

На правах рукописи

**То Тун Ко**

**Методика восстановления энергетического распределения потока  
нейтронов с помощью нейронных сетей по откликам, получаемым  
от многослойного детектора нейтронов**

01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва – 2010

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Колесников Святослав Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
ОАО "СНИИП"  
Панфилов Александр Владимирович

доктор физико-математических наук  
НИЯУ МИФИ  
Трошин Владимир Сергеевич

Ведущая организация: ОАО "НИИТФА"

Защита состоится **«11» марта 2010 г.** в **15** часов на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 в НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, телефон 323-91-67, в ауд. К-608.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «\_\_\_» февраля 2010 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу:  
115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, диссертационный совет,  
Улину С.Е.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.ф-м.н., профессор



Улин С.Е.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В мире накоплен большой опыт применения ядерных материалов и теперь одна из главных технических проблем – установление полного контроля над их перемещением. Попадание ядерных материалов вне сферы их основного товарооборота – это не только глобальная угроза для экологии, здоровья и жизни людей, но также и основание для вторжения в сферу человеческих отношений и терроризма. По этой причине необходимо развивать инструментарий, который не позволит неправомерное проникновение ядерных материалов через контрольные пункты, таможню, предприятия переборки и утилизация ядерных материалов и других в объектах.

**Цель и задачи работы:** Целью диссертационной работы является разработка нейтронного детектора, который позволяет в режиме реального времени восстанавливать энергетическое распределение потока нейтронов в диапазоне от 0 до 10 МэВ в 28 и более групповом приближении.

**В ходе исследования решались следующие задачи:**

1. Анализ ранее созданных методов восстановления энергетических распределений потока нейтронов.
2. Анализ методов и алгоритмов для решения задач Фредгольма первого рода.
3. Разработка методов восстановления энергетического распределения потока нейтронов с помощью искусственной нейронной сети для ранее созданных МДН.
4. Разработка новой модели детектора нейтронов для восстановления энергетического распределения потока нейтронов в диапазоне от 0 до 10 МэВ в 28 и более групповом приближении.

5. Разработка метода для восстановления энергетического распределения потока нейтронов с помощью искусственной нейронной сети для новой модели МДН.

**Методы исследования:** Для решения поставленных задач в диссертации использованы теория и методы искусственных нейронных сетей, методическое и программное обеспечение среды «*MatLab*», программное обеспечение среды «*MCNP*».

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. впервые разработан метод восстановления энергетического распределения нейтронного излучения источника нейтронов, и определения энергетического распределения потока нейтронов ИРТ МИФИ на основе использования искусственной нейронной сети с помощью пятислойного детектора нейтронов (МДН),
2. впервые разработан новый детектор, способный дать представления об энергетическом распределении потока нейтронов в 28 и более групповом приближении,
3. впервые разработан метод восстановления энергетического распределения потока нейтронов на основе использования искусственной нейронной сети с помощью разработанного нового двадцати-девятого группового детектора нейтронов.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что разработанный метод восстановления энергетического распределения потока нейтронного излучения на основе искусственной нейронной сети по данным, полученным от многослойного детектора нейтронов (5 регистрирующих слоев) может быть использован в области экспериментальной физики нейтронного излучения для экспрессного анализа энергетического распределения потоков нейтронов. Так же метод может быть применен для анализа энергетического распределения потока нейтронов по данным, получаемым от детекторов типа сферы-Боннэра, резонансных фольг и других многослойных детекторов.

Разработанная новая модель МДН в совокупности с новым методом восстановления энергетического распределения потока нейтронов, на основе использования искусственной нейронной сети, способная дать представление об энергетическом распределении потока нейтронов в 28 и более групповом приближении, могут найти применение в области спектрометрии нейтронного излучения. В частности данный детектор может быть применен для анализа нейтронного излучения при перевозке делящихся радиоактивных веществ через таможенные контрольно-пропускные пункты.

