые при проверке в создаваемых комплексом опорных нейтронных полях, а погрешности, усредненные для обучающей выборки. В [4] показано, что с практической точки зрения более важными являются не среднеквадратические ошибки восстановления спектральных составляющих по всем энергетическим интервалам всех реализаций обучающей выборки, а среднеквадратическая величина максимальных ошибок восстановления каждой реализации. При этом использование среднеквадратических величин для характеристики неопределенности результатов измерений ионизирующих излучений (включая и нейтронное излучение) ввиду их высокой стохастичности более корректно, чем предел максимальных погрешностей, выявляемых при проверке измерительного средства.

Теория нейронных сетей утверждает, что если сеть обучена на выборке с более широким разнообразием восстанавливаемых зави-

симостей, то неопределенность восстановления зависимостей, полученная для любой выборки с более узким разнообразием не может превосходить неопределенности по более широкой выборке, а значит, неопределенность по более широкой выборке будет достоверно характеризовать неопределенность по любой ее части. А поскольку мы имеем возможность отдельно оценить неопределенности по всей обучающей выборке и по той ее части, которая формируется опорными нейтронными полями поверочного комплекса, то при поверке достаточно убедиться, что экспериментально полученная при поверке неопределенность не превышает расчетной для данной подвыборки. Но в паспорт прибора должна записываться неопределенность не для экспериментальной подвыборки, а для всей обучающей выборки.

Заключение

1. Метрологическое обеспечение спектрометрии произвольных нейтронных потоков практически отсутствует, поскольку отсутствуют и промышленные нейтронные спектрометры реального времени. Более того, весьма несовершенно и метрологическое обеспечение радиометров-дозиметров нейтронного излучения, широко используемых в атомной отрасли. Реальные погрешности этих приборов при измерении потоков с разнообразной формой энергетического спектра могут в несколько раз превышать их паспортные значения, определяемые при проведении поверки на существующих поверочных нейтронных установках из-за несоответствия спектра измеряемого потока со спектром потока той поверочной установки, на которой калибровался данный прибор. Поэтому предлагается проводить поверку создаваемого нейтронного спектрометра реального времени в опорных нейтронных полях с различной формой энергетических спектров.

2. Для генерирования опорных нейтронных полей с различной формой энергетических

спектров разрабатывается промышленный испытательно-поверочный комплекс, в котором нейтронные поля с различной формой энергетических спектров создаются за счет последовательной установки в канал коллимирующей системы с первичным радиоизотопным источником нейтронов замедляющих дисков различной толщины из водородсодержащего материала.

3. Для получения опорных потоков с желаемым диапазоном вариаций плотности потока вместо использования закона обратных квадратов для расчета ослабления потока с увеличением расстояния между источником нейтронов и детектором в создаваемом испытательно-поверочном комплексе предложено использовать заранее рассчитанные значения плотности и энергетические спектры опорных нейтронных полей на выбранных расстояниях между источником нейтронов и детектором.

4. Рассмотрено три подхода к определению энергетических спектров, создаваемых испытательно-поверочным комплексом опорных нейтронных полей: измерение с использованием метода активационного анализа; измерение многошаровым спектрометром Боннера; прямой расчет с использованием программных комплексов, применяемых в ядерно-физических расчетах. Показано преимущество последнего подхода, но в этом случае можно получить лишь нормированные на интегральную плотность соответствующих потоков значения спектральных составляющих опорных потоков.

5. Для получения абсолютных значений спектральных составляющих опорных потоков предложено проводить измерения их тепловых составляющих с помощью образцового радиометра, чувствительного к низкоэнергетическим нейтронам, используя метод кадмиевой разности и, сопоставляя полученное значение этой составляющей с нормированным значением тепловой составляющей данного опорного

потока, определять коэффициент соответствия между ними, умножая на который нормированные значения спектральных составляющих, получать их абсолютные значения.

6. Рассмотрен состав разрабатываемого испытательно-поверочного комплекса, приведены результаты расчета спектров формируемых им опорных нейтронных полей.

7. Кратко описана процедура проведения поверки нейтронного спектрометра в опорных нейтронных полях, формируемых испытательно-поверочным комплексом. Точность измерений спектральных составляющих произвольных нейтронных протоков многодетекторным спектрометром реального времени предложено характеризовать среднеквадратической вели-

чиной максимальных ошибок их восстановления на обширной выборке спектров самой разнообразной формы, которая определяется при обучении нейронной сети. А поверка спектрометра, проводимая на опорных полях, создаваемых испытательно-поверочным комплексом, должна констатировать не превышение выявленной при этом среднеквадратической величиной погрешностей измерения спектральных составляющих опорных потоков нормируемой величины этой погрешности, полученной при обучении нейронной сети.

Публикация подготовлена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213).

Литература

1. Дрейзин В.Э., Логвинов Д.И., Гримов А.А., Кузьменко А.П. Формирование и расчет спектральных характеристик сцинтилляционных нейтронных детекторов // АНРИ. 2022. № 3(110). С. 21-31.
2. Дрейзин В.Э., Логвинов Д.И., Гримов А.А., Кузьменко А.П. Восстановление абсолютных значений спектральных составляющих в многодетекторном нейтронном спектрометре // АНРИ. 2022. № 3(110). С. 32-36.
3. Дрейзин В.Э., Логвинов Д.И., Гримов А.А., Кузьменко А.П. Исследование и подавление чувствительности нейтронных сцинтилляционных детекторов к гамма-излучению // АНРИ. 2022. № 4(111). С. 22-32.
4. Дрейзин В.Э., Логвинов Д.И., Гримов А.А., Кузьменко А.П. Моделирование и оптимизация состава детекторов в многодетекторном нейтронном спектрометре реального времени // АНРИ. 2022. № 4(111). С. 33-43.
5. ГОСТ 8.031-82 ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения потока и плотности потока нейтронов.

