

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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 (технические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
**на соискание учёной степени кандидата технических наук**

**Научный руководитель:**  
**Дрейзин В.Э.**  
доктор технических наук, профессор

Курск – 2014

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ДОЗИМЕТРИИ И СПЕКТРОМЕТРИИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	16
1.1. Существующие методы спектрометрии нейтронного излучения.....	16
1.1.1. Особенности и основные проблемы дозиметрии и спектрометрии нейтронного излучения.....	16
1.1.2. Общая классификация методов нейтронной спектрометрии.....	17
1.1.3. Времяпролётный и гравиметрический методы.....	18
1.1.4. Метод активационного анализа.....	20
1.1.5. Методы, использующие протоны отдачи.....	21
1.1.6. Многошаровой метод с использованием замедлителей нейтронов.....	23
1.2. Методы и алгоритмы вычислительного восстановления спектра, используемые в активационном анализе.....	26
1.3. Методы и алгоритмы вычислительного восстановления спектра, используемые в нейтронной спектрометрии на основе протонов отдачи.....	33
1.4. Методы и алгоритмы вычислительного восстановления спектра, используемые в нейтронной спектрометрии на основе многошарового метода.....	37
1.5. Концепция построения нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени.....	40
1.6. Формулировка частных задач исследования .....	45
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ТРЁХКАНАЛЬНОГО БЛОКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БДКС-05С .....	48
2.1. Постановка задачи. Общее описание системы моделирования.....	48
2.2. Подбор и моделирование базовых энергетических спектров нейтронных потоков для создания обучающей выборки.....	49
2.3. Моделирование функций спектральных чувствительностей трёхканального блока детектирования БДКС-05С .....	54
2.4. Выбор оптимальной архитектуры, конфигурации и методики обучения нейронных сетей для решаемых задач.....	57
2.4.1. Постановка задачи.....	57
2.4.2. Выбор архитектуры нейронных сетей.....	58
2.4.3 Выбор конфигураций используемых нейронных сетей.....	61
2.4.4. Выбор алгоритмов обучения нейронных сетей.....	64

<b>3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ БЛОКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БДКС-05С .....</b>	<b>67</b>
3.1. Постановка задачи.....	67
3.2. Раздельное обучение нейронных сетей для отдельных групп базовых спектров.....	68
3.2.1. Нейронная сеть для восстановления спектров нейтронных потоков от радиоизотопных источников.....	68
3.2.2. Нейронная сеть для восстановления спектров нейтронов утечки из критических сборок.....	70
3.2.3. Нейронная сеть для восстановления спектров нейтронов утечки из защиты реакторов различных типов.....	71
3.2.4. Нейронная сеть для восстановления спектров потоков нейтронов в активной зоне реакторов.....	71
3.2.5. Нейронная сеть для восстановления спектров потоков нейтронов на рабочих местах персонала в защищённых зонах.....	73
3.3. Обучение единой нейронной сети для всех групп базовых спектров...	74
3.4. Имитационное моделирование промышленного радиометра- дозиметра нейтронного излучения МКС-03С с использованием базовых спектров.....	80
3.4.1. Построение математической модели радиометра-дозиметра нейтронного излучения МКС-03С.....	80
3.4.2. Результаты имитационного моделирования радиометра- дозиметра МКС-03С с использованием базовых спектров.....	85
3.4.3. Результаты имитационного моделирования радиометра- дозиметра МКС-03С с дополнительной совместной обработкой получаемой от блока детектирования информации с помощью нейронных сетей.....	91
3.5. Анализ полученных результатов.....	92
<b>4. ПОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА- ДОЗИМЕТРА НА ОСНОВЕ БЛОКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БДКС-05С .....</b>	<b>94</b>
4.1. Структурная схема макетного образца нейтронного спектрометра на основе блока детектирования БДКС-05С .....	94
4.2. Измерительный модуль нейтронного спектрометра.....	95
4.3. Вычислительный модуль вторичной обработки информации по нейросетевым алгоритмам.....	97
4.3.1. Структурная схема вычислительного модуля.....	97
4.3.2. Разработка способа измерения интенсивности	

стохастических потоков импульсов измерительного модуля .....	102
4.3.3. Разработка алгоритмов, реализующих эмуляцию предварительно обученных нейронных сетей.....	108
4.3.4. Алгоритмы вычисления дозиметрических величин по вычисленным спектральным плотностям нейтронных потоков.....	110
4.4. Создание нейтронной испытательной установки с целью обеспечения возможности получения опорных нейтронных полей с разнообразной формой энергетического спектра для поверки созданного нейтронного спектрометра.....	112
4.5. Результаты экспериментального исследования макетного образца нейтронного спектрометра на созданной нейтронной испытательной установке.....	117
4.5.1. Сопоставление показаний блока детектирования БДКС-05С по тепловой, промежуточной и быстрой составляющих опорных нейтронных полей с их расчётными значениями.....	117
4.5.2. Измерение усреднённых спектральных плотностей опорных нейтронных полей на трёх интервалах .....	120
4.5.3. Измерение усреднённых спектральных плотностей опорных нейтронных полей на девяти децимальных интервалах .....	124
4.5.4. Анализ погрешностей определения мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения с помощью созданного нейтронного спектрометра.....	133
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	137
Библиографический список .....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	160

## Введение

**Актуальность темы исследования.** Измерение энергетического спектра нейтронных потоков различных источников нейтронного излучения является очень сложной и до конца не решённой во всём мире проблемой, важность которой и для дальнейшего развития ядерной физики, и для решения насущных практических задач в ядерной энергетике и обеспечении радиационной безопасности ядерных объектов трудно переоценить. Нейтронное излучение играет определяющую роль в работе ядерных реакторов и является наиболее опасным для живых организмов из всех видов ионизирующих излучений. При этом и для проектирования и управлении ядерными реакторами, и для расчёта амбиентного эквивалента поглощённой дозы нейтронного излучения (характеризующего его физиологическое воздействие на организм человека) необходимо знать не только интегральную плотность воздействующих нейтронных потоков, но и их энергетический спектр, т.е. распределение плотности потока по энергии нейтронов [1]. Энергетические спектры реальных нейтронных полей в различных зонах ядерных реакторов и в помещениях за биологической защитой, а также спектры нейтронных излучений ядерного топлива, радиоизотопных источников и радиоактивных отходов могут быть самыми разнообразными по форме и простираются в энергетическом диапазоне от сотых долей электрон-вольт (тепловые нейтроны) до единиц и десятков мегаэлектрон-вольт (быстрые нейтроны), т.е., как минимум, на 9 порядков [2-5]. Таким образом, важность оперативных измерений интегральной плотности нейтронных потоков и их энергетического спектра несомненна. Тем не менее, техника измерений нейтронных полей во всём мире находится на весьма низком уровне.

Проблемами нейтронной спектрометрии в нашей стране занимались учёные ВНИИФТРИ – Брегадзе Ю.И., Масляев П.Ф., Ярына В.П., Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. и другие. Ими были созданы методы восстановления нейтронных спектров [5-7], способы аппроксимации нейтронных спектров [9], методы оценки погрешности определения спектров

[10], а также детекторы нейтронов [11] и методы применения их для измерения спектров [12]. Множество работ посвящено проблемам метрологии нейтронного излучения [13-23]. Бойцовым А.А. проводились работы по метрологическому обеспечению нейтронных измерений на высокопоточных реакторах [24]. Множество работ посвящено активационному анализу - климентовым В.Б. был всесторонне исследован активационный метод спектрометрии нейтронов [25]; Рязановым Д.К. была создана система нейтронно-дозиметрического сопровождения на исследовательских реакторах на основе активационного метода [26]; Терешкиным В.И. разработан набор активационных детекторов для проведения радиационных исследований [27]. Спектрометрами нейтронного излучения занимались Кухтевич В.И. с сотрудниками – ими был разработан однокристальный нейтронный спектрометр [28], коллектив учёных СНИИП, разработавших прототипный дозиметр-радиометр МКС-03С [29], Санников А. В. с сотрудниками (ГНЦ ИФВЭ), разработавшие один из первых российских образцов многошарового спектрометра нейтронов [30] и развившие методы нейтронной спектрометрии на больших протонных ускорителях [31]. Сцинтилляционными спектрометрами занимались Кащук Ю.А. [32], Абдурашитов Д.Н. [33]. Жуковым А.П. выполнен расчёт процессов детектирования нейтронов в спектрометре по времени замедления в свинце [34], Деденко Д.Л. проведено моделирование характеристик многомодульных детекторов нейтронного излучения [35].

За рубежом проблемами нейтронной спектрометрии и нейтронными спектрометрами занимались Bramblett R. L. , R. I. Ewing, T. W. Bonner, создавшие новый класс приборов – спектрометры Боннера [36], получивших в США и Европе достаточно широкое распространение [37-57]. Вопросами получения спектральных чувствительностей данных спектрометров занимались D.J.Thomas, A. V. Alevra и другие [37-45]. M. Matske, S. Avdic, V. Mares исследовали методы вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения по результатам измерений с помощью спектрометров Боннера [50-57]. 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. Соответственно отсутствует и промышленный выпуск таких спектрометров.

Практически все существующие промышленные приборы для измерений нейтронного излучения предназначены для измерений интегральной плотности нейтронных потоков. При этом большинство из них измеряют лишь тепловую составляющую измеряемых потоков или укомплектованы замедлителями нейtronов, снижающими энергию нейtronов до тепловой. В лучшем случае весь поток разделяется на две или три энергетические составляющие. В первом случае – на тепловые нейtronы (с энергией от 0,025 эВ до 0,4-0,5 эВ) и все остальные (с энергией от 0,5 эВ до 15-20 МэВ). Во втором – на тепловые, промежуточные (с энергией от 0,4 эВ до 0,2 МэВ) и быстрые (с энергией от 0,2 до 15-20 МэВ). В нейтронных дозиметрах по результатам этих измерений автоматически или вручную определяются производные дозовые показатели. Но и в том, и в другом случае данные приборы характеризуются значительными и непредсказуемыми погрешностями, возникающими из-за сложного характера зависимости чувствительности нейтронных детекторов от энергии нейtronов при несоответствии энергетического спектра измеряемого потока и спектров образцовых источников нейтронного излучения, по которым проводилась калибровка приборов. Один из приборов второго типа [29] экспериментально исследовался автором и показал полную непригодность к измерению потоков с произвольной формой спектра.

Основная проблема при измерении интегральной плотности нейтронного потока состоит в том, что не существует детекторов, имеющих одинаковую чувствительность к нейtronам любых энергий. В диапазоне энергий от сотых долей электрон-вольт до 15-20 МэВ чувствительность используемых на практике нейтронных детекторов может меняться в десятки и даже сотни раз. Отсюда понятна зависимость показаний приборов, измеряющих интегральную плотность потока нейtronов, от его энергетического спектра. Традиционное решение здесь состоит в том, чтобы принудительно резко сузить

энергетический спектр нейтронов, попадающих на детектор. Это делается с помощью замедлителей нейтронов и фильтров, которые чаще всего гасят скорость быстрых и промежуточных нейтронов до тепловой или, наоборот, отсекают всю тепловую составляющую нейтронного потока (кадмиеевые фильтры). Но при этом возникает несколько проблем:

Во-первых, после замедлителя спектр нейтронов, конечно, сужается, но всё же существенно превышает тепловой диапазон. Так даже при использовании полиэтиленового замедлителя толщиной 25 см плотность надтепловых нейтронов в выходном потоке почти вдвое превышает плотность тепловых (при использовании первичного потока от Ru-Be-источника). При этом форма и ширина энергетического спектра нейтронов, прошедших через замедлитель, зависят как от первоначальной формы спектра (до замедлителя), так и от свойств и толщины замедлителя. А поскольку в таких случаях применяют детекторы с  $1/v$ -характеристикой (газонаполненные  $^3\text{He}$  и  $^{10}\text{B}$  детекторы), чувствительность которых обратно пропорциональна скорости нейтронов, то и в этом узком диапазоне энергий чувствительность детектора не остается постоянной (хотя изменяется уже не на порядки, а в разы).

Во-вторых, часть нейтронов, попадающих в замедлитель, поглощается им (время жизни свободных нейтронов в плотном веществе составляет микросекунды), а часть рассеивается и не попадает в сам детектор. Точно определить, какая доля нейтронов, попавших в замедлитель, окружающий детектор, достигнет самого детектора, практически невозможно.

В-третьих, замедлитель не только уменьшает скорость нейтронов, но и хаотизирует её направление, и на сам детектор нейтроны могут падать со всех сторон. В то же время нейтронные детекторы (особенно газонаполненные) чувствительны к их ориентации относительно направления потока нейтронов. От этого зависит их эффективность (т.е. вероятность того, что попавший в него нейtron будет зарегистрирован). Например, для газонаполненных детекторов чувствительность к нейtronам, треки которых парал-

лельны его оси, в несколько раз выше чувствительности к поперечно пролетающим нейtronам.

В-четвёртых, широко применяемые в качестве нейтронных детекторов газовые коронные счётчики на основе гелия-3 (при захвате нейтрона ядро  ${}^3\text{He}$  превращается в ядро трития  ${}^3\text{H}$  с испусканием протона, который и инициирует газовый разряд:  $\text{n} + {}^3\text{He} \rightarrow \text{p} + {}^3\text{H} + 764 \text{ кэВ}$ ) или на основе трифторида бора весьма велики по габаритам (20-30 мм в диаметре и 150-300 мм в длину). При таких габаритах самих детекторов создать одинаковые условия замедления нейтронов для всего объёма детектора при погружении его в замедлитель весьма сложно. Особенно, если мы хотим получить блок детектирования приемлемых для переносного прибора габаритов и использовать разделение потока нейтронов на несколько энергетических составляющих путём использования нескольких детекторов, погружаемых в замедлитель на различную глубину.

Все эти неопределённости пытаются преодолеть, производя градуировку прибора от образцового источника нейтронного излучения с известным спектром и известной плотностью потока. Но совершенно очевидно, что спектр реального измеряемого нейтронного потока не будет совпадать со спектром образцового потока, по которому производилась градуировка прибора. А все указываемые в паспорте прибора погрешности определяются именно для образцового потока с известным спектром. Каковы же будут реальные погрешности для потока с неизвестным спектром, сказать сложно. Они могут в десятки раз превысить значения паспортных погрешностей, если спектр измеряемого потока резко отличается от спектра того потока, по которому производилась калибровка прибора.

Единственным путём кардинального повышения точности измерения интегральной плотности нейтронного потока при неизвестном его спектре является переход к спектральным измерениям. Этим и обосновывается необходимость разработки нейтронного спектрометра, способного проводить измерения в режиме реального времени. При этом совершенно очевидно, что

деление всего энергетического диапазона нейтронов всего на две или три полосы не решает данную задачу. Этого недостаточно даже для дозиметров нейтронного излучения, поскольку биологическое воздействие нейтронов очень сильно зависит от их энергии (биологические дозовые коэффициенты для тепловых и быстрых (15 МэВ) нейтронов отличаются в 100 раз!), и при делении всего энергетического диапазона всего на две или три части эквивалентная доза будет определяться с большими погрешностями. А для исследования нейтронных полей ядерных реакторов, для исследования спектральной чувствительности детекторов нейтронного излучения и при проведении разнообразных ядерно-физических и биологических экспериментальных исследований потребность в достаточно точных и детальных спектральных измерениях является ещё более острой.

Реальные спектрометрические исследования нейтронных потоков проводят либо активационным методом с помощью определённых наборов веществ-индикаторов, либо на уникальных времяпролётных экспериментальных установках, где источником нейтронов являются либо ядерные реакторы, либо ускорители заряженных частиц. Понятно, что такие методы и установки далеки от приборной реализации спектрометров. Наибольшим приближением к такой реализации являются нейтронные многошаровые спектрометры Боннера, но и они реализуют лабораторный метод исследования с обработкой результатов ряда из нескольких десятков прямых измерений на ЭВМ и непригодны для спектральных измерений потоков нейтронов в режиме реального времени. Поэтому спектрометрами их можно назвать лишь с большой натяжкой.

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 кон-

троля 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 схемотехнического 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 спек-

тров 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 уменьшении 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 природ-

ной 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-коммутационных технологиях” (г. Москва, МГТУ им. Баумана, 2010);
- на Международной научной конференция, “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 конференция: «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 15 научных работах общим объемом 49,2 п.л., из них доля автора – 17,0 п.л., в том числе 4 публикаций общим объемом 1,7 п.л. 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, 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 [60, 65, 66, 80] – структурно-функциональная организация и принципы функционирования нейтронного спектрометра реального времени; в [58, 65-68, 70-72, 74, 76] – система имитационного моделирования для исследования вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения и методика обучения входящих в состав нейтронного спектрометра-дозиметра нейронных сетей; в [64, 81] – способ получения опорных нейтронных полей с разнообразной формой энергетических спектров; в [59, 75, 79] – критерии подбора состава детекторов многодетекторного блока детектирования для спектрометра нейтронного излучения.

**Структура и объем работы.** 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.

Приложение состоит из четырёх пунктов – А, Б, В, Г.

# 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ДОЗИМЕТРИИ И СПЕКТРОМЕТРИИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

## 1.1. Существующие методы спектрометрии нейтронного излучения

### 1.1.1. Особенности и основные проблемы радиометрии и дозиметрии нейтронного излучения

Трудность измерения энергетического спектра нейтронного излучения определяется тем, что энергию нейтрона нельзя определить путём воздействия магнитного или электрического поля на траекторию его движения, как энергию заряженных частиц, а также тем, что нейтроны непосредственно не вызывают ионизацию и возбуждение атомов, а реагируют только с их ядрами при столкновениях с ними [84]. Следовательно, по интенсивности вспышки света в сцинтилляторе или числу пар ионов в газе или полупроводнике нельзя судить об энергии нейтронов, так как нейtron прямо не вызывает этих процессов.

Однако при взаимодействии нейтронов с ядрами атомов вещества протекают разнообразные ядерные реакции, в том числе с образованием гамма-квантов и заряженных частиц, по которым можно не только зарегистрировать нейтрон, но и получить информацию об его энергии. Существуют также прямые методы определения скорости нейтрона путём измерения времени пролёта нейтроном определённого пути  $L$  или измерения искривления траектории движения нейтронов в вакууме в поле тяготения Земли. Однако для реализации этих методов приходится создавать громоздкие и дорогие экспериментальные установки, содержащие мощные импульсные источники нейтронов, длинные (до сотен метров) каналы высокого ваккуума, а также сложную электронную регистрирующую и управляющую аппаратуру. Причём эти методы не пригодны для спектральных измерений произвольных нейтронных потоков, а значит, в принципе не могут решить поставленную проблему.

В ядерной энергетике проблема измерений спектров нейтронных потоков в различных зонах ядерных реакторов решается путём использования ме-

тода активационного анализа, при котором в исследуемые зоны ядерного реактора помещаются на определённое время вещества-индикаторы, и по наведённой в них активности, которая измеряется после извлечения их из измеряемого нейтронного потока, судят о плотности нейтронного потока. Благодаря тому, что различные вещества-индикаторы селективны к различным участкам энергетического спектра нейтронов, при использовании их определённых наборов появляется возможность по результатам измерений наведённой в них активности восстановить вычислительным путём энергетический спектр измеряемого потока. Конечно, и это не приборный, а лабораторный метод и в режиме реального времени его использовать невозможно.

Наиболее близок к приборному методу многошаровой спектрометр Боннера, но и он не пригоден к измерениям в режиме реального времени и фактически тоже реализует лабораторный метод исследования с последующим восстановлением энергетического спектра измеряемого нейтронного излучения вычислительным путём на ЭВМ.

Ниже основные методы нейтронной спектрометрии рассматриваются более подробно.

### 1.1.2. Общая классификация методов нейтронной спектрометрии

Проблемам и методам измерения энергетического спектра нейтронных потоков посвящён обзор [85], опубликованный в ведущем европейском журнале по приборам и методам ядерных измерений «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research». В нём приводится следующая классификация методов нейтронной спектроскопии:

- 1) методы, в которых нейтроны рассеиваются, и энергия отражённых нейронов измеряется;
- 2) методы, основанные на измерении энергии заряженных частиц, полученных в ядерных реакциях, индуцируемых нейронами;
- 3) методы, в которых измеряется скорость нейронов;

4) пороговые методы, в которых минимальная энергия нейтронов показывается в виде появления индуцированных нейроном эффектов, таких как радиоактивность, гамма-излучение;

5) методы, в которых энергетическое распределение нейтронов определяется из данных от детекторов (или конфигураций детекторов), которые различны в энергетической зависимости их чувствительностей к нейtronам;

6) методы, основанные на дифракции нейтронов;

7) методы, в которых измеряется временное распределение замедления короткого импульса нейтронов высокой энергии в соответствующую среднюю энергию.

При этом к методам, пригодным для измерения энергетического спектра произвольных потоков нейтронов, относятся лишь методы 1, 2, 4 и 5-й групп. Однако, поскольку в ядерной физике для исследования взаимодействия нейтронов с различными ядрами наиболее широко используются импульсно-лучевые времяпролётные методы, которые являются, фактически, единственными прямыми методами измерения энергии нейтронов, сначала разберём их.

#### 1.1.3. Времяпролётный и гравиметрический методы

Прямым методом измерения скорости нейтронов является времяпролётный метод, который основан на измерении времени  $t$ , необходимого нейтрону для преодоления расстояния  $L$  от источника до детектора. Здесь  $L$  называют *пролётной базой спектрометра*. По скорости уже легко найти кинетическую энергию нейтрона. Для измерения времени  $t$  при известной пролётной базе  $L$  необходимо знать момент выхода нейтрона из источника (момент старта) и момент прихода его в детектор (момент финиша). Момент финиша совпадает с моментом детектирования нейтрона, и его определить легко, в то время как момент старта нейтрона остаётся неизвестным. Чтобы обойти эту трудность, используют импульсный источник нейтронов, в котором нейтроны испускаются в течение очень короткого момента времени, ко-

торый чётко фиксируется. Импульсный источник нейтронов создают двумя методами. В первом из них поток нейтронов от непрерывного источника (которым служит ядерный реактор) прерывают быстродействующим механическим затвором.

Второй метод состоит в том, что пучок ускоренных заряженных частиц на короткий момент времени отклоняют на определённую мишень, при бомбардировке которой происходят ядерные реакции, в результате которых испускаются нейтроны. Эти вторичные нейтроны и используются.

Известен и третий способ получения мощных импульсных источников нейтронов – с помощью импульсных ядерных реакторов. Один из таких реакторов ИБР-30 (импульсный быстрый реактор) построен в Дубне [86].

Примером времяпролётного спектрометра может служить Гатчинский нейtronный времяпролетный спектрометр – ГНЕЙС [87].

Совершенно очевидно, что нейtronные спектрометры по времени проёта в действительности не предназначены для спектральных измерений произвольных нейtronных потоков. Более того, они вообще не являются измерительными приборами, а представляют собой уникальные комплексы для проведения экспериментальных исследований в области ядерной физики.

Можно упомянуть ещё об одном прямом методе измерения скорости нейтронов – гравитационном, в котором используется источник непрерывного нейтронного излучения (ядерный реактор). Суть его состоит в использовании искривления траекторий движения нейтронов в длинном вакуумированном канале под действием силы тяжести Земли. Поскольку нейтроны, вылетающие из источника, под действием силы тяжести движутся по параболическим траекториям, соответствующим определённым энергиям, то создание условий для выделения одной траектории приведёт к монохроматизации нейтронов [92]. Для реализации этого условия на пути движения нейтронов устанавливается три коллиматора с узкими горизонтальными щелями (первый вблизи источника нейтронов, второй в апогее траектории и третий в конце пролётной базы). Несколько поколений таких спектрометров с пролёт-

ными базами в 500 и 1000 м было построено на базе импульсного источника нейтронов ИБР-30 в ГНЦ ОИЯИ г. Дубна [87]. Ещё одним примером может служить нейtronный спектрометр ТРОНС (Троицкий нейtronный спектрометр) мезонной фабрики ИЯИ РАН в г. Троицке [88].

Данные методы измерения скорости нейтронов имеют, в принципе, все те же недостатки, свойственные времяпролётному методу – они реализуются с помощью сложные уникальных лабораторных комплексов, ориентированных на работу с одним источником нейтронов.

#### 1.1.4. Метод активационного анализа

Активационный метод нейtronной спектрометрии до настоящего времени является наиболее широко применяемым методом измерения энергетического спектра постоянных во времени нейtronных потоков с разнообразной формой спектра. Суть его заключается в том, что определённые вещества (индикаторы) подвергаются бомбардировке нейtronами измеряемого потока в течение определённого времени. Под действием нейтронов образуются радиоактивные изотопы, которые распадаются с выделением заряженных частиц и квантов излучений. При этом число распадов в единицу времени (активность) пропорционально количеству образовавшихся радиоактивных ядер, а оно – потоку нейтронов, прошедшему через вещество за время экспозиции в исследуемом нейtronном потоке. Измеряя с помощью радиометров и спектрометров гамма-излучения наведённую в индикаторах активность, вычисляют плотность измеряемого потока нейтронов [25,89].

К индикаторам предъявляется общее требование приемлемого периода полураспада возникающих радиоактивных ядер. При слишком маленьком периоде активность индикатора сильно уменьшается за период между облучением и измерением и в ходе процесса измерения, а при слишком большом периоде слишком большим становится время достижения активности насыщения а индикаторе и время измерения самой активности. Индикатор также не должен содержать заметного количества примесей других элементов, так

как в данном случае наведённая активность от данных примесей сильно исказит измеряемую активность основного изотопа.

Для проведения спектрального анализа нейтронного излучения активационным методом рекомендуются специальные наборы изотопов-индикаторов, в которые кроме спектрально-чувствительных индикаторов обязательно включаются  $1/v$ -индикаторы, у которых сечение реакции монотонно снижается с ростом энергии нейtronов без резонансных выбросов.

Активационный метод имеет ряд преимуществ перед другими методами измерения нейtronов. Путём выбора вещества индикатора можно в широких пределах изменять чувствительность метода к различным участкам энергетического спектра нейtronов. Индикатор может быть изготовлен небольших размеров. Кроме того, вследствие своих малых размеров, индикатор практически не влияет на поток нейtronов в измеряемом месте, что также трудно выполнить другими методами регистрации нейtronов. Индикаторы не чувствительны к гамма-излучению и могут применяться при большом гамма-фоне. Но активационный метод не даёт быстрой информации о нейтронном излучении. Он применяется при измерении постоянных потоков нейtronов и непригоден для измерения переменных во времени потоков нейtronов, например при пуске и остановке ядерного реактора. Таким образом, активационный метод не подходит для создания нейтронных спектрометров реального времени.

#### 1.1.5. Методы, использующие протоны отдачи

Данные методы используют упругое взаимодействие нейtronов с ядрами атомов лёгких элементов (главным образом, водорода и гелия). В приведенной в п. 1.1.2 классификации они обозначены как методы на основе рассеяния и отражения нейtronов.

Они реализуются с использованием газонаполненных нейтронных детекторов на основе водородных и метановых пропорциональных счётчиков, а также сцинтилляционных детекторов на основе органических кристаллов и

пластмасс. Ядра атомов водорода (протоны), выбитые нейтронами, вызывают в газонаполненных детекторах ионизацию атомов, а в сцинтиляционных детекторах световые вспышки, яркость которых пропорциональна энергии протонов отдачи. В обоих случаях на выходе детектора формируются импульсы, амплитуда которых пропорциональна энергии соответствующих протонов. Но энергия протонов зависит не только от энергии нейтронов, но и от угла столкновения нейтронов с ядрами атомов водорода. При этом максимальная амплитуда импульсов  $U_0$  будет соответствовать их лобовым столкновениям с ядрами водорода, а значит будет пропорциональна энергии этих нейтронов:

$$U_0 = aE_n \quad , \quad (1.1)$$

где коэффициент пропорциональности  $a$  можно найти экспериментально по результатам калибровочных измерений, проводимых с моноэнергетическими нейтронами известной энергии.

Таким образом, каждой спектральной линии нейтронов в идеальном случае должно соответствовать прямоугольное распределение амплитуд от нуля до  $U_0$ . Основной сложностью спектрометрических измерений с использованием данных детекторов является то обстоятельство, что, если измеряемый поток содержит нейтроны различных энергий, то амплитудный спектр будет представлять собой наложение этих распределений от нейтронов различных энергий, и восстановить по ним исходный спектр измеряемого потока нейтронов достаточно сложно, учитывая, что на аппаратурный спектр кроме энергии нейтронов влияет ещё целый ряд трудно учитываемых факторов, таких как нелинейность световогохода за счёт многократного рассеяния нейтронов в сцинтилляторе и краевого эффекта за счёт выхода образовавшихся протонов за пределы сцинтиллятора, зависимость световогохода от угла движения протона отдачи в кристалле относительно его главной оси [90], зависимость световогохода от температуры сцинтиллятора и многих других. Ес-

ли же говорить об аппаратурном спектре нейтронного потока с непрерывным распределением нейтронов по энергии в достаточно широком диапазоне, то необходимо учитывать ещё зависимость сечения ( $n, p$ )-реакции от энергии нейтронов, а также зависимость эффективности детектора конечных размёров от энергии нейтронов. Поэтому восстановление спектра нейтронов по аппаратурному спектру протонов отдачи – достаточно сложная задача, в результате чего этим приборы не удалось довести до промышленной реализации. В [28, 90] рассматриваются теоретические основы и реализация экспериментальных таких приборов на основе кристалла стильбена и газонаполненных водородных и метановых счётчиков. Обработка экспериментальных амплитудных распределений протонов отдачи в таких спектрометрах проводится на ЭВМ. Но совершенно очевидно, что точно учесть все указанные воздействия на измеренный аппаратурный спектр расчётным путём невозможно. Поэтому и в этих программах приходится использовать априорную информацию о форме восстанавливаемого спектра и итерационные процедуры приближения расчётных моделей к результатам измерений.

#### 1.1.6. Многошаровой метод с использованием замедлителей нейтронов

Данный метод основан на принудительной деформации спектра измеряемого потока с помощью замедлителей нейтронов различной толщины с измерением полученной интегральной плотности нейтронного потока. Результаты измерений, полученные с «голым» детектором и с детектором, последовательно помещаемым в полость замедлителей различных диаметров, обрабатываются на ЭВМ с целью вычислительного восстановления спектра первоначального потока. Впервые спектрометр, реализующий данный метод, был предложен ещё в 1960 г. [36] и получил название спектрометра Боннера. В Европе и Америке спектрометры Боннера получили весьма широкое распространение. Было разработано множество вариантов его конструктивного исполнения, отличающихся друг от друга как количеством используемых шаров-замедлителей нейтронов (от 4 до 12) и используемых детекторов,

так и способами получения функций спектральной чувствительности и алгоритмами вычислительного восстановления спектра измеряемого потока по результатам измерений с использованием полного набора шаров-замедлителей нейтронов [36-42].

Принцип действия спектрометров Боннера состоит в том, что нейтроны измеряемого потока, проходя через замедлитель (сферы) с разной толщиной стенок, замедляются рассеиваются и частично поглощаются веществом замедлителя. Все эти процессы приводят к трансформации энергетического спектра потока, попадающего в детектор. Таким образом, для каждой  $i$ -й сферы спектральные функции чувствительности  $R_i(E)$  отличаются друг от друга.

Если детектор, который находится в  $i$ -й сфере, имеющий функцию чувствительности  $R_i(E)$ , помещён в нейtronное поле со спектральным флюенсом  $\phi(E)$ , то интегральный отклик детектора  $M_i$  можно найти математическим умножением  $R_i(E)$  на  $\phi(E)$  [36], т.е:

$$M_i = \int R_i(E) j(E) dE \quad (1.2)$$

Хорошие аппроксимации на  $R_i(E)$  могут быть получены из имитационных вычислений, на основе измерений с хорошо характеризованными моноэнергетическими и радионуклидными источниками нейтронов. А далее, используя эти функции и проводя измерения потока с неизвестным спектром с использованием всех этих сфер, можно восстановить по ним вычислительным путём спектр этого потока  $\phi(E)$ . Непрерывный спектр нейтронов при этом представляется ступенчатой функцией, т.е. в виде массива элементов  $\phi_j$ , где  $\phi_j$  – это флюенс в  $j$ -м энергетическом интервале, взятом от энергии  $E_j$  до  $E_{j+1}$ . Тогда интеграл в (1.2) заменяется суммой:

$$M_i = \sum_{j=1}^n R_{ij} j_j \quad (1.3)$$

Уравнение является приближением выражения (1.2), степень приближения повышается с увеличением числа  $m$  групп, определяемым числом используемых сфер-замедлителей разного диаметра. Выражение (1.3) представляет собой набор  $m$  линейных уравнений, и если  $m \geq n$ , то они могут быть решены, используя метод наименьших квадратов, относительно значений  $\phi_j$ . Однако так как  $m$  обычно менее 10, то такое решение может обеспечить лишь довольно грубое представление спектра, поскольку происходит его «размытие» по широким интервалам энергий. Для более детального представления спектра необходимо увеличивать число интервалов ступенчатой аппроксимации. Поэтому обычно число интервалов  $n > m$ . Это означает, что выражение (1.3) может быть решено относительно  $\phi_j$  только с помощью дополнительной априорной информации о форме отдельных участков спектра.

Наиболее часто для расчёта матрицы чувствительностей по экспериментальным данным измерений опорных нейтронных полей применяется программа *ANISN*. Однако отсутствие опорных строго моноэнергетических полей нейтронов затрудняет достоверное определение чувствительностей для различных сфер в заданных энергетических диапазонах. Сравнение результатов применения различных методик определения матриц чувствительностей к одним и тем же системам Боннера показывает определённые различия между ними, что подтверждает существование неопределённости в самих методах получения этих матриц.

Наиболее целесообразным подходом к расчёту функций чувствительности при этом является метод Монте-Карло. Примеры таких расчётов для систем с  ${}^3\text{He}$ -счётчиком описаны в [38], для систем с детектором на основе  $\text{LiI}(\text{Tl})$  – в [49]. Однако, сравнение матриц чувствительностей, полученных разными авторами для одних и тех же модификаций спектрометра Боннера, показывает наличие существенных расхождений между ними. Они определяются не только различиями в методиках измерений и вычислений, но и неточностями определения свойств материала замедлителя и параметров детектора.

В России известно лишь о двух моделях спектрометра Боннера. Один из них построен в ГНЦ ИФВЭ (г. Протвино) на базе серийного радиометра РСУ-01 и получил название СБ-РСУ-01. Он описан в [30], а пример его использования для измерений реальных потоков нейтронов – в [4].

Ещё одна реализация спектрометра Боннера приведена в [92]. В данном случае он был реализован на базе дозиметра ДКС-96Н с набором полиэтиленовых замедлителей и внешним кадмиевым экраном.

\* \* \*

Рассмотрев методы нейтронной спектрометрии, можно сделать вывод о полной непригодности гравиметрических и времяпролётных методов для спектрального анализа произвольных нейтронных потоков в реальном времени. Оставшиеся методы (активационный, метод протонов отдачи и многошаровой метод) недостаточно оперативны (не применимы для измерения нейтронных потоков в реальном времени) и характеризуются необходимостью использования достаточно сложных методов и алгоритмов для вычислительного восстановления спектров нейтронных потоков по результатам измерений. Разберём данные методы и алгоритмы подробнее.

## **1.2. Методы и алгоритмы вычислительного восстановления спектра, используемые в активационном анализе**

Методы восстановления спектров потоков нейтронов по экспериментальным данным активационных измерений [13,25,89] разделяются на *математические* и *полуэмпирические*. В первом случае спектр определяют по данным активационных измерений без введения предположений о его форме. Во втором случае заранее вводится вид математической модели спектра, определяющей его форму.

К математическим методам восстановления спектров нейтронов относится целый ряд методов, среди которых можно выделить метод ортонормального разложения (метод Трайса и Хартмана), полиномиальный и орто-нормально-полиномиальный методы [25].

### ***Метод ортонормального разложения (метод Трайса и Хартмана).***

При облучении набора из  $n$  индикаторов результаты измерений их наведённой активности  $R_i$  будут выражаться системой из  $n$  уравнений вида [25]

$$R_i = \int_{En0}^{\infty} \Phi(E) \sigma_i(E) dE, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n . \quad (1.4)$$

где  $\Phi(E)$  – спектр нейтронов,

$\sigma_i(E)$  – сечение реакции индикатора.

В итоге мы получаем систему интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода с дискретным заданием  $i$ . Их необходимо разрешить относительно  $\Phi(E)$ . Математически эта задача является некорректной, т.е. допускает множество решений, и для сужения класса возможных решений необходимо вводить дополнительные условия. В частности, такими условиями могут быть:

- положительность, непрерывность и гладкость функции  $\Phi(E)$ ;
- адекватность по отношению к результатам измерений  $R_i$  (т.е. устойчивость решений при небольших вариациях  $R_i$ , обусловленных погрешностями измерений);
- соответствие форме априорного спектра, задаваемого на основе предварительной информации об источниках излучения и условий его формирования.

В [13 и 25] рассматривается два подхода к решению этой задачи: восстановление спектра по результатам нейтронно-активационных измерений и корректировка априорно заданного спектра по результатам этих измерений. Как видим, различие в них состоит только в отсутствии или присутствии третьего условия регуляризации задачи. В [90] первый подход назван математическим, а второй – полуэмпирическим. Такое разделение задачи существенно в том смысле, что для достоверного осуществления первого подхода необходимо, чтобы для каждого энергетического интервала в составе используемого

набора индикаторов имелся бы индикатор, в активационный интеграл которого нейтроны на данном энергетическом интервале вносят существенный вклад. Поэтому чем больше будет индикаторов в наборе и чем разнообразней будут их спектральные характеристики, тем более достоверным будет решение. При втором подходе искомый спектр излучения может быть задан как расчётный или измеренный другими средствами и требуется лишь уточнить его по результатам активационных измерений при небольших коррекциях его формы. Понятно, что в этом случае можно обойтись меньшим количеством индикаторов, а требования к разнообразию их спектральных характеристик могут быть менее жёсткими.

При обоих подходах весь диапазон энергий разбивается на  $m$  интервалов ( $m \leq n$ ). Для каждого из них сечение реакций реагирующих на них индикаторов принимают постоянным и равным среднему значению  $\sigma_{i,j}$  для  $i$ -го индикатора в  $j$ -м интервале энергий. Это даёт возможность заменить  $n$  интегральных уравнений на  $m$  алгебраических. Спектр нейtronов в этом случае представляется в виде [25]

$$\Phi(E) = \sum_k B_k \phi_k(E) , \quad (1.5)$$

где функции  $\psi_k(E)$  являются линейной комбинацией сечений используемых индикаторов и составляют ортонормированную систему:

$$\begin{aligned} \phi_1(E) &= A_{11} \sigma_1(E), \\ \phi_2(E) &= A_{21} \sigma_1(E) + A_{22} \sigma_2(E), \\ &\dots \\ \phi_n(E) &= \sum_{k,q=1}^n A_{kq} \sigma_k(E). \end{aligned} \quad (1.6)$$

Коэффициенты  $A_{k,q}$  определяют из условий ортонормальности системы функций  $\psi_k$ :

$$\int_0^\infty \phi_k(E) \phi_q(E) dE = 0, \quad \text{при } k \neq q$$

$$\int_0^\infty \phi_k(E) \phi_q(E) dE = 1, \quad \text{при } k = q \quad .$$
(1.7)

При  $m < n$  для нахождения коэффициентов  $A_{kq}$  используется метод наименьших квадратов:

$$\int_0^\infty [\Phi(E) - \Phi^1(E)]^2 dE = \min ,$$
(1.8)

где  $\Phi(E)$  действительная, а  $\Phi^1(E)$  расчётная (по формуле (1.5) плотность потока нейтронов.

При этом расчётная функция  $\Phi^1(E)$  может выражаться различными аналитическими функциями. В зависимости от этого различают полиномиальный и ортонормально-полиномиальный методы [25]. При использовании **полиномиального метода** плотность потока нейтронов представляют полиномом  $(n-1)$ -го порядка

$$\Phi(E) = W(E) \sum_{i=1}^n B_i E^{i-1} ,$$
(1.9)

где  $B_i$  – коэффициенты разложения, которые определяют, используя измеренную активность индикаторов;

$n$  – число используемых индикаторов;

$W(E)$  – весовая функция.

Активационный интеграл  $k$ -го индикатора будет иметь вид [25]

$$R_k = \int_0^\infty \sigma_k(E) \Phi(E) dE = \int_0^\infty W(E) \sigma_k(E) \sum_{i=1}^n B_i E^{i-1} dE =$$

$$= \sum_{i=1}^n B_i \int_0^\infty W(E) \sigma_k E^{i-1} dE .$$
(1.10)

Введя обозначение  $M_{ki} = \int_0^{\infty} W(E) \sigma_k(E) E^{i-1} dE$ , можно переписать выражение (1.5) в матричной форме [25]:

$$\langle R \rangle = \langle M \rangle \cdot \langle B \rangle , \quad (1.11)$$

откуда  $\langle B \rangle = \langle M \rangle^{-1} \langle R \rangle . \quad (1.12)$

Подставляя найденные коэффициенты в (1.9), находим искомый спектр нейтронов.

Однако экспериментальная проверка данного метода с числом индикаторов от 6 до 8, показала, что полученная таким путём функция  $\Phi(E)$  существенно отличается от действительного спектра. Броунелл [90] модифицировал этот метод, заменив обычный полином ортонормальным:

$$\chi_i(E) = \sum_{j=1}^l A_{ij} E^{i-1} , \quad (1.13)$$

где для определения коэффициентов  $A_{ij}$  используют условие ортонормальности полиномов  $\chi_j(E)$  с весовой функцией  $W(E)$  [90]:

$$\begin{aligned} \int_0^{E_{\max}} W(E) \chi_i(E) \chi_j(E) dE &= \delta_{ij} \\ \sum_{i,j=1}^{k,n} A_{ij} A_{qr} \int_0^{E_{\max}} W(E) E^{i+j-2} dE &= \delta_{ij} \end{aligned} , \quad (1.14)$$

где  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j , \\ 0 & \text{при } i \neq j . \end{cases}$

Для  $k$ -го активационного интеграла имеем

$$R_k = \sum_{i=1}^n B_i \int_0^{E_{\max}} W(E) \sigma_k(E) \chi_i dE . \quad (1.15)$$

Аналогично предыдущему случаю, обозначив активационные интегралы как  $M_{ki}$  и переходя к матричным формам, получаем

$$\langle B \rangle = \langle M \rangle^{-1} \langle R \rangle .$$

В итоге функция плотности потока нейтронов от энергии (энергетический спектр) будет находиться как

$$\Phi(E) = W(E) \sum_{i=1}^n B_i \chi_i(E) . \quad (1.16)$$

К программам, реализующим эти методы можно отнести RDMM, SPECTRA, CRISTALL BALL, RFSP и др.