### **На защиту выносятся:**

1. методика восстановления энергетического распределения нейтронного излучения источника нейтронов на основе использования искусственной нейронной сети с помощью многослойного детектора нейтронов (МДН);
2. новая модель многослойного детектора нейтронов, способного дать представления об энергетическом распределении потока нейтронов в 28 и более групповом приближении;
3. методика восстановления энергетического распределения потока нейтронов на основе использования искусственной нейронной сети для новой модели МДН.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на XV международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов–2008», на 15-ой всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика–2008», и на ежегодных научных сессиях МИФИ (2007, 2008, 2009 г.), на международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM'2009 и в 7-я Курчатовской молодежной научной школе 2009, и опубликованы в сборниках трудов конференций и сессий.

Основные результаты диссертации опубликованы в журнале «Естественные и технические науки» (№4, 2008), «Естественные и технические науки» (№3, 2009) и «Инженерная Физика» (5/2009).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 12 печатных работах.

### **Структура и объем работы**

Диссертация содержит четыре главы, введение и заключение, 56 рисунков и 15 таблиц.

Общий объем – 106 страниц. Список использованных источников содержит 60 наименований.

### **Содержание работы.**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы и приводится ее краткая характеристика. Формулируются цель работы, задачи исследования и представляются основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обзор существующих спектрометров, методов и алгоритмов восстановления энергетических распределений потока нейтронов.

Спектрометрия нейтронов - одна из важнейших областей нейтронной физики. В области малых энергий нейтронов (до 10 кэВ) в основном применяются спектрометры на основе радиоактивных  $1/\nu$  индикаторов, камер деления и счетчиков с наполнителем  $BF_3$  или  $He$ . В области высоких энергий, от 0,1 до 15 МэВ, нашли применения спектрометры на основе пороговых радиоактивных индикаторов, камер деления, трековых детекторов, сцинтилляционных счетчиков и полупроводниковых детекторов. Измерение энергетического распределения потока нейтронов в широком диапазоне энергий осуществляется комбинированными детекторами нейтронов, такими

как набор радиоактивных индикаторов или мультисфер, а так же с помощью многомодульного детектора нейтронов.

Для анализа данных, полученных от выше описанных детекторов, необходимо рассмотреть все существующие методы восстановления энергетического распределения потока нейтронов, выбрать наиболее совершенный и подходящий, для конкретной задачи, после чего провести его адаптацию к применяемому прибору.

Задача по восстановлению энергетического распределения потока нейтронов  $\varphi(E)$  заключается в решении интегрального уравнения:

$$q = \int_E \sigma(E)\varphi(E)dE \quad (1)$$

где  $q$  - показания детектора,  $\sigma(E)$  - функция чувствительности детектирующего устройства.

Однако решение подобного типа уравнений является некорректным. Так как  $q$  и  $\sigma(E)$  известны с некоторой погрешностью, то существует множество решений  $\varphi(E)$ , удовлетворяющих уравнению (1). Для получения физически обоснованного решения требуются дополнительные предположения, например, о гладкости решения, неотрицательности и др.

Первые попытки решить задачу по восстановлению энергетического распределения потока нейтронов были сделаны в работах Мотеффа, в которых он кратко рассмотрел полиномиальный, полигональный методы и метод разложения искомого спектра в ряд по ортонормированным функциям.

В последние годы наблюдается повышенный интерес к нейронным сетям, которые нашли применение в самых различных областях человеческой деятельности – бизнесе, медицине, технике. Нейронная сеть имитирует взаимосвязанную, параллельную

вычислительную структуру с отдельными элементами, нейронами. В целом нейронная сеть состоит из входных слоев, которые связывали с выходными слоями, через одни или несколько скрытых слоев. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными, а также выполнять их обобщение. Это значит, что, в случае успешного обучения, сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающем наборе, а также неполных (зашумленных), частично искаженных данных.

**Во второй главе** описан метод восстановления энергетического распределения нейтронного излучения по откликам, полученным от многослойного детектора нейтронов, с применением искусственной нейронной сети.

