

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и инновационной деятельности ФГАОУ ВПО
«Белгородский государственный национальный исследовательский университет»



И.С. Константинов

2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Гримова Александра Александровича

«Нейтронный спектрометр-дозиметр реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды веществ, материалов и изделий.

На отзыв представлена диссертационная работа и автореферат.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, списка литературы, включающего 110 наименований, изложена на 138 страницах машинописного текста и поясняется 34 рисунками и 46 таблицами.

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Гримова Александра Александровича на тему «Нейтронный спектрометр-дозиметр реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей» посвящена разработке спектрометра произвольных нейтронных потоков с использованием реального времени с использованием нескольких нейтронных детекторов с разнообразными спектральными характеристиками и совместной обработкой получаемой от них информации с использованием предварительно обученных искусственных нейронных сетей (ИНС).

В настоящее время проблема измерения энергетического спектра нейтронного излучения в реальном масштабе времени не решена ни в России, ни за рубежом, хотя важность спектрометрических измерений нейтронных потоков с произвольной формой спектра и для ядерной энергетики, и для нейтронной дозиметрии, и для дальнейшего развития экспериментальных ядерно-физических исследований несомненна.

Для нейтронной спектрометрии произвольных нейтронных потоков, главным образом, применяется метод активационного анализа. Это лабора-

торный метод, требующий для проведения одного цикла измерений и компьютерной обработки их результатов не менее нескольких суток, причём автоматизировать эти процессы невозможно. Поэтому во всём мире предпринимались неоднократные попытки приборной реализации нейтронной спектрометрии. Наиболее успешной из них является многошаровой спектрометр Боннера, впервые предложенный ещё 50 лет назад. Однако, и он является недостаточно оперативным поскольку требует проведения до нескольких десятков прямых измерений исследуемого потока одним и тем же детектором, последовательно погружаемым в сферы различных диаметров (от 50 до 500 мм) из полиэтилена (служащего замедлителем нейтронов) с последующей обработкой полученных результатов на компьютере с целью вычислительного восстановления спектра. Серийно эти спектрометры не производятся. Понятно, что такие спектрометры не решают проблему оперативных измерений энергетического спектра нейтронных потоков. Более близки к требованиям приборной реализации экспериментальные образцы нейтронных спектрометров на основе реакции упругого рассеяния нейтронов в водородсодержащем веществе с вылетом протонов отдачи с применением газонаполненных (водородных и метановых ионизационных камер и пропорциональных счётчиков) и сцинтилляционных детекторов на основе органических сцинтилляторов (чаще всего применялись стильбеновые детекторы). Однако у спектрометров на основе газонаполненных детекторов слишком узкий энергетический диапазон (0,02 – 0,7 МэВ на основе водородных счётчиков и 0,2 – 2,0 МэВ на основе метанового счётчика) и имеется ограничение по плотности измеряемого нейтронного потока (до 10^4 нейтр/с·см²), а сцинтилляционные однокристалльные спектрометры имеют низкую разрешающую способность, существенное влияние гамма-фона и низкую достоверность результатов измерений. Всё это, а также неудовлетворительное состояние метрологического обеспечения нейтронной спектрометрии, не позволило довести разработки до выпуска промышленных образцов приборов.

В то же время не вызывает сомнений, что нейтронные спектрометры реального времени найдут широкое применение в ядерной энергетике для контроля радиационной обстановки на территории АЭС, для адекватной дозиметрии персонала по нейтронной составляющей излучений (с учётом большого различия весовых коэффициентов при определении мощности эффективной дозы для нейтронов различных энергий), на предприятиях топливного ядерного цикла – для технологического контроля производственных процессов (определения удельных концентраций делящихся материалов в сырье, полуфабрикатах и готовой продукции) и для контроля радиационной обстановки и дозиметрии персонала, а также в разнообразных ядерно-

физических исследованиях. Поэтому тема данной диссертационной работы, безусловно, является актуальной.

