

На правах рукописи

Гримов Александр Александрович

**НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР-ДОЗИМЕТР РЕАЛЬНОГО
ВРЕМЕНИ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ С ПОМОЩЬЮ
НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Дрейзин Валерий Элезарович

Официальные оппоненты: Подкин Юрий Германович,
доктор технических наук, профессор,
Сарапульский политехнический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры»

Санников Дмитрий Петрович,
кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»,
заведующий научно-исследовательской лабораторией «Специальное программное обеспечение»

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

Защита диссертации состоится «7» апреля 2015г. в 15-30 на заседании диссертационного совета Д.212.182.01 при ФГБОУ ВПО «Государственный университет - УНПК» по адресу: 302020, РФ, г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, ауд.212, официальный сайт: www.gu-unpk.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Государственный университет - УНПК» и на официальном сайте www.gu-unpk.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ФГБОУ ВПО «Государственный университет - УНПК» по адресу: www.gu-unpk.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета _____ В.Н. Волков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Измерение энергетического спектра нейтронных потоков является сложной и до конца не решённой во всём мире проблемой. Нейтронное излучение играет определяющую роль в работе ядерных реакторов и является наиболее опасным из всех видов ионизирующих излучений. При этом и для проектирования и управления ядерными реакторами, и для расчёта амбиентного эквивалента поглощённой дозы нейтронного излучения необходимо знать не только интегральную плотность воздействующих нейтронных потоков, но и их энергетический спектр.

Проблемами нейтронной спектрометрии в нашей стране занимались учёные ВНИИФТРИ – Ярына В.П., Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Масляев П.Ф., Брегадзе Ю.И., Исаев Б.М и другие. Ими были исследованы методы восстановления нейтронных спектров, способы их аппроксимации, а также различные детекторы нейтронов. Климентовым В.Б. был всесторонне исследован активационный метод спектрометрии нейтронов. Ряд работ (Брегадзе Ю.И., Масляев П.Ф., Бойцов А.А., Терешкин В.И.) посвящен проблемам метрологии нейтронного излучения (применительно к активационному методу анализа). Определённый вклад в разработку аппаратуры для анализа нейтронных потоков внесли сотрудники ГНЦ «СНИИП», разработавшие трёхканальный дозиметр-радиометр МКС-03С, а также ГНЦ «ИФВЭ» (Санников А. В. и др.), разработавшие один из первых российских образцов многошарового нейтронного спектрометра. За рубежом проблемами нейтронной спектрометрии и устройствами для анализа нейтронных потоков занимались R. L. Bramblett, R. I. Ewing, T. W. Bonner, создавшие новый класс приборов – многошаровые спектрометры Боннера. Вопросами получения спектральных характеристик данных спектрометров занимались D.J.Thomas, A. V. Alevraи другие. M. Matske, S.Avdic, V. Mares исследовали методы вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения по результатам измерений с помощью спектрометров Боннера. Но, тем не менее, нейтронных спектрометров, пригодных для измерения произвольных нейтронных потоков в реальном времени до сих пор не было создано ни в нашей стране, ни за рубежом. Практически все существующие промышленные приборы для измерений нейтронного излучения предназначены для измерений интегральной плотности нейтронных потоков. В лучшем случае весь поток разделяется на две или три энергетические составляющие. Но и в том, и в другом случае данные приборы характеризуются значительными и непредсказуемыми погрешностями, возникающими из-за несоответствия энергетического спектра измеряемого потока и спектров образцовых источников нейтронного излучения, по которым проводилась калибровка приборов. Единственным путём кардинального повышения точности измерения интегральной плотности нейтронного потока при неизвестном его спектре является переход к спектральным измерениям с последующим интегрированием спектра. При этом измерение энергетического спектра нейтронных потоков важно и само по себе для полноценного контроля режимов работы атомных реакторов и радиационной обстановки в помещениях АЭС, а также для достоверной дозиметрии нейтронного излучения, поскольку его биологическое действие также сильно зависит от энергии нейтронов (биологические дозовые коэффициенты для тепловых и быстрых (15 МэВ) нейтронов отличаются в 100 раз).

Таким образом, **актуальными** являются вопросы совершенствования средств измерения и дозиметрии нейтронного излучения, обеспечивающих возможность получения энергетического спектра нейтронного излучения произвольных нейтронных потоков в реальном времени.

Целью работы является повышение достоверности, оперативности и точности средств спектрометрических измерений и дозиметрического контроля нейтронного излучения с обеспечением возможности получения энергетического спектра нейтронного излучения в реальном времени.

В соответствии с поставленной целью научно-техническая задача декомпозирована на следующие **частные задачи**.

1. Анализ известных методов и средств дозиметрии и спектрометрии нейтронного излучения. Обоснование направления исследований. Выбор метода вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения.

2. Создание системы имитационного моделирования для исследования вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения по информации, получаемой от блока детектирования, оснащённого детекторами с разнообразными спектральными характеристиками.

3. Создание испытательной установки для получения опорных нейтронных полей с разнообразной формой энергетических спектров.

4. Разработка нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени, проведение экспериментальных исследований макетного образца спектрометра на созданной испытательной нейтронной установке.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использованы методы нейронных сетей, расчётные методы переноса радиационных излучений в веществе, методы схмотехнического и алгоритмического проектирования, математической обработки экспериментальных данных.

Новыми научными результатами и положениями, выносимыми на защиту, являются:

1) Система имитационного моделирования для исследования вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения, состоящая из комплекса моделирующих программ и базы данных опорных спектров, позволяющая генерировать обучающую и проверочную выборки модельных спектров необходимого объёма по базовым опорным спектрам, моделировать блоки детектирования с разнообразными спектральными характеристиками входящих в них детекторов и исследовать различные варианты типов и конфигураций нейронных сетей, используемых для вычислительного восстановления спектров с оценкой достижимой погрешности восстановления, отличающаяся возможностью использования различных наборов моделей базовых спектров и блоков детектирования.