В частности, при восстановлении спектра быстрых нейтронов с помощью набора пороговых индикаторов в качестве аппроксимаций действительных зависимостей сечений реакций пороговых индикаторов от энергии используют простейшие ступенчатые функции [90]:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_i(E) = 0 \quad \text{при } E < E_{\text{эфф}}^i \\ \sigma_i(E) = \sigma_{\text{эфф}}^i \quad \text{при } E > E_{\text{эфф}}^i \end{array} \right\} \quad (1.17)$$

Тогда

$$\int_0^\infty \sigma_i(E) \Phi(E) dE = \sigma_{\text{эфф}}^i \int_{E_{\text{эфф}}^i}^\infty \Phi(E) dE = R_i . \quad (1.18)$$

Вся проблема заключается в правильном определении  $E_{\text{эфф}}^i$  и  $\sigma_{\text{эфф}}^i$ , поскольку реальные зависимости сечений реакций пороговых индикаторов от энергии весьма сложны, и это приводит к неопределенности при выборе  $E_{\text{эфф}}^i$  и  $\sigma_{\text{эфф}}^i$ . Для устранения этой неопределенности предложено много различных методик определения  $E_{\text{эфф}}$  и  $\sigma_{\text{эфф}}$  (при выборе этих двух величин третья –  $E_{\text{max}}$  однозначно определяется из условия равенства площади одноступенчатой функции активационному интегралу). Предложены таблицы с рекомендуемыми значениями  $E_{\text{эфф}}$  и  $\sigma_{\text{эфф}}$  для различных пороговых детекторов [90]. Од-

нако, очевидно, что всё это не устраниет главного недостатка этого метода – слишком грубой аппроксимации реальных зависимостей  $\sigma(E)$ , что и приводит к неустранимым погрешностям при восстановлении формы спектра. Именно для уменьшения этих погрешностей форма спектра задаётся заранее.

Изучение формы спектра быстрых нейтронов в реакторах различных типов показало, что, начиная с энергии 0,5 МэВ, в энергетическом диапазоне шириной несколько мегаэлектрон-вольт форма спектра достаточно хорошо описывается кусочно-экспоненциальными функциями. В связи с этим Диркссом [90] было предложено в зависимости от конкретного набора пороговых индикаторов разбивать весь энергетический диапазон измеряемого спектра на ряд интервалов (согласованных с пороговыми энергиями применяемых индикаторов) и на каждом интервале аппроксимировать форму спектра экспоненциальной функцией вида

$$\Phi(E) = Ce^{-kE} , \quad (1.19)$$

где  $k$  – параметр, постоянный для каждого интервала; а  $C$  определяется из равенства интегральных функций от (1.19) в границах данного интервала:

$$\int_{E_h}^{E_e} \Phi(E) dE = \int_{E_h}^{E_e} Ce^{-kE} dE . \quad (1.20)$$

Вся сложность заключается в определении левого интеграла с помощью применяемых пороговых детекторов.

Однако в широком диапазоне энергий все изложенные выше методы не могут дать надёжных результатов в восстановлении спектра неизвестной формы. Точность восстановления может быть существенно повышена при использовании итераций. В этом и заключается суть алгоритмов второй группы. Процедура итераций заключается в том, что функция плотности потока от энергии, полученная любым из изложенных методов, используется для задания формы спектра в следующей итерации. Из неё получают уточ-

нённое среднее сечение спектра, по которому определяется уточнённая функция плотности потока и т.д. Итерации повторяют до тех пор, пока интегральная плотность потока для последней итерации будет незначительно отличаться от соответствующей характеристики предыдущей итерации.

Проведенный во ВНИИФТРИ [13] сравнительный анализ показал, что алгоритмы второй группы обеспечивают большую устойчивость и меньшую зависимость от правильности задания исходной аппроксимирующей функции восстанавливаемого спектра, но, тем не менее, зависимость от априорно задаваемых характеристик спектра для алгоритмов обеих групп остается весьма существенной. Для облегчения решения этого вопроса в ВНИИФТРИ были подготовлены библиотеки классифицированных спектров БКС-1 и БКС-2, которые применялись в разработанных там же вычислительных программах восстановления спектра ПРОСПЕКТ-1 и ПРОСПЕКТ-2 (методика их применения приведена в МИ 1806-87).

### **1.3. Методы и алгоритмы вычислительного восстановления спектра, используемые в нейтронной спектрометрии на основе протонов отдачи**

В п. 1.1.5 было показано, что аппаратурный спектр нейтронного потока, регистрируемый с помощью детекторов, использующих упругое рассеяние нейtronов на ядрах водорода с излучением протонов отдачи, представляет собой амплитудное распределение выходных импульсов детектора, сложным образом зависящее от энергетического спектра измеряемого нейтронного потока. Это создаёт серьёзные трудности при восстановлении спектра измеряемого нейтронного потока по полученному аппаратурному спектру.

Наиболее простым способом восстановления спектра измеряемого нейтронного потока является численное дифференцирование измеренного амплитудного распределения импульсов от протонов отдачи. Если считать отклик детектора идеальным (для которого амплитудное распределение выходных импульсов детектора от моноэнергетического потока нейtronов описывается равномерным распределением от нулевой энергии до энергии дан-

ного моноэнергетического потока), то для нейтронного потока со спектром  $\varphi(E)$  аппаратурный спектр (энергетический спектр протонов отдачи) можно описать выражением [90]:

$$u(E_p) = \text{const} \int_0^{E_{pmax}} \frac{\varepsilon(E)}{E} \varphi(E) dE , \quad (1.21)$$

где  $E_{pmax}$  – энергия протонов отдачи, соответствующая лобовым столкновениям;

$\varepsilon(E)$  – функция зависимости эффективности детектора от энергии нейтронов;

$\varphi(E)$  – энергетический спектр измеряемого потока нейтронов.

В этом случае искомый спектр нейтронов можно было бы найти с помощью численного дифференцирования полученного аппаратурного спектра:

$$\varphi(E) = -\frac{E}{\varepsilon(E)} \frac{du(E_p)}{dE_p} . \quad (1.22)$$

При этом зависимость эффективности используемого конкретного детектора от энергии нейтронов должна быть предварительно определена либо экспериментально, либо расчётным путём. Однако ввиду неидеальности отклика детектора восстановление спектра измеряемого нейтронного потока по полученному аппаратурному спектру существенно затрудняется.

Поскольку аппаратурный спектр измеряемого потока определяется экспериментально в виде распределения амплитуд выходных импульсов детектора, то выполнять дифференцирование в соответствии с (1.22) необходимо в числовой форме. В этом случае измеренный аппаратурный спектр детектора представляется в виде:

$$u_i = u(z_i) , i = 1, 2, \dots, N , \quad (1.23)$$

где  $z_i$  – номер канала амплитудного анализатора;

$u(z_i)$  – число импульсов, зарегистрированных в  $i$ -м канале амплитудного анализатора;

$N$  – число каналов амплитудного анализатора.

Искомый нейтронный спектр также представляется в дискретном виде, т.е. в виде ступенчатой функции [90]:

$$\varphi_j = \int_{E_j}^{E_{j+1}} \frac{\varphi(E)}{E_{j+1}-E_j} dE , j = 1, 2, \dots, M , \quad (1.24)$$

где  $M$  – число дискретных энергетических интервалов нейтронного спектра;

$\varphi_j$  – усреднённая по ширине  $j$ -го интервала спектральная плотность нейтронного потока.

В матричном виде связь между аппаратурным спектром и соответствующим нейтронным спектром будет выражаться в виде:

$$\mathbf{U} = \mathbf{K}\Psi , \quad (1.25)$$

где  $\mathbf{U}$  – вектор-столбец аппаратурного спектра (числа зарегистрированных импульсов в каждом канале амплитудного анализатора);

$\mathbf{K}$  – матрица, образованная из функций отклика детектора, соответствующих каждому из  $M$  энергетических интервалов;

$\Psi$  – вектор-столбец решения, т.е. искомый энергетический спектр нейтронного потока.

Трудность состоит в необходимости определения матрицы коэффициентов  $\mathbf{K}$ , получаемых из функций отклика детектора, которая имеет размерность  $N \times M$ . При использовании современных амплитудных анализаторов на основе быстродействующих АЦП число каналов  $N$  может быть от 512 до 2048, а число интервалов восстанавливаемого нейтронного спектра должно быть не менее нескольких десятков. Поэтому матрица отклика детектора  $\mathbf{K}$  получается весьма громоздкой, а для нахождения решения необходимо эту матрицу обращать:

$$\Psi = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{U} . \quad (1.26)$$

И здесь нас подстерегают чисто математические трудности. Во-первых,

стандартные программы обращения матриц применимы только к квадратным матрицам, а у нас имеет место прямоугольная. С этим, казалось бы, справиться легко – надо принять  $M = N$ , поскольку  $M$  мы вправе выбирать по своему усмотрению. Однако, увеличение размерности матрицы, помимо резкого возрастания громоздкости вычислений неизбежно приводит к её плохой обусловленности. Матрица становится вырожденной, и её обращение становится невозможным. Поэтому реально приходится уменьшать размерность  $N$ , усредняя показания нескольких соседних каналов, что, безусловно, снижает разрешающую способность спектрометра. Во-вторых, даже при уменьшении  $N = M$  до нескольких десятков, показания соседних каналов остаются достаточно тесно коррелированными между собой (более того, при усреднении нескольких соседних каналов неизбежно происходит сглаживание спектра, а значит, взаимная корреляция образованных усреднённых каналов только возрастает). А в этом случае решение получается неустойчивым, т.е. малые погрешности в измеренном аппаратурном спектре приводят к большим искажениям в восстановленном нейтронном спектре.

Для преодоления этих трудностей могут быть использованы различные методы регуляризации некорректно поставленных задач, разработанные академиком А. Н. Тихоновым, а также методы, основанные на аппроксимации нейтронного спектра суперпозицией ортогональных функций, в частности, полиномами Лежандра, Чебышева, Лагерра, аппроксимации параметрической функцией с числом определяемых параметров, не превышающем  $N$ , различные итерационные методы, использующие априорную информацию о форме восстанавливаемого спектра, метод направленного отбора, которые кратко описаны в [90]. Практически, все эти методы в той или иной форме базируются на использовании априорной информации о форме искомого спектра, с помощью которой и преодолевается неопределенность решения. Но самой основной и принципиальной трудностью является определение коэффициентов прямой матрицы  $\mathbf{K}$ , поскольку их приходится определять экспериментально или расчётным путём для каждого конкретного детектора.

Кроме того, для получения более точного решения необходимо учитывать упомянутые ранее поправки на краевой эффект, на многократное рассеяние нейтронов в сцинтилляторе, на зависимость эффективности детектора от энергии нейтронов, на зависимость световогохода от угла рассеяния протонов на ядрах водорода и т.д. Понятно, что они могут быть учтены только приблизённо.

#### **1.4. Методы и алгоритмы вычислительного восстановления спектра, используемые в нейtronной спектрометрии на основе многошарового метода**

Для восстановления спектра по результатам измерений, полученных с помощью спектрометров Боннера, были опробованы практически все алгоритмы, применяющиеся в активационном анализе. В оригинальной статье [36] авторы этого метода вообще не затрагивают вопросы математического восстановления спектра по результатам измерений, получив экспериментально лишь спектральные функции чувствительности для каждой из используемых сфер-замедлителей, причём всего по нескольким точкам для каждой сферы . Что касается восстановления спектра по результатам измерений, то, очевидно, использовалось прямое решение системы алгебраических уравнений (1.3), где число энергетических интервалов  $n$  соответствовало числу  $m$  используемых сфер-замедлителей (плюс «голый» детектор). В дальнейшем создавались различные программы восстановления (развёртки) спектра, использующие как чисто математические, так и полуэмпирические методы, рассмотренные в предыдущем разделе. Но наибольшую популярность завоевали итерационные методы Монте-Карло. Общий обзор применяемых программ развёртки спектра нейтронов был дан *M. Matske* в [50]. Чтобы выявить причины несоответствий, получаемых при использовании различных программ для восстановления спектров по результатам измерений спектрометрами Боннера, была организована рабочая группа европейской радиационной дозиметрической ассоциации *EURADOS*. Различным участникам этой группы

были переданы результаты измерений одним и тем же спектрометром Боннера нескольких спектров вместе с матрицей чувствительности этого спектрометра. Они должны были независимо друг от друга восстановить эти спектры без какой-либо другой дополнительной информации. Результаты получились существенно отличающимися. Оказалось, что ни одна из используемых программ не может корректно работать без привлечения дополнительной априорной информации об источнике излучения. Результаты расчётов большинства компьютерных программ зависят от априорной оценки формы спектра. Это общее свойство всех программ, компенсирующих неполноту исходной информации с помощью итерационных вычислений, и особенно характерно для программ, использующих метод Монте-Карло.

В качестве примера можно привести программу *BON95*, которая была разработана в ГНЦ ИФВЭ для созданного там же спектрометра Боннера СБРСУ-01, который был упомянут ранее [30]. В этой программе изначально задаётся математическая модель спектра в виде линейной суперпозиции максвелловского спектра тепловых нейтронов  $F_{th}$ , хвоста эпитетловых нейтронов  $F_{epi}$ ,  $1/E$  – хвоста промежуточных нейтронов  $F_{int}$  и квазимаксвелловского пика быстрых нейтронов  $F_f$  [30,31]:

$$E \phi_p(E) = a_1 F_{th}(E) + a_2 F_{epi}(E) + a_3 F_{int}(E) + a_4 F_f(E) , \quad (1.27)$$

$$\left| \begin{array}{l} F_{th} = X_{th}^{3/2} e^{-X_{th}} , \quad X_{th} = E / T_{th} ; \\ F_{epi} = E^{-b} (1 - e^{-X_{th}}) e^{-X_f} ; \\ F_{int} = (1 - e^{-X_f}) e^{-X_f} ; \\ F_f = X_f^{3/2} e^{-X_f} , \quad X_f = (E / T_f)^c . \end{array} \right. \quad (1.28)$$

где

Температура пика тепловых нейтронов выбрана равной  $T_{th} = 0,035$  эВ, что соответствует спектрам за водородсодержащей биологической защитой. Экспоненциальные функции в выражениях для  $F_{epi}$  и  $F_{int}$  служат для подавления этих компонент в областях тепловых и быстрых нейтронов.

С помощью варьирования с определённым шагом свободных параметров  $b$ ,  $c$  и  $T_f$ , описывающих наклон эпителевого хвоста, ширину и температуру пика быстрых нейтронов, добиваются минимизации выражения [31]

$$\chi^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \frac{M_i - M_i^p}{\Delta M_i^{\text{exp}}} \right)^2 = \min , \quad (1.29)$$

где

$$M_i^p = \sum_{j=1}^n A_i(E_j) \phi_p(E_j) \quad (1.30)$$

$M_i$  – показания детектора в различных шарах Боннера.

Значения коэффициентов  $a_k$  в уравнении (1.27) для каждой комбинации свободных параметров находятся методом наименьших квадратов, учитывая, что выражение (1.27) линейно относительно этих коэффициентов. Для этого находятся частные производные от (1.29) (с учётом подстановки в него (1.30) относительно коэффициентов  $a_k$  [31]):

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a_k} = \sum_{i=1}^m (B_{ik} - C_{ik} a_k) = 0 . \quad (1.31)$$

Система линейных дифференциальных уравнений (1.31) имеет единственное решение, поскольку компоненты спектра в (1.27) линейно независимы.

Найденный таким образом оптимальный спектр (выражение (1.27) с найденными значениями коэффициентов  $a_k$ ), соответствующий минимуму  $\chi^2$ , используется далее в качестве начального спектра в итерационной процедуре с критерием окончания  $\chi^2 < 1$ . В большинстве случаев, когда форма измеряемого спектра хорошо согласуется с принятой моделью (т.е. выражены тепловой и быстрый пики, а зависимость распределения промежуточных нейтронов от энергии близка к  $1/E$ ), алгоритм параметризации сразу даёт решение, удовлетворяющее критерию  $\chi^2 < 1$ . Поэтому итерационную процедуру приходится применять при более сложных видах спектров (т.е. при существенных отличиях формы измеряемого спектра от гипотетической) [30].

Полученный спектр  $\Phi_0(E_j)$  используется для расчёта полных погрешностей  $\Delta M_i$  [30]:

$$\Delta M_i = \sqrt{(\Delta M_i^{exp})^2 + [\sum_{i=1}^n \Delta A_i(E_j) \Phi_0(E_j)]^2}. \quad (1.32)$$

Для определения статистической достоверности восстанавливаемого спектра измерения с каждым шаром повторяются  $N$  раз, либо к однократному результату прибавляется случайная величина, распределённая по нормальному закону, т.е. так или иначе для каждого шара мы получаем  $N$  измерений (принималось  $N = 25$ ), что позволяет оценить статистический разброс расчётных значений спектральной плотности при заданных среднеквадратических погрешностях измерений. Как видим, в этой программе широко привлекается априорная информация о форме характерных участков спектра. Если эта информация соответствует действительности, то восстановленному спектру вполне можно доверять. Но если измеряемый спектр по форме существенно отличается от гипотетической, то достоверность измерений становится сомнительной.

На примере данной программы достаточно чётко прослеживаются те общие проблемы по алгоритмам восстановления спектров по результатам измерений с помощью спектрометров Боннера, о которых шла речь выше.

## **1.5. Концепция построения нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени**

Единственным путём кардинального повышения точности измерения интегральной плотности нейтронного потока при неизвестном его спектре является переход к спектральным измерениям с последующим вычислением интегральной плотности потока. Этим и обосновывается необходимость нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени с вычислительным определением интегральной плотности потока и всех других измеряемых величин. При этом совершенно очевидно, что деление всего энергетического

диапазона нейтронов всего на две или три полосы не решает данную задачу. Этого недостаточно даже для дозиметров нейтронного излучения, предназначенных только для измерения эквивалентной поглощённой дозы, поскольку биологическое воздействие нейтронов очень сильно зависит от их энергии. А для исследования нейтронных полей ядерных реакторов и решения большинства других задач необходимо определять усреднённые спектральные плотности хотя бы на каждом децимальном интервале энергии. При этом измерения спектральной плотности по всему энергетическому диапазону нейтронных потоков чрезвычайно важны и сами по себе: и для ряда важных практических задач, и для многих научных задач ядерной физики.

Если отбросить прямые методы измерения энергии нейтронов, которые не могут использоваться для измерений нейтронных потоков от произвольных источников, то остаётся лишь две возможности:

1. Восстановление спектра измеряемого нейтронного потока путём совместной вычислительной обработки результатов его измерений с помощью нескольких детекторов, избирательных к различным участкам энергетического спектра измеряемого потока.

2. Принудительное последовательное изменение конфигурации спектра измеряемого нейтронного потока путём погружения одного и того же детектора в замедлитель нейтронов на различную глубину с последующим вычислительным восстановлением формы исходного спектра.

Первый путь широко используется в активационном анализе (п. 1.1.4). Основным его недостатком является трудоёмкость измерительных процедур и низкая производительность. Это лабораторный метод, и его реализация требует, как правило, нескольких суток для проведения одного цикла измерений и должна осуществляться высококвалифицированным персоналом.

Второй путь реализован в многошаровом спектрометре Боннера и в весьма урезанном виде в радиометре-дозиметре нейтронного излучения МКС-03С [29,93]. Возможности этого пути с одновременным погружением нескольких детекторов в замедлитель на различную глубину с целью повы-

шения оперативности измерений весьма ограничены. Приведённые в описании прибора МКС-03С зависимости чувствительности трёх каналов (для тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов) от энергии нейтронов ярко иллюстрируют это (рис. 1.1). На данном графике для удобства сопоставления чувствительности разных каналов чувствительность канала быстрых нейтронов увеличена в 4 раза.

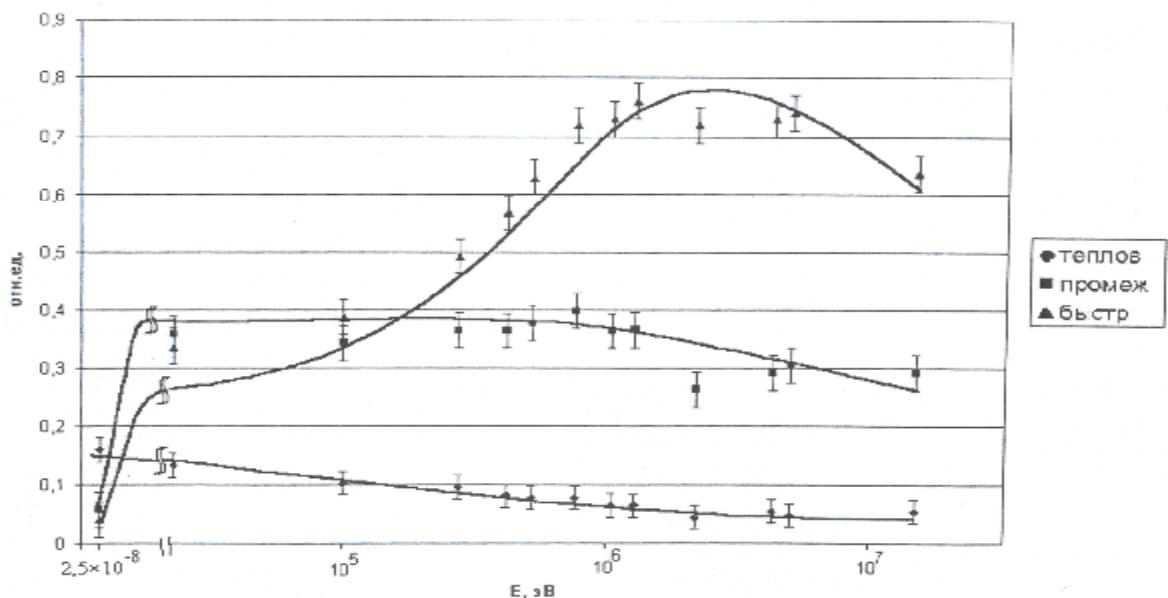


Рисунок 1.1 – Зависимость чувствительности трёх измерительных каналов прибора МКС-03С от энергии нейтронов

Здесь следует иметь в виду, что для самих детекторов энергетические зависимости чувствительности близки к линейно падающим. Рост чувствительности с повышением энергии нейтронов в каналах для промежуточных и быстрых нейтронов происходит за счёт замедления их до тепловых. Из приводимых графиков видно, что чувствительности всех трёх каналов во всём энергетическом диапазоне от 0,025 эВ до 15 МэВ сопоставимы. Поэтому разделение потока нейтронов по энергии на тепловые, промежуточные и быстрые таким способом получается достаточно условным.

По сути дела, погружая детектор в замедлитель нейтронов, мы изменяем зависимость его спектральной чувствительности от энергии. Как следует из графиков рис. 1.1, при одновременном их погружении в замедлитель на

различную глубину эти изменения не слишком значительны. В спектрометре Боннера при поочерёдном погружении одного и того же детектора в сферы с резко отличающейся толщиной стенки эти отличия более существенны, а дополнительное использование кадмievого фильтра ещё более подчёркивает эти отличия. Но и на этом пути уже виден предел. Использовать большее число шаров для повышения разрешающей способности уже нет смысла, т.к. при промежуточных размерах изменения чувствительности от шара к шару будут скорее количественными, чем качественными.

Таким образом, общий принцип построения нейтронного спектрометра реального времени должен состоять в совместной вычислительной обработке сигналов от многодетекторного блока детектирования, состоящего из оптимально подобранного набора детекторов с селективной чувствительностью в различных областях энергетического спектра нейтронов, с целью восстановления энергетического спектра измеряемого потока нейтронов [58]. При этом в основу алгоритма восстановления спектра не должна закладываться какая-то математическая модель спектра, определяющая его форму (в отличие от описанных в [4 и 13] алгоритмов восстановления спектров). Только в этом случае спектрометр будет способен достоверно измерять нейтронные потоки с любыми формами энергетического спектра.

Учитывая нелинейность и достаточную сложность спектральных функций чувствительности используемых детекторов и высокую вариабельность формы спектров измеряемых потоков нейтронов, надежды на возможность получения математической модели восстановления спектров аналитическим путём становятся весьма призрачными. Следовательно, остаётся лишь один путь – получение такой модели статистическими методами по обучающей выборке предъявляемых на вход системы заранее известных спектров нейтронных потоков всевозможных видов [70-71]. Экспериментальное получение необходимой статистически достоверной обучающей выборки нейтронных потоков с различными и заранее известными спектрами сопряжено с большими и, скорее всего, практически непреодолимыми трудностя-

ми (этим и можно объяснить тот факт, что этот путь до сих пор не был реализован). Поэтому остаётся лишь один возможный путь – имитационное моделирование потоков нейтронов со спектрами разнообразной формы, и самого блока детектирования (модель которого будет состоять из имитационных моделей спектральных функций всех детекторов, входящих в измерительный модуль), и самой системы восстановления спектров [94].

Исходя из вышеизложенного, Дрейзином В.Э. [94] предложен новый способ нейтронной спектрометрической радиометрии, заключающийся в использовании нескольких параллельно работающих детекторов нейтронного излучения, имеющих различные зависимости чувствительности от энергии нейтронов. Детекторы подбираются таким образом, чтобы зависимости их чувствительностей от энергии нейтронов совместно перекрывали весь энергетический диапазон измеряемых нейтронных потоков. Выходные сигналы этих детекторов обрабатываются совместно с помощью специально обученной нейронной сети, обеспечивая вычислительное восстановление энергетического спектра измеряемого потока нейтронов и вычисление по нему интегральной плотности измеряемого потока нейтронов и его производных характеристик. Поскольку получение реализаций потоков нейтронов с известными и различными энергетическими спектрами, которые необходимы для формирования обучающей и проверочной выборок, используемых для обучения нейронной сети, представляет серьёзную проблему, предложен способ обучения нейронной сети, состоящий в многократном предъявлении на входы нейронной сети реализаций обучающей выборки, отличающейся тем, что реализации обучающей (и проверочной) выборок получаются не экспериментально, а генерируются имитационной программой, моделирующей энергетические спектры нейтронных потоков различных видов, а с помощью программ, моделирующих зависимости чувствительности применяемых в приборе детекторов нейтронного излучения от энергии нейтронов, эти реализации преобразуются к виду, соответствующему выходным сигналам детекторов при воздействии на них данных реализаций, после чего они уже предъяв-

ляются на входы обучаемой нейронной сети. Выходные векторы нейронной сети сравниваются с заранее известными значениями спектральных плотностей входных реализаций по каждому энергетическому интервалу, что позволяет определить вектор ошибок и, тем самым, произвести обучение нейронной сети. Новизна предложенного способа подтверждается полученным патентом на способ и устройство для измерения спектральной и интегральной плотности потоков нейтронов [95].

Выберем данный способ для построения нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени.

Рассмотрим задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

### **1.6. Формулировка частных задач исследования**

Целью работы является повышение достоверности, оперативности и точности средств спектрометрических измерений и дозиметрического контроля нейтронного излучения с обеспечением возможности получения его энергетического спектра в реальном времени. Важнейшей частной задачей является разработка нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени. Для построения данного спектрометра необходимо решить несколько задач.

Первая задача – подбор детекторов. Для построения энергетического спектра в широком диапазоне энергий необходимо иметь набор селективных к энергии нейтронов детекторов с различными зависимостями чувствительности от энергии.

Вторая задача – конструктивная. Необходимо разместить несколько различных детекторов в одном блоке детектирования так, чтобы они не экранировали друг друга и все вместе занимали минимальный пространственный объём, чтобы не сказывалась неоднородность измеряемых нейтронных полей в пространстве.

Третья задача – математическая – восстановление спектрального распределения по результатам измерений, полученным от разных детекторов с помощью предварительно обученных нейронных сетей. Для её решения нужна весьма солидная по объёму обучающая выборка входных потоков излучения с разнообразными и заранее известными спектрами. Получить их экспериментально весьма затруднительно, а точно измерить их спектры просто нечём. Следовательно, остаётся единственный возможный путь – имитационное моделирование, с помощью которого по имитационным моделям входных потоков с различными формами спектров и имитационным моделям спектральных характеристик используемых детекторов можно найти математическую модель восстановления спектра по выходным сигналам детекторов. Именно эта модель и должна закладываться в наше устройство.

Отсюда возникает четвёртая задача – разработка системы имитационного моделирования различных спектральных распределений нейтронных потоков и их преобразования выбранным набором детекторов для отработки математического метода восстановления спектра по данным, получаемым от детекторов.

Предыдущая (третья) задача является наиболее сложной. В качестве математического аппарата для вычислительного восстановления спектров нейтронного излучения выбраны нейронные сети. Необходимо выбрать оптимальную архитектуру, конфигурацию и метод обучения нейронных сетей для решаемой задачи вычислительного восстановления спектров.

В последние годы метод нейронных сетей получил существенное теоретическое и практическое развитие и начал широко применяться как для решения задач восстановления сложных зависимостей (регрессионных задач), так и для создания распознающих систем (зрительных образов, речи, и т.п.). По потенциальным возможностям метод ИНС превосходит все другие методы аппроксимации многомерных функций, идеально приспособлен для решения стохастических задач (к которым относятся все задачи измерений ионизирующих излучений), процедуры обучения ИНС конкретным задачам

хоть и сложны, но поддерживаются весьма совершенными и надёжно апробированными программными пакетами. Известно применение нейронных сетей для идентификации нуклидов по гамма-спектру [95] и [96], в том числе и с участием автора [61-63], [78].

Однако для решения задачи вычислительного восстановления энергетического спектра нейтронного излучения метод ИНС до сих пор не применялся. Объяснить это можно только тем, что он требует обширной обучающей выборки с известными и разнообразными спектрами, получить которую экспериментальным путём на реальных нейтронных источниках весьма проблематично, и помимо этого необходимо знание спектральных характеристик используемых детекторов, что также проблематично. Однако обе эти проблемы можно решить путём имитационного моделирования.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ТРЕХКАНАЛЬНОГО БЛОКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БДКС-05С

### 2.1. Постановка задачи. Общее описание системы моделирования

Задача восстановления спектрального распределения по результатам измерений, полученным от разных детекторов является ключевой для реализации концепции построения нейтронного спектрометра реального времени, предложенной в п. 1.6. Предлагается совместная обработка выходных сигналов детекторов с помощью специально обученной нейронной сети, обеспечивающая вычислительное восстановление энергетического спектра измеряемого потока нейтронов и вычисление по нему интегральной плотности измеряемого потока нейтронов и его производных характеристик. При этом нейронная сеть обучается путём многократного предъявления на входы нейронной сети реализаций обучающей выборки. Реализации обучающей (и проверочной) выборок генерируются системой имитационного моделирования [67-69], структура которой представлена на рисунке 2.1.

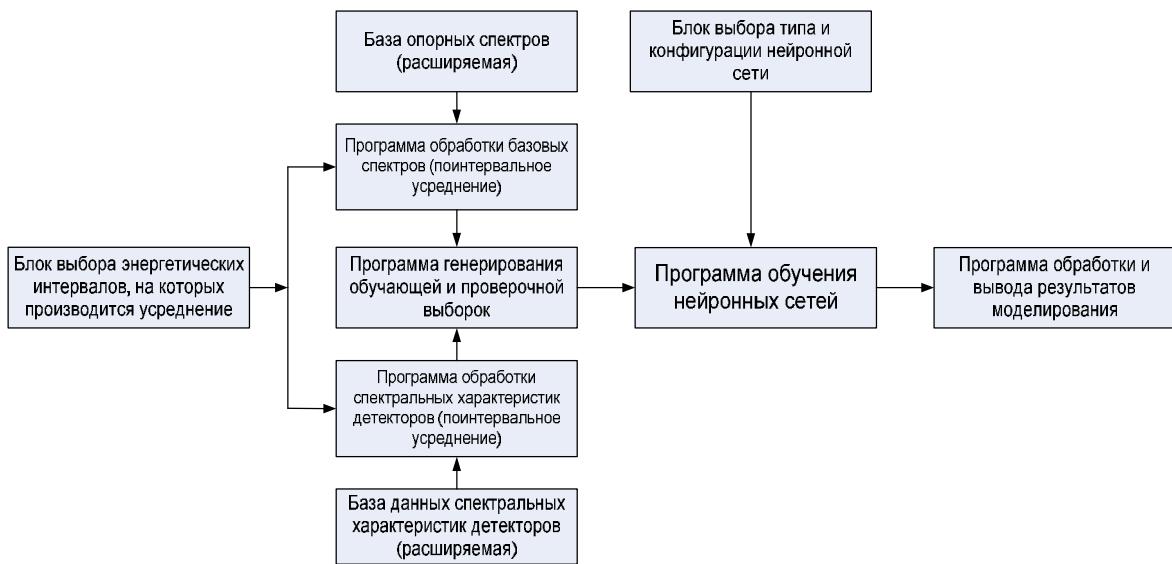


Рис. 2.1. Структура системы имитационного моделирования

Система состоит из базы данных опорных спектров разнообразной формы, которые программой обработки базовых спектров [97] преобразуют-

ся в ступенчатые функции путём поинтервального усреднения на задаваемом множестве энергетических интервалов, после чего формируется любое желаемое количество реализаций спектров путём прибавления к базовым спектрам случайной величины, распределённой по энергетической шкале. Аналогично в виде ступенчатых функций, задаваемых на тех же энергетических интервалах представляются спектральные функции используемых детекторов (с помощью программы обработки спектральных характеристик детекторов). С их помощью полученные реализации обучающей выборки преобразуются к виду, соответствующему выходным сигналам детекторов при воздействии на них данных реализаций, после чего они уже предъявляются на входы обучающей нейронной сети. А выходные векторы нейронной сети сравниваются с заранее известными значениями спектральных плотностей входных реализаций по каждому энергетическому интервалу, что позволяет определить вектор ошибок и, тем самым, произвести обучение нейронной сети. Задачами данной части исследования являются:

- подбор и моделирование базовых энергетических спектров нейтронных потоков для создания обучающей выборки;
- моделирование функций спектральных чувствительностей блока детектирования;
- выбор оптимальной архитектуры, конфигурации и методики обучения нейронных сетей для решаемых задач.

## **2.2. Подбор и моделирование базовых энергетических спектров нейтронных потоков для создания обучающей выборки**

Проведённый в [66] обзор реальных спектров различных источников нейтронного излучения показывает, что разнообразие форм спектров от различных источников нейтронного излучения весьма велико. Поэтому отобразить их каким-то ограниченным набором аналитических моделей, пусть даже с варьируемыми параметрами, вряд ли удастся. Кроме того, стоит задача не просто подобрать математическую модель, которая бы достаточно адекватно

аппроксимировала конкретный реальный энергетический спектр, а восстановить спектр неизвестной заранее формы по результатам измерений сигналов от нескольких детекторов с различными зависимостями чувствительности от энергии нейтронов. В данном случае базовые спектры нейтронных потоков искались в литературе и были нами систематизированы в [65-66] в зависимости от видов источников излучения на 5 групп:

1. Спектры радиоизотопных источников нейтронов, которые представлены спектрами нейтронных потоков  $^{235}\text{U}$ ,  $^{252}\text{Cf}$ , Ra-Be, Pu-Be – всего 4 базовых спектра. Далее будем их обозначать: U-235, Cf-252, Ra-Be, Pu-Be.

2. Спектры потоков нейтронов утечки за границы активной зоны критических сборок – всего 4 базовых спектра. Далее будем их обозначать соответственно КС-1, КС-2, КС-3 и КС-4.

3. Спектры потоков нейтронов из активной зоны ядерных реакторов – представлены спектрами нейтронных потоков в вертикальных и горизонтальных экспериментальных каналах реактора ИРТ-2000: ВЭК-6, ВЭК-10, ВЭК-11, ВЭК-12, ВЭК-13, ГЭК-2-1 – без фильтра, ГЭК-2-2 – со свинцовым фильтром, ГЭК-2-3 – с графитовым фильтром (далее будем их обозначать соответственно ВЭК-6И, ВЭК-10И, ВЭК-11И, ВЭК-12И, ВЭК-13И, ГЭК-2-1И, ГЭК-2-2И и ГЭК-2-3И); спектрами нейтронных потоков в вертикальных экспериментальных каналах ВЭК-5, ВЭК-13, ВЭК-14, ВЭК-1-1 реактора ВВР-К (далее будем их обозначать соответственно ВЭК-5В, ВЭК-13В, ВЭК-14В, ВЭК-1-1В); спектрами потоков в каналах Б-2 и Б-3 реактора на быстрых нейтронах БР-5 – всего 14 базовых спектров.

4. Спектры потоков утечки нейтронов из защиты реакторов различных типов – реактор Наяда, реактор Рашель, водо-водянной реактор с бетонной защитой, водо-водянной реактор с защитой из серпентинитового бетона и стали, тяжеловодный реактор Винча – всего 5 базовых спектров. Далее будем их обозначать соответственно У-1, У-2, У-3, У-4, У-5.

5. Спектры потоков на рабочих местах персонала в защищённых зонах – представлены спектрами нейтронных потоков на рабочих местах персонала

Горно-химического комбината (ГХК): – всего измерения проводились в 18 точках. Будем обозначать их ГХК-1 …ГХК-18.

Все эти спектры представлены в литературе в графическом виде и путём усреднения по задаваемым энергетическим интервалами переводились в табличную форму с помощью программы [97]. Проводилось их нормирование по интегральной плотности, что позволило привести их к единому масштабу (поскольку максимальные спектральные плотности исходных потоков отличались на 11 порядков).

Поскольку производители нейтронных детекторов не аттестуют их по спектральной чувствительности, то в качестве блока детектирования в системе моделировался трёхканальный блок детектирования БДКС-05С, в техническом описании которого были представлены спектральные характеристики всех трёх его измерительных каналов (см. рис. 1.1). Учитывая, что он содержит всего 3 измерительных канала была поставлена задача восстановления усреднённых по энергетическим интервалам спектральных плотностей на девяти децимальных интервалах энергии в диапазоне от 0,025 эВ до 25 МэВ.

Полученные таким образом спектры считались базовыми. Всего было получено 45 базовых спектров.

В табличном виде все эти базовые спектры представлены в таблицах 2.1-2.5.

Таблица 2.1 – Усреднённые по децимальным интервалам энергии спектральные плотности нейтронного излучения радиоизотопных источников, нейтр/(см<sup>2</sup>·с)

Энергетический диапазон / Источник	U-235	Cf -252	Ra-Be	Pu-Be
0,025-0,25	0	0	0	0
0,25-2,5	0	0	0	0
2,5-25	0	0	0	0
25-250	0	0	0	0
250-2,5К	0	0	0	0
2,5К-25К	0	0	0	0
25К-250К	0,01346	0,01159	0,01556	0,02386
250К-2,5М	0,16007	0,1537	0,09266	0,04919
2,5М-25М	0,0336	0,03974	0,06754	0,05107

Таблица 2.2 – Усреднённые по децимальным интервалам энергии спектральные плотности нейтронного излучения потоков утечки за границы активной зоны критических сборок, нейтр/(см<sup>2</sup>·с)

Энергетический диапазон / Источник	КС-1	КС-2	КС-3	КС-4
0,025-0,25	0	0,036779	0	0
0,25-2,5	0	0,039103	0	0,019979
2,5-25	0	0,046581	0	0,033868
25-250	0	0,052778	0	0,041774
250-2,5K	0,000962	0,06031	0,008774	0,055288
2,5K-25K	0,009669	0,071955	0,025641	0,14647
25K-250K	0,10369	0,14215	0,25417	0,47046
250K-2,5M	1,8562	0,56186	0,67372	0,26191
2,5M-25M	0,18766	0,10865	0,068269	0,006677

Таблица 2.3 – Усреднённые по децимальным интервалам энергии спектральные плотности нейтронного излучения в активных зонах ядерных реакторов, нейтр/(см<sup>2</sup>·с)

Энергетический диапазон / Источник	ВЭК-12И	ВЭК-11И	ВЭК-6И	ВЭК-10И	ВЭК-13И	ГЭК-2-1И	ГЭК-2-2И
0,025-0,25	8,32E+07	1,33E+08	6,92E+08	8,85E+08	2,85E+09	4,81E+07	3,09E+06
0,25-2,5	8,32E+07	1,33E+08	7,21E+08	8,85E+08	2,95E+09	4,82E+07	3,21E+06
2,5-25	8,00E+07	1,29E+08	7,49E+08	8,85E+08	3,16E+09	4,78E+07	3,66E+05
25-250	7,87E+07	1,29E+08	7,87E+08	8,93E+08	3,38E+09	4,82E+07	3,67E+06
250-2,5K	7,78E+07	1,30E+08	8,42E+08	9,52E+08	3,70E+09	4,89E+07	4,48E+06
2,5K-25K	8,18E+07	1,22E+08	1,02E+09	1,04E+09	4,77E+09	5,47E+07	5,98E+06
25K-250K	1,33E+08	1,47E+08	2,17E+09	1,32E+09	1,14E+10	8,13E+07	1,56E+07
250K-2,5M	4,26E+08	2,18E+08	4,31E+09	1,92E+09	1,27E+10	2,29E+08	6,54E+07
2,5M-25M	1,66E+08	7,03E+07	8,51E+08	4,28E+08	1,48E+09	6,88E+07	1,24E+07
Энергетический диапазон / Источник	ГЭК-2-3И	ВЭК-5В	ВЭК-13В	ВЭК-1-1В	ВЭК-14В	Б-2	Б-3
0,025-0,25	2,41E+06	4,73E+07	4,53E+08	1,90E+09	4,25E+09	7,99E+07	3,33E+06
0,25-2,5	1,02E+06	4,73E+07	4,53E+08	1,90E+09	4,25E+09	1,04E+08	6,40E+06
2,5-25	2,47E+05	4,69E+07	4,53E+08	1,94E+09	4,18E+09	1,95E+08	2,15E+07
25-250	2,79E+05	4,55E+07	4,53E+08	1,99E+09	4,05E+09	2,74E+08	5,02E+07
250-2,5K	3,25E+05	5,09E+07	4,75E+08	2,04E+09	3,99E+09	3,31E+08	6,26E+07
2,5K-25K	4,82E+05	6,44E+07	5,97E+08	2,32E+09	4,53E+09	3,54E+08	7,01E+07
25K-250K	2,04E+06	1,09E+08	9,31E+08	3,59E+09	8,27E+09	9,49E+08	4,57E+08
250K-2,5M	1,41E+07	1,82E+08	1,74E+09	6,41E+09	1,82E+10	1,39E+09	1,37E+09
2,5M-25M	6,98E+06	4,51E+07	4,00E+08	1,11E+09	2,72E+09	5,44E+07	1,39E+08

Таблица 2.4 – Усреднённые по децимальным интервалам энергии спектральные плотности нейтронного излучения потоков утечки из защиты ядерных реакторов различных типов

Энергетический диапазон / Источник	У-1	У-2	У-3	У-4	У-5
0,025-0,25	0,40833	0,17833	0,14611	0,0625	0,058333
0,25-2,5	0,28861	0,17833	0,14235	0,071512	0,13488
2,5-25	0,18296	0,18207	0,12617	0,090679	0,16293
25-250	0,1146	0,17444	0,11824	0,12231	0,16839
250-2,5K	0,070772	0,16043	0,10682	0,15818	0,15883
2,5K-25K	0,095969	0,14398	0,097562	0,19997	0,13253
25K-250K	0,12466	0,11157	0,1217	0,25722	0,10296
250K-2,5M	0,28028	0,059537	0,27318	0,090278	0,14565
2,5M-25M	0	0	0,071975	0,020093	0,028735

Таблица 2.5 – Усреднённые по децимальным интервалам энергии спектральные плотности нейтронного излучения потоков ядерного реактора за зоной биологической защиты на рабочих местах персонала, нейтр/(см<sup>2</sup>·с)

Энергетический диапазон / № точки	1	2	3	4	5	6
0,025-0,25	2,0715	3,946	2,9467	0,6537	2,5502	1,12
0,25-2,5	0,6183	1,3505	0,7879	0,1068	1,6065	0,4585
2,5-25	0,5972	1,325	0,7044	0,1	1,5771	0,4286
25-250	0,5972	1,325	0,7044	0,1	1,5771	0,4223
250-2,5K	0,5972	1,325	0,701	0,1009	1,688	0,4554
2,5K-25K	0,8837	1,4223	0,7991	0,1232	2,4119	0,6804
25K-250K	1,1054	2,9334	1,6224	0,2818	5,0999	1,3399
250K-2,5M	3,6347	7,4253	2,9717	0,3354	4,2689	0,8115
2,5M-25M	0,6499	1,6594	1,0473	0,0344	0,3852	0,024733

Продолжение таблицы 2.5

Энергетический диапазон/№ точки	7	8	9	10	11	12
0,025-0,25	7,2982	17,218	6,5365	2,6588	2,4147	14,91
0,25-2,5	5,376	6,6262	2,4653	0,6408	0,7584	7,3357
2,5-25	5,3489	6,3416	2,3333	0,6327	0,743	7,1044
25-250	5,1809	6,3416	2,3333	0,6114	0,7541	7,1044
250-2,5K	5,1389	6,3416	2,3379	0,5764	0,7731	7,1044
2,5K-25K	5,6775	6,4938	2,62	0,5891	0,9791	7,8298
25K-250K	17,187	14,094	7,3476	3,2502	2,2929	25,434
250K-2,5M	8,5003	41,193	20,844	33,394	2,6982	95,332
2,5M-25M	0,08348	3,0841	2,9138	6,1543	0,2168	18,879

## Продолжение таблицы 2.5

Энергетический диапазон/№ точки	13	14	15	16	17	18
0,025-0,25	15,059	0,5645	0,5951	0,5179	3,8051	2,2736
0,25-2,5	9,6671	0,6754	0,1519	0,1363	1,3114	0,6077
2,5-25	9,5219	0,692	0,1377	0,133	1,2844	0,5448
25-250	9,5219	0,692	0,1377	0,133	1,2844	0,5448
250-2,5K	9,8088	0,692	0,1395	0,1339	1,2844	0,5448
2,5K-25K	12,422	0,742	0,1656	0,1588	1,3835	0,6038
25K-250K	49,853	3,4294	0,787	0,3467	3,1247	1,4822
250K-2,5M	128,12	14,03	6,1844	0,882	2,0282	0,9038
2,5M-25M	15,987	1,2537	2,1412	0,3071	0,02347	0,027605

Итого получили 45 базовых спектров нейтронного излучения, по которым в дальнейшем будет формироваться база данных для создания обучающей и проверочной выборок для обучения нейронных сетей, применяемых для восстановления спектров измеряемых нейтронных потоков.