Многослойный детектор нейтронов (МДН) содержит чередующиеся слои водородосодержащего замедлителя и регистраторов медленных нейтронов. Каждый регистрирующий слой в МДН набран из He-3 счетчиков нейтронов в виде одной или двух плоских кассет. Слои счетчиков He-3 расположены поперек падающего потока на различной глубине в замедлителе. Отклик, получаемый от каждого регистрирующего слоя, формируется по принципу:

$$Q_i = \int_0^{\infty} S_i(E) \cdot \varphi(E) \cdot dE, i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где  $S_i(E)$  – чувствительность регистрирующего слоя к энергии налетающего нейтрона;  $\varphi(E)$  – плотность потока нейтронов, падающего на МДН;  $i$  – номер регистрирующего слоя.

Уравнение (2) – это уравнение Фредгольма первого рода, и в нем нам известны  $Q$  и  $S$ , и надо найти поток  $\varphi$ . Эта задача является



некорректной и для решения этой задачи планируется использовать двухслойную искусственную нейронную сеть (ИНС) со скрытым слоем, представленную на рис. 1.

Первый слой ИНС содержит всего 5 нейронов и служит для приема откликов от МДН и передачи в ИНС. В связи с этим на массив данных накладывается некоторое ограничение. На первый нейрон должен подаваться отклик от первого регистрирующего слоя, на второй от второго и на пятый от пятого. Выходной слой так же имеет в своей структуре 5 нейронов и выдает массив данных, соответствующий энергетическому распределению потока нейтронов в пятигрупповом приближении.

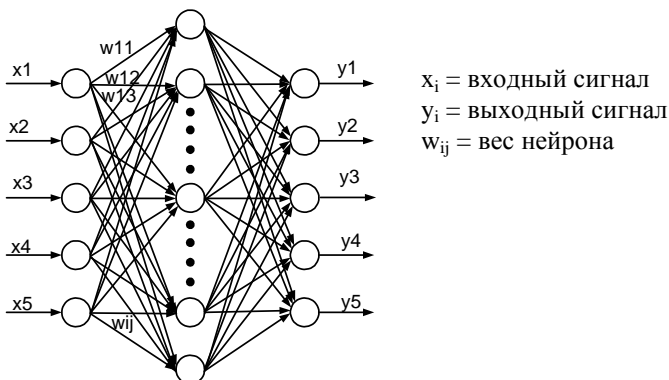


Рис. 1. Двухслойная нейронная сеть со скрытым слоем.

Для обучения ИНС созданы 79 различные вариаций потоков нейтронного излучения, основанных на энергетических распределениях потока нейтронов от источников  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{238}\text{Pu-Be}$ , моноэнергетические спектры и энергетические распределения потока нейтронов из справочника МАГАТЭ. С помощью математической модели МДН, получены 79 наборы откликов, которые используются как наборы входных значений искусственной нейронной сети. Спектр были разбиты на пять энергетических групп. Диапазоны энергий: от тепловых до 0,1 МэВ – первая группа, от 0,1 до 1 МэВ – вторая группа,

от 1 до 2,5 МэВ – третья группа, от 2,5 до 6 МэВ – четвертая группа, от 6 и 14,5 МэВ – пятая группа. Созданные энергетические распределения потока нейтронов по 5 энергетическим группам используются как наборы желаемых значений. В процессе обучения веса нейронной сети постепенно корректировались так, чтобы для каждого набора входных значений был желаемый набор выходных значений.