2) Методика обучения входящих в состав нейтронного спектрометра-дозиметра нейронных сетей, основанная на принципе обучения с учителем, отличающаяся использованием результатов имитационного моделирования спектров нейтронных источников, спектральных характеристик используемых детекторов и модельных реализаций их выходных сигналов, позволяющая снять ограничения по использованию нейронных сетей для обработки сигналов датчиков в нейтронных спектрометрах, связанные с необходимостью проведения значительного числа экспериментов для получения состоятельной обучающей выборки.

3) Способ измерения интенсивности стохастических потоков импульсов, обеспечивающий устранение противоречия между статистической погрешностью и затратами времени на один цикл измерения; уменьшение времени реакции на изменение интенсивности излучения; уменьшение требований к объёму буфера для хранения всех усредняемых отсчётов и уменьшение времени расчёта значения интенсивности потока импульсов.

4) Способ создания нейтронных полей с разнообразной формой энергетических спектров, отличающийся использованием одного радиоизотопного источника нейтронов, что обеспечивает снижение затрат при создании нейтронных испытательных и поверочных установок и повышает оперативность проведения экспериментов.

Объект исследований – методы и приборы контроля нейтронного излучения в системах радиационного контроля окружающей среды и ядерных объектов.

Предмет исследований – методы, алгоритмы и аппаратные средства для измерения и вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения с целью создания спектрометра нейтронного излучения реального времени.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- с помощью имитационного моделирования и экспериментально проверена исследуемая концепция построения нейтронного спектрометра реального времени с вычислительным восстановлением спектра с помощью предварительно обученной нейронной сети;

- разработан спектрометр-дозиметр нейтронного излучения реального времени на основе серийного блока детектирования БДКС-05С;

- на основе предложенного способа получения нейтронных полей с разнообразной формой энергетических спектров создана испытательная поверочная установка;

- изготовлен макетный образец разработанного спектрометра-дозиметра и проведены его экспериментальные исследования на созданной испытательной установке;

- полученные результаты исследований позволяют начать ОКР на разработку новой модели прибора МКС-03С с использованием того же блока детектирования, но с новым измерительно-вычислительным блоком, использующим совместную вычислительную обработку сигналов, получаемых от блока детектирования, с помощью нейронных сетей, что обеспечит многократное уменьшение погрешностей измерений спектральных плотностей тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов в измеряемом потоке с добавлением функции измерения энергетического спектра нейтронного излучения и многократно повысит достоверность определения мощности эффективной дозы.

Результаты работы внедрены на ОАО «Курский завод «Маяк» при разработке модернизированного прибора МКС-03СМ, а также в учебном процессе ЮЗГУ направления 211000 «Конструирование и технология электронных средств».

Соответствие паспорту специальности. 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».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на международных и российских конференциях, семинарах, симпозиумах:

- на итоговых конференциях конкурса научных работ «Знания молодых ядерщиков – атомным станциям» (г.Обнинск, ИАТЭ, 2009 – получена I премия конкурса, г. Москва, НИЯУ МИФИ, 2010 – получена вторая премия);

- на Международной научной конференции «Актуальные проблемы развития прикладной математики в энергетике, энергоэффективности и информационно-коммуникационных технологиях» (г. Москва, МГТУ им. Баумана, 2010);

- на Международной научной конференции, «Найновите постижения на европейската наука» (г.София, 2012);

- на X конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям (г. Харьков, ННЦ ХФТИ, 2012);

- на VIII Международной научно-практической конференции: «Инновационное развитие: физико-математические и технические науки» (г. Москва, 2014);

- на Международных научно-технических конференциях «Диагностика-2009», «Диагностика-2011» и «Диагностика-2013» (г. Курск, ЮЗГУ, 2009, 2011, 2013);

- на региональных семинарах «Инновация-2010» и «Инновация-2012» (г.Курск, ЮЗГУ, 2010, 2012);

- на научно-технических семинарах кафедры «Конструирование и технология электронных средств» Юго-западного государственного университета с 2009 по 2014 гг.

Публикации. Результаты проведенных исследований и разработок опубликованы в 17 научных работах общим объемом 49,2 п.л., из них доля автора – 17,0 п.л., в том числе 4 публикации общим объёмом 1,7 п.л. в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК России, из них доля автора – 0,63 п.л.; в двух монографиях и двух зарубежных статьях. Оригинальность технических решений защищена 2-мя свидетельствами РФ на программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту научные результаты получены соискателем лично. В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателем разработаны: в [3, 7-8, 14] – структурно-функциональная организация и принципы функционирования нейтронного спектрометра реального времени; в [1, 7-11] – система имитационного моделирования для исследования вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения и методика обучения входящих в состав нейтронного спектрометра-дозиметра нейронных сетей; в [4,15] – способ получения опорных нейтронных полей с разнообразной формой энергетических спектров; в [2, 13] – критерии подбора состава детекторов многодетекторного блока детектирования для спектрометра нейтронного излучения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 162 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 110 наименований, четырех приложений, поясняется 34 рисунками и 46 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность темы исследования, анализируется степень её научной разработанности, формулируются цель и задачи исследования, ха-

рактически характеризуются теоретико-методологические основы работы, раскрывается её научная новизна, формулируются положения, выносимые на защиту, обосновывается теоретическая и практическая значимость диссертации, раскрывается апробация её результатов.

В первой главе проведен анализ известных методов и устройств нейтронной спектрометрии и оценена возможность их применения для измерений в реальном времени. Представлена классификация методов нейтронной спектрометрии и рассмотрены наиболее важные из них. Рассмотрены прямые методы измерения энергии нейтронов – времяпролётный и гравитационный и показано, что они не предназначены для спектральных измерений произвольных нейтронных потоков. Показана неприменимость наиболее широко используемого активационного метода для создания спектрометров нейтронных потоков реального времени. Рассмотрены наиболее близкие к приборному исполнению метод протонов отдачи и многошаровой метод, показаны сложности, возникающие при восстановлении спектров в этих методах, что приводит к большим погрешностям при измерении произвольных нейтронных потоков. Проведен анализ применяемых методов для вычислительного восстановления спектров нейтронных потоков по результатам измерений и показаны основные проблемы данных методов – необходимость использования априорной информации о форме восстанавливаемого спектра. На основе выполненного аналитического обзора показано, что к настоящему времени не разработан метод нейтронной спектрометрии, пригодный для измерений произвольных нейтронных потоков в реальном времени.