Далее, для генерирования обучающей и проверочной выборок моделей реализаций этих спектров, к найденным интервальным усреднённым значениям спектральных плотностей моделируемых потоков нейтронов добавлялась случайная величина, распределённая по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением в 10 % от усреднённого значения спектральной плотности для данного децимального интервала, которая имитировала вариабельность спектров по отношению к эталонной (заданной) форме [72]. Всего по каждому базовому спектру генерировалось 30 реализаций, из которых 20 входили в обучающую выборку, а остальные 10 – в проверочную. Таким образом, обучающая выборка состояла из 900 реализаций, проверочная – из 450 реализаций.

### **2.3. Моделирование функций спектральных чувствительностей трёхканального блока детектирования БДКС-05С**

Используемый для моделирования трёхканальный блок детектирования БДКС-05С, входящий в комплект радиометра-дозиметра нейтронного излучения МКС-03С, состоит из замедлителя нейтронов в виде шара из борированного полиэтилена, внутри которого на различной глубине размещены три

счётчика нейтронов типа СНМ-16, причём один из них, входящий в канал измерения быстрых нейтронов, расположен в центре шара, а два других, образующих канал измерения промежуточных нейтронов, расположены на определённой глубине симметрично от центра. Ближе к периферии шара размещены ещё два счётчика нейтронов типа СНМ-17, образующие канал измерения тепловых нейтронов. Используемые в блоке детектирования газо-наполненные коронные счётчики тепловых нейтронов имеют спектральную характеристику типа  $1/v$ . Путём помещения их на различную глубину в замедлитель нейтронов их спектральные характеристики по отношению к внешнему излучению трансформируются так, как было показано на рисунке 1.1.

В прототипном приборе МКС-03С, куда входит данный блок детектирования, регистрация потока нейтронов осуществляется непосредственно по выходным сигналам этих трёх каналов, чтобы раздельно измерять плотность потока быстрых, промежуточных и медленных нейтронов. Никакой совместной обработки этих сигналов не предусмотрено.

Усреднённые значения чувствительностей каналов блока детектирования БДКС-05С для децимальных интервалов энергии, найденные по графикам рисунка 1.1, представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Усреднённые относительные значения чувствительностей различных каналов блока детектирования БДКС-05С для децимальных интервалов по энергии

Энергия нейтронов, Эв		Чувствительность по каналам $S_i$ , отн. ед.		
Диапазон	Дец. интервалы	Тепловые	Промежуточные	Быстрые
Тепловые	0,025...0,25	0,145	0,347	0,057
	0,25...2,5	0,140	0,380	0,063
Промежуточные	2,5...25	0,135	0,380	0,063
	25...250	0,130	0,380	0,063
	250...2500	0,125	0,380	0,063
	$2,5 \cdot 10^3 \dots 25 \cdot 10^3$	0,115	0,380	0,063
	$25 \cdot 10^3 \dots 250 \cdot 10^3$	0,100	0,380	0,08
Быстрые	$0,25 \cdot 10^6 \dots 2,5 \cdot 10^6$	0,075	0,373	0,155
	$2,5 \cdot 10^6 \dots 25 \cdot 10^6$	0,035	0,297	0,179

При этом значения этих чувствительностей представлены в относительных единицах (за базу нормирования принималась интегральная чувствительность канала измерения тепловых нейтронов, т.е. сумма чувствительностей  $S_i$  этого канала по всем децимальным интервалам энергии принималась равной единице). Хотя принято считать энергетический диапазон тепловых нейтронов от 0,025 эВ до 0,5 эВ, для удобства сдвигом их верхнюю границу до 2,5 эВ, чтобы она совпала с верхней границей второго децимального интервала. Таким образом, будем считать, что:

- канал тепловых нейтронов включает два первых децимальных интервала энергий и имеет границы: 0,025...2,5 эВ;
- канал промежуточных нейтронов включает пять децимальных интервалов энергий: 2,5...25 эВ, 25...250 эВ, 250...2500 эВ, 2,5... 25 кэВ и 25 ... 250 кэВ;
- канал быстрых нейтронов включает оставшиеся два децимальных интервала энергий: 0,25...2,5 МэВ и 2,5...25 МэВ.

Отклики всех трёх измерительных каналов подсчитывались как сумма произведений средней плотности  $P_{ij}$  данного  $j$ -го потока на  $i$ -м децимальном интервале на усреднённую чувствительность  $S_i$  данного канала для того же децимального интервала:

$$\begin{aligned} Q_T &= \sum_{i=1}^9 P_{ij} S_{iT} ; \\ Q_{\Pi} &= \sum_{i=1}^9 P_{ij} S_{i\Pi} ; \\ Q_B &= \sum_{i=1}^9 P_{ij} S_{iB} . \end{aligned} \quad (2.1)$$

Индексы Т, П, Б означают здесь “тепловой”, “промежуточный” и “быстрый” каналы измерительного модуля соответственно.

По результатам этих расчётов определялись действительные значения выходных сигналов каналов измерения тепловых, промежуточных и быстрых

нейтронов, а также значения интегральной плотности измеряемого потока для каждой реализации обучающей и проверочной выборок с помощью программы обработки спектральных характеристик детекторов.

Полученный массив данных использовался для обучения и проверки точности обученной нейронной сети. Здесь важно отметить тот факт, что благодаря тому, что входные потоки моделируются, нам известны «истинные» значения спектральной плотности для каждого децимального интервала, а также укрупнённых интервалов, определяющих тепловую, промежуточную и быструю составляющие нейтронного потока и интегральной плотности всего потока. Сравнивая их с ответами сети по каждому выходу и их сумме, мы можем определять ошибки сети и, используя метод обратного распространения ошибки, проводить обучение сети. Обучение сети проводится с помощью специализированной программы, которая имеет блок выбора типа и конфигурации нейронной сети. Результаты обучения сети (полученные погрешности, время обучения) обрабатываются программой обработки и вывода результатов моделирования.

## **2.4. Выбор оптимальной архитектуры, конфигурации и методики обучения нейронных сетей для решаемых задач**

### **2.4.1. Постановка задачи**

Задачей нейронной сети в разрабатываемом нейтронном спектрометре является определение значений усреднённых по децимальным интервалам энергии спектральных плотностей нейтронных потоков по данным, получаемым от блока детектирования. В созданной системе имитационного моделирования имеется в виду не сам блок детектирования, а его имитационная модель, на вход которой последовательно загружаются имитационные модели реализаций спектров. Поскольку действительные значения этих усреднённых спектральных плотностей для каждой реализации и для каждого децимального интервала энергии нам известны, то имеется возможность сравнить ответы нейронной сети с действительными значениями этих спектральных плотно-

стей. На минимизации этих ошибок при многократном предъявлении на входы обучаемой нейронной сети реализаций обучающей выборки строятся все итерационные процедуры обучения нейронных сетей. А при подаче на входы уже обученной нейронной сети реализаций проверочной выборки (которые не участвовали в её обучении) определяется предсказательная способность нейронной сети, т.е. величина возможных ошибок при предъявлении на её входы новых реализаций. Для решения этой задачи нейронная сеть должна иметь девять выходов (по числу энергетических интервалов, на которых определяются усреднённые значения спектральной плотности измеряемых нейтронных потоков). Число нейронов входного слоя выберем равным трём – по числу измерительных каналов используемого блока детектирования.

Кроме указанной основной задачи большой интерес представляет дополнительная задача: обучение нейронной сети определению плотностей потоков тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов. Тогда можно будет сравнить погрешности прототипного прибора МКС-03С без использования нейронной сети (т.е. в том виде, в каком он сейчас выпускается) с его погрешностями при встраивании в него предварительно обученной нейронной сети для совместной обработки данных, получаемых от блока детектирования, при измерении потоков с одними и теми же спектрами. Для этого необходимо составить имитационную модель прибора МКС-03С.

#### 2.4.2. Выбор архитектуры нейронных сетей

Рассматривалось применение нейронных сетей нескольких архитектур [82]:

- а) многослойные нейронные сети прямого распространения с различными передаточными функциями нейронов;
- б) нейронные сети с радиальными базисными функциями *RBF*;
- в) сеть Элмана.

Каждая из них имеет определённые достоинства и недостатки, и для задач разных классов оптимальной может оказаться та или другая из них.

*Многослойные сети прямого распространения* применяются наиболее широко, поскольку наиболее детально исследованы теоретически и для многих практических задач обеспечивают минимум настраиваемых коэффициентов при сопоставимой точности по сравнению с сетями других типов.

*RBF-сети* представляют собой двухслойные сети без обратных связей, содержащие один скрытый слой радиально-симметричных нейронов. Достоинствами данного типа сетей перед многослойной сетью прямого распространения являются:

- возможность моделирования произвольной нелинейной функции с помощью одного промежуточного слоя, что избавляет от необходимости решать вопрос о необходимом числе промежуточных слоёв;
- более быстрое обучение (требуется меньшее число эпох обучения). Но есть и недостатки: плохие экстраполирующие свойства; большая размерность сети.

Существует несколько модификаций нейронных сетей данного типа:

- радиальная базисная сеть (*RB*);
- радиальная базисная сеть с нулевой ошибкой (*RBE*);
- обобщённо-регрессионная нейронная сеть (*GRNN*).

Учитывая вышесказанное, для обоснованного выбора архитектуры нейронных сетей, наиболее пригодной для наших задач, были опробованы все указанные архитектуры. Все они исследовались на задаче восстановления спектров нейтронных потоков всех базовых спектров с использованием полученной базы данных моделей реализаций нейтронных потоков и имитационной модели блока детектирования. Исследования проводились с помощью программы [98], входящей в созданную систему имитационного моделирования и выполняющей функции обучения нейронной сети и восстановления энергетических спектров. Обучение каждой нейронной сети проводилось по всем реализациям обучающей выборки (всего 900 реализаций), а ошибки определялись по реализациям проверочной выборки (всего 450 реализаций). Результаты исследований для нейронных сетей различных видов представле-

ны в таблице 2.7. В ней показаны среднеквадратические ошибки ответов нейронных сетей по всем группам спектров для каждого децимального интервала энергии нейtronов [82].

Таблица 2.7 – Среднеквадратические ошибки выходов нейронных сетей по энергетическим интервалам, %

Энергетический интервал	Многослойная Сеть	Радиальная сеть RB	Радиальная сеть RBE	Сеть GRNN	Сеть Элмана
0,025-0,25 эВ	9,97	12,44	12,44	9,97	12,36
0,25-2,5 эВ	4,64	7,06	7,05	4,64	7,24
2,5-25 эВ	5,63	6,65	6,65	5,63	6,68
25-250 эВ	5,54	6,81	6,80	5,54	6,86
0,25-2,5 кэВ	5,04	6,13	6,12	5,04	6,29
2,5-25 кэВ	3,66	4,56	4,56	3,66	4,66
25-250 кэВ	9,95	14,12	14,12	9,95	13,85
0,25-2,5 МэВ	5,05	7,93	7,93	5,05	7,85
2,5-25 МэВ	3,89	5,74	5,74	3,89	5,69
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>9,97</b>	<b>12,44</b>	<b>12,44</b>	<b>9,97</b>	<b>12,36</b>

Из неё видно, что сети RB, RBE и сеть Элмана дают очень близкие результаты, а многослойная сеть и сеть GRNN существенно лучше на всех энергетических интервалах. При этом сети RB и RBE по требуемой сложности (количеству нейронов и настраиваемых при обучении коэффициентов) существенно превышают сеть Элмана и сеть прямого распространения.

Дело в том, что конфигурация данных сетей не задаётся изначально, а определяется в процессе итеративной процедуры обучения: на каждом шаге обучения добавляется один нейрон и процедура продолжается до тех пор, пока сумма квадратов ошибок не станет меньше заданной или не будет использовано максимальное их число. Это приводит к большому количеству нейронов, а значит и к объёмным матрицам весов. В данном случае при достижении относительной погрешности, сравнимой с сетью прямого распространения 3-6-9, число коэффициентов радиальной базисной сети достигло 3259, число коэффициентов сети RBE достигло 11709, в то время как многослойная сеть 3-6-9 имеет всего 99 коэффициентов.

Сеть GRNN, хотя и даёт наравне с сетью прямого распространения наилучшие результаты по точности, имеет все недостатки, характерные для радиальных базисных сетей – высокую сложность получаемой после обучения сети. В данном случае потребовалось 11700 настраиваемых коэффициентов.

Таким образом, для нашей задачи наилучшей оказалась многослойная сеть прямого распространения с сигмоидными передаточными функциями конфигурации 3-6-9, поскольку при таком же качестве аппроксимации иско- мой сложной функции как сеть GRNN имеет во много раз меньшую вычис- лительную сложность.

#### 2.4.3 Выбор конфигураций используемых нейронных сетей

Конкретные конфигурации нейронных сетей во многом определяются числом входных и выходных параметров в метрических (регрессионных) задачах или числом входных информативных признаков и выходных классов в задачах классификации. Наши задачи относятся к классу метрических задач. Входными параметрами являются выходные данные трёх измерительных каналов блока детектирования, а выходными – усреднённые по интервалам энергии значения спектральных плотностей измеряемых нейтронных пото- ков. В основной задаче мы имеем 9 децимальных интервалов энергии, следо- вательно, столько же будет выходных параметров. В дополнительной задаче весь диапазон энергий разделяется всего на три интервала (тепловой, проме- жуточный и быстрый), соответственно, и выходных параметров сети будет три. Входных параметров и в первой, и во второй задачах одинаковое число – три (по числу измерительных каналов блока детектирования). Конечно, чис- ло нейронов во входном слое не обязательно должно соответствовать числу входных параметров, однако опыт показывает, что чаще всего такое соот- ветствие является предпочтительным. Число нейронов в выходном слое много- слойных сетей прямого распространения однозначно определяется характе- ристиками решаемых задач (для наших задач выходной слой сети должен со-

стоять из девяти нейронов для основной задачи и трёх нейронов для дополнительной). Остаётся решить вопрос с промежуточными слоями. С увеличением числа промежуточных слоёв потенциальные возможности нейронной сети возрастают, но в ещё большей степени возрастает объём необходимых вычислений (если эмулировать нейронную сеть на компьютере). Теория нейронных сетей развита, в основном, для сетей с одним промежуточным слоем и не даёт однозначных рекомендаций в каких случаях необходимо увеличивать число промежуточных слоёв. Практика же использования нейронных сетей показывает, что для задач, плохо решаемых нейронной сетью с одним промежуточным слоем, увеличение числа промежуточных слоёв несущественно сказывается на эффективности решения задачи. Поэтому будем использовать нейронные сети с одним промежуточным слоем.

Для оценки числа нейронов  $L$  в промежуточном слое однородных нейронных сетей с сигмоидными передаточными функциями воспользуемся эвристической формулой:

$$\begin{aligned} 2(L + m + n) &\leq N \leq 10(L + m + n) \\ \frac{N}{10} - n - m &\leq L \leq \frac{N}{2} - n - m \end{aligned} \quad . \quad (2.2)$$

где  $n$  — размерность входного сигнала,  $m$  — размерность выходного сигнала,  $N$  — число элементов обучающей выборки.

Для реализаций всех групп вместе  $N = 900$ , для самых малочисленных групп спектров  $N = 80$ . С учётом этого для основной задачи при  $N = 900$  получаем  $90 - 12 \leq L \leq 450 - 12$ , т.е. число нейронов в промежуточном слое может составлять от 78 до 438. Для минимальной по численности группы реализаций это будет:  $8 - 12 \leq L \leq 40 - 12$ . Поскольку отрицательным число нейронов быть не может, то оно должно лежать в пределах от 0 до 28. Как видим, этот критерий оставляет слишком широкий выбор.

Более конкретной и самой простой является следующая рекомендация [99]: число нейронов в промежуточном слое нейронных сетей с одним про-

межуточным слоем следует выбирать равным полусумме числа нейронов во входном и выходном слоях.

Согласно последней рекомендации число нейронов в промежуточном слое для основной задачи следует выбирать равным  $L = (3 + 9)/2 = 6$ , а для дополнительной задачи  $L = (3 + 3)/2 = 3$ .

Поэтому воспользуемся второй рекомендацией и, лишь в случае получения не удовлетворяющих нас результатов, будем увеличивать число нейронов в промежуточном слое. Таким образом, для основной задачи – определения усреднённых по децимальным интервалам энергии спектральных плотностей измеряемых нейтронных потоков – будем исследовать нейронные сети конфигурации 3-6-9 (т.е. 3 нейрона во входном слое, 6 – в промежуточном и 9 – в выходном), а для дополнительной задачи – определения плотностей составляющих тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов в измеряемых потоках – сети конфигурации 3-3-3 (по три нейрона в каждом слое). Структура нейронной сети для восстановления плотностей потока нейтронов в 9-ти децимальных интервалах представлена на рисунке 2.2.

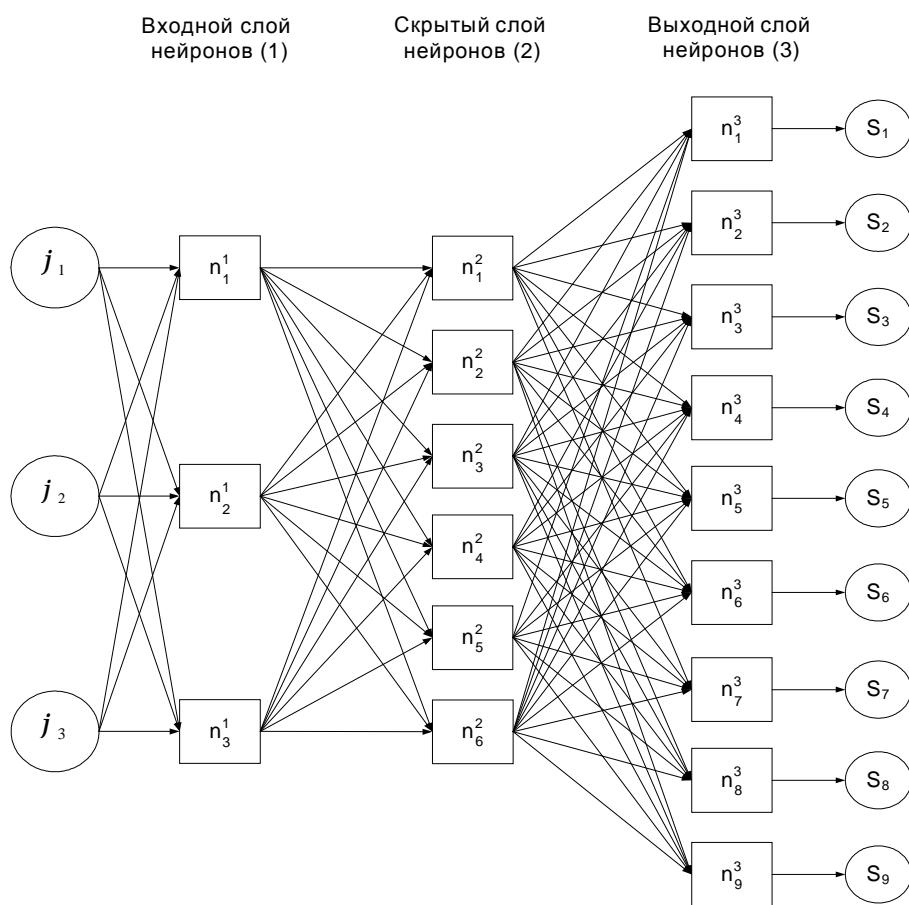


Рисунок 2.2 – Структура нейронной сети для восстановления плотностей потока нейтронов в 9-ти децимальных интервалах

Здесь:  $\varphi_i$  – нормированная к сумме интенсивность импульсных последовательностей  $i$ -го канала БДКС-05С:

$$\varphi_i^k = \frac{\Phi_i^k}{\sum_{i=1}^3 \Phi_i^k} , \quad (2.3)$$

где  $\Phi_i^k$  – 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 децимальном интервале энергии.

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

$$S_i = \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{\sum_{i=1}^3 k_i^2 * \frac{1}{1 + e^{-\left(\sum_{i=1}^3 k_i^1 * \varphi_i + b_i^1\right)} + b_i^2}}{\sum_{i=1}^3 k_i^3 * \frac{1}{1 + e^{-\left(\sum_{i=1}^3 k_i^1 * \varphi_i + b_i^1\right)} + b_i^3}}\right)}} \quad (2.4)$$

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.

#### 2.4.4. Выбор алгоритмов обучения нейронных сетей

Выбор оптимального обучающего алгоритма нейронной сети зависит от многих факторов, таких как число элементов обучающего множества, число настраиваемых параметров сети, требуемая ошибка обучения. Для многослойных сетей прямого распространения применяют следующие алгоритмы обучения:

1. Градиентные алгоритмы обучения:
  - $gd$  – алгоритм градиентного спуска;
  - $gdm$  – алгоритм градиентного спуска с возмущением;
  - $gda$  – алгоритм градиентного спуска с выбором параметра скорости настройки;
  - $gdx$  – комбинированный алгоритм обучения ( $gda$  и  $gdm$ );
  - $rp$  – пороговый алгоритм обратного распространения ошибки.
2. Алгоритмы метода сопряжённых градиентов:
  - $cgf$  – реализует метод Флетчера – Ривса;
  - $cgp$  – реализует метод Полака – Рибейры;
  - $cgb$  – реализует метод Биеле – Паузла;
  - $scg$  – реализует метод обучения, предложенный Моллером.
3. Квазиньютоновы алгоритмы:
  - $bfg$  – использует на каждой итерации приближённую оценку матрицы Гессе;
    - $oss$  – одношаговый алгоритм метода секущих плоскостей;
    - $lm$  – использует матрицу Якоби для оценки матрицы Гессе.

Все эти алгоритмы обучения реализуются в программном пакете *Neural Network Toolbox*. Можно предположить, что для нашей задачи алгоритм  $lm$  будет давать наименьшую ошибку обучения, так как он наиболее эффективен

при числе коэффициентов сети до нескольких сотен. Чтобы это подтвердить, была проведена проверка их эффективность на нашей основной задаче. Для этого проводилось обучение нейронной сети прямого распространения 3-6-9 на обучающей выборке, включающей спектры всех 45 видов с использованием каждого из этих алгоритмов. Критерием остановки обучения являлось прекращение уменьшения ошибки, а эффективность алгоритмов оценивалась по достигнутой среднеквадратической ошибке выходов обученной сети.

Для каждого из перечисленных алгоритмов обучения было выполнено по 5 прогонов для получения усреднённых результатов. Усреднённые по 5 прогонам результаты представлены в таблице 2.8. Как следует из данной таблицы, алгоритм *lm* действительно даёт наилучший результат - 0,0012%.

Таблица 2.8 – Среднеквадратические ошибки выходов обученной нейронной сети на обучающей выборке при разных обучающих алгоритмах и одинаковом времени обучения

Алгоритм обучения	Среднеквадратическая ошибка выходов обученной сети
<i>lm</i>	0,00121386
<i>cgp</i>	0,00134780
<i>cgf</i>	0,00162775
<i>rp</i>	0,00163609
<i>cgb</i>	0,00172636
<i>oss</i>	0,00236199
<i>bfg</i>	0,00252736
<i>gda</i>	0,00302763
<i>gdx</i>	0,00306857
<i>scg</i>	0,00316712
<i>b</i>	0,00965376
<i>gdm</i>	0,02461410
<i>gd</i>	0,02633480

Полученный результат хорошо согласуется с исследованиями обучения с использованием указанных алгоритмов, проведёнными компанией *Math-Works* в *Neural Network Toolbox User's Guide* [100]. При этом при обучении сетей для решения задачи аппроксимации сложной функции алгоритм *lm* показывает сильную зависимость ошибки обучения от количества коэффициентов сети.

Таким образом, для нейронной сети конфигурации 3-6-9 наилучшим является алгоритм обучения *lm*. Полученный вывод будет справедлив и для сети конфигурации 3-3-3, т.к. она характеризуется ещё меньшим числом коэффициентов – 36. Можно предположить, что при повышении количества коэффициентов сети (например, при увеличении количества нейронов входного и промежуточных слоёв, что неизбежно при увеличении числа детекторов в блоке детектирования), более эффективными окажутся алгоритмы метода сопряжённых градиентов, например *cgp*.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ БЛОКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БДКС-05С

#### 3.1. Постановка задачи

Имитационное моделирование нейтронного спектрометра реального времени на основе блока детектирования БДКС-05С проводилось с использованием совместной обработки выходных показательных интенсивностей импульсов данного блока с помощью предварительно обученных нейронных сетей двух конфигураций [65-66]. Главной целью исследования нейронных сетей конфигурации 3-6-9 была проверка самого принципа создания нейтронного спектрометра, лежащего в основе разработанного подхода (если при таком несовершенном блоке детектирования с явно недостаточным числом измерительных каналов при их невысокой селективности мы получим

приемлемые результаты, то это будет вполне убедительным доказательством справедливости и эффективности данного подхода). При этом необходимо было проверить ещё один важный вопрос: поскольку в зависимости от вида источника излучения все базовые спектры были разделены на пять групп, имеет ли смысл применять для каждой группы свою нейронную сеть (можно ожидать, что при этом должна повыситься точность восстановления спектров), или без существенных потерь для точности восстановления спектров можно использовать единую нейронную сеть, обученную для всех групп спектров вместе (при этом существенно упростится программное обеспечение и эксплуатация спектрометра, т.к. в него не понадобиться закладывать пять специализированных нейронных сетей одинаковой конфигурации, но обученных для разных групп базовых спектров). Для этого сначала для каждой группы спектров обучалась специализированная нейронная сеть, и определялись её ошибки при восстановлении спектров соответствующей группы, а затем обучалась общая универсальная сеть для всех групп спектров и ошибки этой сети сравнивались с ошибками специализированных сетей. При этом сохранялась одна и та же конфигурация для всех этих сетей.

Решение дополнительной задачи (для сетей конфигурации 3-3-3) имеет целью проверку эффективности совместной обработки сигналов с выходов измерительных каналов блока детектирования с помощью нейронной сети с целью уменьшения погрешностей измерения плотности потоков тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов. Практическое значение решения этой задачи состоит в том, что оно позволит сравнить погрешности измерения этих составляющих измеряемых нейтронных потоков без совместной обработки выходных сигналов блока детектирования и с использованием такой обработки с помощью нейронной сети. Кроме того, это позволит оперативно провести модернизацию выпускаемого в настоящее время ОАО «Курский завод «Маяк» прибора МКС-03С, снабдив его специализированной сетью для более точного определения плотности потоков тепловых, промежуточных и

быстрых нейтронов и второй нейронной сетью для плотности составляющих потоков на 9 децимальных интервалах энергии.

Начнём с нейронной сети с конфигурацией 3-6-9.

### **3.2. Раздельное обучение нейронных сетей для отдельных групп базовых спектров**

#### **3.2.1. Нейронная сеть для восстановления спектров нейтронных потоков от радиоизотопных источников**

Нейронная сеть конфигурации 3-6-9 использовалась для измерения спектральной плотности нейтронного потока в 9 децимальных интервалах энергии с помощью блока детектирования БДКС-05С. Форма спектра потока восстанавливается путём оценки средней плотности потока нейтронов в каждом децимальном интервале энергии. Нейронные сети для отдельных групп базовых спектров имели одну и ту же конфигурацию и отличались только обучающими и проверочными выборками, полученными в п. 2.2 для каждой из групп базовых спектров.

Результаты проверки нейронной сети на контрольных реализациях спектров нейтронных потоков от радиоизотопных источников (не участвовавших в процессе обучения) представлены в таблице. 3.1. В ней по каждому моделируемому источнику представлены средние значения ответов обученной нейронной сети по каждому децимальному интервалу при предъявлении 10 реализаций контрольной выборки, а в последней строке – по всему энергетическому диапазону от 0,025 эВ до 25 МэВ.

Таблица 3.1 – Средние значения спектральной плотности потоков нейтронов радиоизотопных источников, смоделированные обученной нейронной сетью, и действительные значения спектральных плотностей базовых спектров

Диапазон / Источник	U -235		Cf -252		Ra-Be		Pu-Be	
	Действ. знач.	Ответ сети						
0,025-0,25 Эв	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000
0,25-2,5 Эв	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000
2,5-25 Эв	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000

25-250 Эв	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000
250Эв-2,5 кэВ	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000
2,5-25 кэВ	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000
25-250 кэВ	0,0135	0,0135	0,0116	0,0118	0,0156	0,0147	0,0239	0,0225
250кэВ-2,5МэВ	0,1601	0,1572	0,1537	0,1525	0,0927	0,0916	0,0492	0,0541
2,5-25 МэВ	0,0336	0,0336	0,0397	0,0422	0,0675	0,0660	0,0511	0,0473
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>0,2072</b>	<b>0,2043</b>	<b>0,2050</b>	<b>0,2065</b>	<b>0,1758</b>	<b>0,1723</b>	<b>0,1242</b>	<b>0,1239</b>

Из данной таблицы следует, что отклонения усреднённых по 10 реализациям проверочной выборки ответов нейронной сети от соответствующих значений спектральных плотностей базовых спектров не превышают 6,3 % (для источника U-235 максимальное отклонение равно 1,8 %, для Cf-252 – 6,3 %, для Ra-Be – 5,8 % и для Ru-Be – 5,8%). А по интегральной плотности потока (последняя строка таблицы) отклонения ещё меньше: 1,4 % для U-235, 0,7 % для Cf-252, 2 % для Ra-Be и 0,24 % для Ru-Be. При этом не следует забывать, что при генерировании реализаций спектров проверочной выборки к значениям спектральной плотности базового спектра на каждом децимальном интервале энергии добавлялась случайная величина со среднеквадратическим отклонением в 10 %, а приводимые в данной таблице ответы нейронной сети представляют собой средние значения ответов по 10 реализациям.

Показательно, что для низкоэнергетического диапазона (до 25 кэВ) показания нейронной сети точно равны нулю, что и соответствует реальным спектрам радиоизотопных источников, хотя все каналы используемого блока детектирования в этом диапазоне дают далеко не нулевые значения. Это ещё раз подтверждает высокую адаптационную способность нейронных сетей.

### 3.2.2. Нейронная сеть для восстановления спектров нейтронов утечки из критических сборок

Максимальные относительные ошибки обученной нейронной сети для реализаций контрольной выборки представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Максимальные относительные ошибки нейронной сети для восстановления спектров потоков нейтронов утечки за границы активной

зоны критических сборок по реализациям проверочной выборки, %

Диапазон /Источник	КС-1	КС-2	КС-3	КС-4
0,025-0,25 Эв	0,053	0,920	1,847	0,785
0,25-2,5 Эв	0,053	1,433	1,973	0,782
2,5-25 Эв	0,053	1,108	2,031	0,331
25-250 Эв	0,069	1,549	2,422	1,582
250Эв-2,5 кэВ	0,046	0,640	1,890	1,338
2,5-25 кэВ	0,125	0,815	1,451	4,155
25-250 кэВ	0,952	3,915	2,298	1,516
250кэВ-2,5МэВ	3,099	6,045	1,715	0,679
2,5-25 МэВ	1,069	1,731	1,587	1,508
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>-0,279</b>	<b>-0,321</b>	<b>0,116</b>	<b>-0,142</b>

Из данной таблицы следует, что максимальные ошибки при измерении реализаций проверочной выборки в большинстве случаев не превышают единиц процентов, лишь наибольшая из них достигает 10,5%. Представленные в последней строке таблицы ошибки нейронной сети при определении интегральной плотности нейтронных потоков существенно уменьшились – до десятых долей процента.

### 3.2.3. Нейронная сеть для восстановления спектров нейтронов утечки из защиты реакторов различных типов

Результаты проверки нейронной сети на контрольных реализациях (не участвовавших в процессе обучения) представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Максимальные относительные ошибки нейронной сети, полученные по контрольной выборке, %

Диапазон/Источник	У-1	У-2	У-3	У-4	У-5
0,025-0,25 Эв	1,935	4,981	6,135	1,036	1,354
0,25-2,5 Эв	16,431	17,385	3,654	6,559	13,216
2,5-25 Эв	6,947	12,571	5,840	1,975	15,341
25-250 Эв	4,380	15,210	18,394	6,297	24,182
250Эв-2,5 кэВ	2,259	6,701	17,533	7,868	7,178
2,5-25 кэВ	2,938	7,140	8,194	8,982	7,729
25-250 кэВ	3,163	7,458	7,535	13,216	7,750
250кэВ-2,5МэВ	0,476	1,241	10,143	2,439	7,094

2,5-25 МэВ	0,934	0,682	3,320	1,505	3,694
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>-0,082</b>	<b>-0,115</b>	<b>-0,361</b>	<b>-0,093</b>	<b>-0,196</b>

Из данной таблицы следует, что максимальные ошибки нейронной сети на реализациях проверочной выборки в основном лежат в пределах 10 %, а наибольшая из них составляет 24,18 %. Это весьма неплохо, учитывая значительное разнообразие форм спектров в данной группе и малое число выходных каналов используемого блока детектирования.

Существенно меньшими получаются ошибки оценок интегральной плотности потоков, представленные в последней строке данной таблицы. Они составляют десятые или даже сотые доли процента (что обусловлено усреднением погрешностей по энергетическим интервалам).

### 3.2.4. Нейронная сеть для восстановления спектров потоков нейтронов в активной зоне реакторов

Нейронная сеть обучалась на имитационных моделях потоков нейтронов в активных зонах реакторов трёх типов [66]:

- 1) исследовательского реактора на тепловых нейтронах ИРТ-2000 (МИФИ): потоков в каналах ВЭК-6И, ВЭК-10И, ВЭК-11И, ВЭК-12И; потока в канале ВЭК-13И; потоков в канале ГЭК-2И;
- 2) водо-водяного реактора ВВР-К: потоков в каналах ВЭК-1-1В, ВЭК-5В, ВЭК-13В и ВЭК-14В;
- 3) реактора на быстрых нейтронах БР-5: потоки в каналах Б-2 и Б-3.

Таким образом, всего анализировалось 14 разных потоков с различными формами энергетического спектра. По каждому из них, как и в предыдущих случаях, генерировалось 30 реализаций, из которых 20 входили в обучающую выборку и 10 – в контрольную. Следовательно, полный массив реализаций обучающей выборки составил 280, а проверочной выборки – 140 реализаций. Результаты моделирования представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Максимальные относительные погрешности ответов нейронной сети по реализациям проверочной выборки

Диапазон/ Источник	ВЭК-12И	ВЭК-11И	ВЭК-6И	ВЭК-10И	ВЭК-13И	ГЭК-2-1И	ГЭК-2-2И
0,025-0,25 Эв	3,931	10,490	0,578	6,283	0,902	4,424	2,264
0,25-2,5 Эв	4,667	10,472	1,183	7,142	3,962	3,972	0,009
2,5-25 Эв	1,365	9,282	2,737	2,313	5,047	3,948	1,540
25-250 Эв	1,858	10,562	3,475	11,265	8,159	2,042	0,529
250Эв-2,5 кэВ	0,646	6,050	3,856	4,704	5,647	0,324	0,438
2,5-25 кэВ	4,227	7,133	4,531	5,445	5,032	3,015	2,472
25-250 кэВ	2,105	5,422	6,746	13,677	1,726	4,997	5,051
250кэВ-2,5МэВ	10,189	14,435	11,394	10,104	8,974	7,789	1,700
2,5-25 МэВ	1,888	1,033	3,540	8,520	2,446	1,050	5,703
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>-0,305</b>	<b>-0,232</b>	<b>-0,417</b>	<b>0,177</b>	<b>-0,197</b>	<b>-0,278</b>	<b>0,413</b>
Диапазон/ Источник	ГЭК-2-3И	ВЭК-5В	ВЭК-13В	ВЭК-1-1В	ВЭК-14В	Б-2	Б-3
0,025-0,25 Эв	1,158	1,858	2,378	3,525	-0,148	3,744	0,178
0,25-2,5 Эв	2,674	7,313	6,485	6,616	2,650	3,394	0,479
2,5-25 Эв	0,961	5,457	4,663	3,349	2,504	0,886	0,461
25-250 Эв	1,818	5,111	5,298	1,601	3,668	0,031	1,479
250Эв-2,5 кэВ	1,775	3,201	3,897	5,764	4,531	-0,279	1,718
2,5-25 кэВ	2,015	4,013	2,571	5,551	7,284	1,101	2,414
25-250 кэВ	1,512	4,610	5,691	12,085	8,688	13,306	4,098
250кэВ-2,5МэВ	2,201	16,731	8,816	1,456	-3,590	1,032	1,416
2,5-25 МэВ	8,180	-0,591	-0,351	4,049	8,509	1,717	0,348
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>0,482</b>	<b>-0,425</b>	<b>-0,289</b>	<b>0,244</b>	<b>0,508</b>	<b>0,227</b>	<b>-0,276</b>

Из данной таблицы видно, что максимальные ошибки при измерении реализаций проверочной выборки ниже, чем в предыдущем случае (наибольшая из них составляет 14,43 %), хотя разнообразие форм спектров в данной группе достаточно велико. По интегральной плотности потоков ошибки резко снижаются и не превышают десятых долей процента.

### 3.2.5. Нейронная сеть для восстановления спектров потоков нейтронов на рабочих местах персонала в защищённых зонах

Здесь моделировались спектры нейтронных полей, измеренные на рабочих местах персонала ФГУП «Горно-химический комбинат» (г. Железногорск, Красноярский край). Измерения проводились с помощью многошарового нейтронного спектрометра Боннера РСУ-01-СБ-1, описанного в п. 1.1.6, сотрудниками ГНЦ РФ «Институт физики высоких энергий» (г. Протвино, Московская обл.). Всего были проведены замеры в 18 точках в защищённых

помещениях на рабочих местах персонала. Описание этих точек представлено в [66].

Процедура моделирования проводилась аналогично предыдущим случаям. Так же, как и в предыдущих случаях приведём максимальные относительные ошибки нейронной сети на реализациях проверочной выборки. Они представлены в таблице 3.5. Из данной таблицы видно, что максимальные ошибки при измерении реализаций проверочной выборки несколько выше, чем в предыдущих случаях (наибольшая из них составляет 19,1 %), что объясняется большим разнообразием форм спектров в данной группе и большим числом самих базовых спектров (18). Но также как и в предыдущих случаях, ошибки определения интегральной плотности потока нейтронов (в таблице выделены жирным шрифтом) существенно ниже и наибольшая из них составила 0,63%.

**Таблица 3.5 – Максимальные относительные погрешности значений спектральной плотности нейтронного излучения по реализациям проверочной выборки, полученные с помощью нейронной сети**

Диапазон/Источник	ГХК-1	ГХК-2	ГХК-3	ГХК-4	ГХК-5	ГХК-6	ГХК-7
0,025-0,25 Эв	1,045	11,039	8,591	1,883	6,739	1,870	10,199
0,25-2,5 Эв	3,620	2,666	0,579	3,675	7,244	8,042	6,137
2,5-25 Эв	2,628	1,092	2,713	4,424	6,573	8,499	-0,865
25-250 Эв	3,590	1,364	3,966	4,746	7,146	7,777	3,300
250Эв-2,5 кэВ	1,939	-0,404	1,295	2,936	0,687	3,531	6,471
2,5-25 кэВ	-0,913	3,248	6,908	3,339	-1,243	-2,252	7,132
25-250 кэВ	11,523	4,868	7,541	3,222	14,967	10,515	13,119
250кэВ-2,5МэВ	3,830	15,975	19,102	3,304	7,000	1,149	0,803
2,5-25 МэВ	3,607	2,922	-0,310	3,306	2,528	1,517	0,134
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>0,264</b>	<b>-0,336</b>	<b>-0,382</b>	<b>0,108</b>	<b>-0,326</b>	<b>-0,354</b>	<b>-0,305</b>
Диапазон/Источник	ГХК-8	ГХК-9	ГХК-10	ГХК-11	ГХК-12	ГХК-13	ГХК-14
0,025-0,25 Эв	-0,436	0,039	0,030	1,164	2,234	2,178	1,766
0,25-2,5 Эв	3,219	3,040	0,802	7,792	0,857	2,600	0,004
2,5-25 Эв	2,893	2,727	0,307	7,169	1,154	3,019	-0,027
25-250 Эв	1,072	1,870	0,046	4,469	1,027	2,565	0,523
250Эв-2,5 кэВ	1,837	1,901	0,887	7,104	1,178	1,248	-0,106
2,5-25 кэВ	5,102	3,778	0,175	5,056	2,011	1,646	0,172

25-250 кэВ	7,809	0,115	2,411	4,101	2,978	2,150	3,733
250кэВ-2,5МэВ	-3,439	7,451	-0,247	6,002	4,189	5,777	3,643
2,5-25 МэВ	6,936	3,204	2,174	3,019	5,603	1,333	1,131
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>0,451</b>	<b>-0,251</b>	<b>-0,232</b>	<b>-0,085</b>	<b>0,421</b>	<b>0,267</b>	<b>0,301</b>
Диапазон/Источник	ГХК-15	ГХК-16	ГХК-17	ГХК-18			
0,025-0,25 Эв	2,947	0,959	7,971	4,907			
0,25-2,5 Эв	0,389	3,512	1,819	1,541			
2,5-25 Эв	0,241	1,675	2,016	3,313			
25-250 Эв	0,194	2,672	1,929	4,258			
250Эв-2,5 кэВ	0,391	2,985	3,614	6,035			
2,5-25 кэВ	-0,062	3,024	7,769	8,814			
25-250 кэВ	1,493	-1,863	12,419	6,224			
250кэВ-2,5МэВ	8,079	10,990	3,134	6,132			
2,5-25 МэВ	1,276	4,519	3,865	3,567			
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>-0,633</b>	<b>-0,278</b>	<b>0,200</b>	<b>-0,0 70</b>			

### 3.3. Обучение единой нейронной сети для всех групп базовых спектров

В данном случае для обучения нейронной сети использовались все группы спектров нейтронного излучения, рассмотренные выше.