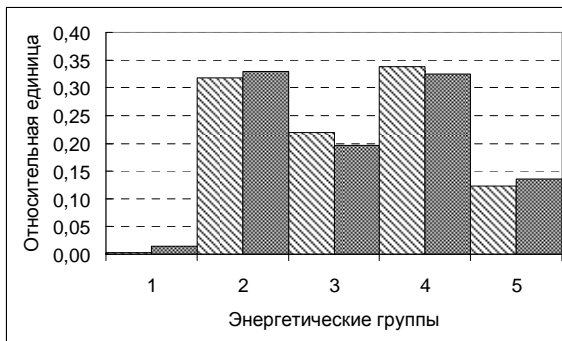
Скрытый слой состоит из 100 нейронов и выполняет функцию сепаратора - выделения долей энергий нейтронов, принадлежащих разным энергетическим группам. Для определения оптимального числа нейронов в скрытом слое с использованием среды «*MatLab*» было создано несколько модификаций ИНС с нулевым пороговым коэффициентом. В качестве функции активации нейронов была взята логарифмическая функция «*logsig*», а для обучения сети - «*traingdx*». При этом количество нейронов изменялось от 25 до 250 с коэффициентом умножения 2. Все ИНС подвергались обучению по одним и тем же данным, а затем сравнивалось несколько параметров: число циклов обучения и значение погрешности. Так же дополнительным критерием при отборе количества нейронов выступал «фактор гибкости ИНС», возможности восстанавливать энергетическое распределение потока нейтронов при небольших изменениях исходных данных. Полученные значения после обучения ИНС приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры нейронных сетей прямого распространения при разном количестве нейронов в скрытом слое.

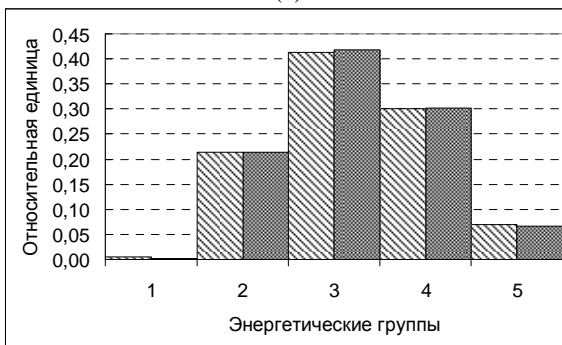
Число нейронов в скрытом слое	Число циклов обучения	Процент попаданий
25	283245	30%
50	291422	80%
<b>100</b>	<b>323742</b>	<b>100%</b>
150	1000000	70%
200	614381	90%
250	566267	90%

Из таблицы видно, что при малом количестве нейронов сеть достаточно быстро обучается и имеет относительно небольшое расхождение полученных и исходных данных. Однако, при попытке восстановления энергетического распределения потока нейтронов по данным, в которые были внесены изменения, результаты оказались не удовлетворительными. Увеличение числа нейронов в 4 раза позволило устранить этот эффект. Дальнейшее увеличение количества нейронов в скрытом слое до 150 дало резкое увеличение количества циклов обучения и увеличение расхождения между целевыми и получаемыми данными. Последующее увеличение количества нейронов привело к снижению циклов обучения и нормализации расхождения между данными, однако вновь возникла проблема с чувствительностью к исходным данным, обусловленная нехваткой данных для обучения ИНС. Исходя из этого, для дальнейшего использования была выбрана ИНС со 100 нейронами в скрытом слое, так как она показала наиболее приемлемые значения.

Результаты обучения - качество восстановления энергетического распределения потока нейтронов - приведены на рис. 2, 3. Из них видно хорошее соответствие исходных энергетических распределений потока нейтронов, представленных в 5-ти групповом представлении (левые столбцы), и энергетических распределений потока нейтронов полученных после обработки данных с использованием ИНС (правые столбцы). Максимальное расхождение исходных и полученных значений не превышает 10%.



(а)



(б)

Рис. 2. Исходные (левые столбцы) и восстановленные распределения потока нейтронов (правые столбцы) для (а) источника  $^{252}\text{Cf}$  и (б) источника  $^{238}\text{Pu-Be}$  методом ИНС.