Теоретически обоснован выбор способа построения нейтронного спектрометра реального времени с использованием многоканального блока детектирования, состоящего из оптимально подобранного набора детекторов с селективной чувствительностью в различных областях энергетического спектра нейтронов и совместной вычислительной обработки сигналов от блока детектирования. В качестве блока детектирования выбран блок детектирования БДКС-05С. В качестве метода вычислительного восстановления спектров выбран нейросетевой метод.

Во второй главе разработана система имитационного моделирования для исследования вычислительного восстановления спектра нейросетевым методом.

Структурная схема системы имитационного моделирования приведена на рис.1.

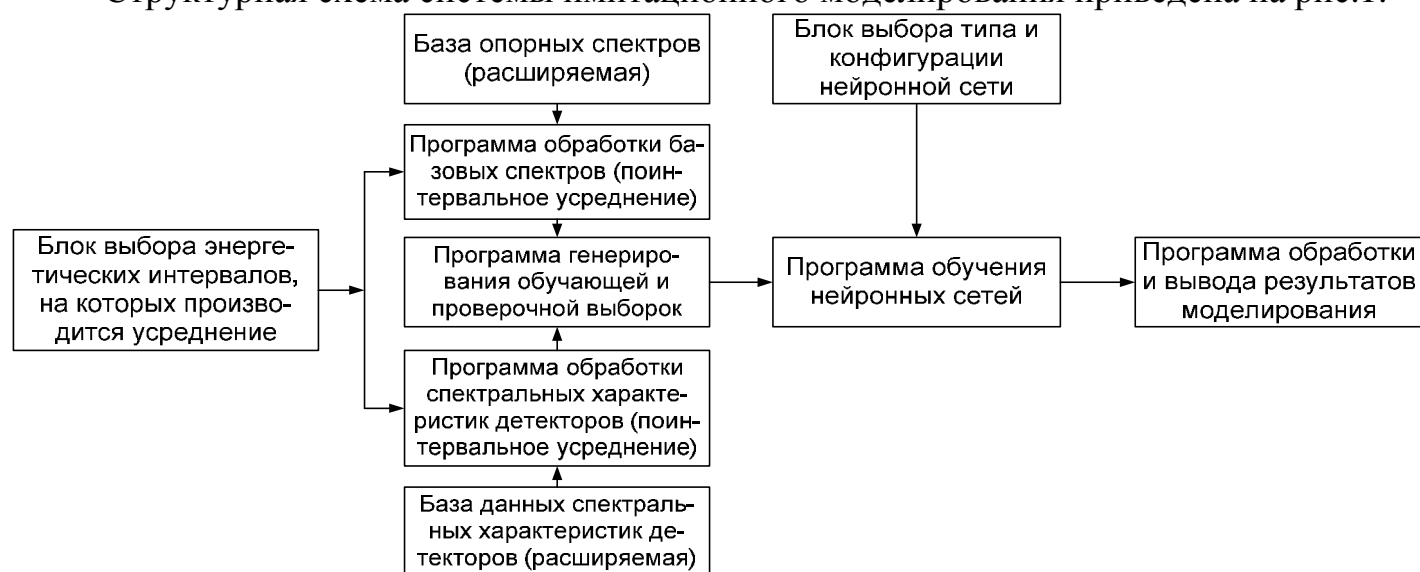


Рисунок 1 – Структурная схема системы имитационного моделирования

Разработан метод обучения нейронных сетей с использованием результатов имитационного моделирования спектров нейтронных источников, спектральных характеристик используемых детекторов и модельных реализаций выходных сигналов детекторов блока детектирования. Произведён подбор базовых энергетических спектров нейтронных потоков для создания обучающей и поверочной выборок. Базовые энергетические спектры разбиты на группы в соответствии с основными видами источников нейтронного излучения и составляют базу данных опорных спектров. Программой обработки базовых спектров [6] они преобразуются в ступенчатые функции путём их поинтервального усреднения на задаваемом множестве энергетических интервалов, после чего формируется необходимое количество реализаций спектров с помощью программы генерирования выборок путём прибавления к базовым спектрам случайной величины, распределённой по энергетической шкале. Аналогично в виде ступенчатых функций, задаваемых на тех же энергетических интервалах, представляются спектральные характеристики используемых детекторов, входящие в базу данных спектральных характеристик детекторов. Проведено моделирование функций спектральных чувствительностей применённого трёхканального блока детектирования БДКС-05С.

Произведён выбор оптимальной архитектуры и конфигурации нейронных сетей для решаемых задач с помощью программы для обучения нейронных сетей и восстановления энергетического спектра [5]. Выбраны многослойные нейронные сети прямого распространения с сигмоидными передаточными функциями. Выбрана конфигурация нейронной сети для восстановления спектров нейтронного излучения на девяти десятичных интервалах с 3-мя нейронами в первом слое, 6-ю в промежуточном и 9-ю в выходном. Для определения плотности потока тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов (что имеет практический смысл при модернизации серийно выпускающегося прибора МКС-03С) выбрана нейронная сеть с 3-мя нейронами в первом слое, 3-мя в промежуточном и 3-мя в выходном. Структура нейронной сети для восстановления плотностей потока нейтронов в 9-ти десятичных интервалах представлена на рис.2.