Так же, как и в предыдущих случаях, были сопоставлены ответы обученной нейронной сети с известными значениями усреднённых по децимальным энергетическим интервалам спектральных плотностей для реализаций обучающей и проверочной выборок всех видов спектров и подсчитаны абсолютные и относительные погрешности. Как и в предыдущих случаях, точность сети будем характеризовать максимальными относительными погрешностями значений спектральной плотности нейтронного излучения, полученными по ответам сети для проверочной выборки, реализации которой не участвовали в обучении сети. Эти ошибки сети представлены по каждой группе спектров (для удобства сопоставления со специализированными сетями, рассмотренными выше) в таблицах 3.6 – 3.10.

Таблица 3.6 – Максимальные относительные погрешности оценок спектральной плотности нейтронного излучения, полученных по проверочной выборке с помощью общей нейронной сети для спектров радиоизотопных источников, %

Диапазон/Источник	U-235	Cf-252	Ra-Be	Pu-Be
0,025-0,25 эВ	-0,022	0,161	1,194	3,764
0,25-2,5 эВ	0,413	0,142	0,153	1,586

2,5-25 эВ	-0,001	0,097	0,569	0,076
25-250 эВ	0,179	-0,162	0,132	1,152
250Эв-2,5 кэВ	0,159	-0,238	0,399	1,515
2,5-25 кэВ	-0,419	-0,744	1,358	3,183
25-250 кэВ	-0,528	0,304	2,027	-1,560
250кэВ-2,5 МэВ	1,974	0,937	-0,270	5,755
2,5-25 МэВ	0,248	1,323	3,098	3,921
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>-0,135</b>	<b>0,093</b>	<b>0,202</b>	<b>-1,020</b>

Таблица 3.7 – Максимальные относительные погрешности оценок спектральной плотности нейтронного излучения, полученных по проверочной выборке с помощью общей нейронной сети для спектров потоков нейтронов утечки за границы активной зоны критических сборок, %

Диапазон/Источник	КС-1	КС-2	КС-3	КС-4
0,025-0,25 Эв	-0,049	4,531	0,081	1,574
0,25-2,5 Эв	0,385	0,753	0,223	-0,651
2,5-25 Эв	0,007	0,171	0,178	1,227
25-250 Эв	0,213	-0,267	1,302	1,877
250Эв-2,5 кэВ	0,261	-1,469	1,239	3,884
2,5-25 кэВ	-0,265	-1,564	2,811	5,202
25-250 кэВ	2,399	6,122	-1,847	8,021
250кэВ-2,5МэВ	0,327	8,699	4,110	0,662
2,5-25 МэВ	0,699	0,013	-1,065	0,778
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>0,136</b>	<b>-0,329</b>	<b>-0,311</b>	<b>0,044</b>

Таблица 3.8 – Максимальные относительные погрешности оценок спектральной плотности нейтронного излучения, полученных с помощью общей нейронной сети для спектров потоков нейтронов утечки из защиты реакторов различных типов

Диапазон/Источник	У-1	У-2	У-3	У-4	У-5
0,025-0,25 Эв	19,459	41,030	27,247	5,675	55,913
0,25-2,5 Эв	-19,033	0,455	-3,732	12,489	9,357
2,5-25 Эв	-1,750	-8,641	-0,739	9,532	-9,681
25-250 Эв	4,468	-1,550	-2,915	3,827	-26,078
250Эв-2,5 кэВ	12,591	-6,133	2,813	-5,721	-15,939
2,5-25 кэВ	9,794	3,524	5,529	-9,606	3,458
25-250 кэВ	20,790	51,711	19,822	33,788	64,697
250кэВ-2,5МэВ	-1,367	9,634	10,075	10,119	1,687
2,5-25 МэВ	4,931	-2,202	-2,956	-3,607	-2,031
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>0,578</b>	<b>0,370</b>	<b>0,234</b>	<b>-0,341</b>	<b>0,555</b>

Таблица 3.9 – Максимальные относительные погрешности оценок спектральной плотности нейтронного излучения, полученных с помощью общей нейронной сети для спектров потоков нейтронов из активной зоны реакторов, %

Диапазон/ Источник	ВЭК-12И	ВЭК-11И	ВЭК-6И	ВЭК-10И	ВЭК-13И	ГЭК-2-1И	ГЭК-2-2И
0,025-0,25 Эв	13,611	29,569	3,937	17,953	-1,478	12,590	1,568
0,25-2,5 Эв	-1,242	1,520	1,589	-0,641	1,030	-1,534	0,965
2,5-25 Эв	-2,671	-0,396	1,074	2,735	3,676	-2,148	4,572
25-250 Эв	-2,335	-4,397	2,770	3,884	3,899	1,772	-0,143
250Эв-2,5 кэВ	-1,974	-0,684	4,239	4,309	7,929	4,180	-0,548
2,5-25 кэВ	-1,243	4,376	3,206	2,893	11,379	-1,834	-1,199
25-250 кэВ	8,160	23,295	-2,045	17,461	5,059	5,823	1,197
250кэВ-2,5МэВ	19,390	18,891	13,835	7,553	2,141	17,980	12,754
2,5-25 МэВ	-4,144	-9,529	-2,830	0,359	2,054	-4,858	-0,422
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>-0,474</b>	<b>-0,202</b>	<b>-0,497</b>	<b>0,121</b>	<b>-0,074</b>	<b>-0,533</b>	<b>-0,660</b>
Диапазон / Источник	ГЭК-2-3И	ВЭК-5В	ВЭК-13В	ВЭК-1-1В	ВЭК-14В	Б-2	Б-3
0,025-0,25 Эв	4,794	8,428	7,753	7,363	4,085	3,375	1,430
0,25-2,5 Эв	0,033	1,692	0,655	1,252	-0,535	3,929	0,853
2,5-25 Эв	1,802	5,256	0,088	3,032	2,459	0,913	-0,032
25-250 Эв	1,026	2,897	4,803	3,690	3,500	-1,4	-0,754
250Эв-2,5 кэВ	-0,076	3,770	3,275	0,804	4,885	-1,75	-0,323
2,5-25 кэВ	-1,023	-1,002	1,419	4,116	4,767	6,697	4,313
25-250 кэВ	10,556	6,628	7,901	10,600	6,423	8,805	2,107
250кэВ-2,5МэВ	5,838	16,852	13,359	4,509	1,338	-3,29	2,603
2,5-25 МэВ	-0,067	-5,645	-1,698	4,045	2,905	2,141	0,901
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>-0,410</b>	<b>-0,584</b>	<b>-0,412</b>	<b>0,233</b>	<b>0,253</b>	<b>0,296</b>	<b>0,170</b>

Таблица 3.10 – Максимальные относительные погрешности оценок спектральной плотности нейтронного излучения, полученных с помощью общей нейронной сети для спектров потоков нейтронов на рабочих местах персонала в защищённых зонах ГХК, %

Диапазон/ Источник	ГХК-1	ГХК-2	ГХК-3	ГХК-4	ГХК-5	ГХК-6	ГХК-7	ГХК-8
0,025-0,25 Эв	-3,646	1,871	3,838	-5,830	-9,791	-21,53	-11,81	-7,924
0,25-2,5 Эв	8,639	5,513	6,886	10,925	8,347	12,717	2,848	5,414
2,5-25 Эв	4,719	5,597	6,102	6,076	11,318	16,921	7,392	4,067
25-250 Эв	4,332	3,819	1,329	1,413	11,169	17,735	10,480	4,735
250Эв-2,5 кэВ	2,271	4,261	2,607	2,339	14,522	15,749	10,118	5,236
2,5-25 кэВ	-2,175	5,955	-0,041	0,819	14,719	6,753	15,278	7,995
25-250 кэВ	8,614	2,093	5,900	1,711	-4,375	-17,56	-13,30	5,406
250кэВ-2,5МэВ	-3,932	4,198	15,984	5,900	-3,490	-1,109	-4,002	-12,57
2,5-25 МэВ	8,373	5,500	2,896	3,838	8,976	7,313	7,499	12,163
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>0,326</b>	<b>0,243</b>	<b>-0,433</b>	<b>-0,355</b>	<b>-0,221</b>	<b>-0,332</b>	<b>0,168</b>	<b>0,638</b>
Диапазон/ Источник	ГХК-9	ГХК-10	ГХК-11	ГХК-12	ГХК-13	ГХК-14	ГХК-15	
0,025-0,25 Эв	-5,277	-1,360	-13,955	-0,709	-1,724	0,211	1,509	
0,25-2,5 Эв	4,521	2,143	16,836	1,199	0,261	-0,988	2,343	
2,5-25 Эв	4,701	1,056	13,597	0,760	1,657	-0,999	1,001	

25-250 ЭВ	4,219	1,396	12,964	2,166	2,957	-0,287	0,865
250ЭВ-2,5 кэВ	4,676	1,435	13,010	2,733	2,626	1,005	0,622
2,5-25 кэВ	4,721	0,383	5,011	2,760	3,814	3,204	-0,457
25-250 кэВ	-1,019	1,040	-8,856	1,361	2,023	6,124	2,743
250кэВ-2,5МэВ	-2,985	-1,300	-4,967	2,249	3,597	-1,382	7,846
2,5-25 МэВ	7,927	3,101	10,728	4,657	4,882	5,279	1,485
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>0,331</b>	<b>0,273</b>	<b>-0,176</b>	<b>0,282</b>	<b>0,342</b>	<b>0,596</b>	<b>-0,542</b>
Диапазон/ Источник	ГХК-16	ГХК-17	ГХК-18				
0,025-0,25 Эв	4,603	-13,011	-9,436				
0,25-2,5 Эв	7,898	16,177	14,868				
2,5-25 Эв	2,940	11,603	15,972				
25-250 Эв	1,814	14,380	9,496				
250Эв-2,5 кэВ	2,018	12,685	8,413				
2,5-25 кэВ	-0,251	6,969	6,291				
25-250 кэВ	4,134	-15,566	-13,361				
250кэВ-2,5МэВ	9,473	2,952	8,551				
2,5-25 МэВ	3,985	6,389	2,077				
<b>0,025 эВ-25 МэВ</b>	<b>-0,254</b>	<b>-0,312</b>	<b>-0,479</b>				

Из таблиц 3.6 и 3.7 следует, что спектры нейтронных излучений радиоизотопных источников и критических сборок восстанавливаются общей нейронной сетью с максимальными погрешностями (определенными по проверочной выборке), не превышающими 8,7 %, что примерно соответствует ошибкам специализированных нейронных сетей, рассмотренных в п.п. 3.2.1 и 3.2.2 (для потоков из критических сборок погрешность даже немного уменьшилась: с 10,5 до 8,7 %). Это можно объяснить существенным увеличением объема обучающей выборки для общей сети (с 80 для каждой из указанных специализированных сетей до 900 для общей сети).

Из сопоставления результатов, представленных в таблице 3.8, с результатами обучения соответствующей специализированной сети следует, что спектры нейтронных излучений из защиты реакторов различных типов восстанавливаются общей нейронной сетью с максимальными погрешностями, существенно (почти в 2,5 раза) превышающими погрешности специализированной нейронной сети. Объяснить это можно существенным отличием форм этих спектров от форм спектров других групп и сравнительно малым количеством базовых спектров этой группы.

Для потоков нейтронов из активной зоны ядерных реакторов при восстановлении спектров с помощью общей нейронной сети (табл. 3.9) погрешности восстановления также возросли по сравнению со специализированной сетью, в 2 раза (29,57 % против 14,43 %).

И наконец, для потоков нейтронов за зоной биологической защиты максимальные погрешности восстановления спектров с помощью общей нейронной сети несколько уменьшились по сравнению с погрешностями специализированной нейронной сети (до 17,56 % против 19,1 %).

Как и в случае специализированных сетей, интегральная плотность потоков определяется с гораздо большей точностью, чем спектральная плотность на отдельных интервалах. Максимальная относительная погрешность по реализациям проверочной выборки здесь составила 1,02 %, что значительно меньше максимальной погрешности определения спектральной плотности (64,7 %).

Для удобства сопоставления точности специализированных нейронных сетей, обученных на реализациях спектров каждой группы в отдельности, и общей нейронной сети, обученной на реализациях спектров всех групп вместе, в таблице 3.11 приведены максимальные и среднеквадратические погрешности оценок ими спектральной и интегральной плотностей потоков нейтронов по каждому виду источников.

Таблица 3.11 – 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, %	
	спец. сеть	общая сеть	спец. сеть	общая сеть	спец. 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

Из таблицы 3.11 видно, что по максимальным погрешностям оценок спектральной плотности общая нейронная сеть мало уступает специализированным. Только в двух случаях – при оценке спектральной плотности потоков утечки из защиты реакторов различных типов и потоков в активной зоне реакторов – максимальная относительная погрешность получилась для общей нейронной сети почти в 2,5 и 2 раза больше, чем для специализированной, а для остальных источников различия несущественны, причём для двух видов источников погрешность общей сети даже несколько уменьшается.

По среднеквадратическим погрешностям общая сеть оказалась менее точной, чем специализированные. Лишь в одном случае – при оценке спектральной плотности потоков радиоизотопных источников: общая сеть дала меньшую среднеквадратичную погрешность. По максимальным погрешностям оценок интегральной плотности потока общая сеть оказалась не хуже специализированных. Поэтому, учитывая аппаратурные и эксплуатационные преимущества использования общей нейронной сети для всех видов спектров, следует использовать именно общую нейронную сеть.

### **3.4. Имитационное моделирование промышленного радиометра-дозиметра нейтронного излучения МКС-03С с использованием базовых спектров**

#### **3.4.1. Построение математической модели радиометра-дозиметра нейтронного излучения МКС-03С**

Исходным прототипным прибором для разрабатываемого спектрометра являлся прибор МКС-03С [29,93] с блоком детектирования БДКС-05С. Для выявления преимуществ совместной обработки информации, получаемой от блока детектирования с помощью заранее обученной нейронной сети проведём моделирование показаний прибора МКС-03С при измерении полученных

в п.2.2. базовых потоков нейтронов. Для этого необходимо, прежде всего построить его математическую модель.

К сожалению, существующая методика градуировки и поверки приборов МКС-03С [29,93] не указывает, каким образом измеренные значения скоростей счёта в каналах измерения плотностей тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов пересчитываются в значения этих плотностей. Это не определено и в техническом описании прибора. Из него лишь следует, что измерение скорости счёта осуществляется путём измерения времени набора 256 импульсов, приходящих из блока детектирования по соответствующему каналу. Каковы численные значения коэффициентов пересчёта по каждому из каналов после проведения градуировки, и каков формат представления измеренных значений скорости счёта неизвестно, что и не даёт возможности промоделировать обработку информации в МКС-03С прямым путём.

Остаётся попробовать обходной путь. Имеется протокол градуировки четырёх приборов МКС-03С с помощью установки УКПН-1 с образцовым плутоний-бериллиевым источником нейтронного излучения ИБН 8-7 [65]. Задача состоит в том, чтобы по результатам этих измерений определить истинное распределение плотности потока по энергии и сопоставить его с показаниями прибора по плотностям тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов. Нам известно соотношение между исходным потоком источника (обозначим его  $P_0$ ) замедленным с помощью полиэтиленового конуса (согласно методике поверки) потоком (обозначим его  $P_3$ ):  $P_3 / P_0 = 0,37$ . Кроме того, нам известны зависимости чувствительностей каналов измерения тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов от энергии нейтронов (рис. 1.1). По ним в табл. 2.6 рассчитаны усреднённые значения чувствительностей каждого канала по каждому децимальному интервалу энергий. Эти значения даны в относительных единицах, причём за базу нормирования принималась чувствительность канала измерения тепловых нейтронов во всём диапазоне энергий (от 0,025 эВ до 14 МэВ). Тогда усреднённые чувствительности каналов измерения тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов по указан-

ным энергетическим диапазонам нетрудно посчитать, суммируя их чувствительности по соответствующим интервалам, попавшим в эти диапазоны. Результаты расчёта приведены в табл. 3.12.

Таблица 3.12 – Усреднённые значения чувствительностей каналов измерения тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов прибора МКС-03С по диапазонам энергий

Энергия нейтронов, эВ		Чувствительность по каналам $S_{ij}$ , отн. ед.		
Диапазон	Интервалы энергий	Тепловой канал	Промежуточный канал	Быстрый канал
Тепловой	0,025...2,5	0,285	0,727	0,12
Промежуточный	$2,5...0,25 \cdot 10^6$	0,605	1,9	0,332
Быстрый	$0,25 \cdot 10^6...25 \cdot 10^6$	0,11	0,67	0,334

Реального распределения плотности нейтронного потока по указанным трём диапазонам для образцового источника мы не имеем, поскольку, используя замедляющий конус, мы не вырезаем из спектра полосу быстрых нейтронов, а смещаем его в сторону меньших энергий. При этом, разность двух измерений (без замедляющего конуса и при его установке) показывает долю рассеянных и поглощённых в замедляющем конусе нейтронов, а не плотность потока быстрых нейтронов. Но распределение плотности уже замедленного потока по этим диапазонам мы определить можем, имея измерения без кадмievого фильтра и с ним. Действительно, первое измерение (без фильтра) по измерительному каналу тепловых нейтронов даёт плотность всего потока, измеренную данным измерительным каналом. Если бы этот поток состоял только из тепловых нейтронов, то второе измерение, проведенное с кадмievым фильтром, дало бы нулевой результат. Поскольку этого не происходит, то значит, в потоке есть доля нейтронов, энергия которых превышает тепловой уровень. Плотность этой составляющей нейтронного потока мы и фиксируем, благодаря тому, что чувствительность канала тепловых нейтронов для промежуточного диапазона почти такая же, как и для теплового. Есть все основания полагать, что поток, прошедший через замедляющий конус, не содержит быстрых нейтронов, т.е. зафиксированный во втором измерении

поток относится к промежуточному уровню. К сожалению, в протоколах градуировки прибора по тепловому каналу не фиксируются показания прибора по каналам промежуточных и быстрых нейтронов. Это упростило бы задачу. Но поскольку мы имеем соотношения чувствительностей этих каналов, то можно обойтись и одной калибровочной точкой – по каналу тепловых нейтронов. В самом деле, разность двух измерений по данному каналу (без фильтра и с фильтром) даёт нам действительное значение плотности потока тепловых нейтронов в замедленном потоке нейтронов.

Обозначим составляющие матрицы чувствительностей, представленной в табл. 3.12, следующим образом:

$$S_{TT} = 0,154 \quad S_{PT} = 0,372 \quad S_{BT} = 0,064$$

$$S_{TP} = 0,931 \quad S_{PP} = 2,255 \quad S_{BP} = 0,392$$

$$S_{TB} = 0,122 \quad S_{PB} = 0,670 \quad S_{BB} = 0,334$$

Здесь первый индекс обозначает измерительный канал, а второй – энергетическую составляющую входного потока нейтронов.

Соответственно этому, обозначим действительные значения энергетических составляющих плотности входного потока нейтронов как ПТ, ПП и ПБ, а измеренные прибором значения: ИПТ, ИПП и ИПБ. Соответствующие суммарные (интегральные) значения плотности потока обозначим как ПС и ИПС.

Для прибора №3 имеем следующие показания из протоколов градуировки [65]:

- измеренное значение по тепловому каналу ИПТ, в качестве которого следует взять результаты первого измерения без кадмивого фильтра: ИПТ = 2,17 Мнейtron/(м<sup>2</sup>·с);

- действительное значение плотности потока тепловых нейтронов ПТ, в качестве которого используется разность первого и второго измерений: ПТ = 0,98 Мнейtron/(м<sup>2</sup>·с);

- действительное значение суммарного потока ПС, в качестве которого можно использовать расчётное значение плотности замедленного потока:

$$ПС = 1,104 \text{ Мнейtron}/(м^2 \cdot с).$$

Измеренное значение каждой составляющей потока складывается из трёх составляющих: внесенных собственной составляющей входного потока и внесённых двумя другими составляющими входного потока:

$$\begin{aligned} ИПТ &= ПТ \cdot S_{TT} \cdot K_T + ПП \cdot S_{TP} \cdot K_{П} + ПБ \cdot S_{TB} \cdot K_B \\ ИПП &= ПТ \cdot S_{PT} \cdot K_T + ПП \cdot S_{PP} \cdot K_{П} + ПБ \cdot S_{PB} \cdot K_B \\ ИПБ &= ПТ \cdot S_{BT} \cdot K_T + ПП \cdot S_{BP} \cdot K_{П} + ПБ \cdot S_{BB} \cdot K_B \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $K_T$ ,  $K_{П}$  и  $K_B$  – градуировочные коэффициенты соответствующих каналов, которые необходимы для перевода непосредственно измеряемой скорости счёта импульсов, поступающих от соответствующего детектора, в единицы плотности потока.

К уравнениям (3.1) следует добавить ещё уравнения для суммарных потоков

$$ИПС = ИПТ + ИПП + ИПБ ; \quad (3.2)$$

$$ПС = ПТ + ПП + ПБ. \quad (3.3)$$

Если бы входной поток содержал только тепловые нейтроны, т.е.  $ПП = 0$  и  $ПБ = 0$ , то измеренный тепловым каналом поток соответствовал бы действительному значению:  $ИПТ = ПТ$ . Но измеренные значения составляющих промежуточных и быстрых нейронов при этом не будут нулевыми, а будут равны соответственно  $ИПП = ПТ \cdot S_{PT} \cdot K_T$ ;  $ИПБ = ПТ \cdot S_{BT} \cdot K_T$ .

Если же, как в нашем примере, входной поток содержит две составляющие  $ПС = ПТ + ПП$  и нам известны  $ИПТ$  и  $ПТ$ , то для него уравнения (3.1), (3.2) и (3.3) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} ИПТ &= ПТ \cdot S_{TT} \cdot K_T + ПП \cdot S_{TP} \cdot K_{П} ; \\ ИПП &= ПТ \cdot S_{PT} \cdot K_T + ПП \cdot S_{PP} \cdot K_{П} ; \\ ИПБ &= ПТ \cdot S_{BT} \cdot K_T + ПП \cdot S_{BP} \cdot K_{П} ; \end{aligned} \quad (3.4)$$

Отсюда

$$ИПС = ИПТ + ИПП = ПТ \cdot S_{TT} \cdot K_T + ПП \cdot S_{TP} \cdot K_{П} + ПТ \cdot S_{PT} \cdot K_T + ПП \cdot S_{PP} \cdot K_{П} \quad (3.5)$$

Из условия  $\text{ПС} = \text{ПТ} + \text{ПП}$  можно непосредственно определить действительное значение плотности потока промежуточных нейтронов:

$$\text{ПП} = \text{ПС} - \text{ПТ} = 1,104 - 0,98 = 0,124 \text{ Мнейtron}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Поскольку информационные сигналы для всех измерительных каналов представляют собой количество импульсов в единицу времени, получаемых от соответствующих детекторов, то, в принципе, для перевода их в единицы плотности потока для всех каналов должен использоваться один и тот же градуировочный коэффициент  $K_{\text{T}} = K_{\text{П}} = K_{\text{Б}} = K$ . Возможность их раздельного регулирования, предусмотренная в приборе, позволяет компенсировать индивидуальный разброс чувствительностей самих нейтронных счётчиков (детекторов) и их временной дрейф при градуировке и поверке прибора. Если этим разбросом и дрейфом пренебречь и считать градуировочные коэффициенты во всех каналах одинаковыми, то из первого уравнения можно найти значение этого коэффициента, поскольку все остальные величины нам известны:

$$\text{ИПТ} = \text{ПТ} \cdot S_{\text{TT}} \cdot K + \text{ПП} \cdot S_{\text{TP}} \cdot K;$$

откуда

$$K = \text{ИПТ} / (\text{ПТ} \cdot S_{\text{TT}} + \text{ПП} \cdot S_{\text{TP}}) = 2,27 / (0,98 \cdot 0,154 + 0,134 \cdot 0,931) = 8,234.$$

Для проверки можно использовать результат второго измерения (с кадмиевым фильтром), который будет представлять собой измеренное тепловым каналом значение от промежуточных нейтронов  $\text{ИПТ}_{\text{кф}}$ :

$$\text{ИПТ}_{\text{кф}} = \text{ПП} \cdot S_{\text{TP}} \cdot K = 0,134 \cdot 0,931 \cdot 8,234 = 1,027.$$

Этот результат близок к измеренному значению 1,28. Некоторое несоответствие можно объяснить неидеальностью кадмиевого фильтра, отсекающего тепловые нейтроны. Совершенно очевидно, что его характеристика не является ступенчатой, а значит, порог отсечки не может точно соответствовать 0,4 эВ. Кроме того, он поглощает и часть нейтронов надпороговой энергии. Не следует также забывать, что мы приняли градуировочные коэффициенты всех каналов одинаковыми. Поэтому данное приближение можно считать вполне удовлетворительным.

Теперь, зная матрицу чувствительностей и градуировочный коэффициент, можно, задавая входные потоки нейtronов с любой формой спектра, просчитать показания прибора МКС-03С.

### 3.4.2. Результаты имитационного моделирования радиометра-дозиметра МКС-03С с использованием базовых спектров

Для моделирования показаний прибора МКС-03С с полученными выше моделями нейтронных потоков достаточно провести расчёт потоков только с самими базовыми спектрами. Как и в предыдущем случае (для сетей 3-6-9), будем считать энергетический диапазон тепловых нейтронов от 0,025 до 2,5 эВ (два децимальных интервала), энергетический диапазон промежуточных нейтронов – от 2,5 эВ до 0,25 МэВ (5 децимальных интервалов) и диапазон быстрых нейтронов – от 0,25 до 25 МэВ (два децимальных интервала).

Теперь по усреднённым спектральным плотностям потоков по децимальным интервалам энергии необходимо рассчитать плотности потоков тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов в базовых спектрах. При этом следует учитывать, что, поскольку в исходных спектрах энергетическая шкала задана в логарифмическом масштабе, то относительная ширина всех децимальных интервалов энергии остаётся постоянной. А это означает, что усреднённые по децимальным интервалам спектральные плотности потока равны интегральным плотностям потока на данных децимальных интервалах. Тогда для получения интегральной плотности потока по нескольким соседним децимальным интервалам достаточно сложить соответствующие значения спектральных плотностей в этих интервалах.

Теперь, используя данные таблицы 3.12 чувствительностей всех трёх каналов к тепловым, промежуточным и быстрым нейтронам, по формулам (3.4) можно подсчитать показания прибора МКС-03С при измерении базовых нейтронных потоков. Результаты расчётов моделируемых показаний и действительных значений измеряемых величин приведены в таблицах 3.13-3.17.

Таблица 3.13 – Моделирование показаний прибора МКС-03С при измерении

базовых спектров первой группы

Базо- вый спектр	Показания прибора МКС-03С и действительное значение плотности измеряемого потока нейтронов, Мнейтр./( $m^2 \cdot c$ )							
	Тепловых нейтр.		Промеж. нейтр.		Быстрых нейтр.		Интегр. поток	
	пока- зания	действ. знач.	пока- зания	действ. знач.	пока- зания	действ. знач.	пока- зания	действ. знач.
U-235	0,2637	0	0,739	0,0135	0,606	0,1936	1,609	0,207
Cf-252	0,2600	0	0,709	0,0116	0,596	0,1934	1,565	0,205
Ra-Be	0,2517	0	0,681	0,0156	0,526	0,1602	1,459	0,176
Pu-Be	0,2417	0	0,565	0,0239	0,406	0,1003	1,213	0,124

Таблица 3.14 – Моделирование показаний прибора МКС-03С при измерении базовых спектров второй группы

Базо- вый спектр	Показания прибора МКС-03С и действительное значение плотности измеряемого потока нейтронов, Мнейтр./( $m^2 \cdot c$ )							
	Тепловых нейтр.		Промеж. нейтр.		Быстрых нейтр.		Интегр. Поток	
	пока- зания	действ. знач.	пока- зания	действ. знач.	пока- зания	действ. знач.	пока- зания	действ. знач.
KC-1	2,699	0	8,45	0,1143	6,247	2,044	17,396	2,1583
KC-2	3,076	0,0759	8,055	0,3738	3,967	0,6705	15,098	1,1202
KC-3	1,865	0	4,897	0,2886	1,975	0,142	8,737	0,4306
KC-4	4,786	0,02	12,53	0,7479	4,872	0,2686	22,188	1,0365

Таблица 3.15 – Моделирование показаний прибора МКС-03С при измерении базовых спектров третьей группы

Базо- вый спектр	Показания прибора МКС-03С и действительное значение плотности измеряемого потока нейтронов, Мнейтр./( $m^2 \cdot c$ )							
	Тепловых нейтр.		Промеж. нейтр.		Быстрых нейтр.		Интегр. Поток	
	пока- зания	действ. знач.	пока- зания	действ. знач.	пока- зания	действ. знач.	пока- зания	действ. знач.
Y-1	5,433	0,6969	13,5	0,589	4,64	0,2803	23,573	1,566
Y-2	5,514	0,3567	15,47	0,7725	4,74	0,595	25,724	1,724
Y-3	4,778	0,2885	11,3	0,5705	4,353	0,3452	20,431	1,204
Y-4	5,887	0,134	13,9	0,8284	5,000	0,1104	24,787	1,073
Y-5	4,513	0,1932	12,8	0,7256	4,65	0,1744	21,963	1,093

Таблица 3.16 – Моделирование показаний прибора МКС-03С при измерении базовых спектров четвёртой группы

Базовый спектр	Показания прибора МКС-03С и действительное значение плотности измеряемого потока нейtronов, Мнейтр./( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ )							
	Тепловых нейтр.		Промеж. нейтр.		Быстрых нейтр.		Интегр. поток	
	показания	действ. знач.	показания	действ. знач.	показания	действ. знач.	показания	действ. знач.
ВЭК-12И	$36,1 \cdot 10^8$	$1,66 \cdot 10^8$	$93,3 \cdot 10^8$	$4,41 \cdot 10^8$	$42,05 \cdot 10^8$	$5,92 \cdot 10^8$	$171 \cdot 10^8$	$12 \cdot 10^8$
ВЭК-11И	$48,4 \cdot 10^8$	$2,66 \cdot 10^8$	$124 \cdot 10^8$	$6,57 \cdot 10^8$	$46,54 \cdot 10^8$	$2,88 \cdot 10^8$	$219 \cdot 10^8$	$12,1 \cdot 10^8$
ВЭК-6И	$417 \cdot 10^8$	$14,1 \cdot 10^8$	$10,8 \cdot 10^{10}$	$0,56 \cdot 10^{10}$	$463 \cdot 10^8$	$51,6 \cdot 10^8$	$19,6 \cdot 10^{10}$	$122 \cdot 10^8$
ВЭК-10И	$428 \cdot 10^8$	$17,7 \cdot 10^8$	$10,8 \cdot 10^{10}$	$0,60 \cdot 10^{10}$	$409,8 \cdot 10^8$	$23,5 \cdot 10^8$	$19,2 \cdot 10^{10}$	$101 \cdot 10^8$
ВЭК-13И	$18,5 \cdot 10^{10}$	$58 \cdot 10^8$	$48 \cdot 10^{10}$	$2,64 \cdot 10^{10}$	$1900 \cdot 10^8$	$142 \cdot 10^8$	$85,5 \cdot 10^{10}$	$464 \cdot 10^8$
ГЭК-2-1И	$22 \cdot 10^8$	$0,96 \cdot 10^8$	$56,9 \cdot 10^8$	$2,81 \cdot 10^8$	$24,56 \cdot 10^8$	$2,98 \cdot 10^8$	$103 \cdot 10^8$	$6,75 \cdot 10^8$
ГЭК-2-2И	$2,91 \cdot 10^8$	$0,06 \cdot 10^8$	$7,41 \cdot 10^8$	$0,33 \cdot 10^8$	$4,037 \cdot 10^8$	$0,78 \cdot 10^8$	$14,4 \cdot 10^8$	$1,17 \cdot 10^8$
ГЭК-2-3И	$0,49 \cdot 10^8$	$3,43 \cdot 10^6$	$1,27 \cdot 10^8$	$3,37 \cdot 10^6$	$0,796 \cdot 10^8$	$21,1 \cdot 10^6$	$2,55 \cdot 10^8$	$0,28 \cdot 10^8$
ВЭК-5В	$23,4 \cdot 10^8$	$0,95 \cdot 10^8$	$60,4 \cdot 10^8$	$3,17 \cdot 10^8$	$24,54 \cdot 10^8$	$2,27 \cdot 10^8$	$54,3 \cdot 10^8$	$6,39 \cdot 10^8$
ВЭК-13В	$216 \cdot 10^8$	$9,06 \cdot 10^8$	$5,58 \cdot 10^{10}$	$29,1 \cdot 10^8$	$227,5 \cdot 10^8$	$21,4 \cdot 10^8$	$10 \cdot 10^{10}$	$59,6 \cdot 10^8$
ВЭК-1-1В	$876 \cdot 10^8$	$38 \cdot 10^8$	$22,5 \cdot 10^{10}$	$1,19 \cdot 10^{10}$	$897 \cdot 10^8$	$75,2 \cdot 10^8$	$40,2 \cdot 10^{10}$	$232 \cdot 10^8$
ВЭК-14В	$1917 \cdot 10^8$	$95 \cdot 10^8$	$49,5 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{10}$	$20,4 \cdot 10^{10}$	$209 \cdot 10^8$	$89,1 \cdot 10^{10}$	$554 \cdot 10^8$
Б-2	$144 \cdot 10^8$	$1,84 \cdot 10^8$	$3,77 \cdot 10^{10}$	$21 \cdot 10^8$	$157,2 \cdot 10^8$	$14,4 \cdot 10^8$	$678 \cdot 10^8$	$37,2 \cdot 10^8$
Б-3	$54,7 \cdot 10^8$	$9,73 \cdot 10^8$	$2,42 \cdot 10^{10}$	$6,61 \cdot 10^8$	$86,74 \cdot 10^8$	$15,1 \cdot 10^8$	$383 \cdot 10^8$	$31,4 \cdot 10^8$

Таблица 3.17 – Моделирование показаний прибора МКС-03С при измерении базовых спектров пятой группы

Базовый спектр	Показания прибора МКС-03С и действительное значение плотности измеряемого потока нейtronов, Мнейтр./( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ )							
	Тепловых нейтр.		Промеж. нейтр.		Быстрых нейтр.		Интегр. поток	
	показания	действ. знач.	показания	действ. знач.	показания	действ. знач.	показания	действ. знач.
ГХК-1	33,66	2,69	84,19	3,781	35,05	4,285	152,9	10,7
ГХК-2	71,25	5,296	186,9	8,33	75,7	9,085	333,8	22,7
ГХК-3	39,86	3,735	100,4	4,53	39,0	4,019	179,3	12,3
ГХК-4	6,375	0,76	15,8	0,706	5,605	0,37	27,8	1,84
ГХК-5	88,23	4,16	262	12,35	84,69	4,654	434,9	21,16
ГХК-6	24,43	1,58	62,17	3,327	22,07	0,836	108,7	5,74
ГХК-7	268,8	12,67	688,8	38,53	247,6	8,584	1205	59,8
ГХК-8	337	23,84	859,2	39,61	356,8	44,28	1553	107,7
ГХК-9	146	9	375	16,97	167	23,76	688	49,7
ГХК-10	80,65	3,3	212,6	5,66	142,9	39,55	436	48,5
ГХК-11	43,48	3,173	110,4	5,542	41,45	2,915	195,3	11,6

ГХК-12	491,5	22,25	1276	54,58	635,1	114,2	2402	191
ГХК-13	738,4	51,73	1926	91,13	918,5	144,1	3583	287
ГХК-14	55,36	1,24	145,6	6,247	77,57	15,28	278,5	22,8
ГХК-15	18,15	0,747	47,86	1,367	30,68	8,326	96,7	10,4
ГХК-16	8,11	0,654	20,66	0,905	8,847	1,189	37,6	2,75
ГХК-17	64,04	5,116	161,8	8,361	56,38	2,052	282	15,5
ГХК-18	29,93	2,881	75,6	3,72	25,66	0,931	131	7,53

По данным таблиц 3.13-3.17 рассчитаем относительные методические погрешности прибора МКС-03С, которые имели бы место при измерении реальных нейтронных потоков с вышеприведенными базовыми энергетическими спектрами. Эти погрешности приведены в таблицах 3.18-3.22.

Таблица 3.18 – Методические погрешности прибора МКС-03С  
при измерении базовых спектров первой группы

Базовый спектр	Методические погрешности							
	Тепловые нейтр.		Промеж. нейтр.		Быстрые нейтр.		Интегр. поток	
	абсол., Мнейтр/ (м <sup>2</sup> ·с)	относ., %	абсол., Мнейтр/ (м <sup>2</sup> ·с)	относ., %	абсол., Мнейтр/ (м <sup>2</sup> ·с)	от- нос., %	абсол., Мнейтр/ (м <sup>2</sup> ·с)	от- нос., %
U-235	0,2637	∞	0,7255	5374	0,4124	213	1,402	677
Cf-252	0,2600	∞	0,6974	6012	0,4026	208	1,36	663
Ra-Be	0,2517	∞	0,6654	4265	0,3658	228	1,283	729
Pu-Be	0,2417	∞	0,5411	2264	0,3057	305	1,089	878

Таблица 3.19 – Методические погрешности прибора МКС-03С  
при измерении базовых спектров второй группы

Баз- вый спектр	Методические погрешности							
	Тепловые нейтр.		Промеж. нейтр.		Быстрые нейтр.		Интегр. поток	
	абсол., Мнейтр/ (м <sup>2</sup> ·с)	отн., %						
KC-1	2,699	∞	8,3357	7293	4,203	206	15,2377	706
KC-2	3,076	3953	7,6812	2055	3,2965	492	13,9778	1248
KC-3	1,865	∞	4,6084	1597	1,833	1291	8,3064	1929
KC-4	4,786	4746	11,7821	1575	4,6034	1714	21,1515	2041

Таблица 3.20 – Методические погрешности прибора МКС-03С  
при измерении базовых спектров третьей группы

Баз- вый	Методические погрешности			
	Тепловые нейтр.	Промеж. нейтр.	Быстрые нейтр.	Интегр. поток

спектр	абсол., Мнейтр/ (м <sup>2</sup> ·с)	отн., %						
У-1	4,7361	680	12,911	2192	4,3597	1555	22,007	1405
У-2	5,1573	1446	14,6975	1903	4,145	697	24	1392
У-3	4,4895	1556	10,7295	1881	4,0078	1161	19,227	1597
У-4	5,753	4293	13,0716	1578	4,8896	4429	2,714	2210
У-5	4,3198	2236	12,0744	1664	4,4756	2566	20,87	1909

Таблица 3.21 – Методические погрешности прибора МКС-03С  
при измерении базовых спектров четвёртой группы

Базовый спектр	Методические погрешности							
	Тепловые нейтр.		Промеж. нейтр.		Быстрые нейтр.		Интегр. поток	
	абсол., Мнейтр/ (м <sup>2</sup> ·с)	отн., %						
ВЭК-12И	34,44·10 <sup>8</sup>	2075	88,9·10 <sup>8</sup>	2016	36,13·10 <sup>8</sup>	610	159·10 <sup>8</sup>	1325
ВЭК-11И	45,74·10 <sup>8</sup>	1719	117,4·10 <sup>8</sup>	1787	43,66·10 <sup>8</sup>	1516	206,9·10 <sup>8</sup>	1710
ВЭК-6И	402,9·10 <sup>8</sup>	2857	10,2·10 <sup>10</sup>	1828	411,4·10 <sup>8</sup>	797	1838·10 <sup>8</sup>	1506
ВЭК-10И	410,3·10 <sup>8</sup>	2318	10,2·10 <sup>10</sup>	1700	386,3·10 <sup>8</sup>	1644	1819·10 <sup>8</sup>	1801
ВЭК-13И	1792·10 <sup>8</sup>	3090	45,4·10 <sup>10</sup>	1718	1758·10 <sup>8</sup>	1238	8086·10 <sup>8</sup>	1743
ГЭК-2-1И	21,04·10 <sup>8</sup>	2192	54,09·10 <sup>8</sup>	1925	21,58·10 <sup>8</sup>	724	96,25·10 <sup>8</sup>	1426
ГЭК-2-2И	2,85·10 <sup>8</sup>	4750	7,08·10 <sup>8</sup>	2145	3,257·10 <sup>8</sup>	417	13,23·10 <sup>8</sup>	1131
ГЭК-2-3И	0,456·10 <sup>8</sup>	1328	1,24·10 <sup>8</sup>	3668	58,5·10 <sup>6</sup>	277	2,27·10 <sup>8</sup>	811
ВЭК-5В	22,45·10 <sup>8</sup>	2363	57,23·10 <sup>8</sup>	1805	22,27·10 <sup>8</sup>	981	47,9·10 <sup>8</sup>	750
ВЭК-13В	206,9·10 <sup>8</sup>	2284	528,9·10 <sup>8</sup>	1875	206,1·10 <sup>8</sup>	963	940·10 <sup>8</sup>	1578
ВЭК-1-1В	838·10 <sup>8</sup>	2205	21,3·10 <sup>10</sup>	1791	821,8·10 <sup>8</sup>	1093	3788·10 <sup>8</sup>	1632
ВЭК-14В	1822·10 <sup>8</sup>	1918	47·10 <sup>10</sup>	1880	1831·10 <sup>8</sup>	876	8356·10 <sup>8</sup>	1508
Б-2	142,1·10 <sup>8</sup>	7726	356·10 <sup>8</sup>	1695	142,8·10 <sup>8</sup>	992	640,8·10 <sup>8</sup>	1722
Б-3	44,97·10 <sup>8</sup>	462	235,4·10 <sup>8</sup>	3561	71,64·10 <sup>8</sup>	474	351,6·10 <sup>8</sup>	1120

Таблица 3.22 – Методические погрешности прибора МКС-03С  
при измерении базовых спектров пятой группы

Базовый спектр	Методические погрешности							
	Тепловые нейтр.		Промеж. нейтр.		Быстрые нейтр.		Интегр. поток	
	абсол., Мнейтр/ (м <sup>2</sup> ·с)	отн., %						
ГХК-1	30,97	1151	80,41	2127	30,76	718	142,2	1329
ГХК-2	65,95	1245	178,6	2144	66,6	733	311,1	1370
ГХК-3	36,12	967	95,9	9134	34,98	870	167	1358
ГХК-4	5,615	739	15,1	2138	5,235	1415	25,96	1411
ГХК-5	84,07	2021	249,6	2021	80,04	1720	413,7	1955
ГХК-6	22,85	1446	58,84	1769	21,23	2540	103	1794
ГХК-7	256,1	2021	650,3	1688	239	2784	1145	1975
ГХК-8	313,2	1314	819,6	2069	312,5	706	1445	1342
ГХК-9	137	1522	358	2106	143,2	603	638,3	1284
ГХК-10	77,35	2344	206,9	3656	103,3	261	387,5	799
ГХК-11	40,31	1270	104,9	1892	38,5	1322	183,7	1584
ГХК-12	469,25	2109	1221	2238	520,9	456	2211	1158
ГХК-13	656,7	1327	1834,9	2013	774,4	537	3296	1148

ГХК-14	54,12	4364	139,3	2231	62,29	408	255,7	1121
ГХК-15	17,4	2330	46,49	3401	22,35	268	86,3	830
ГХК-16	7,456	1140	19,75	2183	7,658	644	34,85	1267
ГХК-17	58,92	1152	153,4	1935	54,33	2647	266,5	1719
ГХК-18	27,05	939	71,88	1932	24,73	2656	123,5	1640

Из таблиц 3.18-3.22 следует, что относительные погрешности прибора МКС-03С при измерении потоков нейтронов с базовыми спектрами будут находиться в пределах от 200 до 8000 % (здесь мы не учитываем погрешности измерения плотности потоков тепловых нейтронов в спектрах радиоизотопных источников первой группы, которые не содержат тепловых нейтронов, но за счёт ненулевой чувствительности теплового канала к промежуточным и быстрым нейtronам показания данного канала далеки от нулевых, что приводит к бесконечно большой относительной ошибке). Причём показания всегда превышают действительное значение измеряемого потока. Столь большие погрешности объясняются не только низкой селективностью каналов, но и некорректной методикой градуировки и поверки прибора, регламентированной ТУ на данный прибор.