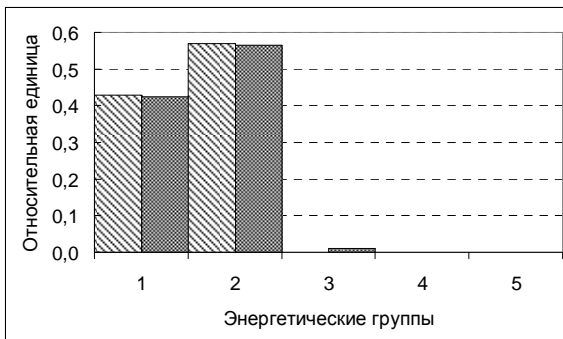
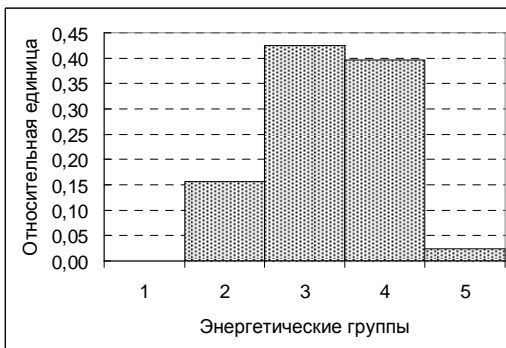


Рис. 3. Исходные (левые столбцы) и восстановленные распределения потока нейтронов (правые столбцы) моноэнергетических источников методом ИНС.

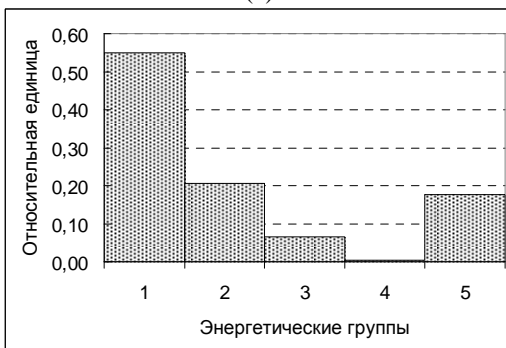
В экспериментальной работе источник нейтронного излучения  $^{252}\text{Cf}$  располагался на расстоянии 10 см от центра лицевой поверхности МДН и снимались показания с детектора в течение 30 минут. Эксперимент еще проведено с источником, расположенным в полиэтиленовом контейнере. Размер контейнера–15см×15см×15см. Восстановленные энергетические распределения потока нейтронов методом искусственной нейронной сети, с применением значения откликов, полученные в ходе эксперимента, представлены на рис. 4. В таблице 2 показана средняя квадратичная ошибка восстановленного энергетического распределения потока нейтронов. Расчет среднеквадратической ошибки проводился по формуле:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2,$$

где  $e_i$  = разность между исходным и восстановленным значениями,  $N$  = количество энергетических групп.



(а)



(б)

Рис. 4. Восстановленные энергетические распределения потока нейтронов для (а) источника  $^{252}\text{Cf}$  без контейнера и (б) источника  $^{252}\text{Cf}$  в полиэтиленовом контейнере методом ИНС.

Таблица 2. Средняя квадратичная ошибка экспериментальных энергетических распределений потока нейтронов от источника Cf.

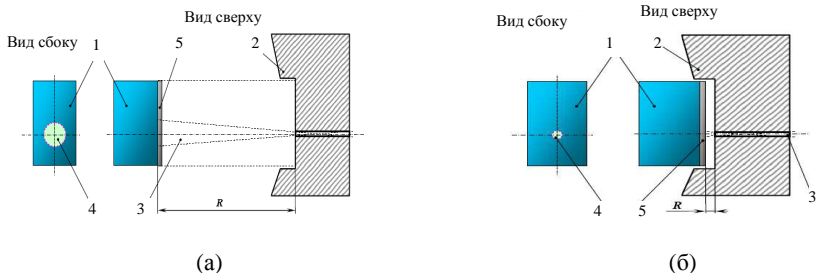
Восстановленные значения методом искусственной нейронной сети	
от источника Cf из справочника МАГАТЭ	от источника Cf без контейнера (Расстояние – 10 см)
0	0
0,23	0,16
0,40	0,42
0,31	0,40
0,04	0,02
Средняя квадратичная ошибка	0,01

Из таблицы 2 видно, что среднеквадратическая ошибка восстановленного энергетического распределения потока нейтронов от

экспериментального источника Cf не превышает 5%. Опираясь на полученные результаты можно четко говорить о возможности применения искусственной нейронной сети для решения задач по восстановлению энергетического распределения потоков нейтронного излучения.