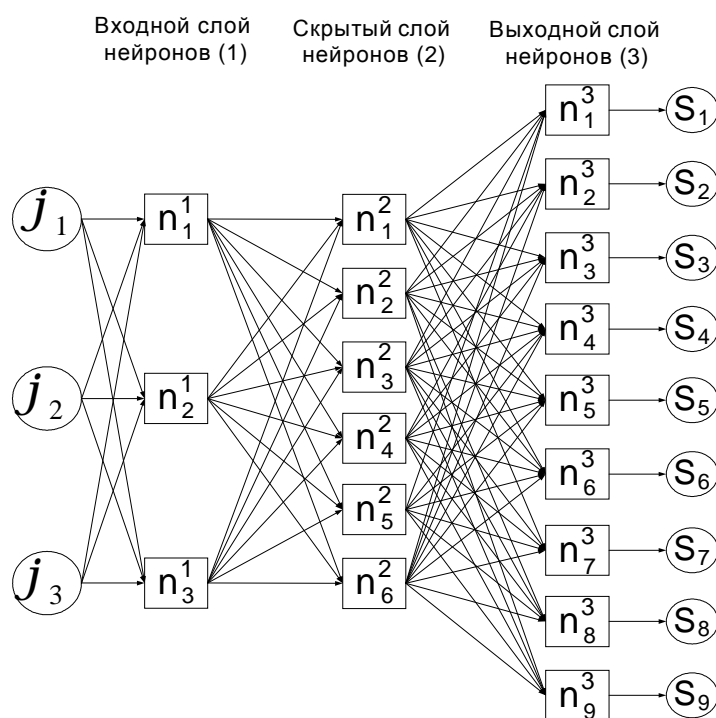


Рисунок 2 – Структура нейронной сети для восстановления плотностей потока нейтронов в 9-ти десятичных интервалах

На рисунке: φ_i – нормированная к сумме интенсивность импульсных последовательностей i -го канала БДКС-05С: $\varphi_i^k = \frac{\Phi_i^k}{\sum_{i=1}^3 \Phi_i^k}$, где Φ_i^k – выход i – го канала при k – м потоке; n_i^j – i -й нейрон j -го слоя; S_i – спектральная плотность потока на i -м десятичном интервале энергии.

В спектрометре спектральная плотность потока на i -м десятичном интервале энергии (S_i) рассчитывается по формуле для предварительно обученной нейронной сети:

$$S_i = \frac{1}{1 + e^{-\left(\sum_{i=1}^6 k_i^3 * \frac{1}{1 + e^{-\left(\sum_{i=1}^3 k_i^2 * \frac{1}{1 + e^{-\left(\sum_{i=1}^3 k_i^1 * \varphi_i + b_i^1\right) + b_i^2}\right) + b_i^3}\right)}}\right)}}$$

Здесь k_i^1 – вес синапса нейрона входного слоя, k_i^2 – вес синапса нейрона скрытого слоя, k_i^3 – вес синапса нейрона выходного слоя; b_i^1, b_i^2, b_i^3 – значения смещения нейронов соответствующего слоя.

В третьей главе представлены результаты имитационного моделирования нейросетевого метода восстановления спектра в спектрометре на основе блока детектирования БДКС-05С.

Имитационное моделирование нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени проводилось с использованием совместной обработки выходных поканальных интенсивностей импульсов данного блока детектирования с помощью предварительно обученных нейронных сетей двух конфигураций. Главной целью исследования нейронных сетей конфигурации 3-6-9 была проверка самого принципа создания спектрометра. При этом дополнительно проверялся вопрос возможности замены специализированных сетей, обученных на спектрах каждой группы одной общей сетью, обученной для всех групп спектров вместе. Кроме того, исследовалась сеть конфигурации 3-3-3 для восстановления плотностей тепловой, промежуточной и быстрой составляющих нейтронных потоков. Результаты исследования нейронных сетей конфигурации 3-6-9 представлены в таблице 1. Из неё видно, что среднеквадратические погрешности определения спектральной плотности с помощью общей сети не превышают 5%. Поэтому, учитывая аппаратные и эксплуатационные преимущества использования общей нейронной сети для всех видов спектров, принято решение использовать общую нейронную сеть.

Промоделирован прототипный прибор МКС-03С и модернизированный вариант с дополнительной совместной обработкой получаемой от блока детектирования информации с помощью предварительно обученной нейронной сети конфигурации 3-3-3. Показано, что при измерении потоков нейтронов с базовыми спектрами погрешности определения тепловой, промежуточной и быстрой составляющих плотностей измеряемых потоков в прототипном приборе будут достигать 200 - 8000 %, тогда как в модернизированном варианте они не превышают 9 % (таблица 2).

Таблица 1 – Максимальные и среднеквадратические погрешности оценок спектральной и интегральной плотности потоков нейтронов от различных видов источников

Источники излучения	Спектральная плотность				Интегральная плотность	
	Максимальные погрешности, %		Среднеквадратические погрешности, %		Максимальные погрешности, %	
	специализ. сеть	общая сеть	специализ. сеть	общая сеть	специализ. сеть	общая сеть
Радиоизотопные источники	4,37	5,75	2,75	1,69	0,526	1,02
Критические сборки	10,52	8,69	0,97	1,09	-0,321	-0,329
Потоки утечки из защиты ЯР	24,18	64,69	2,02	4,51	-0,361	0,578
Активная зона реакторов	16,79	29,56	0,97	1,45	0,508	0,66
Защищённая зона	19,1	17,73	1,10	2,10	-0,633	0,638

Таблица 2 – Относительные среднеквадратические ошибки ответов нейронной сети при определении плотностей тепловой, промежуточной и быстрой составляющих нейтронных потоков, %

Диапазон /Источник	Радиоизотопные источники	Критические сборки	Потоки утечки из защиты ЯР	Потоки в активной зоне ЯР	Потоки за биол. защитой ЯР	Все группы спектров
Тепловой	1,17	1,22	6,78	3,11	3,34	3,97
Промежуточный	4,40	2,56	8,20	4,74	4,88	5,30
Быстрый	2,51	1,47	1,69	1,83	1,96	1,92
Интегральная плотность	0,63	0,43	0,40	0,32	0,27	0,40

В четвертой главе приводится описание разработанного макетного образца нейтронного спектрометра-дозиметра и результаты его экспериментальных исследований на созданной установке для получения опорных нейтронных полей с разнообразной формой энергетического спектра.