Теперь, используя тот же самый блок детектирования, промоделируем модернизированный радиометр-дозиметр МКС-03СМ с дополнительной совместной обработкой получаемой от блока детектирования информации с помощью предварительно обученной нейронной сети конфигурации 3-3-3.

#### 3.4.3. Результаты имитационного моделирования радиометра-дозиметра МКС-03С с дополнительной совместной обработкой получаемой от блока детектирования информации с помощью нейронных сетей

Для обучения нейронной сети использовались реализации всех групп спектров нейтронного излучения полученной ранее базы данных.

Для оценки предсказательной точности обученной нейронной сети в таблице 3.23 представлены среднеквадратические ошибки ответов нейронной сети для значений плотности потоков тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов для всех групп спектров. Как видно из этой таблицы, для спектров более простой формы радиоизотопных источников и критических сборок эти

ошибки весьма малы. Наихудшие результаты для данной нейронной сети получены для спектров потоков нейтронов утечки из защиты ядерных реакторов – среднеквадратическая погрешность в диапазоне промежуточных энергий достигает 8,2%.

**Таблица 3.23 – Относительные среднеквадратические ошибки ответов нейронной сети при определении плотности тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов, %**

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

При измерении интегральной плотности нейтронного потока среднеквадратическая погрешность уменьшилась (за счёт усреднения по интервалам энергии) и для соответствующих групп спектров составила: для первой группы – 0,63 %, для второй – 0,43 %, для третьей – 0,4 %, для четвёртой – 0,32 % и для пятой – 0,27 %.

Полученные погрешности уменьшились на 2-3 порядка по сравнению с погрешностями прибора МКС-03С, что ярко демонстрируют преимущества совместной обработки информации, получаемой от блока детектирования.

### **3.5. Анализ полученных результатов**

Подводя итоги результатов имитационного моделирования с использованием нейронных сетей можно сделать следующие общие выводы:

1. Путём имитационного моделирования с использованием реальных видов энергетических спектров нейтронных потоков доказана высокая эффективность предлагаемого в [58, 94] подхода к спектральным измерениям нейтронного излучения с использованием нескольких детекторов, обладающих различными спектральными характеристиками и совместно перекрыва-

ющих весь энергетический диапазон измеряемого излучения. Даже при использовании блока детектирования, имеющего всего три измерительных канала с явно недостаточной энергетической селективностью каждого из них, удалось весьма точно измерить усреднённые спектральные плотности нейтронных потоков на каждом децимальном интервале энергии в диапазоне энергий от 0,025 эВ до 25 МэВ.

2. Показана высокая эффективность искусственных нейронных сетей в качестве математического аппарата для вычислительного восстановления спектра измеряемого нейтронного излучения по показаниям нескольких детекторов с различными спектральными характеристиками. Из всех опробованных видов нейронных сетей наиболее предпочтительными оказались многослойные сети типа *FF (feed forward back prop)* с сигмоидными передаточными функциями.

3. Разработанная методика имитационного моделирования обучающей и проверочной выборок на основе реальных энергетических спектров источников нейтронов от различных источников, а также спектральных характеристик детекторов нейтронного излучения позволила продемонстрировать возможности и преимущества предлагаемого подхода построения нейтронного спектрометра реального времени на примере трёхканального блока детектирования БДКС-05С, хотя данный блок детектирования не удовлетворяет в полной мере предъявляемым требованиям.

4. Необходимым условием эффективного обучения нейронных сетей восстановлению спектров является нормирование реализаций обучающей и проверочной выборок. Это означает, что и при реализации прибора выходные сигналы детекторов блока детектирования с помощью специальных программных средств должны приводиться к единому масштабу.

5. Нецелесообразно применять для построения нейтронного спектрометра нейронные сети, обученные на группах спектров.

6. При решении более простой задачи – раздельного измерения плотностей составляющих тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов (для че-

го и предназначался прототипный прибор МКС-03С) – совместная обработка получаемой от трёхканального блока детектирования информации с помощью предварительно обученной нейронной сети даёт практически идеальные результаты: среднеквадратическая погрешность по обучающей выборке для всех видов спектров составила 0,35 %, по проверочной – менее 0,5 %; максимальные погрешности по отдельным реализациям более чем для половины реализаций не выходят за 3 %, а по всем реализациям не выходят за 20 %, при том, что погрешности самого прототипного прибора при измерении тех же реализаций нейтронных потоков (но без добавления к ним случайных отклонений), полученные путём математического моделирования прибора, лежат в диапазоне от 200 до 8000 %.

7. Полученные результаты при решении задачи раздельного измерения плотностей составляющих тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов (предназначение прототипного прибора МКС-03С) позволяют запустить в производство модифицированный прибор с сохранением всех его функций при значительном уменьшении погрешностей измерения с добавлением функции измерения спектра.

#### **4. ПОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА-ДОЗИМЕТРА НА ОСНОВЕ БЛОКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БДКС-05С**

##### **4.1. Структурная схема макетного образца нейтронного спектрометра на основе блока детектирования БДКС-05С**

Для экспериментального подтверждения результатов, полученных при исследовании нейросетевого метода для вычислительного восстановления спектров нейтронных потоков был разработан нейтронный спектрометр-дозиметр реального времени. Спектрометр проектировался унифицированным для работы с различными блоками детектирования с числом измерительных каналов до восьми. Его структурная схема представлена на рис.4.1.

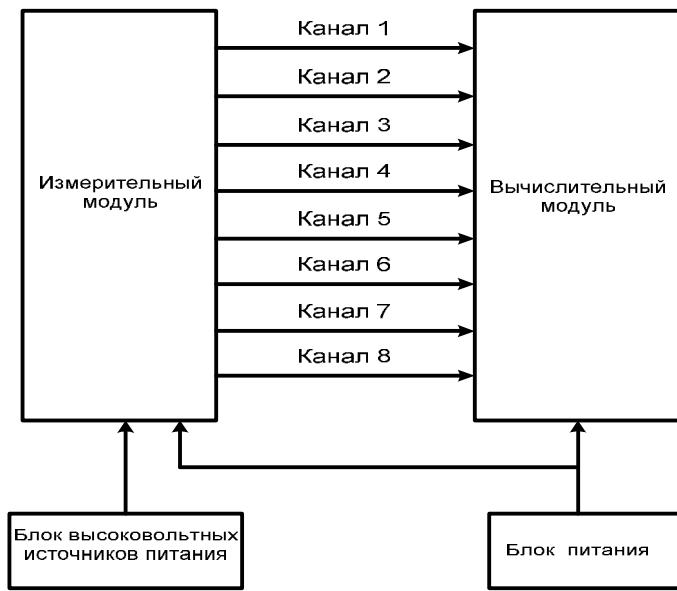


Рисунок 4.1 – Схема структурно-функциональная нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени

Спектрометр состоит из двух основных частей: измерительного модуля и вычислительного модуля. Измерительный модуль содержит первичные преобразователи, а также необходимые усилители и формирователи сигналов. Вычислительный модуль принимает сформированные сигналы от измерительного модуля и осуществляет вычислительное восстановление спектров нейтронных потоков и вычисление всех необходимых дозиметрических величин. Спектрометр рассчитан на максимум 8 каналов измерительного модуля, что с запасом перекрывает потребности при выполнении измерительных модулей как на базе существующих блоков детектирования, так и на базе вновь разрабатываемых [59,75,79]. Так, в блоке детектирования БДКС-05С прототипного прибора МКС-03С имеется 5 каналов.

Кроме данных модулей спектрометр содержит блок питания и блок высоковольтных источников питания, необходимых для питания первичных преобразователей (газоразрядных детекторов и ФЭУ). Конструктивно измерительный и вычислительный модули выполнены на одной печатной плате унифицированного измерительного блока. К ней подключаются с помощью соответствующих разъёмов блок детектирования и ЭВМ верхнего уровня.

Схемы электрические принципиальные унифицированного измерительного блока и блока питания для него приведены в приложении А. Соответствующие перечни элементов – в приложении Б. Внешний вид унифицированного измерительного блока и блока детектирования приведён в приложении В.

#### **4.2. Измерительный модуль макетного образца нейтронного спектрометра**

Измерительный модуль содержит первичные преобразователи, а также усилители и формирователи сигналов. Разработанный измерительный модуль рассчитан на восемь каналов блока детектирования [60]. Структурная схема измерительного модуля представлена на рис.4.2.

Измерительный модуль состоит из блока детектирования и восьми однотипных каналов усиления и формирования импульсов. Усилители-формирователи предназначены для усиления, селекции и стандартизации по амплитуде импульсов, поступающих с детекторов блока детектирования. Они представляют собой двухкаскадное устройство. Первый каскад – инвертирующий усилитель, построенный на быстродействующем операционном усилителе. Второй каскад – пороговое устройство на компараторе.

Для питания усилителей-формирователей используется однополярный источник питания с напряжением пять вольт. В качестве операционных усилителей в измерительном модуле при работе с относительно низкоскоростными детекторами (газоразрядные счётчики) используются ОУ *LMP7715* с типичной частотой единичного усиления 17 МГц, а при работе с сцинтилляционными и полупроводниковыми детекторами – *OPA353* с частотой единичного усиления 44 МГц [60].

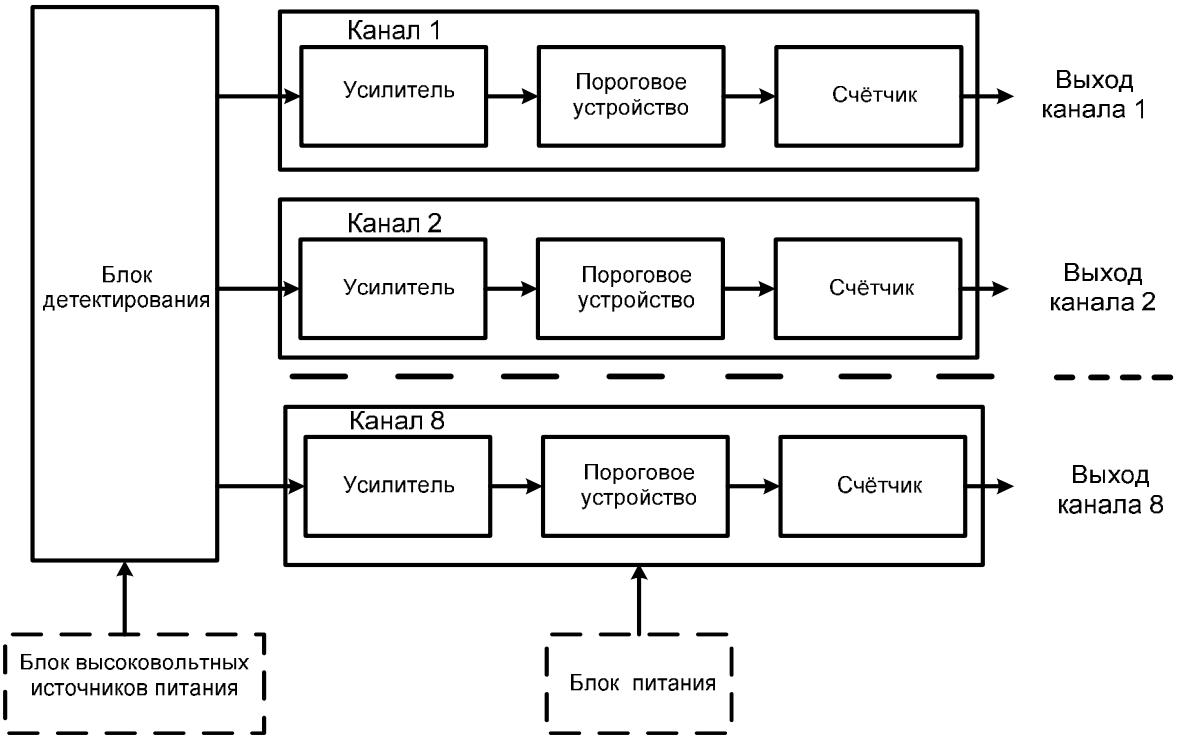


Рисунок 4.2 – Схема структурно-функциональная измерительного модуля

Пороговое устройство помимо формирования импульсов обеспечивает и амплитудную селекцию для подавления шумов или влияния побочного гамма-излучения в случае возможности его отделения по амплитуде импульсов. Дополнительная гибкость применения усилителей-формирователей обеспечивается перемычками, позволяющими отключить усилитель-формирователь при наличии в детекторе встроенного усилителя.

Усиленные и сформированные импульсы поступают на входы счетчиков. Они служат для понижения частоты следования импульсов на входах вычислительного модуля, что позволяет при относительно невысокой частоте сканирования каналов получить малую ошибку из-за пропусков импульсов при измерении потоков высокой интенсивности. В делителях частоты предусмотрены перемычки для выбора коэффициента деления 1, 2 или 4.

В макетном образце спектрометра используется блок детектирования БДКС-05С прототипного прибора МКС-03С [73]. В нем имеются встроенные усилители-формирователи, а также высоковольтные источники питания для газоразрядных детекторов. Поэтому в макетном образце спектрометра внеш-

ний блок высоковольтных источников не используется, а перемычки на печатной плате установлены таким образом, что усилители-формирователи отключены [77]. В блоке детектирования БДКС-05С имеется 5 газоразрядных детекторов нейтронов, следовательно, используется 5 каналов измерительного модуля. Максимальная расчётная скорость счёта импульсов на выходах БДКС-05С не превышает 10000 имп/с. Измерения на испытательном стенде для поверки нейтронных радиометров-дозиметров в лаборатории радиационных измерений ОАО «Курский завод «Маяк» показали максимальную частоту следования импульсов порядка 500-1000 имп/с. При такой частоте следования импульсов нет никакой необходимости в её делении, так как любой современный микроконтроллер, применённый в вычислительном модуле обеспечит намного более высокую частоту сканирования каналов. Поэтому перемычки на печатной плате устанавливаются таким образом, чтобы деления частоты не происходило.

### **4.3. Вычислительный модуль вторичной обработки информации по нейросетевым алгоритмам**

#### **4.3.1. Структурная схема вычислительного модуля**

Вычислительный модуль предназначен для вычислительного восстановления спектров нейтронных потоков и соответствующих дозиметрических величин по значениям интенсивности импульсных последовательностей на выходах измерительного модуля. Структурная схема вычислительного модуля представлена на рис.4.3. В состав вычислительного модуля входит микроконтроллер, устройство индикации и клавиатура, энергонезависимая память и интерфейсный модуль *RS-232* для связи с системой верхнего уровня.

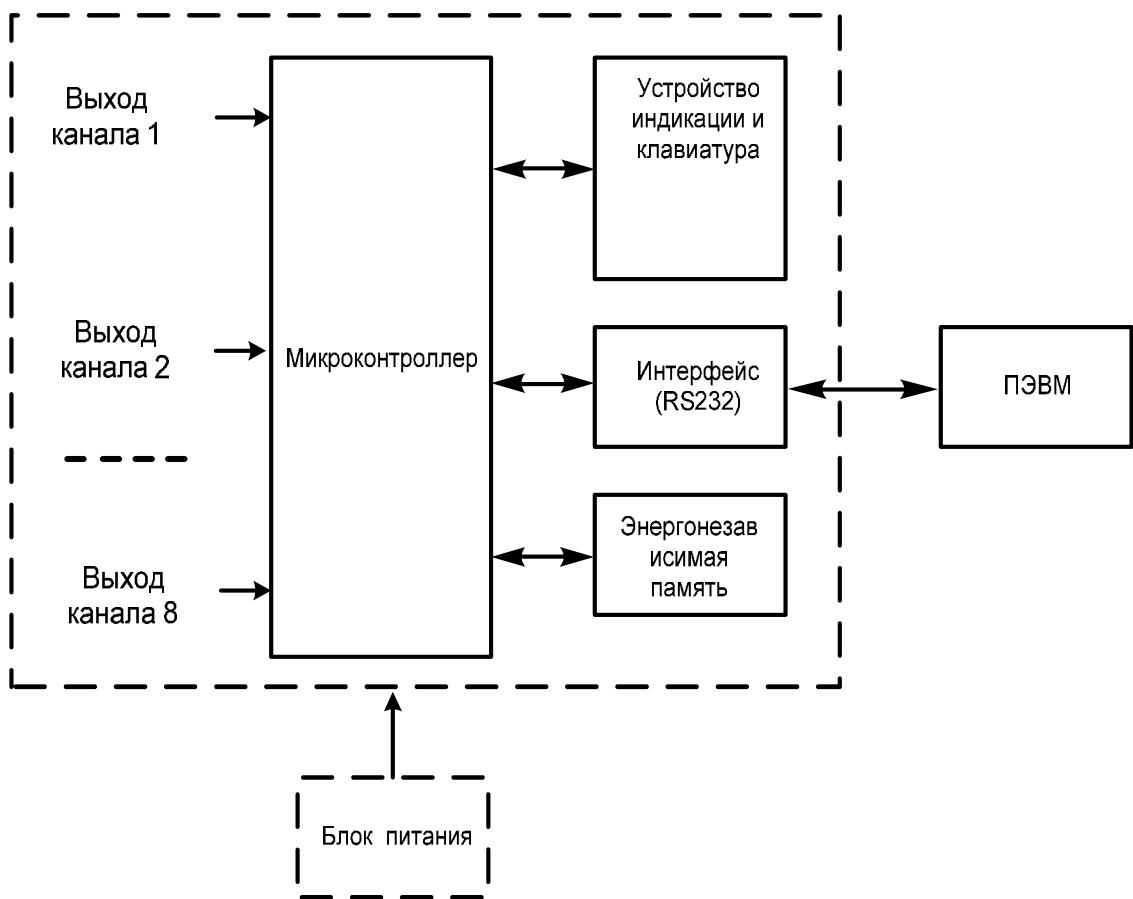


Рисунок 4.3 – Схема структурно-функциональная вычислительного модуля

Основные функции микроконтроллера здесь следующие [80]:

- автоматическая диагностика целостности программной и энергонезависимой памяти данных;
- автоопределение подключения клавиатуры и дисплея;
- автоопределение подключения к персональному компьютеру (целостности канала приёма данных);
- тестирование блока детектирования;
- поддержка функций калибровки каналов в виде ручного ввода и сохранения в энергонезависимой памяти калибровочных констант;
- подсчёт числа импульсов в каждом из восьми каналов за секундный интервал;
- вычислительная обработка импульсных последовательностей по алгоритму модифицированного скользящего среднего;

- поддержка интерфейса с персональным компьютером при активности интерфейса и передача посекундных отсчётов каждого программно сформированного канала счёта импульсов;
- поддержка функций настройки и диагностики через подключаемые клавиатуру и дисплей (доступны функции: перезапуска диагностики; формирования тестовых импульсов для тестирования/настройки усилителей-формирователей; тестирования программного обеспечения персонального компьютера выводом через интерфейс *RS-232* предустановленных секундных отсчётов по каждому из каналов; настройки скорости обмена с персональным компьютером по интерфейсу *RS-232* для учёта длины соединительного шлейфа).

Так как в измерительном модуле используется блок детектирования БДКС-05С, в котором имеются по два однотипных детектора в промежуточном канале и канале тепловых нейтронов, то микроконтроллер осуществляет попарное посекундное суммирование содержимого программных счётчиков сигналов данных детекторов.

В качестве микроконтроллера применён 8-ми битный микроконтроллер Atmega8535.

Энергонезависимая память предназначена для хранения базовых настроек вычислительного модуля, а также для накопления и хранения результатов измерений для последующей обработки на ЭВМ. Для упрощения конструктивного исполнения платы вычислительного модуля использована БИС памяти с двухпроводным интерфейсом *I2C*. При этом обеспечивается рациональное использование встроенных интерфейсов микроконтроллера, так как данный тип интерфейса имеет встроенную аппаратную поддержку в микроконтроллере.

Устройство индикации и клавиатура выполнены в виде отдельного блока и подключаются к плате вычислительного модуля 14-выводным шлейфом. Для уменьшения числа контактов микроконтроллера и проводников шлейфа используется 4-х битная шина данных.

Интерфейс с ЖКИ-модулем рассчитан на применение в нём контроллера *HD44780*. Фактически это промышленный стандарт. Это даёт возможность не привязываться к одному конкретному модулю. Применённый четырёхпроводный вариант подключения несущественно удлиняет обмен с модулем отображения, но одновременно экономит линии интерфейса.

Узел гальванической развязки интерфейса *RS-232* помимо гальванического разделения цепей измерительного блока и персонального компьютера осуществляет формирование линейных уровней напряжения интерфейса *RS-232*. Развязка реализуется с помощью оптронных пар. В устройстве применена относительно распространённая оптопара АОТ128Д9 (зарубежный аналог 4N35). Узел гальванической развязки при применении оптопар 4N35 обеспечивает беспроблемную работу на скорости 9600 и даже 19200 бод, что полностью удовлетворяет требованиям на скорость передачи данных (время обмена при передаче 8-ми 2-х байтовых отсчётов равно 36 и 18 мс соответственно) [60]. Результаты испытаний данного узла показаны на рисунке 4.4. Применение гальванически развязанного канала даёт возможность использовать при отладке дешёвый USB-COM адаптер без опторазвязки.

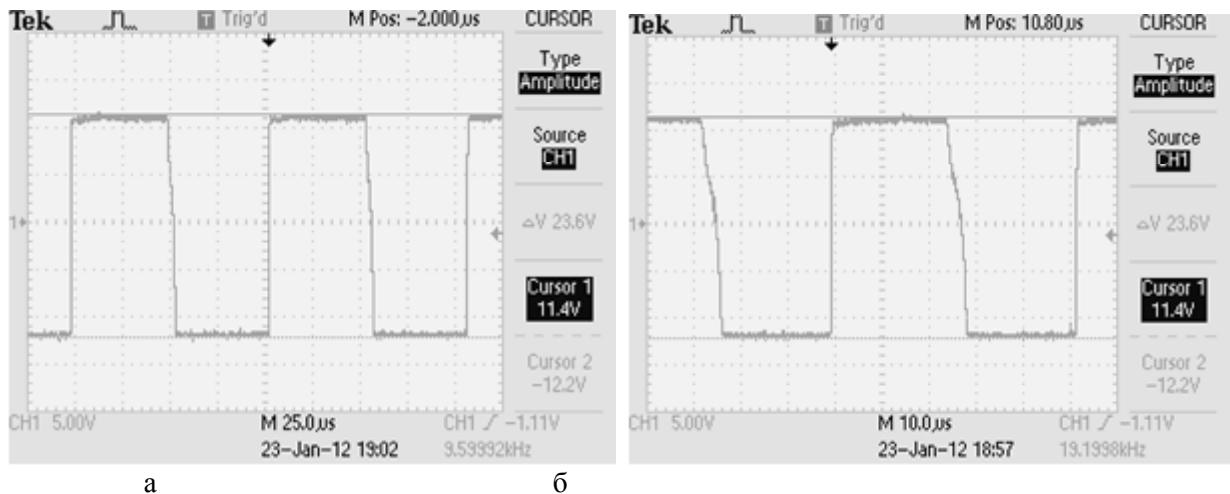


Рисунок 4.4 – Осциллографмы выходных сигналов RS-изолятора:  
а – 9600 бод, б – 19200 бод

ЭВМ используется в вычислительном модуле устройства для решения следующих задач:

- приём секундных отсчётов по всем каналам измерения по интерфейсу *RS-232* в соответствии с выбранным протоколом;
- расчёт спектра, интегральной плотности нейтронного излучения и дозиметрических величин по нейросетевой модели;
- восстановление непрерывной формы спектра нейтронного излучения по найденным усреднённым спектральным плотностям в децимальных интервалах энергии.

Программное обеспечение для ЭВМ разработано в пакете *MatLab* и представляет собой исполняемый файл. Для работы ПО в среде *Windows* необходимы установленные компоненты *MatLab Compiler Runtime* и *Microsoft .NET Framework 3.0*. Для работы в среде *UNIX* необходимы установленные компоненты *MatLab Compiler Runtime*. Приложение имеет главное окно (рисунок 4.5), где отображаются значения интегральной плотности потока, значения секундных отсчётов по всем каналам измерения, спектр нейтронного потока, а также вспомогательные окна:

- окно настройки передачи данных по *RS-232*;
- окно настройки чувствительностей используемых детекторов;
- окно настройки чувствительностей детекторов и обучения нейронной сети.

В главном окне также можно осуществить выбор вида прорисовки спектра – гистограмма или непрерывный спектр, построенный по 9-ти отсчётам по децимальным интервалам с помощью сплайн-аппроксимации. В окне настроек передачи данных по интерфейсу *RS-232* осуществляется выбор скорости и формата передачи данных, выбор *COM*-порта. ПО осуществляет автоматическую непрерывную запись поступающих по интерфейсу *RS-232* секундных отсчётов по всем каналам, а также рассчитанной интегральной и спектральной плотности нейтронного излучения и плотности гамма-излучения с указанием текущей даты с разрешением в 0,01 с.

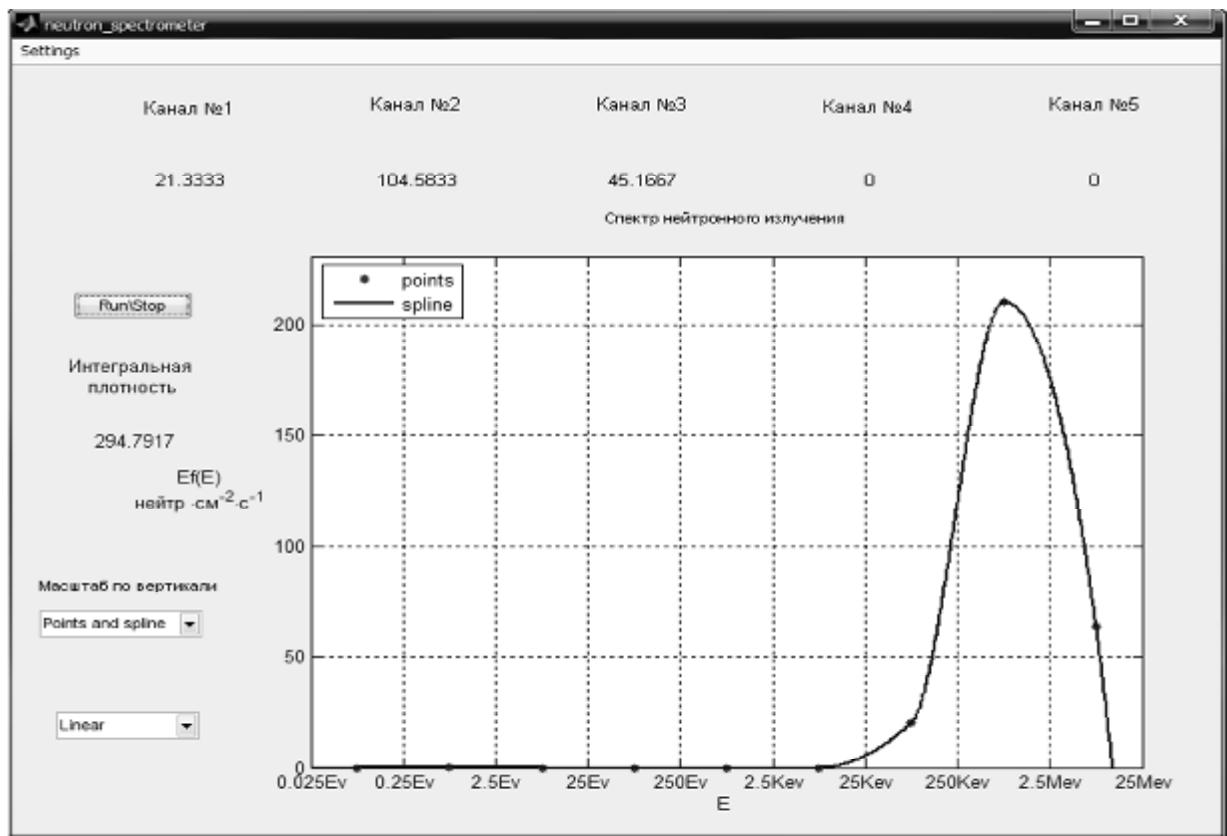


Рисунок 4.5 – Главное окно программы

#### 4.3.2. Разработка способа измерения интенсивности стохастических потоков импульсов измерительного модуля

В выпускаемых приборах измерения ионизирующих излучений непосредственно измеряется интенсивность потока частиц (скорость счёта). Существует множество способов измерения скорости счёта.

Известен и широко используется способ со счётчиком импульсов. Счётчик импульсов содержит электронный ключ, управляемый от устройства формирования времени счёта (в простейшем случае – одновибратор) и цифрового счётчика (рисунок 4.6).

При подаче сигнала <Пуск> одновибратор генерирует импульс фиксированной длительности. При этом электронный ключ открывается, и импульсная последовательность поступает на счётчик. По завершении интервала счёта, сформированного одновибратором, количество импульсов накопленных в счётчике представлено цифровым кодом, считываемых с его выходов. Количество подсчитанных импульсов относится к времени счёта и представ-

ляет собой интенсивность импульсов поступающих с детектора. Если выбрать время счёта равным 1 с, то полученный с выходов счётчика цифровой код и есть искомая интенсивность.

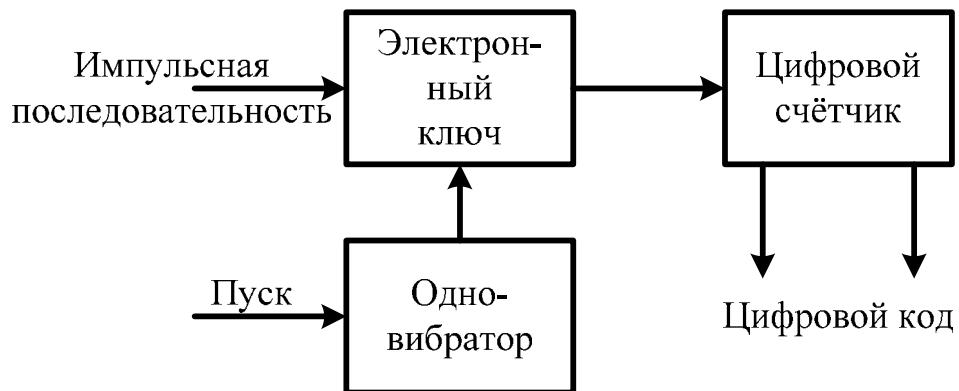


Рисунок 4.6 – Счётчик импульсов

Для получения высокой достоверности в условиях стохастичности потока частиц требуется зарегистрировать большое число импульсов. При этом при низкой интенсивности излучения время измерения получается чрезмерно большим. Поэтому выбор времени счёта – это компромисс между точностью и затратами времени на один цикл измерения, а также реакции на изменение интенсивности излучения. Такой способ, например, применён в радиометре загрязнённости поверхности РЗС-09С [102].

Альтернативный вариант состоит в измерении временного интервала, в течение которого подсчитываемыми импульсами заполняется счётчик заданной ёмкости (например, ёмкостью 256 или 1024 импульса). Но при малых интенсивностях излучения приходится мириться с большим временем измерения. Такой способ измерения реализован, например, в [103].

В обоих вариантах счётчиков велико время ожидания следующего отсчёта.

Для уменьшения времени измерения прибегают к усреднению вновь полученных отсчётов с ранее накопленными. При этом выбираются случайные, плохо обоснованные, а нередко и громоздкие алгоритмы определения интенсивности излучения.

В то же время, хорошо известен, часто применяемый в обработке сигналов, способ скользящего среднего. Усреднение осуществляется по заранее выбранному количеству отсчётов. При добавлении очередного отсчёта измеряемой величины в массив самый старый отсчёт удаляется, а среднее значение пересчитывается. Для сокращения количества вычислений очередное среднее значение  $\overline{X}_m$  определяется как:

$$\overline{X}_m = \overline{X}_{m-1} - (x_{old} + x_{new}) / n, \quad (4.1)$$

где  $\overline{X}_{m-1}$  – значение среднего на предыдущем шаге,

$x_{old}$  и  $x_{new}$  – соответственно самое старое и новое значение величины;

$n$  – количество данных в усредняемом массиве.

Для реализации данного способа измерения интенсивности потока импульсов выбирается фиксированный интервал времени счёта импульсов (например, 1 с) и количество усредняемых отсчётов. Каждый новый отсчёт делится на количество усредняемых отсчётов  $n$ , записывается в кольцевой буфер и, в соответствии с (4.1), рассчитывается среднее значение.

Способ скользящего среднего разрешает рассмотренные противоречия, т.к. новое значение среднего определяется после получения каждого следующего отсчёта (1 с), а статистическая достоверность гарантирована выбором большого количества усредняемых отсчётов.

Недостатком метода является большой объём буфера для хранения всех усредняемых отсчётов и существенные накладные расходы процессорного времени на управление им. Этот недостаток особенно проявляется при чисто программной реализации счётчиков интенсивности излучения, когда загрузка процессора достигает 80-90 %. При этом необходимо выделить процессорное время для выполнения всех остальных, возложенных на него функций. Для проектируемого спектрометра реализация способа становится невозможной.

Для разрешения рассмотренных противоречий разработан способ измерения интенсивности стохастических потоков импульсов. 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. Суть решения поясняется диаграммой, изображённой на рисунке 4.7. На диаграмме границы линейного накопления импульсов каждым счётчиком выделены сплошными линиями. На границах счётчики обнуляются. Процесс накопления в счётчике 2 начинается лишь при накоплении в счётчике 1 не менее  $N_0$  импульсов. Далее содержимое счётчиков увеличивается одновременно.

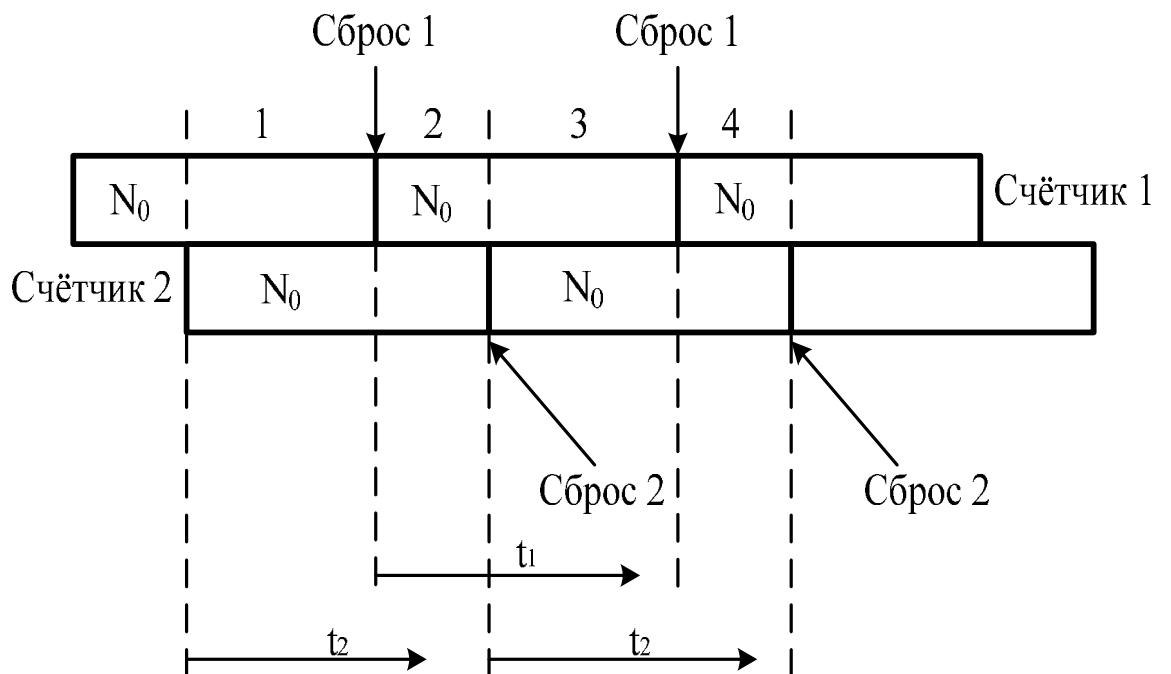


Рисунок 4.7 – Диаграмма функционирования счётчиков в предлагаемом способе измерения интенсивности стохастических потоков импульсов

Рассмотрим процесс получения среднего значения в установившемся режиме (начало интервала 2). Отметим, что для снижения вычислительной нагрузки на микроконтроллер, содержимое счётчиков проверяется на пересечение границы в  $N_0$  импульсов лишь один раз в секунду.

В момент начала интервала 2 количество импульсов накопленных в счётчике 2 превысило  $N_0$ . Счётчик 1 обнуляется вместе с его таймером. С этого момента интенсивность потока импульсов рассчитывается как:

$$n_0 = n_2/t_2, \quad (4.2)$$

где  $n_2$  – количество импульсов накопленных счётчиком 2;

$t_2$  – интервал счёта.

Поскольку накопление импульсов осуществляется параллельно в двух счётчиках, то в некоторый момент времени количество импульсов в счётчике 1 превысит  $N_0$  (проверка каждую секунду). Этот момент времени на рисунке 3 представлен границей раздела интервалов 2 и 3. При этом счётчик 2 и соответствующий ему таймер 2 сбрасываются, а среднее значение в пределах всего интервала 3 будет рассчитываться по выражению

$$n_0 = n_1/t_1, \quad (4.3)$$

где  $n_1$  – количество импульсов, накопленных счётчиком 1;

$t_1$  – интервал счёта.

Таким образом, новое значение интенсивности представляется каждую секунду, а объём накопленных импульсов при малых интенсивностях колеблется от  $N_0$  в начале до  $2*N_0$  в конце интервала работы с текущим счётчиком. При высокой загрузке каналов, проверка по-прежнему осуществляется с заданным интервалом (1 с). При этом граница в  $N_0$  импульсов может пересекаться практически при первом же отсчёте и с большим избытком. Однако алгоритм работы не изменяется, а смена счётчиков будет происходить по каждому отсчёту. Но ёмкость счётчиков должна выбираться с большим запасом (в вычислительном модуле используется 16-битовый счётчик ёмкостью 65535).

Предложенный способ при его программной реализации очень экономично использует ресурсы микропроцессора, что позволяет реализовать в вычислительном модуле практически полностью программным путём все необходимые функции, даже не используя ПК.

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 рисунке 4.8. На данный способ и устройство для его реализации направлена Заявка на изобретение.

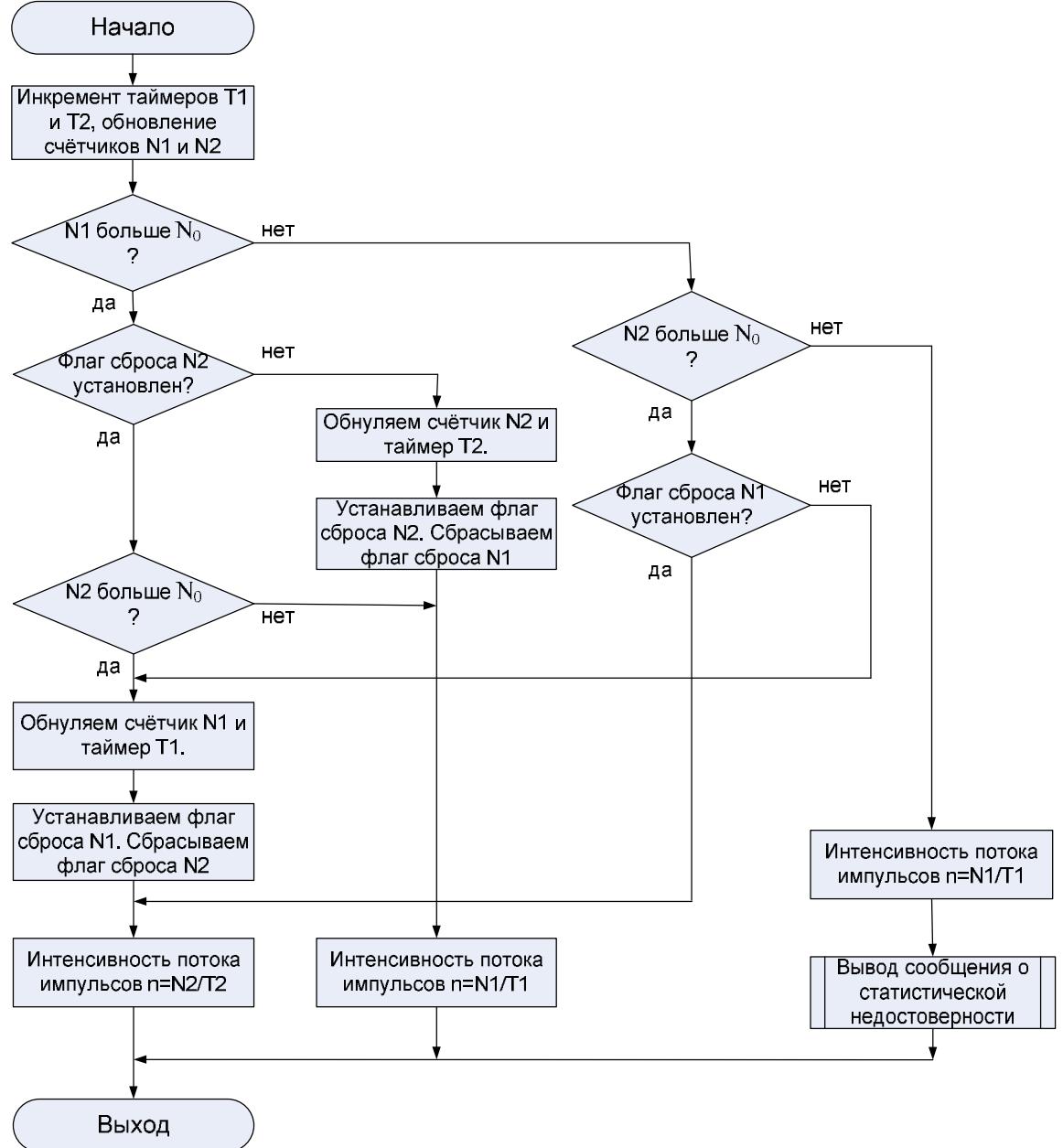


Рисунок 4.8 – Блок-схема алгоритма измерения интенсивности потока импульсов измерительного модуля

#### 4.3.3. Разработка алгоритмов, реализующих эмуляцию предварительно обученных нейронных сетей

В п. 3.3 и п. 3.4. были получены обученные нейронные сети для вычислительного восстановления спектров нейтронных потоков на 9-ти децималь-

ных интервалах энергии и по трём диапазонам (тепловые нейтроны, промежуточные, быстрые) соответственно. Для использования данных нейронных сетей в нейтронном спектрометре необходимо разработать алгоритмы, реализующие эмуляцию предварительно обученных нейронных сетей, которые будут использованы в программном обеспечении спектрометра. Эмуляция уже обученных сетей не представляет вычислительных и алгоритмических сложностей (в отличие от самого процесса обучения). Целесообразно разработать алгоритм таким образом, чтобы он мог использоваться как при использовании ЭВМ в составе вычислительного модуля, так и при эмуляции нейронных сетей средствами микроконтроллера. Последнее условие накладывает жёсткие требования к скорости эмуляции нейронной сети. Так, при опросе измерительного модуля с интервалом в 1 с максимально допустимое время эмуляции можно оценить в 0,1 с. Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рис. 4.9.