Новизна проведенных исследований и полученных результатов

Целью диссертационной работы являлось доказательство реализуемости и эффективности выдвинутой концепции построения нейтронного спектрометра реального времени, базирующейся на совместной обработке информации, получаемой от нескольких детекторов с разнообразными зависимостями спектральной чувствительности от энергии нейтронов, с помощью предварительно обученной нейронной сети, решающей задачу восстановления энергетического спектра исследуемого потока. Хотя эта идея близка и к идее активационного анализа, и к идее многосферных спектрометров Боннера, но её реализация упиралась в практическую неосуществимость экспериментального создания обучающей выборки нейтронных полей со спектрами разнообразной формы, необходимой для обучения нейронной сети. В диссертации эта проблема решается путём создания системы имитационного моделирования, позволяющей на основе реальных базовых спектров сгенерировать любое желаемое число модельных реализаций, отличающихся друг от друга по форме спектра, необходимых для обучения нейронной сети и оценки погрешностей восстановления спектра. Поскольку промышленность не выпускает нейтронных детекторов, аттестованных по спектральным характеристикам, а измерить их нечем, диссертант использовал для моделирования и построения макетного образца спектрометра промышленный трёхканальный блок детектирования БДКС-05С, входящий в состав нейтронного радиометра-дозиметра МКС-03С, для которого имеются спектральные характеристики всех трёх измерительных каналов (тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов). И хотя он не вполне отвечает предъявляемым требованиям (всего три измерительных канала при их невысокой спектральной селективности), но для проверки самой идеи построения спектрометра такой выбор вполне оправдан (если уж при столь несовершенном блоке детектирования результаты будут удовлетворительны, то стоит предпринимать дальнейшие усилия для построения более совершенного многодетекторного блока детектирования). Реализуя эту задачу, диссертантом получены следующие новые результаты:

1. Разработана система имитационного моделирования для моделирования многодетекторных нейтронных спектрометров, выбора конфигурации и обучения нейронной сети для исследования вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения, включающая расширяемую базу данных разнообразных по форме реальных спектров нейтронных потоков, программу для генерирования на их основе обучающей и проверочной выборок

модельных реализаций спектров любого желаемого объёма, программу оцифровки и моделирования спектральных характеристик используемых нейтронных детекторов и, собственно программу для исследования и обучения нейронных сетей для вычислительного восстановления спектров.

2. Путём имитационного моделирования спектрометра на основе блока детектирования БДКС-05С доказана высокая эффективность совместной обработки выходной информации многодетекторного блока детектирования для вычислительного восстановления энергетического спектра нейтронного излучения с помощью предварительно обученной нейронной сети. Методическая среднеквадратическая погрешность восстановления усреднённых по десятичным интервалам энергии плотностей потока и для обучающей, и для поверочной выборки составила менее 1 %.

Это открыло перспективы для разработки макетного образца прибора на основе данного блока детектирования, что дополнительно позволяло сравнить погрешности прототипного прибора МКС-03С без совместной обработки выходных сигналов измерительных каналов и нового прибора при измерениях одних и тех же потоков с энергетическими спектрами разнообразной формы. Но для этого необходимо было решить ещё одну важную проблему – создания испытательной установки для формирования от одного источника нейтронного излучения опорных нейтронных полей с разнообразными формами спектров.

При решении этой проблемы также были получены важные новые результаты:

3. С использованием библиотеки программ GEANT4 проведено моделирование различных способов формирования опорных нейтронных полей с разнообразной формой спектра с помощью замедлителей нейтронов различной толщины, которые позволили разработать оптимальный вариант установки для формирования таких полей. Установка позволяет от одного образцового радиоизотопного источника получать 35 опорных полей с различными энергетическими спектрами.

4. Разработана методика расчёта энергетических спектров опорных нейтронных полей с использованием библиотеки программ GEANT4.

5. Разработана методика проведения экспериментальных исследований нейтронного спектрометра на созданной установке для формирования опорных нейтронных полей.

Практическая значимость полученных в диссертации результатов
Имеющими практическую важность результатами являются:

1. Разработка испытательной установки для формирования опорных нейтронных полей с разнообразной формой энергетического спектра от одного образцового радиоизотопного источника.

2. Разработка структурно-функциональных и принципиальных схем, а также программного обеспечения макетного образца нейтронного спектрометра на основе блока детектирования БДКС-05С.

3. Проведение экспериментальных исследований изготовленного макетного образца на созданной установке для формирования опорных нейтронных полей с разнообразными формами спектров, подтвердивших высокую эффективность использования предварительно обученных нейронных сетей для вычислительного восстановления энергетических спектров измеряемых нейтронных потоков. Ошибки восстановления усреднённых по десятичным энергетическим интервалам спектральных плотностей измеряемых потоков не превышали 5-10 %. А ошибки восстановления спектральных плотностей тепловой, промежуточной и быстрой составляющих измеряемых нейтронных потоков снизились по сравнению с показаниями прибора МКС-03С, использованного в качестве прототипа, в 20-100 раз.

Полученные теоретические и практические результаты позволяют начать опытно-конструкторские работы по разработке промышленного спектрометра-дозиметра нейтронного излучения реального времени.

Степень обоснованности и достоверности положений, выводов и заключений, содержащихся в диссертации.