Для экспериментального исследования способа построения нейтронного спектрометра реального времени был разработан и изготовлен макетный образец нейтронного спектрометра-дозиметра. Спектрометр проектировался унифицированным для работы с различными блоками детектирования с числом измерительных каналов до восьми. Его структурная схема представлена на рис.3. Спектрометр состоит из измерительного и вычислительного модулей, общего блока питания и блока высоковольтных источников питания детекторов. Структурные схемы измерительного и вычислительного модулей представлены на рис.4.

Разработано соответствующее программное обеспечение для встраиваемого микроконтроллера и ПЭВМ. Микроконтроллер реализует разработанный способ измерения интенсивности потока импульсов, устраняющий существующее противоречие между достижимой статистической достоверностью результата измерения скорости счёта (интенсивности) стохастических потоков импульсов и затратами времени на один цикл измерения, большим временем реакции на изменение интенсивности излучения и высокими требованиями к объёму буфера для хранения всех усредняемых отсчётов.

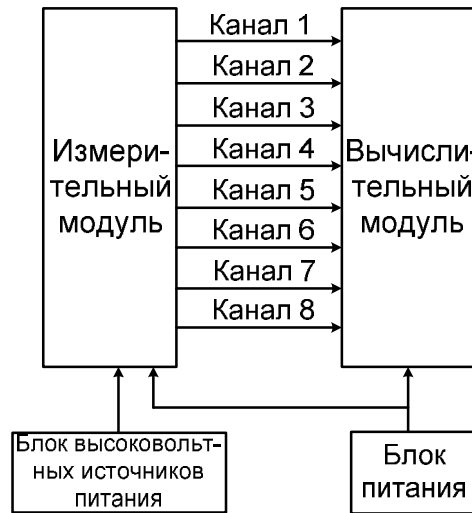


Рисунок 3 – Схема структурно-функциональная нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени

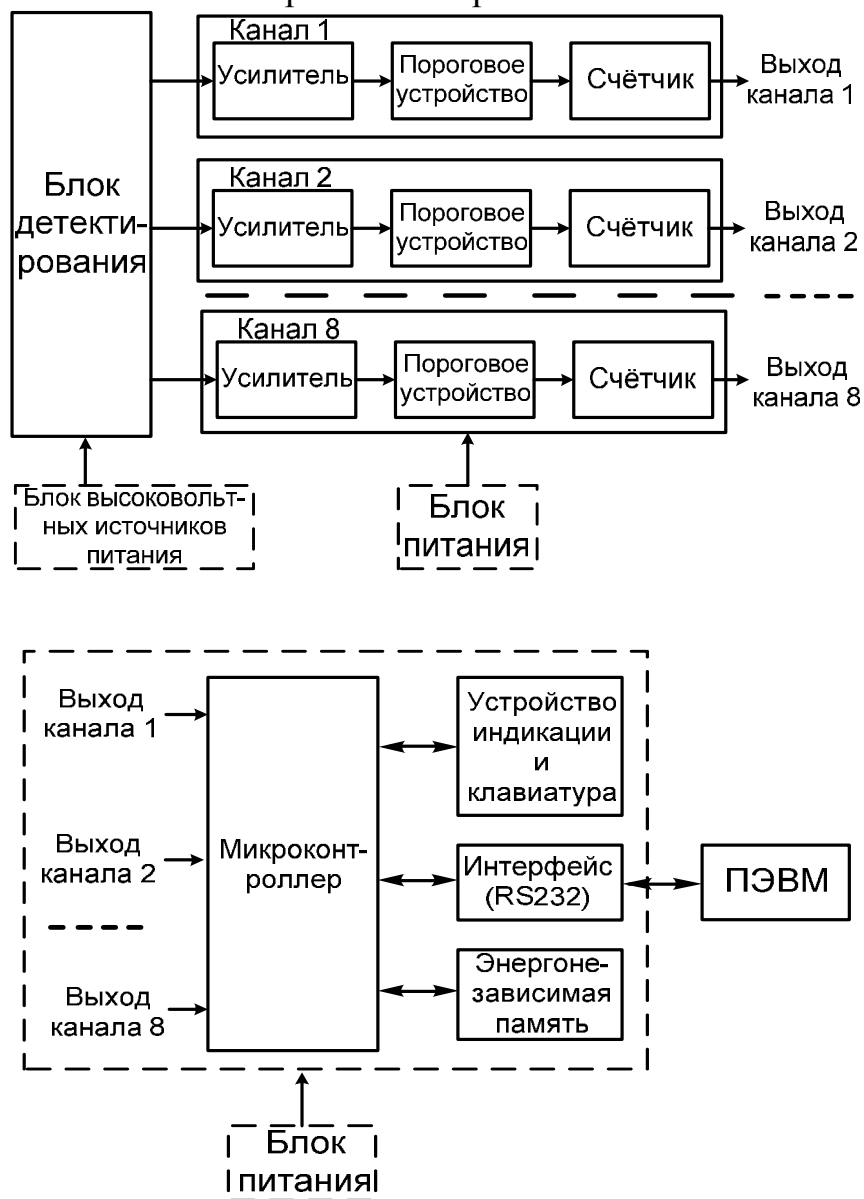


Рисунок 4 – Схемы структурно-функциональные: измерительного модуля (сверху), вычислительного модуля (снизу)

Способ состоит в том, что каждому каналу измерения ставится в соответствие два программных счётчика импульсов (счётчик 1 и счётчик 2) и два программных таймера соответственно (t_1 и t_2). Задаётся минимальное число подсчитываемых импульсов (N_0), для которого определяется интенсивность импульсной последовательности. Накопление импульсов осуществляется параллельно в двух счётчиках, при превышении в каком-либо из счётчиков N_0 (они опрашиваются каждую секунду) происходит сброс второго счётчика и его таймера. Среднее значение после сброса будет рассчитываться по выражению $n_0 = n_1/t_1$, где n_1 – количество импульсов, накопленных счётчиком 1; t_1 – интервал счёта. При превышении N_0 во втором счётчике происходит сброс первого счётчика и его таймера и т.д. Таким образом, новое значение интенсивности представляется каждую секунду, а объём накопленных импульсов при малых интенсивностях колеблется от N_0 в начале до $2 \times N_0$. В отличие от традиционных способов с использованием метода скользящего среднего, в этом случае не предъявляется высоких требований к объёму памяти и быстродействию микроконтроллера. На описанный способ подана заявка на изобретение.