Для оценки эффективности разработанного алгоритма были разработаны 2 программы для оценки скорости эмуляции нейронных сетей на 8-ми битном микроконтроллере [83]. Так как вычисления на ЭВМ выполняются в формате представления чисел – 64 бита с плавающей запятой, дополнительно оценивалась погрешность, внесённая вычислениями с представлением чисел – 24 и 32 бита с плавающей точкой. Кроме того, оценивались требования к памяти программ и памяти данных. В качестве арифметических подпрограмм с плавающей точкой выбраны подпрограммы Frank J. Testa, представленные в документах AN575 [104], AN617 [105], AN660 [106]. Данные подпрограммы характеризуются высокой скоростью исполнения, эффективно используют преимущества имеющегося в применённом микроконтроллере умножителя 8x8. Полученные результаты представлены в табл.4.1.

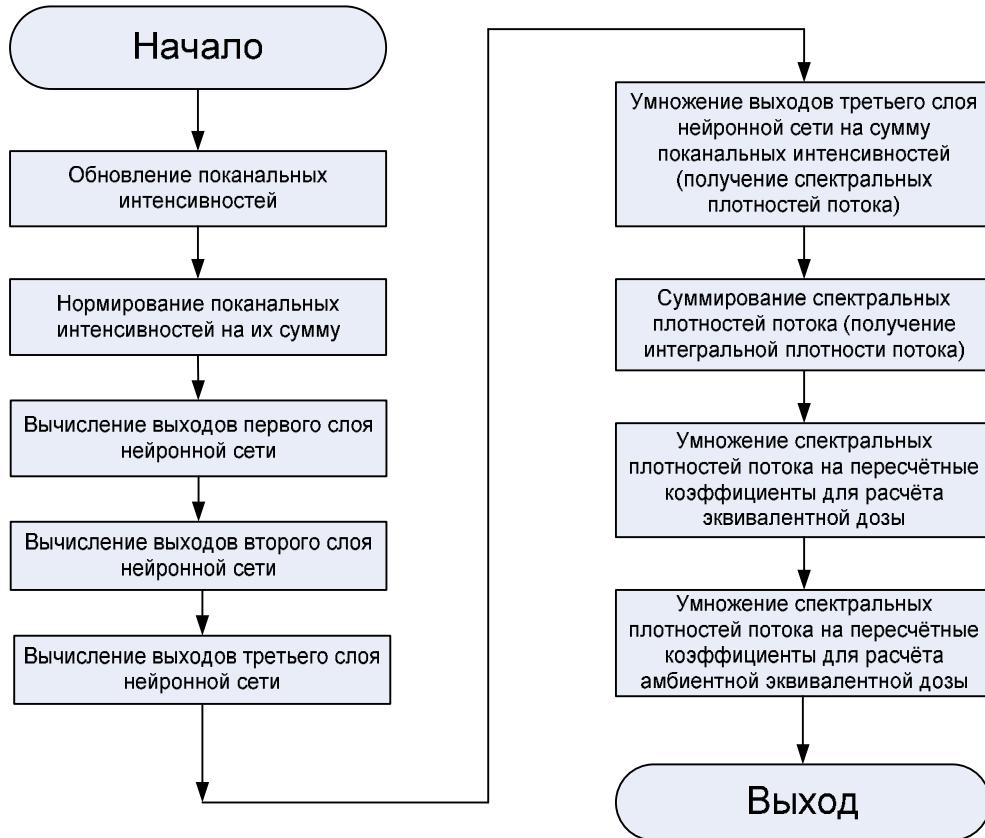


Рисунок 4.9 – Блок-схема алгоритма, реализующего эмуляцию предварительно обученных нейронных сетей

Таблица 4.1 – Параметры подпрограмм для эмуляции нейронной сети 3-6-9

Формат\Параметр	24бита	32бита
Максимальное время исполнения, мкс. при 8МГц	3305	4930
Максимальная относительная ошибка, %	1,93	0,074
Занимаемое количество ячеек памяти программ	4186	3487
Занимаемое количество ячеек памяти данных	96	103

Как видно из таблицы, обе подпрограммы с большим запасом укладываются в заданные требования; при этом 32-х битный формат с плавающей точкой даёт значительно меньшую максимальную относительную ошибку и занимает меньше ячеек в памяти программ (в основном за счёт разницы в используемых подпрограммах арифметики) при не имеющем значения в дан-

ном случае увеличении времени исполнения в 1,5 раза. Имеет смысл остановиться на использовании 32-х битного формата с плавающей точкой.

#### 4.3.4. Алгоритмы вычисления дозиметрических величин по вычисленным спектральным плотностям нейтронных потоков

Определив спектральные плотности потока нейtronов, можно вычислить мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения с гораздо (предельно - на порядки) более высокой точностью, чем используя интегральную плотность потока. Дело в том, что биологическое воздействие нейtronов очень сильно зависит от их энергии. Зависимость эквивалентной дозы от энергии нейtronов дана в [1], [36], [107] и нормах радиационной безопасности [108]. В [1] дана и зависимость амбиентной эквивалентной дозы на единичный флюенс (на нейтр/ $m^2$ ). Воспользуемся зависимостью эквивалентной дозы от энергии нейtronов для  $4\pi$  геометрии из нормативного документа [108], а зависимостью амбиентной эквивалентной дозы из [1]. Зависимости даны для 24 и 20 значений энергии соответственно в диапазоне от 0,025 эВ до 20 МэВ. Для пересчёта спектральных плотностей потоков в мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения в проектируемом нейтронном спектрометре необходимо получить пересчётные коэффициенты на 9-ти децимальных интервалах энергии и на 3-х интервалах для задачи модернизации прототипного прибора МКС-03С. Для этого нужно экстраполировать зависимость в область высоких энергий (20 МэВ-25 МэВ) и найти среднее значение на каждом искомом интервале. Данная задача проблемы не представляет. На рис. 4.10 и 4.11 представлены графики исходных зависимостей и экстраполированные и сглаженные.

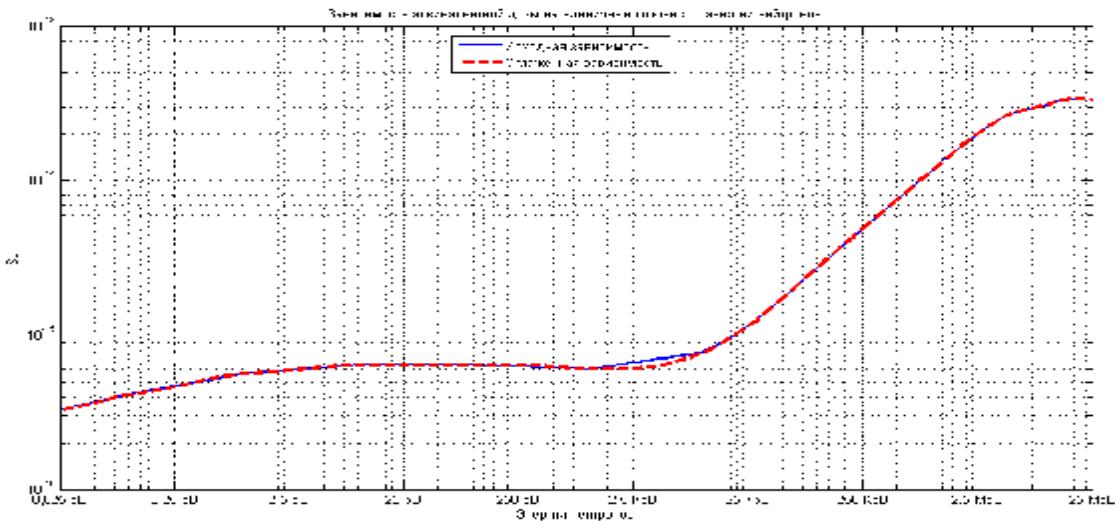


Рисунок 4.10 – Зависимость эквивалентной дозы на единичный флюенс от энергии нейtronов

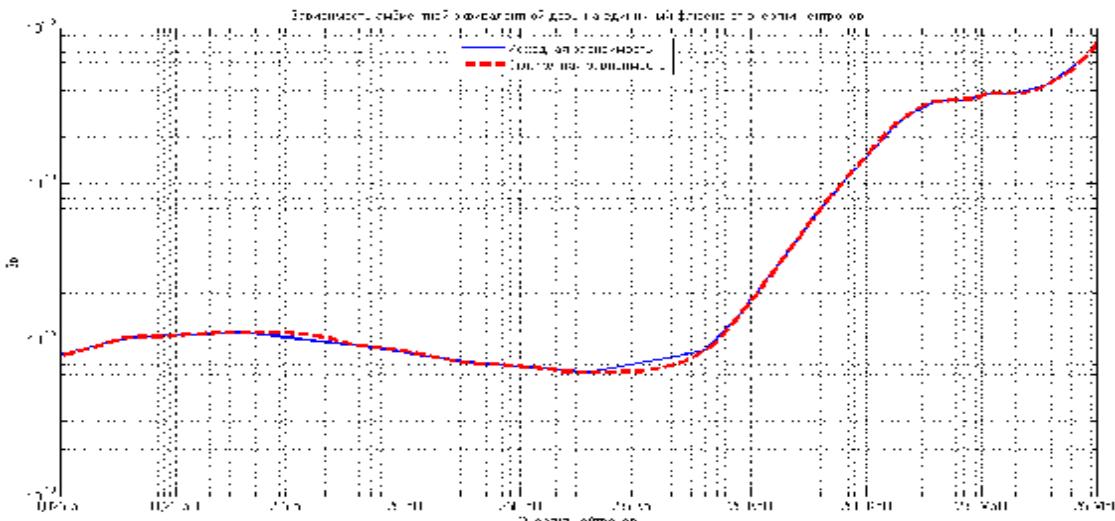


Рисунок 4.11 – Зависимость амбиентной эквивалентной дозы на единичный флюенс от энергии нейтронов

Далее были найдены усреднённые по интервалам энергии пересчётные коэффициенты. Они представлены в таблицах 4.2 и 4.3.

От данных коэффициентов легко перейти к пересчётным коэффициентам для пересчёта спектральных плотностей потоков в мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения и в мощность амбиентной эквивалентной дозы нейтронного излучения (для перевода в Зв/час достаточно умножить пересчётные коэффициенты на 3600).

Таблица 4.2 – Пересчётные коэффициенты для пересчёта спектральных плотностей потоков в эквивалентную дозу нейтронного излучения

Энергетический интервал	0,025 эВ - 0,25 эВ	0,25 эВ - 2,5 эВ	2,5 эВ - 25 эВ	25 эВ - 250 эВ	250 эВ - 2,5 КэВ	2,5 КэВ - 25 КэВ	25 КэВ - 250 КэВ	250 КэВ - 2,5 МэВ	2,5 МэВ - 25 МэВ
Пересчётный коэффициент, Зв·10 <sup>-15</sup> на 1 нейтр/м <sup>2</sup>	0,39	0,54	0,63	0,64	0,62	0,77	2,56	10,87	29,13
Энергетический интервал	Тепловые нейтроны			Промежуточные нейтроны			Быстрые нейтроны		
Пересчётный коэффициент, Зв·10 <sup>-15</sup> на 1 нейтр/м <sup>2</sup>	0,52			0,68			14,19		

Таблица 4.3 – Пересчётные коэффициенты для пересчёта спектральных плотностей потоков в амбиентную эквивалентную дозу нейтронного излучения

Энергетический интервал	0,025 эВ - 0,25 эВ	0,25 эВ - 2,5 эВ	2,5 эВ - 25 эВ	25 эВ - 250 эВ	250 эВ - 2,5 КэВ	2,5 КэВ - 25 КэВ	25 КэВ - 250 КэВ	250 КэВ - 2,5 МэВ	2,5 МэВ - 25 МэВ
Пересчётный коэффициент, Зв·10 <sup>-15</sup> на 1 нейтр/м <sup>2</sup>	0,97	1,11	0,97	0,74	0,64	0,91	6,49	29,18	46,32
Энергетический интервал	Тепловые нейтроны			Промежуточные нейтроны			Быстрые нейтроны		
Пересчётный коэффициент, Зв·10 <sup>-15</sup> на 1 нейтр/м <sup>2</sup>	1,02			0,76			27,33		

#### **4.4. Создание нейтронной испытательной установки с целью обеспечения возможности получения опорных нейтронных полей с разнообразной формой энергетического спектра для поверки созданного нейтронного спектрометра**

Для экспериментального подтверждения результатов имитационного моделирования необходимо провести измерения энергетических спектров нейтронных потоков с разнообразными по форме и точно известными спек-

трами. В связи с отсутствием и в стране, и в мире нейтронных источников с метрологически аттестованными энергетическими спектрами с участием автора была проведена разработка установки для создания опорных нейтронных полей со спектрами различной формы. Установка создавалась на базе действующего в лаборатории радиационных измерений ОАО «Курский завод «Маяк» испытательного стенда для поверки нейтронных радиометров-дозиметров. Источником нейтронного излучения на этом стенде служили радиоизотопные образцовые плутоний-бериллиевые источники.

Попытки использования для получения таких нейтронных полей метода, рекомендованного в ГОСТ 8.355-79 «Радиометры нейтронов. Методы и средства поверки» [109], путём использования «тепловой насадки» в виде конуса из водородсодержащего вещества (полиэтилена), устанавливаемого между источником и детектором и выполняющего роль замедлителя нейтронов, оказались бесплодными. Проведенные расчёты спектров с использованием полиэтиленовых замедлителей в виде конусов различной толщины, проведенные с помощью библиотеки программ GEANT-4 [110] показали полную непригодность этого метода. Во всех случаях с ростом толщины замедляющего конуса наблюдалось лишь уменьшение величины потока, падающего на детектор, за счёт его интенсивного рассеяния в замедляющем конусе. Оказалось также, что существенную часть достигающего детектора потока составляют рассеянные нейтроны, вторично отражённые от стен, пола и потолка помещения. При этом толщина замедляющего конуса не оказывает существенного влияния на количество таких отражённых нейтронов, достигающих детектора, поскольку подавляющая часть первичного потока нейтронов рассеивается непосредственно от источника и на первой секции конуса толщиной 20 мм.

Очевидно, чтобы устраниТЬ рассеивание нейтронов от источника необходимо его экранировать и колимировать поток нейтронов на детектор. Для решения этой задачи путём имитационного моделирования с использованием библиотеки программ GEANT-4 [91] было исследовано несколько различных

конструкций устройств экранирования и коллимирования источника, которые можно встраивать в испытательную установку без её конструктивной переделки. Наиболее приемлемым оказалось использование полиэтиленового отражателя с конусной выемкой, по центру которой должен размещаться источник. В плотную 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 (как показано на фотографии – рисунок 4.12). Эта труба и выполняет функцию коллиматора. В полость трубы в качестве замедлителей нейтронов вставляются парафиновые диски толщиной 10, 20, 30 и 50 мм, позволяющие устанавливать суммарную толщину замедлителя от 10 до 180 мм с дискретностью в 10 мм. Кроме того, в каждом из дисков по центру были сделаны сквозные отверстия диаметром 20 мм, в которые можно помещать парафиновые пробки. Это должно позволять ещё больше разнообразить формы получаемых спектров [64].

Сами спектры для всех возможных вариантов рассчитывались с помощью библиотеки программ GEANT-4. На рисунке 4.13 представлены расчётные спектры нейтронных потоков для «голого» источника, с отражателем нейтронов и для экранирующей системы в сборе (без замедляющих дисков).

Из данных графиков следует, что уже при «голом» источнике в спектре появляется отчётливый пик тепловых нейтронов (свыше 20 % от высоты пика быстрых нейтронов) и заметная доля промежуточных нейтронов. Это как раз и обусловлено нейtronами, рассеянными от стен, пола и потолка помещения, поскольку в исходном излучении Ru-Be-источника тепловых и надтепловых нейтронов не содержится.



Рисунок 4.12 – Экранирующая система источника, состоящая из отражателя нейтронов и экранирующей трубы (коллиматора)

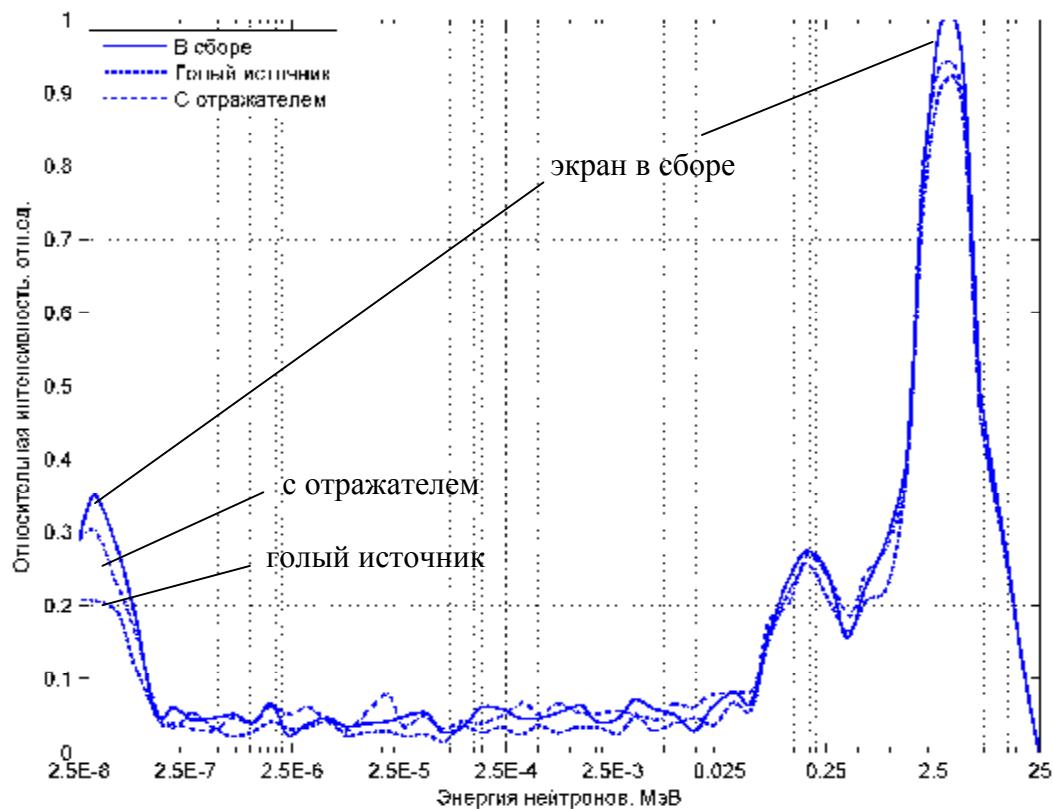


Рисунок 4.13 – Энергетические спектры потоков нейтронов, достигших детектора, при «голом» источнике, источнике с отражателем и для экрана в сборе

Отражатель нейтронов существенно (на 36 % по максимуму теплового пика) увеличивает тепловую составляющую, а экранирующая система в сборе увеличивает его ещё на 18 %. В среднем в полтора раза увеличивается и

промежуточная составляющая, в то время как высокоэнергичная часть спектра существенно не изменяется. Дальнейшая деформация спектра осуществляется с помощью изготовленных из парафина замедляющих дисков разной толщины, вставляемых в экранирующую трубу. Расчётные спектры для дисков толщиной 0 мм (нет дисков), 20, 50, 80, 130 и 180 мм представлены на рисунке 4.14.

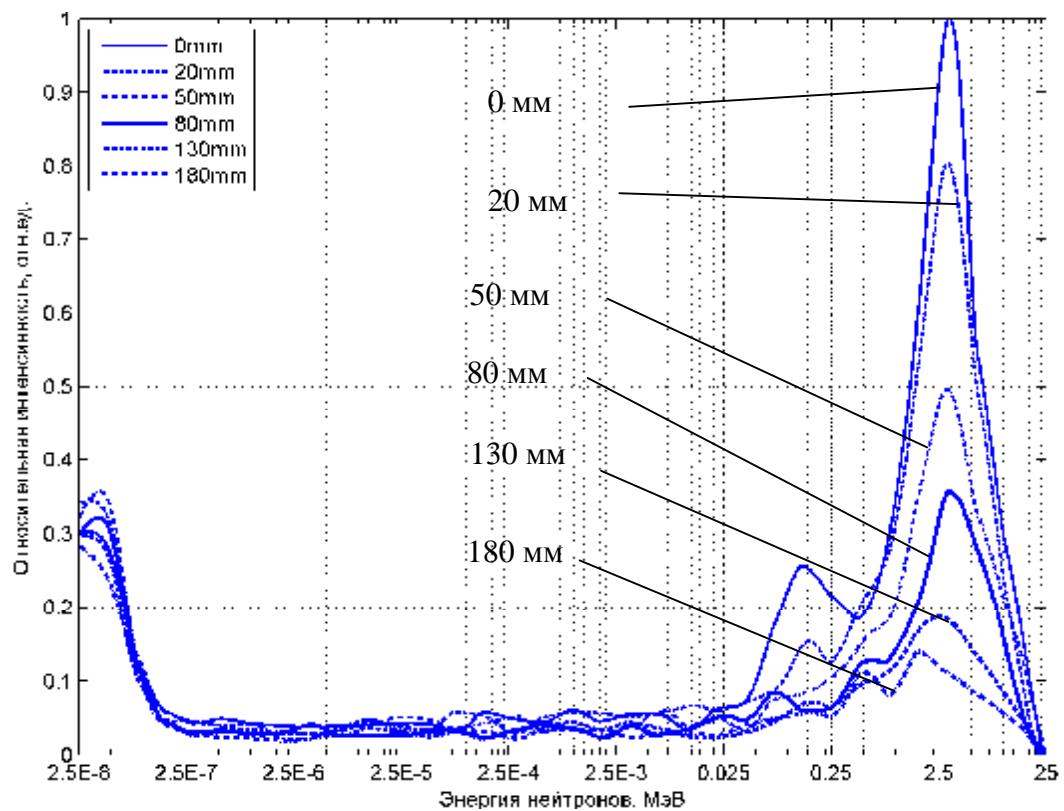


Рисунок 4.14 – Энергетические спектры потоков нейтронов, достигших детектора, с экранированием источника и замедляющими дисками различной толщины

Из него видно, что, как и ожидалось, использование замедляющих дисков сильно деформирует именно высокоэнергичную часть спектра и существенно слабее промежуточную и тепловую составляющие. Уже при толщине диска 80 мм максимум теплового пика сравнивается с максимумом пика быстрых нейтронов, а при дальнейшем увеличении толщины дисков превышает пик быстрых нейтронов. Максимальное превышение происходит при

суммарной толщине дисков 180 мм. Максимум быстрой составляющей спектра при этом составляет лишь 50 % от максимума тепловой составляющей.

Промежуточные значения суммарной толщины сборки замедляющих дисков и извлечение из них парафиновых пробок позволяет получать менее заметные деформации спектра (всего можно создавать более 50 комбинаций и, соответственно, столько же модификаций спектров от одного и того же источника).

#### **4.5. Результаты экспериментального исследования макетного образца нейтронного спектрометра на созданной нейтронной испытательной установке**

##### **4.5.1. Сопоставление показаний блока детектирования БДКС-05С по тепловой, промежуточной и быстрой составляющих опорных нейтронных полей с их расчётными значениями**

С помощью установки, описанной в п. 4.4 были проведены измерения показаний всех трёх каналов измерительного модуля (скорости счёта импульсов) и сопоставлены с расчётными значениями усреднённых по этим энергетическим поддиапазонам значений спектральных плотностей опорных полей, создаваемых на этой установке. Поскольку функции преобразования каждого канала блока детектирования БДКС-05С неизвестны (неизвестно, какая часть нейtronов соответствующего диапазона энергий, вошедших в замедляющую сферу, регистрируется каждым каналом), то нас интересовали лишь изменения регистрируемых потоков при использовании замедляющих дисков различной толщины. При этом начальные точки расчётных и экспериментальных зависимостей (соответствующие отсутствию замедляющих дисков) совмещались и принимались за единицу. По этим зависимостям можно косвенно судить о достоверности расчётов соответствующих спектров. Полученные результаты в графическом виде представлены на рисунках 4.15 – 4.17.

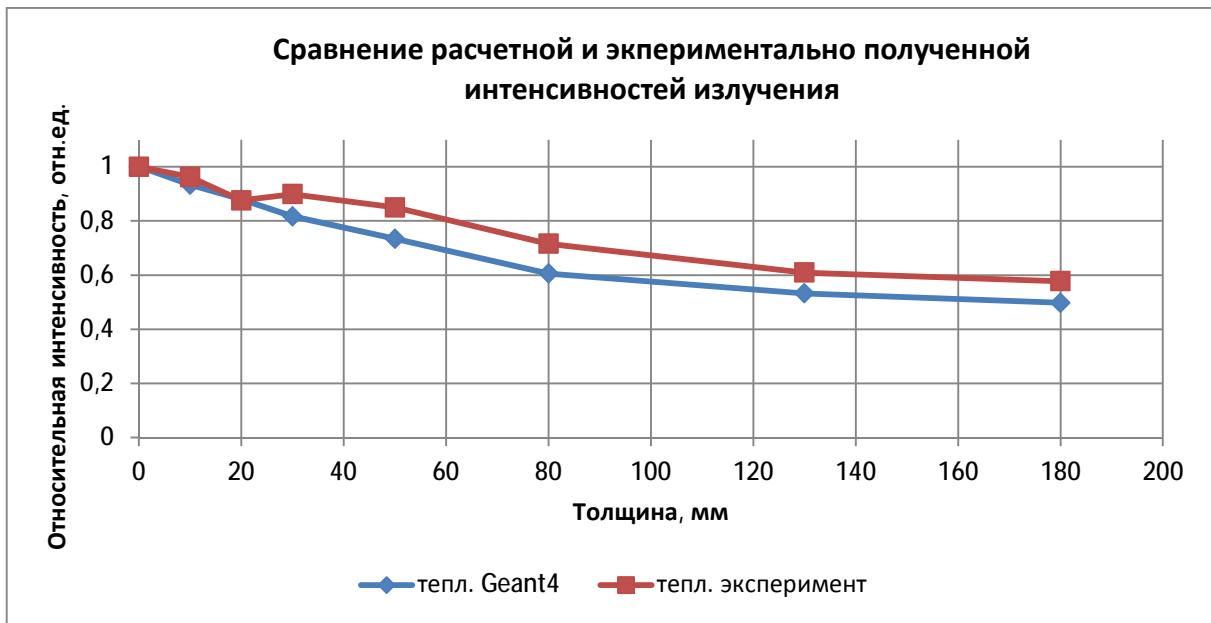


Рисунок 4.15 – Зависимость относительной интенсивности потока нейтронов от суммарной толщины дисков по тепловой составляющей

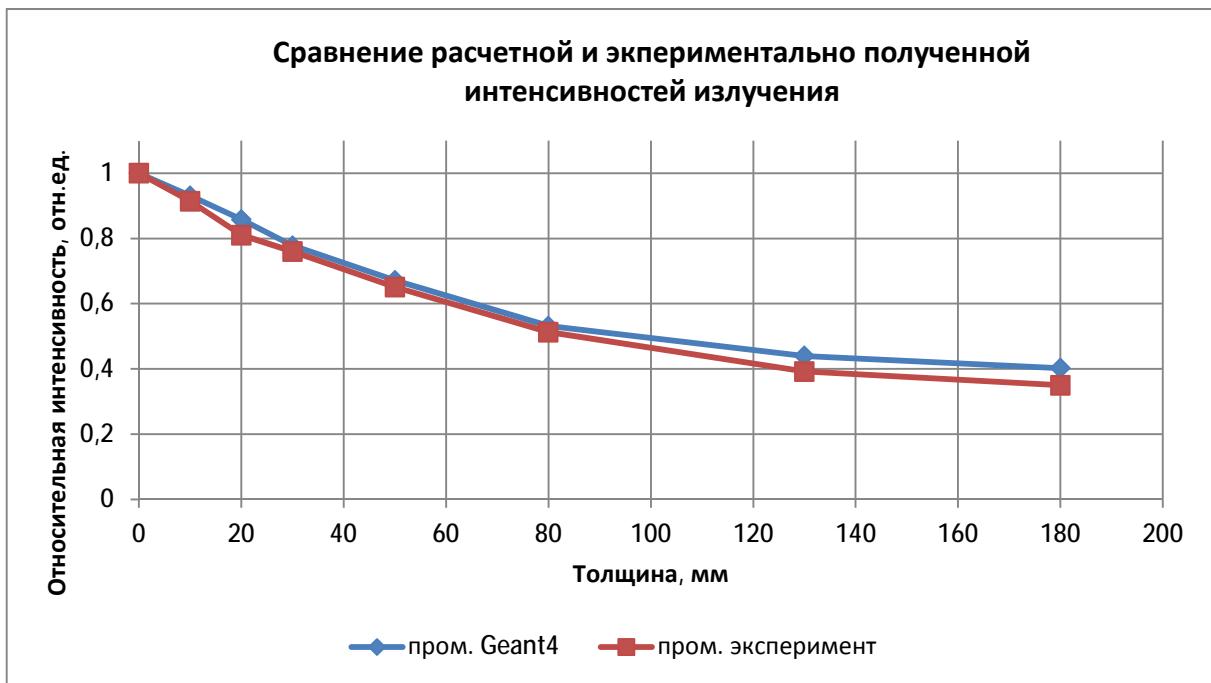


Рисунок 4.16 – Зависимость относительной интенсивности потока нейтронов от суммарной толщины дисков по промежуточной составляющей

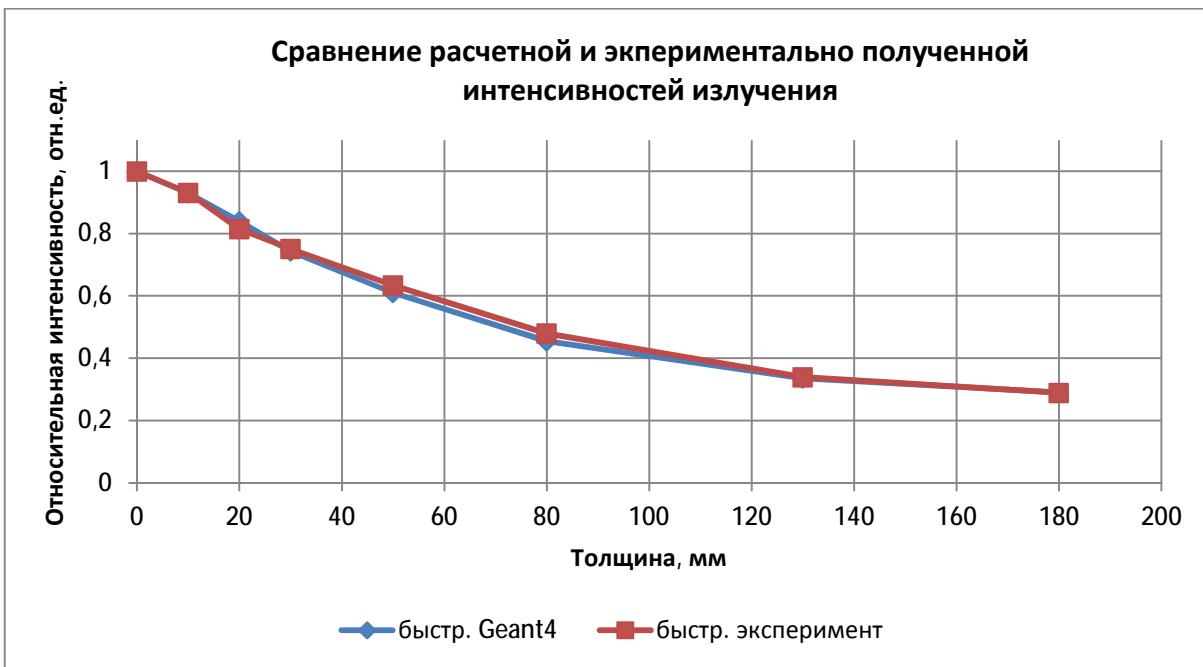


Рисунок 4.17 – Зависимость относительной интенсивности потока нейтронов от суммарной толщины дисков по быстрой составляющей

Как можно наблюдать из представленных зависимостей, максимальная разница между расчётами в GEANT-4 и экспериментом по тепловому каналу 11 %, по промежуточному каналу 5,2 %, по быстрому каналу 2,5 %. То есть результаты моделирования в GEANT-4 довольно хорошо согласуются с результатами эксперимента. Более существенное расхождение между расчётными и экспериментальными результатами по каналу тепловых нейтронов, чем по каналам промежуточных и быстрых нейтронов, объясняется влиянием на тепловую составляющую нейтронного потока рассеянных нейтронов, вторично отражённых от стен, пола и потолка помещения, поскольку точно рассчитать этот вторичный поток, достигающий детектора достаточно сложно. Из полученных результатов видно, что реально этот вторичный поток рассеянных нейтронов больше, чем по расчётным данным. Действительно, наблюдаемое ослабление интенсивности нейтронного потока при максимальной суммарной толщине парафиновых дисков по тепловому каналу в эксперименте составляет 1,73 раза, в GEANT-4 в 2 раза; по промежуточному каналу: в эксперименте в 2,85 раза, в GEANT-4 в 2,48 раза; по быстрому каналу: в эксперименте в 3,46 раза, в GEANT-4 в 3,44 раза. Поскольку поток рассеян-

ных нейтронов, вторично отражённых от стен, пола и потолка помещения, содержит в основном тепловые нейтроны, то его влияние максимально именно на измерительный канал тепловых нейтронов.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточной достоверности расчётных спектров и позволяют использовать спектры нейтронных потоков, рассчитанные в GEANT-4 для поверки разработанного нейtronного спектрометра реального времени. Начнём с измерения усреднённых спектральных плотностей нейtronного излучения на трёх интервалах.

#### 4.5.2. Измерение усреднённых спектральных плотностей опорных нейтронных полей на трёх интервалах

Измерения проводились с помощью разработанного нейtronного спектрометра-дозиметра, включающего в себя измерительный модуль на базе блока детектирования БДКС-05С. Использовался режим измерения нейtronного спектрометра-дозиметра для определения плотности нейtronного излучения на 3-х интервалах энергии – тепловом, промежуточном и быстрым (назначение прототипного прибора МКС-03С). Измерения проводились на 2-х расстояниях от источника – 500 и 1100мм. Каждое измерение проводилось в течение 10 минут. Таким образом, всего было проведено 32 измерения:

##### На расстоянии 1100 мм:

- источник с отражателем;
- источник с отражателем и коллиматором (без замедляющих дисков);
- источник с отражателем, коллиматором и замедляющими дисками без отверстий толщиной 10, 20, 30, 50, 80, 130, 180 мм;
- источник с отражателем, коллиматором и замедляющими дисками с проходными центральными отверстиями диаметром 20 мм и толщиной 10, 20, 30, 50, 80, 130, 180 мм.

##### На расстоянии 500мм:

- источник с отражателем;
- источник с отражателем и коллиматором (без замедляющих дисков);

- источник с отражателем, коллиматором и замедляющими дисками без отверстий толщиной 10, 20, 30, 50, 80, 130, 180 мм;
- источник с отражателем, коллиматором и замедляющими дисками с отверстиями толщиной 10, 20, 30, 50, 80, 130, 180 мм.

Энергетические спектры всех этих потоков моделировались с помощью библиотеки программ GEANT-4 с учётом потоков рассеяния от стен, пола и потолка лаборатории.

По полученным результатам были рассчитаны погрешности измерений на каждом интервале для каждой реализации относительно расчётных спектральных плотностей по GEANT-4, представленные в таблицах 4.4 – 4.7.

Таблица 4.4 – Относительные погрешности (%) определения плотности нейтронного излучения для опорных нейтронных полей, получаемых с помощью замедляющих дисков с отверстиями (расстояние до источника – 1100 мм)

Энергетический интервал/Конфигурация	Отражатель	В сбере	10 мм с отв.	20 мм с отв.	30 мм с отв.	50 мм с отв.	80 мм с отв.	130 мм с отв.	180 мм с отв.
Тепловые нейтроны	0,7	-1,0	-2,0	4,8	-9,7	-0,1	3,2	-3,8	2,6
Промежуточные	-4,2	-2,0	-6,1	-3,9	-3,1	13,0	9,2	0,0	-10,5
Быстрые	-0,1	0,4	-0,6	-3,2	0,9	-0,4	-0,4	0,4	0,0
<b>Среднеквадратич.</b>	<b>3,0</b>	<b>1,6</b>	<b>4,6</b>	<b>4,9</b>	<b>7,3</b>	<b>9,2</b>	<b>6,9</b>	<b>2,7</b>	<b>7,7</b>

Таблица 4.5 – Относительные погрешности (%) определения плотности нейтронного излучения для опорных нейтронных полей, получаемых с помощью замедляющих дисков без отверстий (расстояние до источника – 1100 мм)

Энергетический интервал/Конфигурация	10 мм цельные	20 мм цельные	30 мм цельные	50 мм цельные	80 мм цельные	130 мм цельные	180 мм цельные
Тепловые нейтроны	2,4	2,6	-3,7	1,5	3,3	-2,1	0,8
Промежуточные	-1,6	-4,6	1,0	9,3	6,3	-2,2	-9,9
Быстрые	1,7	1,6	0,0	-0,2	-0,4	0,5	0,0
<b>Среднеквадратич.</b>	<b>2,4</b>	<b>3,9</b>	<b>2,7</b>	<b>6,6</b>	<b>5,1</b>	<b>2,2</b>	<b>7,1</b>

Таблица 4.6 – Относительные погрешности (%) определения плотности нейтронного излучения для опорных нейтронных полей, получаемых с помощью замедляющих дисков с отверстиями (расстояние до источника –500 мм)

Энергетический интервал/Конфигурация	Отражатель	В сборе	10 мм с отв.	20 мм с отв.	30 мм с отв.	50 мм с отв.	80 мм с отв.	130 мм с отв.	180 мм с отв.
Тепловые нейтроны	0,1	1,8	5,3	-7,0	-3,2	-3,8	1,1	1,6	-0,9
Промежуточные	0,8	1,4	1,0	-3,0	-3,4	3,1	5,0	-1,8	5,0
Быстрые	0,0	0,0	-0,1	1,0	0,2	-0,1	0,0	-0,1	0,0
<b>Среднеквадратич.</b>	<b>0,6</b>	<b>1,6</b>	<b>3,8</b>	<b>5,4</b>	<b>3,3</b>	<b>3,5</b>	<b>3,6</b>	<b>1,7</b>	<b>3,6</b>

Таблица 4.7 – Относительные погрешности определения плотности нейтронного излучения для опорных нейтронных полей, получаемых с помощью замедляющих дисков без отверстий (расстояние до источника – 500 мм)

Энергетический интервал/Конфигурация	10 мм цельные	20 мм цельные	30 мм цельные	50 мм цельные	80 мм цельные	130 мм цельные	180 мм цельные
Тепловые нейтроны	4,6	7,8	-2,1	-0,1	-4,1	1,9	0,9
Промежуточные	0,7	-5,7	-6,6	0,5	11,1	4,4	-5,8
Быстрые	-1,1	0,0	0,2	-0,1	0,2	-0,4	0,2
<b>Среднеквадратич.</b>	<b>3,4</b>	<b>6,8</b>	<b>4,9</b>	<b>0,4</b>	<b>8,4</b>	<b>3,4</b>	<b>4,1</b>

Среднеквадратическая погрешность определения интервальных плотностей по всем спектрам составляет 4,4 %. Как можно видеть из таблиц, наибольшие отклонения наблюдаются на интервале промежуточных нейтронов, где они могут достигать 11%.

Погрешности определения интегральной плотности нейтронного излучения представлены на диаграммах (рисунки 4.18, 4.19). На рисунке 4.18 представлена диаграмма погрешностей определения интегральной плотности излучения для всех опорных нейтронных полей при расстоянии между источником и блоком детектирования 1100 мм, а на рисунке 4.19 – для тех же полей при расстоянии между источником и блоком детектирования 500 мм.