Обоснованность и достоверность положений, выносимых на защиту автором диссертационной работы, подтверждаются корректным использованием теории имитационного моделирования, математического аппарата статистического анализа, теории искусственных нейронных сетей и квалифицированным использованием программного пакета Neural Networks Toolbox, входящего в пакет расширения системы MATLAB 7, при создании и исследовании системы имитационного моделирования нейтронного спектрометра, а также теории переноса ионизирующих излучений через вещество и реализующей её библиотеки программ GEANT4, при разработке испытательной установки для формирования опорных нейтронных полей с энергетическими спектрами разнообразной формы, и подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований макетного образца нейтронного спектрометра на созданной испытательной установке для формирования опорных нейтронных полей.

Замечания по диссертации и автореферату

1. Известно, что реальные нейтронные потоки всегда сопровождаются достаточно интенсивным гамма-излучением. Однако ни в диссертации, ни в

автореферате ничего не сказано о влиянии гамма-фона на результаты измерений создаваемого спектрометра.

2. Не указано, каким образом получены спектральные характеристики измерительных каналов используемого блока детектирования БДКС-05С, хотя на приведенных графиках этих характеристик показан возможный разброс экспериментальных или расчётных точек. Не проведен анализ ошибок, к которым может приводить указанный разброс этих характеристик.

3. Не оценена достоверность расчётных спектров опорных нейтронных полей, создаваемых разработанной испытательной установкой.

4. Не указано, как получен спектр образцового радиоизотопного источника, используемого в этой испытательной установке (на приводимых графиках он представлен как спектр «голового» источника).

Основные результаты работы и рекомендации по их использованию

Основные результаты работы уже были перечислены при описании научной новизны и практической значимости диссертации. А в качестве рекомендаций по их использованию можно указать следующие:

1. Полученные результаты имитационного моделирования нейтронного спектрометра и результаты экспериментального исследования его макетного образца в опорных нейтронных полях с разнообразной формой спектра позволяют рекомендовать проведение опытно-конструкторских работ по созданию промышленного нейтронного спектрометра на основе разработанного и испытанного макетного образца.

2. Разработанная система имитационного моделирования может быть использована для проработки альтернативных вариантов построения нейтронных спектрометров реального времени с более совершенным многодетекторным блоком детектирования с большим числом измерительных каналов и более высокой спектральной селективностью каждого из них.

3. При разработке промышленного нейтронного спектрометра следует уделить большое внимание метрологической аттестации созданной испытательной установки для формирования опорных нейтронных полей как основного средства метрологического обеспечения промышленного выпуска нейтронных спектрометров.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 7 международных 2 всероссийских конференциях и 3-х региональных семинарах.

Публикации

Материалы диссертации весьма полно отражены в 2-х монографиях с участием автора и 24 научных статьях, из которых 7 опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Заключение

Диссертация А. А. Гримова «Нейтронный спектрометр-дозиметр реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей» является законченной научно-квалификационной работой, посвящённой решению важной и актуальной научно-технической задаче – созданию нового класса приборов ядерного приборостроения: нейтронных спектрометров реального времени, содержит несомненную научную новизну и практическую ценность. Достоверность защищаемых положений определяется квалифицированным использованием методов имитационного моделирования, статистического анализа, теории нейронных сетей, теории переноса ионизирующих излучений, а также апробированных пакетов прикладных программ, реализующих эти методы, и подтверждается проведенными на высоком уровне экспериментальными исследованиями. Содержание диссертации соответствует п. 1 «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» и п. 3 «Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами» паспорта специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» и полностью отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам диссертант Гримов Александр Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

Диссертационная работа заслушана и обсуждена на заседании кафедры общей и прикладной физики ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет, где получила одобрение (протокол №8 от 11 марта 2015 г.).

Зав. кафедрой общей и прикладной

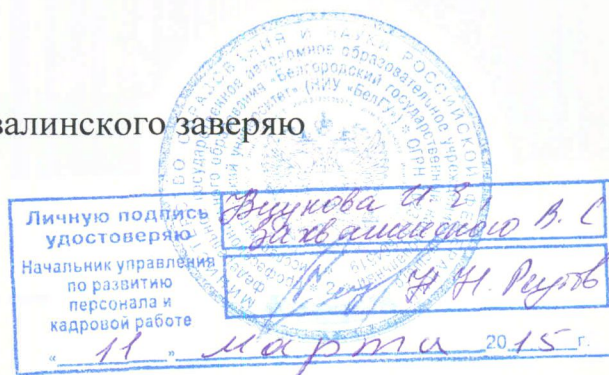
физики, д.ф.-м.н.

Внуков /И.Е. Внуков/

Отзыв подготовил профессор кафедры общей и прикладной физики, д.ф.-м.н.

Захвалинский /В.С. Захвалинский/

Подписи И.Е. Внукова и В.С. Захвалинского заверяю



Внуков Игорь Евгеньевич

Адрес: 308015, г. Белгород, ул. Победы 85

Телефон: 4722-301829

E-mail: vnukov@bsu.edu.ru