В разрабатываемом нейтронном спектрометре-дозиметре способ реализуется с помощью аппаратных (счётчики, таймеры) и программных средств микроконтроллера вычислительного модуля. Блок-схема алгоритма, лежащего в основе программы, исполняемой микроконтроллером, представлена на рис.5.

Разработан алгоритм, реализующий эмуляцию предварительно обученных нейронных сетей и оценена вычислительная сложность его программной реализации. Разработаны алгоритмы вычисления дозиметрических величин по вычисленным спектральным плотностям нейтронных потоков, рассчитаны необходимые пересчётные коэффициенты.

Для экспериментального подтверждения результатов имитационного моделирования в связи с отсутствием нейтронных источников с метрологически аттестованными энергетическими спектрами с участием автора была проведена разработка установки для создания опорных нейтронных полей со спектрами различной формы. Для получения опорных нейтронных полей путём имитационного моделирования с использованием библиотеки программ GEANT-4 было исследовано несколько различных конструкций устройств экранирования и коллимирования источника. Наилучшим оказалось использование полиэтиленового отражателя с конусной выемкой, по центру которой должен размещаться источник. Вплотную к отражателю устанавливается цилиндрический экран в виде трубы из полиэтилена и парафина длиной 200 мм с внутренним диаметром 95 мм и наружным диаметром 135 мм. Эта труба и выполняет функцию коллиматора. В полость трубы в качестве замедлителей нейтронов могут вставляться парафиновые диски толщиной 10, 20, 30 и 50 мм. Кроме того, в каждом из дисков по центру были сделаны сквозные отверстия диаметром 20 мм, в которые можно помещать парафиновые пробки. Это позволило ещё больше разнообразить формы получаемых спектров.

Среднеквадратическая погрешность определения интервальных плотностей созданным нейтронным спектрометром-дозиметром по всем спектрам установки для создания опорных нейтронных полей в задаче определения плотности потоков тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов составляет 4,4 %, максимальная относительная ошибка – 11 %. Среднеквадратическая погрешность определения интегральных плотностей потоков составляет 0,87%.

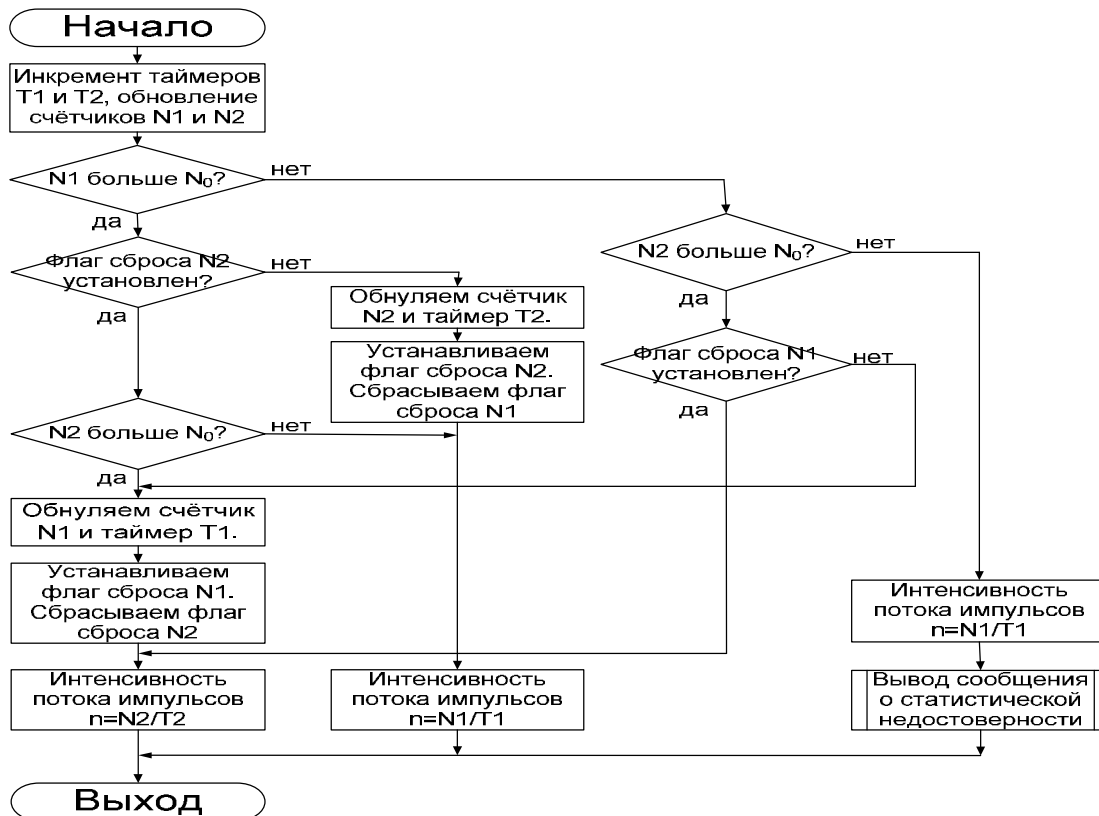


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма измерения интенсивности потока импульсов измерительного модуля

Сами спектры для всех возможных вариантов рассчитывались с помощью библиотеки программ GEANT-4 и использовались для обучения нейронной сети. Расчётные спектры для дисков толщиной 0 мм (нет дисков) - 180 мм представлены на рис.6.