**В третьей главе** рассматривается определение энергетического распределения потока нейтронов ИРТ МИФИ методом искусственной нейронной сети, с помощью многослойного детектора нейтронов (МДН1-01). В ходе исследований возможностей МДН1-01 по определению энергетического распределения потока нейтронов был проведен ряд экспериментов на реакторе ИРТ-МИФИ.

В ходе эксперимента детектор располагался напротив выходного канала № 4 на разных расстояниях от кромки канала. Пространственно детектор был расположен таким образом, чтобы пучок излучения падал перпендикулярно в центр лицевой грани детектора. Ни каких других дополнительных отражателей или поглотителей между каналом и детектором не устанавливалось. Результаты, полученные в ходе такого эксперимента, представлены в таблице 3 и на рисунке 6. Схемы проведения эксперимента показаны на рисунке 5. В дальнейшем эти данные (из таблицы 3) были обработаны с помощью математического аппарата построенного на основе нейронной сети прямого распространения. Для того чтобы создать наборы обучаемых пар для детектора МДН1-01, операционные энергетические распределения потока нейтронов были взяты из справочной книги МАГАТЭ.

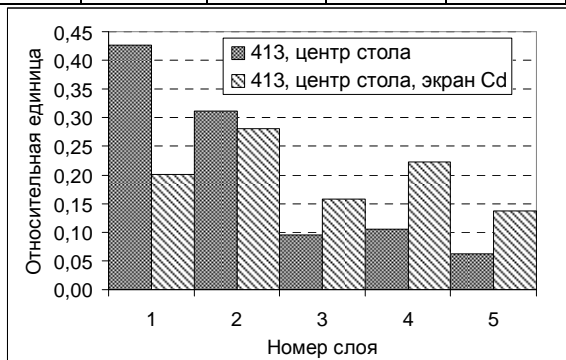


1. МДН1-01; 2. Коллиматор на выходе шиберного устройства ГЭК-4;
3. Пучок нейтронов; 4. “Пятно” излучения; 5. Экран.

Рис. 5. МДН1-01 на расстоянии  $R$  см (а) центр пучка не совпадает с центром детектора, (б) МДН в камере для проведения биологических экспериментов, центр пучка не совпадает с центром детектора.

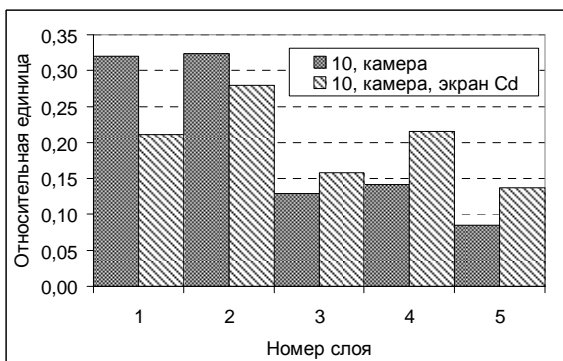
Таблица 3. Результаты измерений, полученные при различных расстояниях и ориентации МДН1-01 относительно оси пучка, с использованием кадмиевого экрана.

$R$ см, хар-ки Эксперимента	Скорость счета в каналах детектора, 1/с				
	№1	№2	№3	№4	№5
413, центр стола	27730±17	20229±14	6224±8	6816±8	4025±6
413, центр стола, экран Cd	5594±7	7870±9	4422±7	6217±8	3844±6
10, камера	46324±20	46724±20	18720±12	20427±13	12366±10
10, камера, экран Cd	18293±14	24277±16	13715±12	18728±14	11869±11



(а) МДН1-01 на расстоянии 413 см





(б) МДН1-01 на расстоянии 10 см

Рис. 6. Полученные отклики при различных расстояниях и ориентации МДН1-01 относительно оси пучка.