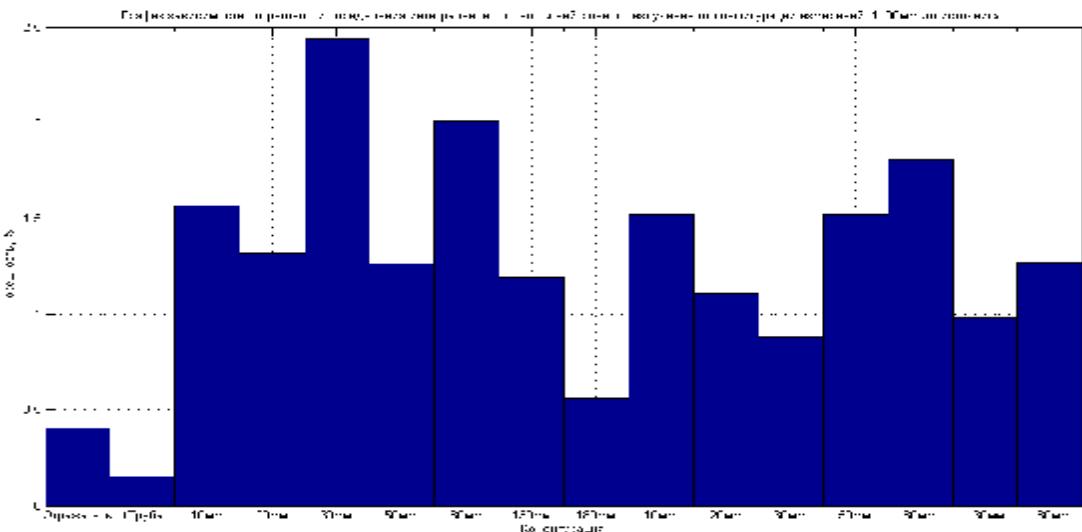


Рисунок 4.18 – Диаграмма погрешностей определения интегральной плотности нейтронного излучения для различных реализаций опорных нейтронных полей при расстоянии между источником и блоком детектирования 1100 мм

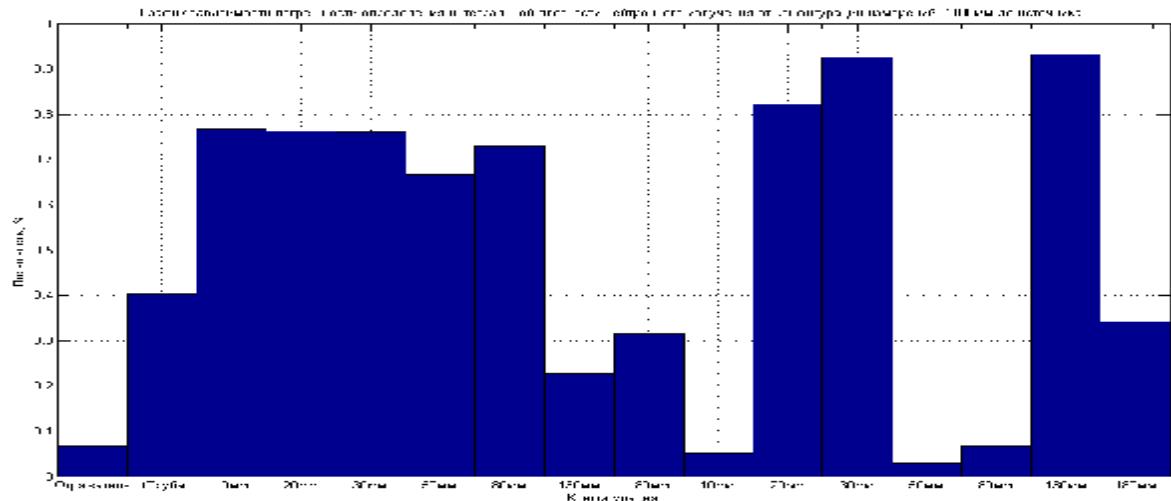


Рисунок 4.19 – Диаграмма погрешностей определения интегральной плотности нейтронного излучения для различных реализаций опорных нейтронных полей при расстоянии между источником и блоком детектирования 500 мм

На каждой диаграмме по оси абсцисс отложены конфигурации системы, определяющие ту или иную реализацию опорного поля. При этом левее по оси абсцисс указана толщина замедляющих парафиновых дисков с отверстиями, а правее – дисков без отверстий.

В целом, среднеквадратическая погрешность определения интегральных плотностей по всем реализациям опорных нейтронных полей составляет 0,87%.

#### 4.5.3. Измерение усреднённых спектральных плотностей опорных нейтронных полей на девяти децимальных интервалах

Измерения проводились с помощью разработанного нейтронного спектрометра-дозиметра, включающего в себя измерительный модуль на базе блока детектирования БДКС-05С. Использовался режим измерения нейтронного спектрометра-дозиметра для определения плотности нейтронного излучения на 9-ти децимальных интервалах.

Проводились измерения тех же опорных нейтронных полей с разными формами энергетических спектров, что и в п. 4.5.1.

Энергетические спектры всех этих потоков также как и в п. 4.5.1. моделировались с помощью библиотеки программ GEANT-4 с учётом потоков рассеяния от стен, пола и потолка лаборатории.

По полученным результатам были рассчитаны погрешности измерений на каждом энергетическом интервале для каждой реализации относительно расчётных спектральных плотностей по GEANT-4. Они представлены в таблицах 4.8 – 4.11.

**Таблица 4.8 – Относительные погрешности (%) определения спектральной плотности нейтронного излучения для опорных нейтронных полей, получаемых с помощью замедляющих дисков с отверстиями  
(расстояние до источника – 1100 мм)**

Энергетический интервал/Конфигурация	Отражатель	В сборе	10 мм с отв.	20 мм с отв.	30 мм с отв.	50 мм с отв.	80 мм с отв.	130 мм с отв.	180 мм с отв.
0,025эВ - 0,25эВ	7,1	15,6	11,2	-0,3	-9,1	-20,3	-5,2	-1,4	1,4
0,25эВ - 2,5эВ	6,0	16,4	8,1	-2,6	-7,7	-13,2	-2,3	-5,0	1,6
2,5эВ - 25эВ	8,1	15,6	7,7	0,2	-0,1	-5,0	1,2	-9,3	1,0
25эВ - 250эВ	7,3	7,7	6,5	-1,2	-2,2	-2,3	11,7	-6,1	-3,1
250эВ - 2,5КэВ	8,2	6,7	3,0	0,6	1,1	5,9	6,0	-6,0	-4,5
2,5КэВ - 25КэВ	4,9	3,6	2,4	-1,1	3,4	9,3	6,8	-2,4	-0,5
25КэВ - 250КэВ	5,2	7,6	0,4	-1,6	9,7	15,8	13,1	-12,1	-0,4
250КэВ - 2,5МэВ	3,7	-6,1	-0,9	3,1	17,1	22,9	3,0	-5,2	-7,5
2,5МэВ - 25МэВ	-2,8	2,7	-2,1	-3,8	3,6	11,0	1,8	4,0	2,7
<b>Среднеквадратич.</b>	<b>6,2</b>	<b>10,4</b>	<b>5,9</b>	<b>1,6</b>	<b>7,9</b>	<b>13,5</b>	<b>6,97</b>	<b>6,5</b>	<b>3,32</b>

Таблица 4.9 – Относительные погрешности (%) определения спектральной плотности нейтронного излучения для опорных нейтронных полей, получаемых с помощью замедляющих дисков без отверстий (расстояние до источника – 1100 мм)

Энергетический интервал/Конфигурация	10 мм цельные	20 мм цельные	30 мм цельные	50 мм цельные	80 мм цельные	130 мм цельные	180 мм цельные
0,025эВ - 0,25эВ	7,4	-7,3	-14,9	7,0	16,4	3,3	1,6
0,25эВ - 2,5эВ	6,5	-4,2	-12,4	4,3	13,3	3,6	-2,7
2,5эВ - 25эВ	7,4	-7,7	-11,6	-5,3	5,3	2,9	-1,1
25эВ - 250эВ	3,7	-7,6	-5,1	-8,2	9,4	7,1	-9,6
250эВ - 2,5КэВ	6,3	-2,3	-9,3	-9,2	15,7	-4,6	-7,1
2,5КэВ - 25КэВ	3,2	-6,0	-2,4	-5,3	5,8	-3,3	-9,2
25КэВ - 250КэВ	-5,3	-4,1	4,2	-11,5	4,0	-8,7	-7,6
250КэВ - 2,5МэВ	-3,9	7,3	18,3	-21,8	0,7	-9,8	-13,9
2,5МэВ - 25МэВ	-5,3	-1,6	-2,1	0,9	-5,4	0,6	2,6
<b>Среднеквадратич.</b>	<b>5,64</b>	<b>5,79</b>	<b>10,5</b>	<b>9,9</b>	<b>10,3</b>	<b>5,64</b>	<b>7,42</b>

Таблица 4.10 – Относительные погрешности (%) определения спектральной плотности нейтронного излучения для опорных нейтронных полей, получаемых с помощью замедляющих дисков с отверстиями (расстояние до источника – 500 мм)

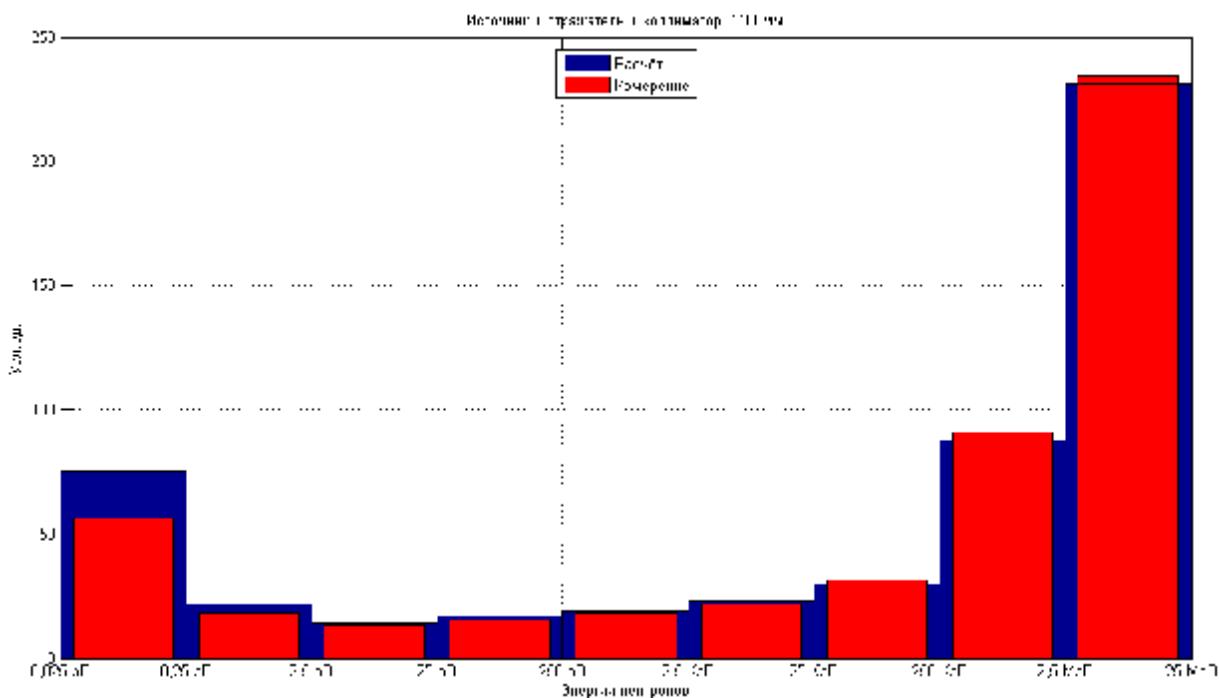
Энергетический интервал/Конфигурация	Отражажа жатель	В сборе	10 мм с отв.	20 мм с отв.	30 мм с отв.	50 мм с отв.	80 мм с отв.	130 мм с отв.	180 мм с отв.
0,025эВ - 0,25эВ	-13,5	20,3	24,7	9,3	-3,9	-22,1	-3,7	0,8	3,3
0,25эВ - 2,5эВ	-4,9	22,8	20,0	6,5	-5,7	-17,3	0,2	2,6	3,2
2,5эВ - 25эВ	1,7	8,0	11,2	1,8	-5,2	-6,2	7,1	3,7	5,8
25эВ - 250эВ	1,2	7,5	7,2	0,4	-3,0	-1,9	4,9	5,4	0,9
250эВ - 2,5КэВ	-1,5	5,3	1,8	0,1	0,6	2,1	2,9	4,5	-1,1
2,5КэВ - 25КэВ	-0,4	0,2	0,8	-2,2	3,9	8,3	2,5	1,6	-6,8
25КэВ - 250КэВ	2,9	-4,1	-10,7	-2,8	8,1	16,4	5,2	-0,8	-5,0
250КэВ - 2,5МэВ	-5,6	-21,7	-11,4	1,6	11,0	17,7	-	-4,2	-6,8
2,5МэВ - 25МэВ	0,4	-2,5	-1,0	2,1	3,4	1,2	0,6	0,6	-1,5
<b>Среднеквадратич.</b>	<b>5,3</b>	<b>13,2</b>	<b>12,6</b>	<b>4,11</b>	<b>5,75</b>	<b>12,84</b>	<b>5,82</b>	<b>3,19</b>	<b>4,43</b>

Таблица 4.11 – Относительные погрешности определения спектральной плотности нейтронного излучения для опорных нейтронных полей, получаемых с помощью замедляющих дисков без отверстий  
(расстояние до источника – 500 мм)

Энергетический интервал/Конфигурация	10 мм цельные	20 мм цельные	30 мм цельные	50 мм цельные	80 мм цельные	130 мм цельные	180 мм цельные
0,025эВ - 0,25эВ	25,1	5,1	-12,4	-6,2	-5,4	-2,9	-3,9
0,25эВ - 2,5эВ	15,6	-0,7	-14,1	-6,2	-2,7	1,7	-5,3
2,5эВ - 25эВ	6,2	-6,4	-13,2	-6,1	6,4	2,4	-9,6
25эВ - 250эВ	5,8	-7,1	-14,3	-5,2	6,8	3,7	-5,9
250эВ - 2,5КэВ	3,0	-9,5	-10,9	-6,4	14,0	8,2	-7,5
2,5КэВ - 25КэВ	-2,0	-7,0	-11,0	-3,7	15,9	5,4	-1,9
25КэВ - 250КэВ	-11,9	-7,1	-3,3	3,1	19,3	7,3	-3,6
250КэВ - 2,5МэВ	-7,1	9,4	9,2	10,4	25,5	12,7	-4,9
2,5МэВ - 25МэВ	1,1	0,4	-1,5	-1,0	-2,2	5,3	-7,3
<b>Среднеквадратич.</b>	<b>11,3</b>	<b>6,6</b>	<b>10,9</b>	<b>5,9</b>	<b>14,8</b>	<b>6,4</b>	<b>6,0</b>

Для наглядности на диаграммах (рисунки 4.20-4.29) приведены сравнения показаний нейронной сети и спектральных плотностей, усреднённых по децимальным энергетическим интервалам, рассчитанных в GEANT-4, в не нормированном виде для некоторых реализаций. На этих диаграммах по горизонтальной оси отложена энергия нейтронов, по вертикальной – условные единицы, т.к. значения спектральных плотностей в децимальных интервалах энергии рассчитанные в GEANT-4 зависят от количества генерируемых при моделировании нейтронов, которое может задаваться произвольно. В данном случае это число частиц в каждом энергетическом интервале, дошедших до замедляющего шара блока детектирования БДКС-05С.

Среднеквадратическая погрешность определения спектральных плотностей по всем спектрам составляет 3,4 %. Как можно видеть из графиков, наибольшие отклонения наблюдаются на 1-м и 8-м интервалах, где они могут достигать 25%.



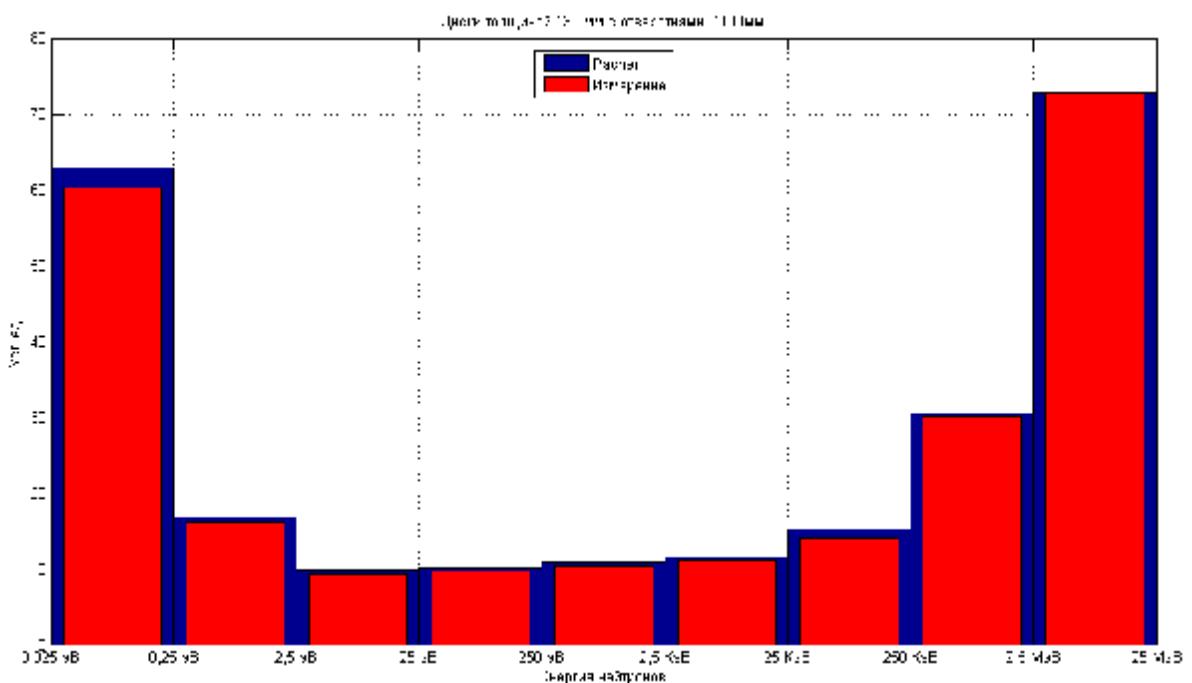


Рисунок 4.22 – Диаграмма сопоставления результатов измерения и результатов расчёта спектра по GEANT-4 для реализации «диск 130 мм с отверстием» при расстоянии между источником и блоком детектирования 1100 мм  
 (Среднеквадратическая погрешность по всем децимальным интервалам – 4,6 %, максимальная – 12,1%)

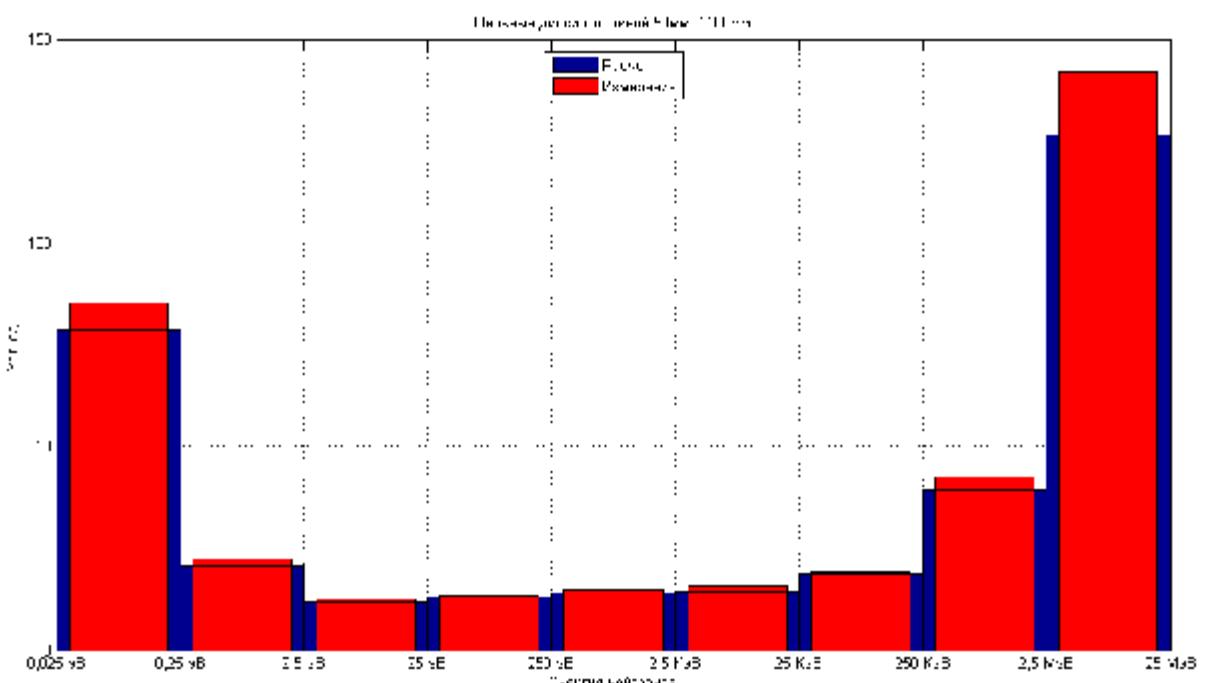


Рисунок 4.23 – Диаграмма сопоставления результатов измерения и результатов расчёта спектра по GEANT-4 для реализации «диск 50 мм без отверстия» при расстоянии между источником и блоком детектирования 1100 мм  
 (Среднеквадратическая погрешность по всем децимальным интервалам – 7,9%, максимальная – 12,8%)

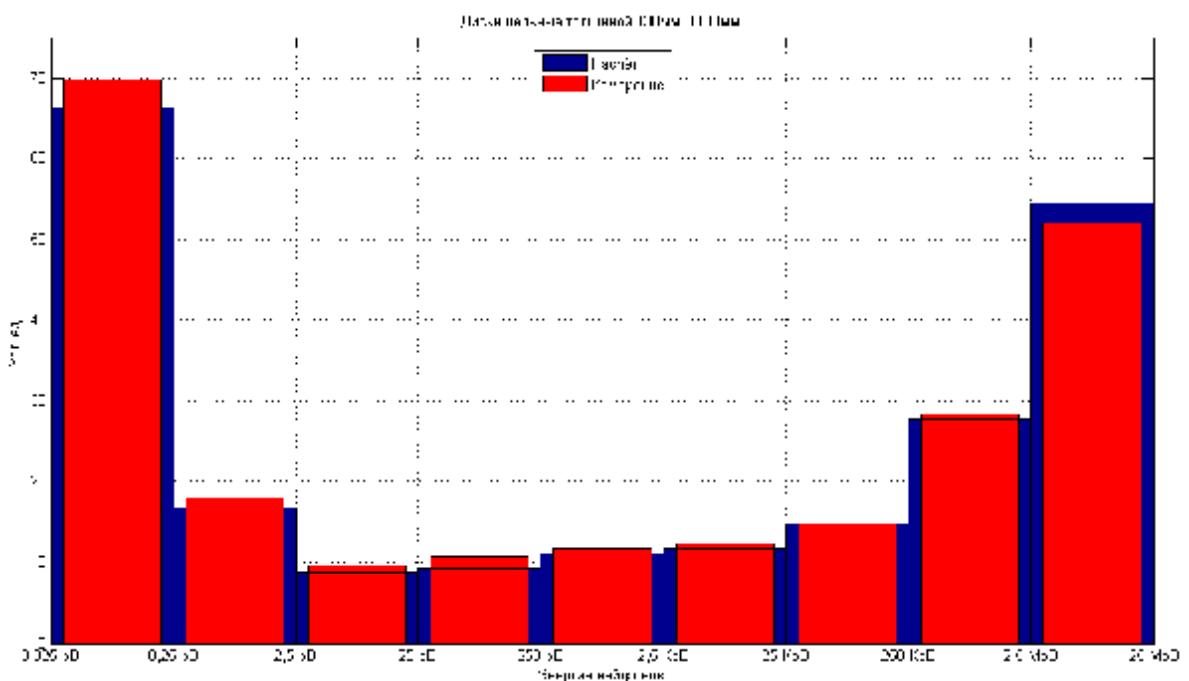
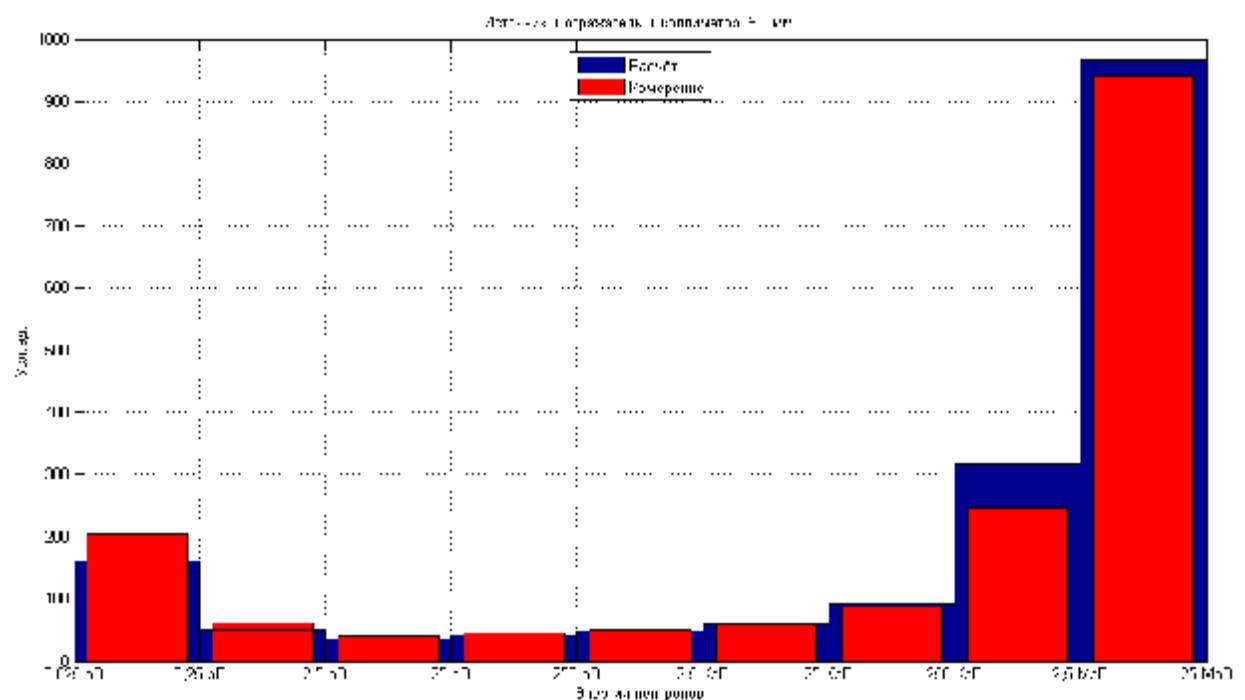


Рисунок 4.24 – Диаграмма сопоставления результатов измерения и результатов расчёта спектра по GEANT-4 для реализации «диск 130 мм без отверстия» при расстоянии между источником и блоком детектирования 1100 мм (Среднеквадратическая погрешность по всем децимальным интервалам – 5,9%, максимальная – 9,8%)



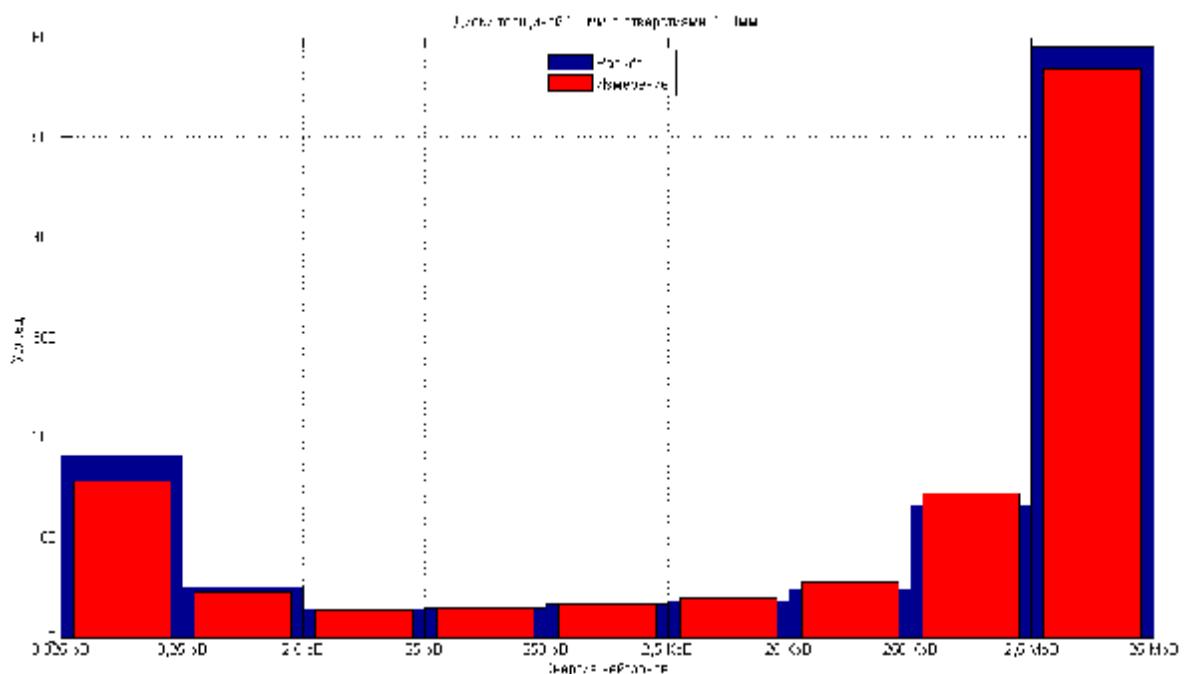


Рисунок 4.26 – Диаграмма сопоставления результатов измерения и результатов расчёта спектра по GEANT-4 для реализации «диск 50 мм с отверстием» при расстоянии между источником и блоком детектирования 500 мм  
(Среднеквадратическая погрешность по всем децимальным интервалам – 9,4%, максимальная – 21,8%)

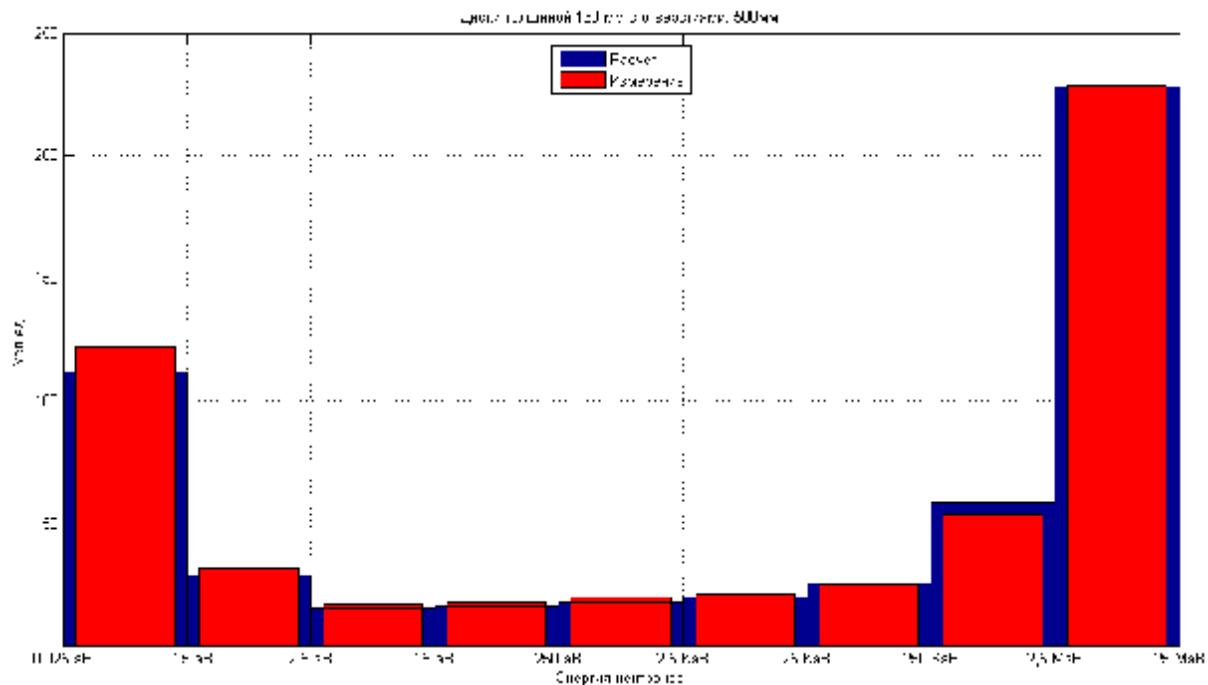


Рисунок 4.27 – Диаграмма сопоставления результатов измерения и результатов расчёта спектра по GEANT-4 для реализации «диск 130 мм с отверстием» при расстоянии между источником и блоком детектирования 500 мм  
(Среднеквадратическая погрешность по всем децимальным интервалам – 2,9%, максимальная – 5,4%)

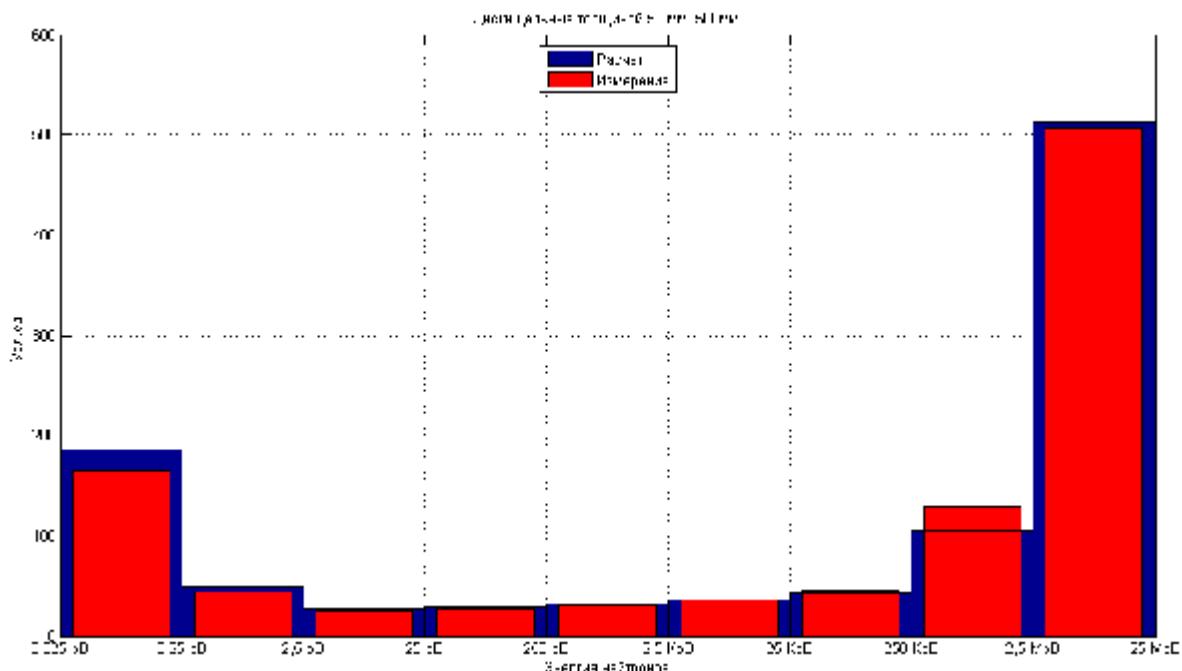


Рисунок 4.28 – Диаграмма сопоставления результатов измерения и результатов расчёта спектра по GEANT-4 для реализации «диск 50 мм без отверстия» при расстоянии между источником и блоком детектирования 500 мм  
(Среднеквадратическая погрешность по всем децимальным интервалам – 5,8%,  
максимальная – 10,4%)

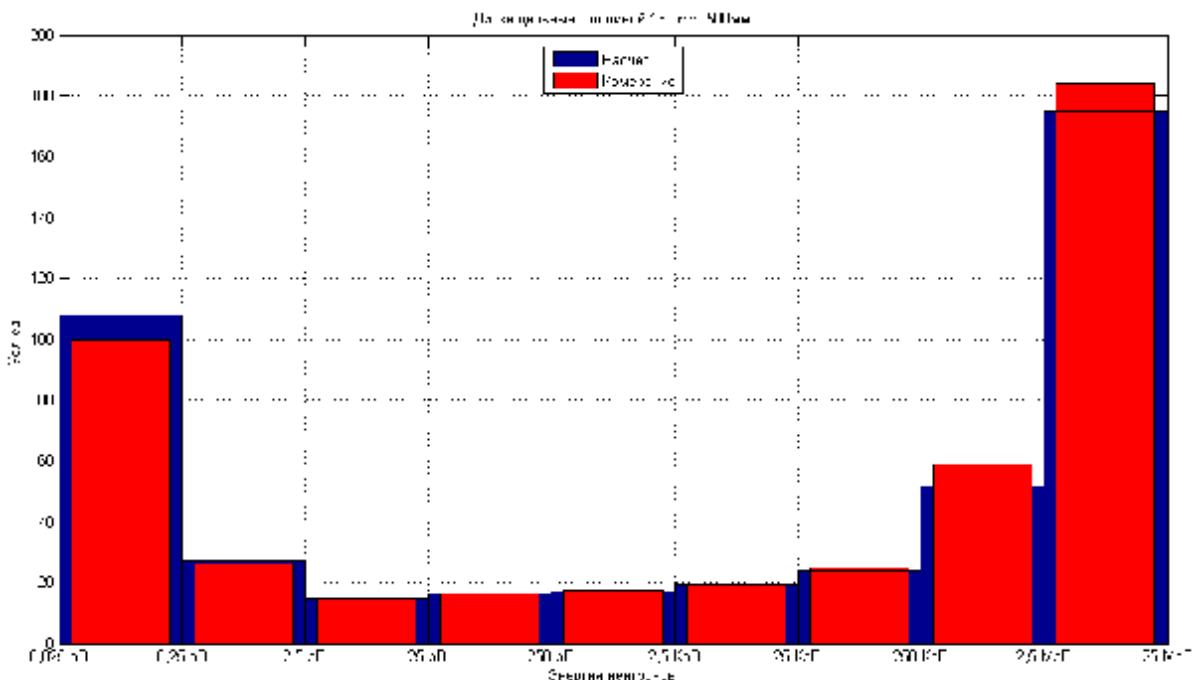


Рисунок 4.29 – Диаграмма сопоставления результатов измерения и результатов расчёта спектра по GEANT-4 для реализации «диск 130 мм без отверстия» при расстоянии между источником и блоком детектирования 500 мм  
(Среднеквадратическая погрешность по всем децимальным интервалам – 5,0%,  
максимальная – 12,7%)

Среднеквадратическая погрешность определения спектральных плотностей по всем спектрам составляет 3,4 %. Погрешности определения интегральной плотности нейтронного излучения представлены на диаграммах (рисунки 4.30, 4.31). На рисунке 4.30 представлена диаграмма погрешностей определения интегральной плотности излучения для всех опорных нейтронных полей при расстоянии между источником и блоком детектирования 1100 мм, а на рисунке 4.31 – для тех же полей при расстоянии между источником и блоком детектирования 500 мм. На каждой диаграмме по оси абсцисс отложены конфигурации системы, определяющие ту или иную реализацию опорного поля. При этом левее по оси абсцисс указана толщина замедляющих парафиновых дисков с отверстиями, а правее – дисков без отверстий.

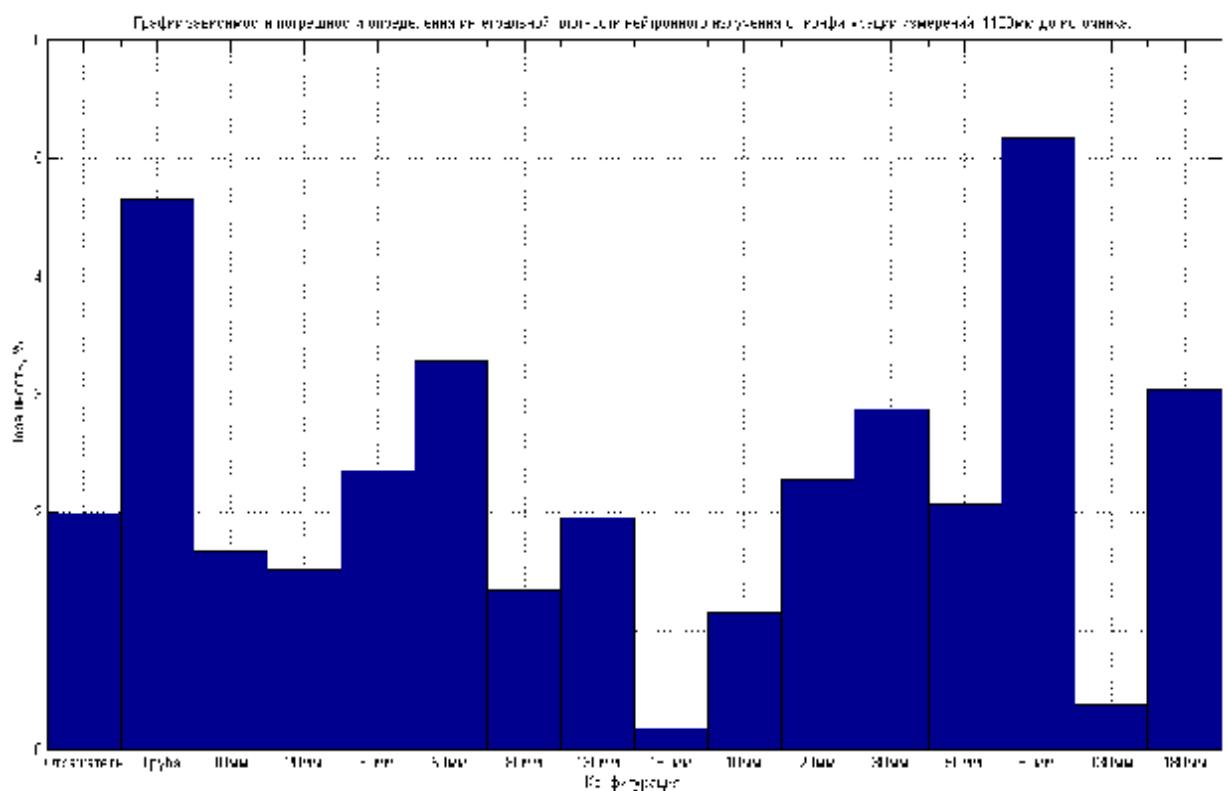


Рисунок 4.30 – Диаграмма погрешностей определения интегральной плотности нейтронного излучения для различных реализаций опорных нейтронных полей при расстоянии между источником и блоком детектирования 1100 мм

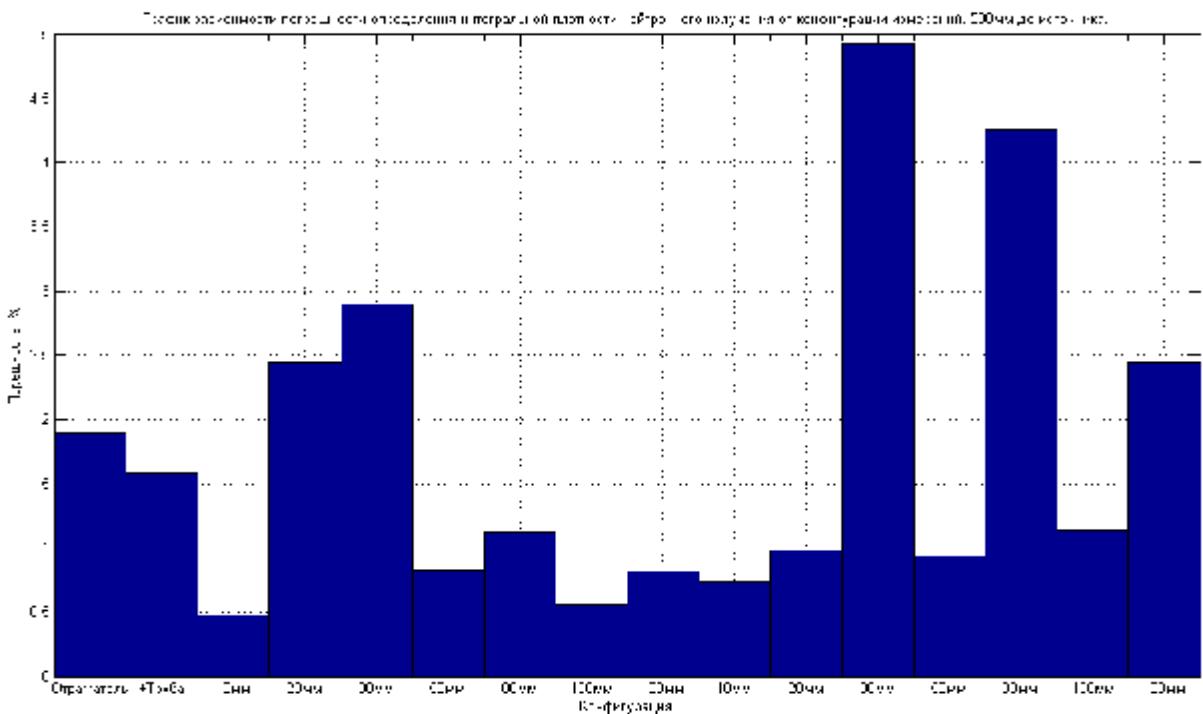


Рисунок 4.31 – Диаграмма погрешностей определения интегральной плотности нейтронного излучения для различных реализаций опорных нейтронных полей при расстоянии между источником и блоком детектирования 500 мм

В целом, среднеквадратическая погрешность определения интегральных плотностей по всем реализациям опорных нейтронных полей составляет 2,4%.