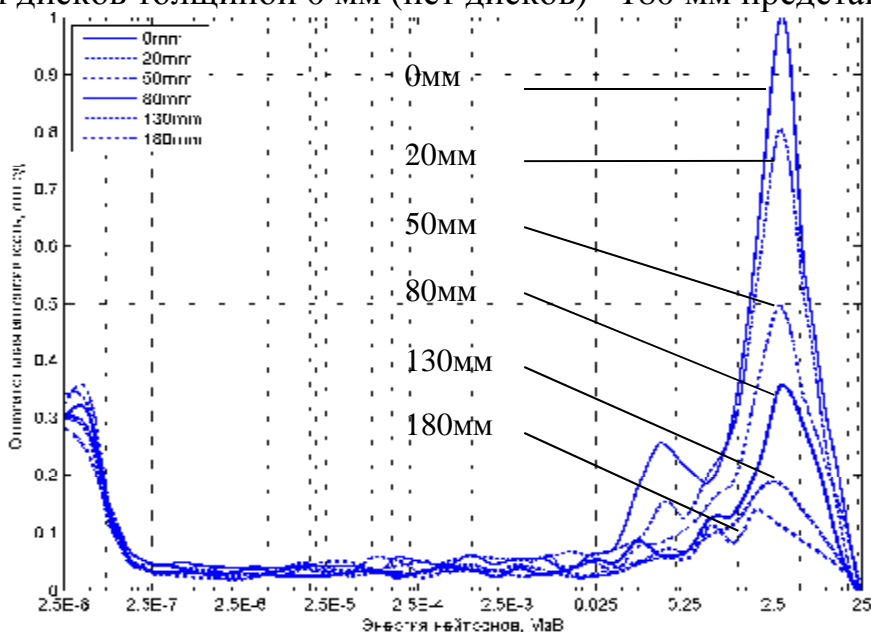


Рисунок 6 – Энергетические спектры потоков нейтронов, достигших детектора, с экранированием источника и замедляющими дисками различной толщины

При восстановлении энергетического спектра нейтронного излучения на девяти десятичных интервалах получены следующие результаты. Среднеквадратическая погрешность определения спектральных плотностей по всем спектрам составляет 3,4 %. Среднеквадратическая погрешность определения интегральных плотностей по всем реализациям опорных нейтронных полей составляет 2,4 %. определения мощности экви-

валентной дозы нейтронного излучения – 11,9 %. Максимальная относительная ошибка определения мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения при варианте разбивки спектра на 9 диапазонов составила 11,9 %, при разбивке на 3 диапазона – 41,45 %.

Таким образом, полученные результаты подтверждают высокую эффективность предложенного способа построения нейтронного спектрометра реального времени, что говорит о достижении целей исследования. Кроме того, подтверждается целесообразность запуска в производство модифицированного прибора МКС-03СМ с сохранением всех его функций при многократном уменьшении погрешностей измерения и добавлением функции измерения спектра нейтронного излучения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведена оценка современного состояния проблемы дозиметрии и спектрометрии нейтронного излучения. На основании проведённого анализа сделаны выводы об актуальности создания нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей. Предложено решение проблемы, связанной с необходимостью получения представительных обучающей и проверочной выборок для их обучения.

2. Создана система имитационного моделирования для исследования вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения, состоящая из комплекса моделирующих программ и базы данных опорных спектров, позволяющая генерировать обучающую и проверочную выборки модельных спектров необходимого объёма по базовым опорным спектрам, моделировать блоки детектирования с разнообразными спектральными характеристиками входящих в них детекторов и исследовать различные варианты типов и конфигураций нейронных сетей, используемых для вычислительного восстановления спектров с оценкой достижимой погрешности восстановления, отличающаяся возможностью использования различных наборов базовых спектров и различных блоков детектирования.

3. Разработана методика обучения входящих в состав нейтронного спектрометра-дозиметра нейронных сетей, основанная на принципе обучения с учителем, отличающаяся использованием результатов имитационного моделирования спектров нейтронных источников, спектральных характеристик используемых детекторов и модельных реализаций их выходных сигналов, позволяющая снять ограничения по использованию нейронных сетей для обработки сигналов детекторов в нейтронных спектрометрах, связанные с необходимостью проведения значительного числа экспериментов для получения состоятельной обучающей выборки. Выбрана оптимальная архитектура и конфигурация нейронных сетей для вычислительного восстановления спектра нейтронного излучения, обеспечивающая минимизацию среднеквадратической ошибки при приемлемой сложности нейронной сети.

4. Предложен способ измерения интенсивности стохастических потоков импульсов, обеспечивающий устранение противоречия между статистической погрешностью и затратами времени на один цикл измерения; уменьшение времени реакции на изменение интенсивности излучения; уменьшение требований к объёму буфера для хранения всех усредняемых отсчётов и уменьшение времени расчёта значения интенсивности потока импульсов.

5. Разработаны алгоритмы работы и структурно-функциональная схема нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени, отличающаяся введением унифици-

рованных измерительного и вычислительного модулей, допускающих использование в спектрометре различных блоков детектирования.

6. Разработан и реализован в созданной испытательной установке способ получения нейтронных полей с разнообразной формой энергетических спектров, обеспечивающий возможность экспериментального исследования спектрометров нейтронного излучения и спектральных характеристик нейтронных детекторов.