6. ГЭТ 51-2017. Государственный первичный эталон единиц плотности потока нейтронов и флюенса нейтронов для ядерно-физических установок.
7. ГЭТ 117-2010. Государственный первичный эталон (ГПЭ) единиц мощности поглощенной дозы и мощности эквивалента дозы нейтронного излучения.
8. ГОСТ 8.521-84 ГСИ. Установки поверочные нейтронного излучения. Методика поверки.
9. ГОСТ 8.355-79 ГСИ. Радиометры нейтронов. Методы и средства поверки.
10. Агунов В.А., Баляева Р.Р., Копейкина Е.С., Меняйло Н.П. Унифицированная методика аттестации типовых эталонных установок нейтронного излучения // АНРИ. 2013. № 1(72). С. 21-27.
11. Масляев П.Ф. Формирование полей нейтронов от радионуклидных источников нейтронов // АНРИ. 2012. № 4(71). С. 32-38.
12. Масляев П.Ф. Учет влияющих факторов при поверке установок с радионуклидными источниками нейтронного излучения // АНРИ. 2016. № 2(85). С. 2-9.
13. 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.
14. Севастьянов В.Д. Моделирующие опорные поля нейтронов для метрологического обеспечения нейтронных измерений на ядерно-физических установках РФ. Под редакцией д.т.н., профессора Донченко С.И. Монография. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2015.
15. Дрейзин В.Э., Логвинов Д.И., Гримов А.А. Создание опорных нейтронных полей для калибровки нейтронных спектрометров // АНРИ. 2013. № 4(75). С. 8-13.
16. Брисман Б.А., Генералова В.В., Крамер-Агеев Е.А. и др. Внутрореакторная дозиметрия: практическое руководство. М.: Энергоатомиздат, 1985. 200 с.
17. F.D. Brooks, H. Klein, «Neutron spectrometry – historical review and present status», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 476, pp. 1-11, 2002.
18. Брегадзе Ю.И., Степанов Э.К., Ярына В.П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1990. 264 с.
19. R.L. Bramblett, R.I. Ewing, T.W. Bonner. «A new type of Neutron spectrometer». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, North-Holland publishing Co, no. 9, pp. 1-12, 1960.
20. D.J. Thomas, A.V. Alevra, «Bonner sphere spectrometers – a critical review», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. A 476, pp. 12-20, 2002.
21. Санников А.В., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Кущов С.И., Сухарев М.М. Многошаровый спектрометр нейтронов на основе серийного прибора РСУ-01 // АНРИ. № 1(56), 2009. С. 62-69.
22. S. Itoh, T. Tsunoda, «Neutron Spectra Unfolding with Maximum Entropy and Maximum Likelihood», *Journal of Nuclear Science and Technology*, no. 26(9), pp. 833-843, 1989.
23. ISO-8529-1:2001, «Reference neutron radiations – Part1: Characteristics and methods of production».

Calibration and Verification of a Real-Time Multi Detector Neutron Spectrometer

The publication was prepared as part of the implementation of the strategic academic leadership program “Priority 2030” (Agreements No. 075-15-2021-1155 and No. 075-15-2021-1213)

Dreyzin Valeri, Logvinov Dmitri, Grimov Aleksandr, Kuzmenko Aleksandr
(Southwestern State University, Kursk, Russia)

Abstract. In [1-4], the main problems of creating a real-time multi-detector neutron spectrometer are considered and simulation modeling of such a spectrometer is carried out in order to determine the optimal composition of the detection unit of such a spectrometer. This article states the imperfection of the metrological and methodological support of not only spectrometric, but also radiometric measurements of arbitrary neutron fluxes. To increase the reliability of the results of neutron measurements, it is proposed to verify the multi-detector real-time neutron spectrometer being developed in reference neutron fields with different and reliably known shapes of energy spectra. To create such reference neutron fields, a neutron testing and verification complex was developed, the prototype of which was studied experimentally. But taking into account the limited variety of forms of the spectra of the reference neutron fields created by this complex, it is proposed to train the neural network embedded in the neutron spectrometer on a wider set of base spectra, which includes, in addition to the spectra of the reference fields created on the test and calibration complex, reliably known spectra of neutron fluxes found in the literature. It is shown that in this case the energy errors of the spectrometer when measuring neutron fluxes with a variety of spectrum shapes will be practically eliminated, even when the spectrometer is verified in reference fields with a narrower variety of spectrum shapes.

Key words: *neutron spectrometer, measurement, metrological support, verification, calibration.*

В.Э.Дрейзин (профессор, д.т.н., в.н.с.), Д.И.Логвинов (к.т.н., инж.), А.А.Гримов (к.т.н., инж.), А.П.Кузьменко (профессор, д.ф.-м.н., г.н.с.) – Юго-Западный государственный университет, г. Курск.

Контакты: тел. +7 (4712) 51-00-89, e-mail: dreyzin-ve@yandex.ru.