#### 4.5.4. Анализ погрешностей определения мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения с помощью созданного устройства

Полученные п.4.5.2 результаты позволяют говорить о достаточной точности восстановления спектров нейтронного излучения в разработанном нейтронном спектрометре-дозиметре реального времени. Кроме того, результаты, полученные в п.4.5.1 позволяют запустить в производство модифицированный прибор МКС-03С с сохранением всех его функций при значительном уменьшении погрешностей измерения и с добавлением функции измерения спектра. Теперь оценим точность определения мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения – важнейшей дозиметрической величины.

Опорные поля в п.4.5.1 – п.4.5.2 были рассчитаны в GEANT-4 как число дошедших до блока детектирования нейтронов в каждом децимальном интервале. Детекторы нейтронов в БДКС-05С погружены в полиэтиленовую сферу диаметром 21 см. Зная её площадь, легко рассчитать флюенс нейтронов на каждом децимальном интервале и, используя пересчётные коэффициенты, найденные в п. 4.3.4 перейти к мощности эквивалентной дозы нейtronного излучения. В таблицах 4.12 – 4.15 представлены расчётная и измеренная спроектированным нейtronным спектрометром мощность эквивалентной дозы нейtronного излучения, а также относительная ошибка для различных реализаций опорных нейtronных полей. Здесь  $\delta_{H\_3}$  – мощность эквивалентной дозы нейtronного излучения при разбивке спектра на 3 интервала по энергии,  $\delta_{H\_9}$  – мощность эквивалентной дозы нейtronного излучения при разбивке спектра на 9 децимальных интервалов по энергии.

Таблица 4.12 – Расчётная и измеренная спроектированным нейtronным спектрометром мощность эквивалентной дозы нейtronного излучения и относительная ошибка (%) для опорных нейtronных полей, получаемых с помощью замедляющих дисков с отверстиями (расстояние до источника – 1100 мм)

Величина/Конфигурация	Отражатель	В сборе	10 мм с отв.	20 мм с отв.	30 мм с отв.	50 мм с отв.	80 мм с отв.	130 мм с отв.	180 мм с отв.
$\delta_H$ , расчётная, мкЗв/ч	0,204	0,204	0,184	0,168	0,152	0,124	0,093	0,066	0,053
$\delta_{H\_3}$ , измеренная, мкЗв/ч	0,135	0,132	0,117	0,104	0,097	0,079	0,060	0,046	0,038
Относительная ошибка, %	-33,82	-35,29	-36,41	-38,09	-36,18	-36,29	-35,42	-30,30	-28,30
$\delta_H$ , расчётная, мкЗв/ч	0,204	0,204	0,184	0,168	0,152	0,124	0,093	0,066	0,053
$\delta_{H\_9}$ , измеренная, мкЗв/ч	0,201	0,208	0,181	0,163	0,159	0,139	0,095	0,068	0,054
Относительная ошибка, %	-1,735	1,82	-1,81	-2,97	4,96	11,93	2,07	2,34	0,96

Таблица 4.13 – Расчёчная и измеренная спроектированным нейтронным спектрометром мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения и относительная ошибка (%) для опорных нейтронных полей, получаемых с помощью замедляющих дисков без отверстий (расстояние до источника – 1100 мм)

Величина/Конфигурация	10 мм с отв.	20 мм с отв.	30 мм с отв.	50 мм с отв.	80 мм с отв.	130 мм с отв.	180 мм с отв.
$\delta_n$ , расчёчная, мкЗв/ч	0,183	0,162	0,143	0,110	0,080	0,052	0,042
$\delta_{n\_3}$ , измеренная, мкЗв/ч	0,120	0,104	0,090	0,070	0,053	0,038	0,032
Относительная ошибка, %	-34,43	-35,80	-37,06	-36,36	-33,75	-26,92	-23,81
$\delta_n$ , расчёчная, мкЗв/ч	0,183	0,162	0,143	0,110	0,080	0,052	0,042
$\delta_{n\_9}$ , измеренная, мкЗв/ч	0,174	0,161	0,143	0,108	0,077	0,051	0,041
Относительная ошибка, %	-4,99	-0,78	-0,11	-1,54	-4,20	-1,11	-0,82

Таблица 4.14 – Расчёчная и измеренная спроектированным нейтронным спектрометром мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения и относительная ошибка (%) для опорных нейтронных полей, получаемых с помощью замедляющих дисков с отверстиями (расстояние до источника – 500 мм)

Величина/Конфигурация	Отражатель	В сборе	10 мм с отв.	20 мм с отв.	30 мм с отв.	50 мм с отв.	80 мм с отв.	130 мм с отв.	180 мм с отв.
$\delta_n$ , расчёчная, мкЗв/ч	0,800	0,832	0,760	0,686	0,620	0,492	0,345	0,194	0,124
$\delta_{n\_3}$ , измеренная, мкЗв/ч	0,498	0,512	0,464	0,417	0,369	0,289	0,202	0,118	0,081
Относительная ошибка, %	-37,75	-38,46	-38,95	-39,21	-40,48	-41,26	-41,45	-39,18	-34,68
$\delta_n$ , расчёчная, мкЗв/ч	0,800	0,832	0,760	0,686	0,620	0,492	0,345	0,194	0,124
$\delta_{n\_9}$ , измеренная, мкЗв/ч	0,797	0,795	0,745	0,700	0,645	0,504	0,344	0,194	0,122
Относительная ошибка, %	-0,33	-4,48	-2,01	2,01	4,04	2,43	-0,34	0,21	-2,09

Таблица 4.15 – Расчёчная и измеренная спроектированным нейтронным спектрометром мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения и относительная ошибка (%) для опорных нейтронных полей, получаемых с помощью замедляющих дисков без отверстий (расстояние до источника – 500 мм)

Величины/Конфигурация	10 мм с отв.	20 мм с отв.	30 мм с отв.	50 мм с отв.	80 мм с отв.	130 мм с отв.	180 мм с отв.
$\delta_{H\_3}$ , расчёчная, мкЗв/ч	0,744	0,651	0,567	0,425	0,276	0,151	0,100
$\delta_{H\_3}$ , измеренная, мкЗв/ч	0,448	0,390	0,337	0,249	0,164	0,095	0,068
Относительная ошибка, %	-39,78	-40,09	-40,56	-41,41	-40,58	-37,09	-32,00
$\delta_{H\_9}$ , расчёчная, мкЗв/ч	0,744	0,651	0,567	0,425	0,276	0,151	0,100
$\delta_{H\_9}$ , измеренная, мкЗв/ч	0,730	0,661	0,551	0,427	0,286	0,150	0,102
Относительная ошибка, %	-1,79	1,53	-2,91	0,58	3,63	-0,64	1,42

Как видно из вышеприведённых таблиц, точность определения мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения значительно выше (почти на порядок) при варианте разбивки спектра на 9 диапазонов (максимальная относительная ошибка при разбивке на 3 диапазона – 41,45 %, при разбивке на 9 диапазонов – 11,9 %). Очевидно, что разбивка всего энергетического спектра на 3 диапазона (тепловые, промежуточные, быстрые) недостаточно точно отражает форму спектра нейтронного излучения, что приводит к существенному занижению мощности дозы ввиду сильной зависимости биологической эффективности нейtronов от их энергии (рис. 4.10). Данный факт ещё раз подтверждает сделанный в п. 1.5 вывод о необходимости перехода к спектральным измерениям с разбивкой всего энергетического спектра хотя бы на 9 децимальных интервалов энергии.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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, ограничивающей применение нейронных сетей в нейтронных спектрометрах, 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 датчиков в нейтронных спектрометрах, связанные с необходимостью проведения значительного числа экспериментов для получения состоятельной обучающей выборки. Выбрана оптимальная архитектура и кон-

фигурация 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 унифицированных 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 децимальных интервалах энергии со среднеквадратической погрешностью, не превышающей 5 %.

## **Библиографический список**

1. В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. Защита от ионизирующих излучений. Справочник – 4-е изд., переработанное и дополненное. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496с.
2. Ю. А. Егоров, А. А. Носков. Радиационная безопасность на АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1986. 152 с.
3. Б. А. Брискман, В. В. Генералова, Е. А. Крамер-Агеев [и др.]. Внуприреакторная дозиметрия: практическое руководство. М.: Энергоатомиздат, 1985. 200 с.
4. Е. В. Косьяненко, С. И. Купцов, В. В. Мартынов [и др.]. Спектры и дозиметрические характеристики полей нейтронов на рабочих местах персонала горно-химического комбината. Протвино: Препринт ГНЦ РФ «ИФВЭ», 2008. 11 с.
5. В. Л. Гозенбук, И. Б. Кеирим-Маркус, А. К. Савинский, Е. Н. Чернов. Дозовая нагрузка на человека в полях гамма-нейтронного излучения. М.: Атомиздат, 1978. 168 с.
6. Севастьянов В.Д. Кошелев А.С. ГСССД МР 182-2011. Методика восстановления спектров нейтронов ядерных реакторов и нейтронных генераторов КАСКАД 200(176). Аттестована Российской научно-техническим центром информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ») 03.05.2011г. М.: «ВНИИФТРИ», 2011. 26с.
7. Севастьянов В.Д. Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Формирование априорных спектров нейтронов ядерных установок с использованием спектров Maxwella. Приборы и техника эксперимента, №5. М., 2008. С.62–66.
8. Маслов Г.Н., Севастьянов В.Д., Кошелев А.С. Метод расчёта спектров нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами реализованный в новой версии программы КАСКАД. Измерительная техника, №5. М., 2003. С.58–62.
9. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Одинцов Ю.М. Двухкомпонентное представление спектра нейтронов на быстрых исследовательских реакторах. Атомная энергия, в.2, т.79. М., 1995. С.107–117.
10. Кошелев А.С., Севастьянов В.Д. Метод оценки погрешности определения спектров полей нейтронов ядерно-физических установок. Приборы и техника эксперимента, №4. М., 2011 С. 1–7.
11. Севастьянов В.Д., Ярына В.П. Авторское свидетельство № 1220465. Детектор нейтронов с делящимся нуклидом для измерения флюенса нейтронов от 22.11.1985.

12. Голиков И.Г., Лещаков И.И., Остроумов В.И., Щебет А.И., Севастьянов В.Д., Александров Б.М., Васильев Р.Д. Применение детекторов  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  для измерения спектра нейтронов. Методы и аппаратура для точных измерений параметров ионизирующих излучений. Труды ВНИИФТРИ, в.30. М., 1976. С.42–46.
13. Брегадзе Ю. И., Э.К. Степанов, В.П. Ярына. Прикладная метрология ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1990. 264 с.
14. Брегадзе Ю.И., Масляев П.Ф. Методы и аппаратура для метрологического обеспечения измерений эквивалентной дозы быстрых нейтронов. Измерительная техника, № 8. М., 1975.
15. Брегадзе Ю.И., Марченко А.В., Масляев П.Ф., Сидоренко Л.М. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений мощности поглощенной и эквивалентной доз нейтронного излучения. Измерительная техника, № 10. М., 1979.
16. Брегадзе Ю.И., Исаев Б.М., Масляев П.Ф. Система метрологического обеспечения в области нейтронной дозиметрии. Isotopenpraxis, Bd. 17, N. 5, 1981.
17. Масляев П.Ф. Проблемы определения эффективной дозы при контроле радиационной безопасности облучения нейтронным излучением. АНРИ, № 3. М., 2001. С. 50–57.
18. А.Г. Алексеев, В.А. Пикалов, О.В. Суманеев, Е.В. Косьяненко, Г.И. Бритвич, Е.Г. Спиров, Н.В. Кирякова, С.А. Глазунов, В.В. Александров, С.Ф. Пономарев, А.П. Куликов, П.Ф. Масляев. Измерение спектров нейтронного излучения на рабочих местах разделительного производства завода по обогащению урана. АНРИ, № 4. М., 2005.
19. Васильев Р.Д., Галиев Н.Б., Гнусин Ю.К., Григорьев Е.И., Севастьянов В.Д., Ярына В.П. Вопросы стандартизации детекторов и измерений. Сб. Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях, Труды I Всес. совещания, т.1. М.: Издательство стандартов, 1972. С.186–188.
20. Васильев Р.Д., Ярына В.П., Севастьянов В.Д. Государственный специальный эталон единицы плотности потока нейтронов для области измерений на ядерно-физических установках. Измерительная техника, №7. М., 1974. С.10–14.
21. Васильев Р.Д., Давиденко В.А., Севастьянов В.Д., Цой В.С., Ярына В.П. Методика активационных измерений характеристик полей моноэнергетических нейтронов с энергией 14 МэВ. Сб. Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках. Материалы I Всес. Школы, т.2. М.: ЦНИИатоминформ, 1976. С.94–98.

22. Беспалов Д.Ф., Блюменцев А.М., Дылюк А.А., Севастьянов В.Д., Цой В.С., Ярына В.П. Система метрологического обеспечения измерений потоков быстрых нейtronов скваженных нейtronных генераторов. Сб. «Геофизическая аппаратура», в.74. Л.: Недра, 1981. С.118–123.
23. Галиев Н.Б., Григорьев Е.И., Севастьянов В.Д., Ярына В.П. Нейtronно-активационные средства измерений для массового применения. Материалы III Всес. совещ. по метрологии нейtronного излучения на реакторах и ускорителях, т.1. М.: ЦНИИатоминформ, 1983. С.116–125.
24. Бойцов А.А. Метрологическое обеспечение нейtronных измерений на высокопоточных исследовательских реакторах. Диссертация кандидата технических наук. – М., 2009. 76с.
25. Климентов, В. Б., Кончинский Г. А., Фрунзе В. В. Активационные измерения потоков и спектров нейtronов в ядерных реакциях. М.: Изд-во стандартов, 1974. 208 с.
26. Рязанов Д.К. Создание и применение системы нейtronно-дозиметрического сопровождения на исследовательских реакторах. Диссертация доктора технических наук. – М., 2009. 271с.
27. Терешкин В.И. Нейtronно-активационные измерения при проведении радиационных исследований в полях излучений генератора СНЕГ-13. Диссертация кандидата физико-математических наук. – М., 1999. 139с.
28. Кухтевич В. И., Трыков Л. А., Трыков О. А. Однокристальный сцинтилляционный спектрометр. М.: Атомиздат, 1971. 119 с.
29. Дозиметр-радиометр МКС-03С. Техническое описание. 67 с.
30. Санников, А. В., Пелешко В. Н., Савицкая Е. Н., [и др.]. Многошаровой спектрометр нейtronов на основе серийного прибора РСУ-01. АНРИ, № 1. М., 2009. С. 62–69.
31. Санников А.В. Развитие методов спектрометрии нейtronного излучения на больших протонных ускорителях. Диссертация кандидата физико-математических наук. – Протвино, 2006. 75 с.
32. Кащук Ю.А. Сцинтилляционные спектрометры нейtronного и гамма излучения для диагностики термоядерной плазмы. Диссертация кандидата физико-математических наук. Троицк, 2007. 198 с.
33. Абдурашитов Д.Н. Низкофоновый спектрометр быстрых нейtronов. Диссертация кандидата физико-математических наук. М., 2008. 82 с.
34. Жуков А.П. Расчёт процессов генерации, переноса и детектирования нейtronов в некоторых экспериментальных установках методом Монте-Карло. Диссертация кандидата физико-математических наук. М., 2005. 109 с.

35. Деденко Д.Л. Моделирование характеристик многомодульных детекторов нейтронного излучения. Диссертация кандидата физико-математических наук. М., 2005. 144 с.
36. Bramblett, R. L., Ewing R. I., Bonner T. W. A new type of Neutron spectrometer. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. North-Holland publishing Co, 1960. № 9. P. 1–12.
37. Thomas, D. J., Alevra A. V. Bonner sphere spectrometers – a critical review / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A 476, 2002. P. 12–20.
38. Mares, V., Schraube G., Schraube H. Calculated neutron response of a Bonner sphere spectrometer with  $^3\text{He}$  counter. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A307, 1991. P. 398–412.
39. Siebert, B. R. L., Thomas R. H. Computational dosimetry. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 70, №1-4, 1997. P. 371–378.
40. Wiegel B., Agosteo S., Bedogni R. [et al]. Intercomparison of radiation protection devices in a high-energy stray neutron field, Part II: Bonner sphere spectrometry. Radiation Measurements, № 44, 2009. P. 660–672.
41. Alevra, A. V., Plostinaru V. D. Characterisation of the IPNE Bonner sphere spectrometer by comparison with PTB system. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A476, 2002. P. 21–25.
42. Thomas, D. I., Bardell A. G., Macaulay E. M. Characterisation of a gold foil-based Bonner sphere set and measurements of neutron spectra at a medical accelerator. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A476, 2002. P. 31–35.
43. Thomas D. I., Hawkes N. P., Jones L. N., Kolkowski P., Roberts N. J. Characterization and utilization of a Bonner sphere set based on gold activation foils. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 126, №1-4, 2007. P. 229–235.
44. Wang Z., Hutchinson J. D., Hertel N. E., Burgett E., Howell R. M. Study of a gold-foil based multisphere neutron spectrometer. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 128, № 3, 2008. P. 289–293.
45. Vylet, V. Respons matrix of extended Bonner sphere system. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A476, 2002. P. 26–30.
46. Vega-Carillo H. R., Manzanares-Acuna E., Martin-Hernandez-Davila V., Mercado Sanchez G. A. Response matrix of a multisphere neutron spectrometer with a  $^3\text{He}$  proportional counter. Revista Mexicana de Fisica, Vol. 51 (1), 2005. P. 47–52.
47. Bedogni R., Esposito A., Andreani C., Senesi R., Pia De Pascale M., Picozza P., Pietropaolo A., Gorini G., Frost C. D., Ansell S. Characterization of the neutron field at the ISIS-VESUVIO facility by means of a Bonner Sphere

Spectrometer. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A612, 2009. P. 143–148.

48. Burgett, E. A., Hertel N. E., Howell R. M. Energy Response and Angular Dependence of a Bonner Sphere Extention. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 56, № 3, 2009. P. 1325–1328.

49. Gany, S., Mares V., Ruhm W. Response functions of a Bonner sphere spectrometer calculateed with GEANT4. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A604, 2009. P. 612–617.

50. Matske, M. Propagation of uncertainties in unfolding procedures. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A476, 2002. P. 230–241.

51. Simmer G., Mares V., Weitzenneger E., Ruhm W. Iterative unfolding for Bonner sphere spectrometer using the MSANDB code – Sensitivity analysis and dose calculation. Radiation Measurements, № 45, 2010. P. 1–9.

52. Messaoudi M. El., Chouak A., Lferde M., Cherkaoui R. Performance of three different unfolding procedures connected to Bonner sphere data. Radiation protection Dosimetry, Vol. 108, № 3, 2004. P. 247–253.

53. Serre S., Castellani-Coulie K., Paul D., Lacoste V. Optimisation Using Monte-Carlo Calculations of a Bonner Sphere Spectrometer Extended to High Energies for the Nutron Environments Characterization. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 56, № 6, 2009. P. 3582–3590.

54. Avdic, S., Pozzi S. A., Propescu V. Detector response unfolding using artifical networks. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A565, 2006. P. 742–752.

55. Sharghi I. A., Bonuadi M. R., Etaati G. R., Shahriari M. Unfolding the neutron spectrum of a NE213 Scintillator using artificial neural networks. Applied Radiation and isotopes, 67, 2009. P. 1912–1918.

56. Vylet V. Response matrix of an extanted Bonner sphere system. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A476, 2002. P. 26–30.

57. Siebert, B. R. L. Assessment of sensitivities and uncertainties in Monte-Carlo particle transport calculations for neutron spectrometry. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A476, 2002. P. 256–262.

58. Дрейзин В.Э., Гримов А.А., Логвинов Д.И., Мазепа И.Н. Новый подход к разработке спектрометрического радиометра нейтронного излучения. Известия вузов. Ядерная энергетика, №1. М., 2010. С.20–25.

59. Дрейзин В.Э., Логвинов Д.И., Гримов А.А. Подбор и оптимизация состава детекторов для многодетекторного спектрометра нейтронного излучения. АНРИ (“Аппаратура и новости радиационных измерений”), №2, М., 2011. С.16–24.

60. Дрейзин В.Э., Гrimov A.A. Измерительный блок для нейтронного спектрометра реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей. Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика, медицинское приборостроение. № 2, Часть 3. Курск, 2012. С. 223–228.
61. Дрейзин В.Э., Гrimov A.A., Логвинов Д.И., Сиделёва Н.В. Определение удельных активностей радиоактивных нуклидов газоаэрозольных выбросов АЭС по гамма-спектрам сцинтиляционных спектрометров: формирование выборки смесей нуклидов. Известия Юго-Западного государственного университета, № 1 (46). Курск, 2013. С. 45–49.
62. Дрейзин В.Э., Гrimov A.A., Логвинов Д.И., Сиделёва Н.В. Определение удельных активностей радиоактивных нуклидов газоаэрозольных выбросов АЭС по гамма-спектрам сцинтиляционных спектрометров: исследование нейронных сетей как инструмента идентификации нуклидного состава газоаэрозольных выбросов АЭС. Известия Юго-Западного государственного университета, № 3 (48). Курск, 2013. С. 23–30.
63. Дрейзин В.Э., Гrimov A.A., Сиделёва Н.В. Определение удельных активностей радиоактивных нуклидов газоаэрозольных выбросов АЭС по гамма-спектрам сцинтиляционных спектрометров: выделение оптимального подмножества информативных признаков из аппаратурных гамма-спектров. Известия Юго-Западного государственного университета, № 5 (50). Курск, 2013. С. 10–18.
64. Дрейзин В.Э., Гrimov A.A., Логвинов Д.И. Создание опорных нейтронных полей для калибровки нейтронных спектрометров. АНРИ (“Аппаратура и новости радиационных измерений”), №4. М., 2013. С.8–13.
65. Дрейзин В.Э., Емельянов С.Г., Гrimov A.A. Спектрометрические измерения нейтронного излучения. Издательство ЮЗГУ. Курск, 2011. 316 с.
66. Дрейзин В.Э., Гrimov A.A., Логвинов Д.И. Нейтронная спектрометрия. Современное состояние и моделирование многодетекторного спектрометра реального времени. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co.KG Heinrich-Böcking-Str.6-8, 66121 Saabrücken, Germany. Saabrücken, 2012. 432 с.
67. Дрейзин В.Э., Гrimov A.A. Разработка имитационной моделирующей системы спектрометрического радиометра нейтронного излучения. Материалы 1 международной научно-технической конференции “Диагностика-2009”. Курск, КурскГТУ, 2009. С.189–192.
68. Дрейзин В.Э., Гrimov A.A., Логвинов Д.И., Мазепа И.Н. Разработка

имитационной моделирующей системы спектрометрического радиометра нейтронного излучения. Материалы итоговой конференции конкурса научных работ “Знания молодых ядерщиков – атомным станциям”. Обнинск, ИАТЭ, 2009. С.66–68.

69. Гримов А.А. Разработка моделирующей системы спектрометрического радиометра нейтронного излучения. Материалы семинара “Инновация-2010”. Курск, ЮЗГУ, 2010. С.28–30.

70. Дрейзин В.Э., Гримов А.А., Kochura A.B., Kochura E.P. Проблемы построения нейтронного спектрометра с вычислительным определением интегральной плотности потока нейtronов. Актуальные проблемы развития прикладной математики в энергетике, энергоэффективности и информационно-коммутационных технологиях. Материалы международной научной конференции. М.:МГТУ им. Баумана, 2010. С.269–273.

71. Дрейзин В.Э., Гримов А.А., Kochura E.P. Имитационное моделирование спектрометров нейтронного излучения. Актуальные проблемы развития прикладной математики в энергетике, энергоэффективности и информационно-коммутационных технологиях. Материалы международной научной конференции. М.:МГТУ им. Баумана, 2010. С.273–277.

72. Дрейзин В.Э., Гримов А.А., Логвинов Д.И., Мазепа И.Н. Использование нейросетевого метода в нейтронной спектрометрии. Материалы итоговой конференции конкурса научных работ “Знания молодых ядерщиков – атомным станциям”. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С.48–49.

73. Гримов А.А. Модернизация радиометра-дозиметра нейтронного излучения МКС-03С. Материалы международной научно-технической конференции “Диагностика-2011”. Курск, ЮЗГУ, 2011. С.37–39.

74. Дрейзин В.Э., Гримов А.А., Логвинов Д.И. Проблемы построения спектрометров нейтронного излучения реального времени. Тезисы докладов X конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. Харьков, ННЦ ХФТИ, 2012. С.95.

75. Дрейзин В.Э., Гримов А.А., Логвинов Д.И. Оценочный расчёт спектральных характеристик детекторов нейтронного излучения. Тезисы докладов X конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. Харьков, ННЦ ХФТИ, 2012. С.95.

76. Гримов А.А., Логвинов Д.И., Kochura E.P. Математическое моделирование нейтронного спектрометра. Материалы семинара “Инновация-2012”. Курск, ЮЗГУ, 2012. С.33–39.

77. Гримов А.А. Унифицированный измерительный блок для радиометрических приборов. Материалы семинара “Инновация-2012”. Курск, ЮЗГУ, 2012. С.39–42.

78. Дрейзин В.Э., Гrimov A.A., Логвинов Д.И., Сиделёва Н.В. Исследование возможности идентификации нуклидного состава газоаэрозольных выбросов АЭС с помощью сцинтиляционных гамма-спектрометров со сцинтил-ляторами NaI(Tl) и LaBr<sub>3</sub>(Cr). Материалы семинара “Инновация-2012”. Курск, ЮЗГУ, 2012. С.43–47.
79. Гrimov A.A., Логвинов Д.И. Моделирование спектральных характеристик детекторов нейтронного излучения. Материалы за 8-а международна научна практична конференция, « Найновите постижения на европейската наука -2012», Том 17. Екология. География и геология. Селско стопанство. София, «Бял ГРАД- БГ» ООД, 2012. С.22–26.
80. Гrimov A.A., Логвинов Д.И. Измерительный блок для нейтронного спектрометра реального времени. Материалы за 8-а международна научна практична конференция, « Найновите постижения на европейската наука -2012», Том 19. Технологии. Физическа култура и спорт. София, «Бял ГРАД- БГ» ООД, 2012. С.72–76.
81. Дрейзин В.Э., Гrimov A.A., Логвинов Д.И. Создание опорных нейтронных полей с разнообразными по форме энергетическими спектрами. Сборник материалов международной научно-технической конференции “Диагностика-2013”. Курск, ЮЗГУ, 2013. С.22–27.
82. Гrimov A.A. Выбор оптимальной архитектуры, конфигурации и методики обучения нейронных сетей в специализированном устройстве для анализа нейтронных потоков в реальном времени. Материалы VIII международной научно-практической конференция: «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке». М., 2014. С.15-17.
83. Гrimov A.A. Алгоритмы вычислительного восстановления спектров и эквивалентной дозы в специализированном устройстве для анализа нейтронных потоков в реальном времени. Материалы VIII международной научно-практической конференция: «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке». М., 2014. С.12-14.
84. Левин, В. Е., Хамьянов Л. П. Регистрация ионизирующих излучений Изд. 2-е. М.: Атомиздат, 1973. 256 с.
85. Brooks, F. D., Klein H. Neutron spectrometry – historical review and present status. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A 476, 2002. P. 1–11.
86. URL: <http://flnp.jinr.ru/336/>
87. Абросимов Н.К., Борухович Г.З., Куликов А.В., Лаптев А.Б., Петров Г.А., Щербаков О.А., Юрченко В.И. Нейтронный времяпролетный спектрометр ГНЕЙС. Л.: Препринт 909, ЛИЯФ, 1983. 36 с.
88. URL: <http://www.ckp-rf.ru/usu/73614/>

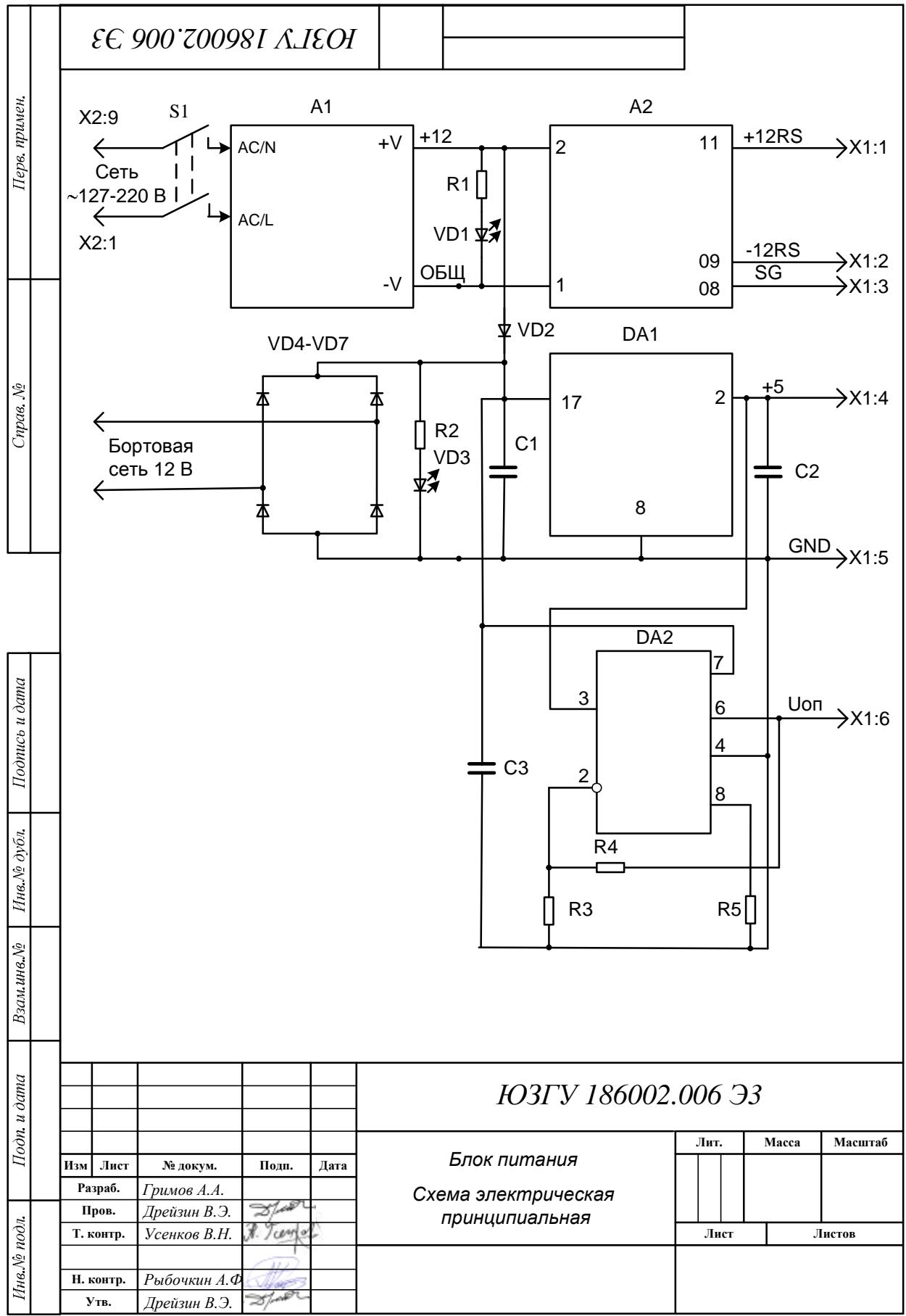
89. Григорьев, Ю. В. Нейтронные сечения и их интегральные характеристики в резонансной и тепловой областях энергий. Дис. д-ра физ.-мат. наук. Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского. Обнинск, 2005.
90. Колеватов Ю. И., Семёнов В. П., Трыков Л. А. Спектрометрия нейтронов и гамма-излучения в радиационной физике. М.: Энергоатомиздат, 1991. 296 с.
91. GEANT 4 – a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A506, 2003. P. 250–303.
92. Бекман И. Н. Измерение ионизирующих излучений: курс лекций. М.: Изд-во МГУ, 2006.
93. Дозиметр-радиометр МКС-03С. Технические условия. 43 с.
94. Дрейзин В. Э. Нейтронная спектрометрия: концепция построения нейтронного спектрометра реального времени. АНРИ (“Аппаратура и новості радиационных измерений”), № 4. М., 2010. С. 13–19.
95. Дрейзин В.Э., Овсянников Ю.А., Поляков В.Г., Катыхин А.И., Полищук И.В. Способ и устройство для измерения спектральной и интегральной плотности потоков нейтронов. Патент РФ №2390800 с приоритетом от 16.04.2008
96. Paul E. Keller, Lars J. Kangas, Gary L. Troyer, Sherif Hashem, Richard T. Kouzes. Nuclear Spectral Analysis via Artificial Neural Networks for Waste Handling. IEEE Transactions on Nuclear Science, August, Vol. 42, № 4, 1995. P. 709–715.
97. Кочергин А.В., Пивоварцев С.С. Нейронная сеть для идентификации нуклидов по гамма-спектру. «Искусственный интеллект» №4. Донецк, 2008. С.600 – 604.
98. Гrimov A.A., Mazepa I.N. Моделирование энергетических спектров нейтронного излучения с произвольным разбиением их на энергетические интервалы. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011619071 Российская Федерация, заявл.30.09.2011; зарегистрировано 22.11.2011.
99. Гrimov A.A. Построение энергетических спектров нейтронного излучения с использованием нейронных сетей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011619067 Российская Федерация, заявл.30.09.2011; зарегистрировано 22.11.2011.
100. Дьяконов, В. П., Круглов В. В. Matlab 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2. М: Солон – Пресс, 2006. 456 с.

101. Foresee F.D., Hagan M.T. Gaus-Newton approximation to Bayesian regularization. Proceedings of the 1997 International Joint Conference on Neural Networks, 1997. Р. 1930–1935.
102. Радиометр загрязнённости поверхности РЗС-09С. Техническое описание.
103. Дозиметр-радиометр МКС-02СМ. Техническое описание.
104. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00575.pdf>
105. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00617.pdf>
106. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00660.pdf>
107. Юдин М.Ф., Фоминых В.И. Нейтронная дозиметрия. М: Изд. стандартов, 1964. 217с.
108. СанПин 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Ропотребнадзора, 2009.
109. ГОСТ 8.355-79 «Радиометры нейтронов. Методы и средства поверки».
110. Дрейзин В. Э., Полищук И. В., Логвинов Д. И. О метрологическом обеспечении нейтронной спектрометрии. АНРИ (“Аппаратура и нововости радиационных измерений”), №4 (71). М., 2012. С. 2–12.

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ МАКЕТНОГО  
ОБРАЗЦА НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ



152



Копировал

Формат А4

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
ПЕРЕЧЕНЬ ЭЛЕМЕНТОВ МАКЕТНОГО  
ОБРАЗЦА НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Копировал

Формат А4

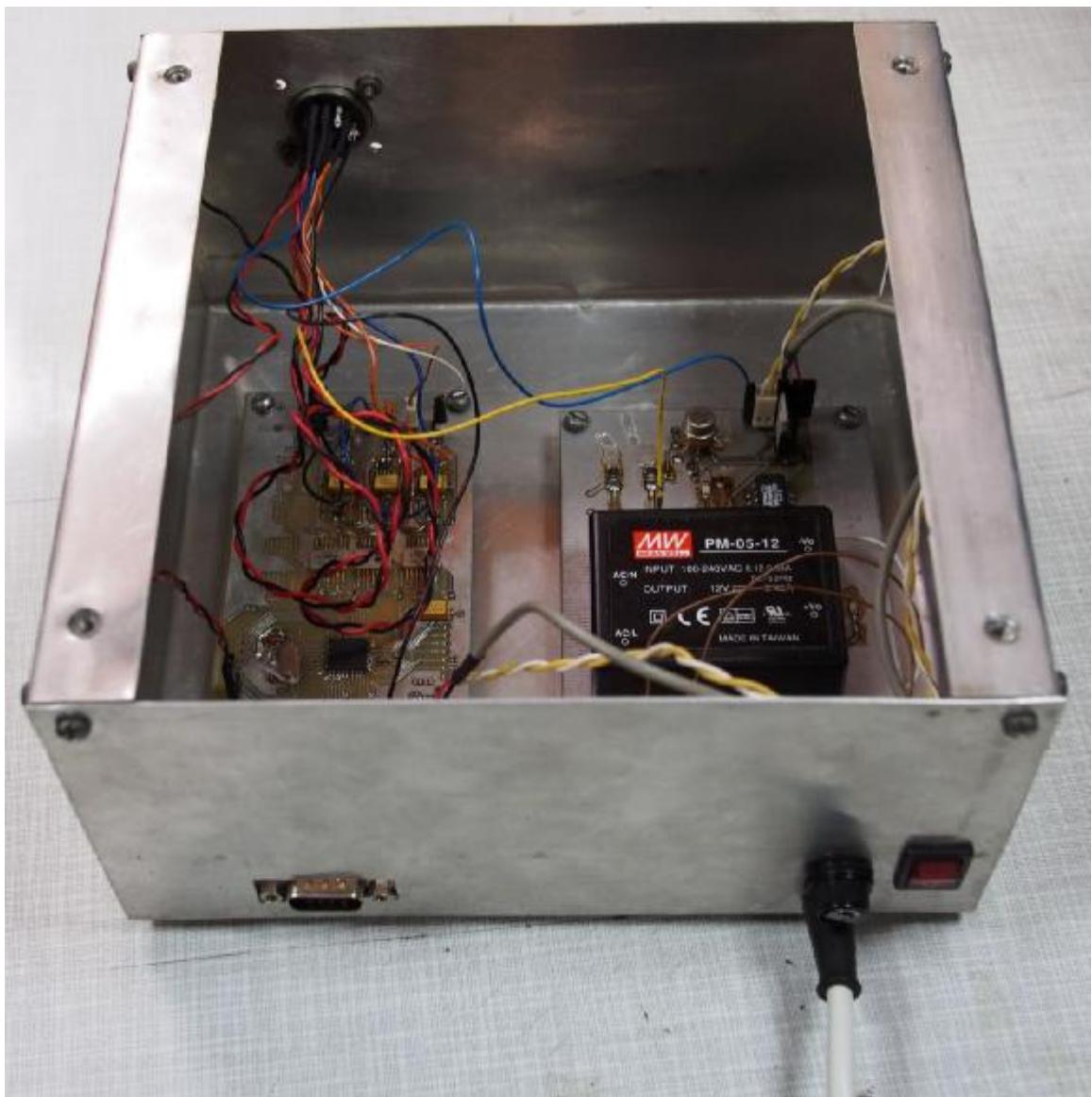




Копировал

Формат А4

ПРИЛОЖЕНИЕ В  
ВНЕШНИЙ ВИД МАКЕТНОГО  
ОБРАЗЦА НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ



Внешний вид измерительного блока макетного образца нейтронного спектрометра реального времени



Внешний вид блока детектирования БДКС-05С, применённого в макетном образце нейтронного спектрометра реального времени

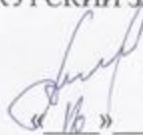
**ПРИЛОЖЕНИЕ Г  
АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ**

«Утверждаю»

Главный инженер

ОАО "КУРСКИЙ ЗАВОД "МАЯК"

А.М. Банников

 «16» 09. 2014 г.

АКТ

Об использовании предложения

Автор внедрения: Гримов Александр Александрович

Источники предложения:

1. Дрейзин В.Э., Гримов А.А. Измерительный блок для нейтронного спектрометра реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика, медицинское приборостроение. 2012. № 2, Часть 3. С. 223-228. - ISSN 2223-1536.
2. Гримов А.А. Построение энергетических спектров нейтронного излучения с использованием нейронных сетей /Гримов А.А./ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011619067. заявл.30.09.2011. рег. 22.11.2011.

Объект внедрения (методика, способ, описание):

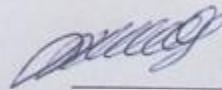
**Измерительный блок для нейтронного спектрометра**

Использовано в ОКР отдела разработки новой техники (ОРНТ) при проектировании модернизированного прибора МКС-03СМ.

Заключение (указать преимущества данного предложения):

Предложенный измерительный блок для нейтронного спектрометра обеспечивает уменьшение погрешностей определения интегральной плотности нейтронного излучения, обусловленных перекрёстной чувствительностью каналов МКС-03.

Начальник ОРНТ

 В.Г. Рыжков

«Утверждаю»

Главный инженер  
ОАО «КУРСКИЙ ЗАВОД «МАЯК»

АКТ

А.М. Банников  
«16» июня 2014 г.

Об использовании предложения

Авторы внедрения: Дрейзин Валерий Элезарович, Гrimov Александр Александрович, Логвинов Дмитрий Иванович

Источники предложения:

1. Дрейзин В.Э., Гrimov A.A., Логвинов D.I. Создание опорных нейтронных полей для калибровки нейтронных спектрометров // АНРИ («Аппаратура и новостri радиационных измерений»). 2013. №4. С.8-13. ISSN 2075-1338
2. Дрейзин В.Э., Гrimov A.A., Логвинов D.I. Создание опорных нейтронных полей с разнообразными по форме энергетическими спектрами // Сборник материалов международной научно-технической конференции «Диагностика-2013». Курск, ЮЗГУ. 2013. С.22-27. ISBN 978-5-7681-0836-6

Объект внедрения (методика, способ, описание):

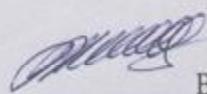
**Испытательная установка для создания опорных нейтронных полей с разнообразной формой энергетических спектров**

Использовано в ОКР отдела разработки новой техники (ОРНТ) при проектировании модернизированной испытательной установки ИЛ-1 для создания опорных нейтронных полей с разнообразной формой энергетических спектров.

Заключение (указать преимущества данного предложения):

Предложенная испытательная установка позволяет производить поверку нейтронных спектрометров на нейтронных полях с разнообразной формой энергетических спектров.

Начальник ОРНТ

  
\_\_\_\_\_  
V.G. Рыжков