7. Изготовлен макетный образец нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени и проведены его экспериментальные исследования на созданной испытательной установке, подтвердившие снижение погрешности определения плотностей тепловой, промежуточной и быстрой составляющих по сравнению с прототипным прибором до 100 раз и возможность восстановления энергетического спектра нейтронного излучения в реальном времени в девяти десятичных интервалах энергии со среднеквадратической погрешностью, не превышающей 5 %.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Гримов, А.А. Новый подход к разработке спектрометрического радиометра нейтронного излучения [Текст] / А.А. Гримов, В.Э. Дрейзин, Д.И. Логвинов, И.Н. Мазепа // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – №1. – С. 20–25. (Личное участие – 25%)

2. Гримов, А.А. Подбор и оптимизация состава детекторов для многодетекторного спектрометра нейтронного излучения [Текст] / А.А. Гримов, В.Э. Дрейзин, Д.И. Логвинов // АНРИ. – 2011. – №2. – С. 16–24. (Личное участие – 33%)

3. Гримов, А.А. Измерительный блок для нейтронного спектрометра реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей [Текст] / А.А. Гримов, В.Э. Дрейзин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика, медицинское приборостроение. – 2012. – № 2, Часть 3. – С. 223–228. (Личное участие – 50%)

4. Гримов, А.А. Создание опорных нейтронных полей для калибровки нейтронных спектрометров [Текст] / А.А. Гримов, В.Э. Дрейзин, Д.И. Логвинов // АНРИ. – 2013. – №4. – С.8–13. (Личное участие – 33%)

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

5. Построение энергетических спектров нейтронного излучения с использованием нейронных сетей [Программа для ЭВМ] / Гримов А.А. / – № 2011619067. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.11.2011. Заявка № 2011617317 от 30.09.2011.

6. Моделирование энергетических спектров нейтронного излучения с произвольным разбиением их на энергетические интервалы [Программа для ЭВМ] / Гримов А.А., Мазепа И.Н. / – №2011619071. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.11.2011. Заявка № 2011617322 от 30.09.2011 (Личное участие – 50%)

Монографии

7. Дрейзин, В.Э. Спектрометрические измерения нейтронного излучения: моногр. [Текст] / В.Э. Дрейзин, С.Г. Емельянов, А.А. Гримов. – Курск: Издательство ЮЗГУ, 2011–316 с. – ISBN 978-5-7681-0673-7. (Личное участие – 33%)

8. Дрейзин, В.Э. Нейтронная спектрометрия. Современное состояние и моделирование многодетекторного спектрометра реального времени: моногр. [Текст] / В.Э. Дрейзин, А.А. Гримов, Д.И. Логвинов – Saabrücken, Germany: LAPLAMBERT Academic Publishing GmbH & Co KG, 2012 – 432 с. – ISBN 978-3-659-15242-9. (Личное участие – 33%)

Прочие публикации

9. Гримов, А.А. Разработка имитационной моделирующей системы спектрометрического радиометра нейтронного излучения [Текст] / А.А. Гримов, В.Э. Дрейзин // «Диагности-

ка-2009»: материалы 1-й Международной научно-технической конференции, 13-15 мая 2009 г., г. Курск: Курский государственный технический университет. – С.189–192. (Личное участие – 50%)

10. Гримов, А.А. Проблемы построения нейтронного спектрометра с вычислительным определением интегральной плотности потока нейтронов [Текст] / А.А. Гримов, В.Э. Дрейзин, А.В. Кочура, Е.П. Кочура // Актуальные проблемы развития прикладной математики в энергетике, энергоэффективности и информационно-коммуникационных технологиях: материалы Международной научной конференции, 27 октября 2009 г., М.: МГТУ им. Баумана. – С.269–273. (Личное участие – 25%)

11. Гримов, А.А. Имитационное моделирование спектрометров нейтронного излучения [Текст] / А.А. Гримов, В.Э. Дрейзин, Е.П. Кочура // Актуальные проблемы развития прикладной математики в энергетике, энергоэффективности и информационно-коммуникационных технологиях: материалы Международной научной конференции, 27 октября 2009 г., М.: МГТУ им. Баумана. – С.273–277. (Личное участие – 33%)

12. Гримов, А.А. Модернизация радиометра-дозиметра нейтронного излучения МКС-03С [Текст] / А.А. Гримов // «Диагностика-2011»: материалы Международной научно-технической конференции, 11-13 апреля 2011 г., г. Курск: Юго-Западный государственный университет. – С.37–39.

13. Гримов, А.А. Моделирование спектральных характеристик детекторов нейтронного излучения [Текст] / А.А. Гримов, Д.И. Логвинов // «Найновите постижения на европейската наука - 2012», Том 17. Экология. География и геология. Селскостопанство: материалы за 8-а международна научна практична конференция, 17-25 юни 2012, г. София: БялГРАД- БГ. – С.22–26. (Личное участие – 50%)

14. Гримов, А.А. Измерительный блок для нейтронного спектрометра реального времени [Текст] / А.А. Гримов, Д.И. Логвинов // «Найновите постижения на европейската наука - 2012», Том 19. Технологии. Физическа култура и спорт: материалы за 8-а международна научна практична конференция, 17-25 юни 2012, г. София: БялГРАД- БГ. – С.72–76. (Личное участие – 50%)

15. Гримов, А.А. Создание опорных нейтронных полей с разнообразными по форме энергетическими спектрами [Текст] / А.А. Гримов, В.Э. Дрейзин, Д.И. Логвинов // «Диагностика-2013»: сборник материалов Международной научно-технической конференции, 14-15 мая 2013 г., г. Курск: Юго-Западный государственный университет. – С.22–27. (Личное участие – 33%)

16. Гримов, А.А. Выбор оптимальной архитектуры, конфигурации и методики обучения нейронных сетей в специализированном устройстве для анализа нейтронных потоков в реальном времени [Текст] / А.А. Гримов // Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке: материалы VIII Международной научно-практической конференции, 29-30 августа 2014 г., М. – С.15-17.

17. Гримов, А.А. Алгоритмы вычислительного восстановления спектров и эквивалентной дозы в специализированном устройстве для анализа нейтронных потоков в реальном времени [Текст] / А.А. Гримов // Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке: материалы VIII Международной научно-практической конференции, 29-30 августа 2014 г., М. – С.12-14.

ЛР ИД № 00670 от 05.01.2000 г.

Подписано к печати « 3 » февраля 2015 г.

Усл. печ. л.1 Тираж 100 экз.

Заказ №187.

Полиграфический отдел «Госуниверситет-УНПК»

302030, г. Орел, ул. Московская, 65