В каждом МДН находятся пять регистрирующих слоев с различными функциями чувствительности регистрации нейтронов от энергии нейтронов. Была создана математическая модель МДН1-01 на MCNP, используя эту модель, создаются набор откликов и набор желаемых значений. При подготовке набора желаемого набора для обучения ИНС, энергетические группы операционных энергетических распределений потока нейтронов должны перегруппироваться в соответствии с различными функциями чувствительности регистрации нейтронов от энергии нейтронов каждого регистрирующего слоя МДН1-01. Энергетические группы энергетических распределений потока нейтронов перегруппируются по следующим диапазонам: первая группа – от 0 до 0,5 эВ, вторая группа – от 0,5 до 25 эВ, третья группа – от 25 эВ до 150 кэВ, четвертая группа – от 150 кэВ до 800 кэВ, пятая группа – от 800 кэВ до 5 МэВ.

В данной работе планировалось использовать двухслойную искусственную нейронную сеть со скрытым слоем. В наборах обучаемых пар подготовятся и поставляются 88 данных. Первой слой и последний слой содержат по пять нейронов. Разные нейронные сети создаются с разными количествами нейронов в скрытом слое.

Реализация метода восстановить энергетическое распределение потока нейтронов была осуществлена в среде «MatLab». В качестве функции активации нейронов была взята логарифмическая функция «*logsig*», а для обучения сети - «*traingdx*». Обучение нейронных сетей прекращается, когда цикл обучения сети пришел до  $5 \cdot 10^5$  циклов либо средняя квадратичная ошибка становится меньше чем предельная погрешность  $10^{-4}$ . После обучения полученные параметры представили в таблице 4.

Таблица 4. Полученные параметры разных сетей после обучения.

Количество нейронов В каждом слое ИНС	Значение погрешности после обучения	Количество циклов
<b>5:100:5</b>	<b><math>3,1 \times 10^{-5}</math></b>	<b><math>5 \times 10^5</math></b>
5:150:5	$3,3 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^5$

Из результатов выбрана нейронная сеть со 100 нейронов в скрытом слое для восстановления энергетического распределения потока нейтронов. Восстановленные значения энергетических распределений потока нейтронового излучения приведены на следующих рисунках (рис. 7, 8).

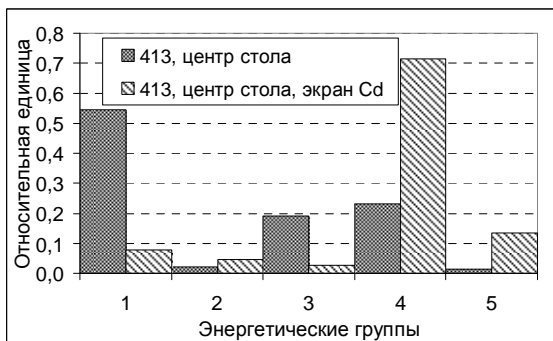


Рис. 7. Восстановленные энергетические распределения потока нейтронов методом ИНС (R = 413 см).



Рис. 8. Восстановленные энергетические распределения потока нейтронов методом ИНС ( $R = 10$  см).

Хотя МДН1-01 и не позволяет дать полные картины энергетического распределения потока нейтронов, полученные результаты хорошо коррелируют с ранее полученными результатами на этом же канале другими исследовательскими группами.

В ходе эксперимента была предпринята попытка вырезать из энергетического распределения потока нейтронного теплового часть спектра. Для этого перед детектором был установлен кадмиевый экран. Экран устанавливался таким образом, чтобы полностью перекрыть регистрирующую часть МДН1-01. Толщина экрана составляла порядка 2 мм. Результаты, полученные в ходе данного эксперимента, приведены на рисунках 7 и 8.

Так как кадмий является превосходным поглотителем тепловых нейтронов, то в ходе эксперимента ожидалось резкое уменьшение доли данного излучения в общий вклад. На восстановленном энергетическом распределении потока нейтронов наблюдается отсутствие тепловой составляющей в энергетическом распределении потока нейтронов и можно сделать вывод, что искусственную нейронную сеть можно использовать в работе восстановления потока нейтронов ИРТ МИФИ.

**В четвертой главе** рассмотрены разработка нового детектора, способного дать представления об энергетическом распределении

потока нейтронов в 28 и более групповом приближении и метод восстановления энергетического распределения потока нейтронов на основе искусственной нейронной сети с помощью нового детектора.

Для получения более точного представления об энергетическом потоке нейтронного излучения, по откликам от многослойного детектора, необходимо увеличить число регистрирующих слоев детектора. Анализ возможностей такого детектора был выполнен с помощью математической модели представленной на рис. 9. Форма детектора - цилиндр, который собирается из одинаковых по форме дисков толщиной 0,5 см. Каждый из дисков - это пластик (СН) либо с обогащением по бору-10 или без обогащения по бору. Общая длина детектора 30 см. Общее число регистрирующих слоев – 29. Анализа работы модели проводился с применением пакета MCNP. Для получения зависимости чувствительности детектора от энергии падающего излучения использовались моноэнергетические источники нейтронов.

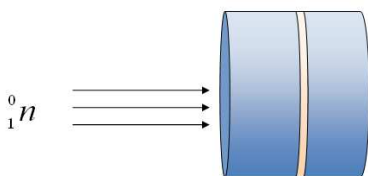
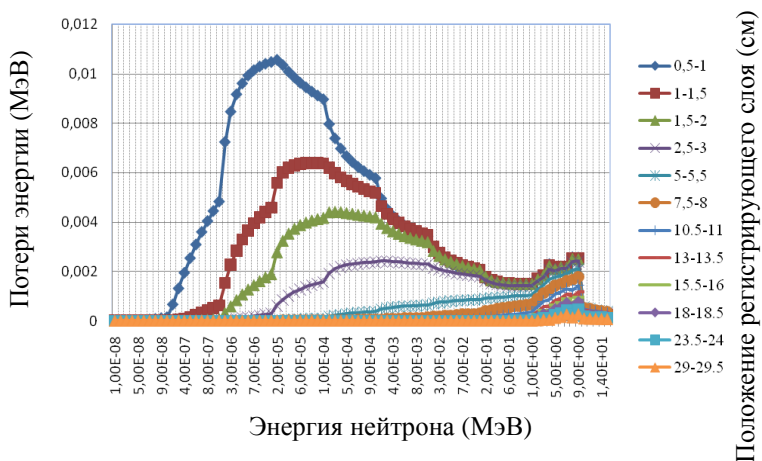


Рис. 9. Схема многослойного детектора нейтронов.

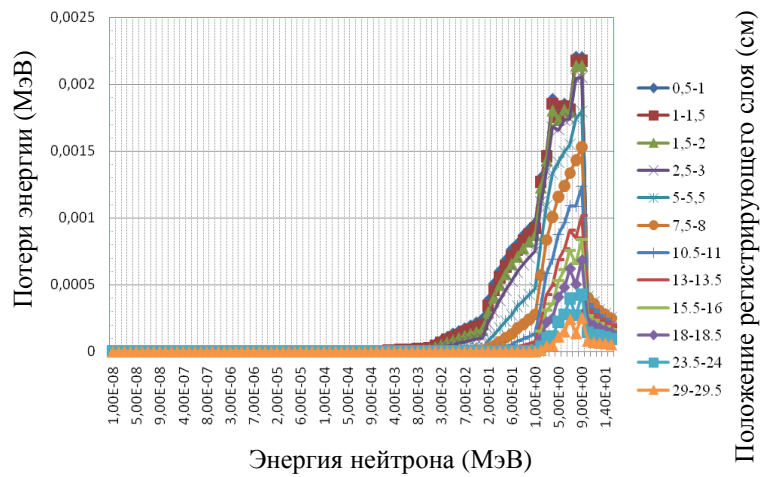
Меняли энергию нейтронов в диапазоне от 0,01эВ до 15МэВ. Был построен график потери энергии нейтрона в зависимости от его первоначальной энергии, при разных положениях регистрирующего слоя по оси детектора (рис. 10(а)). На графике имеют место 2 максимума при регистрации нейтронов: 1 – от взаимодействия нейтронов с бором; 2 – от протонов отдачи, возникающих в ходе упругого столкновения быстрых нейтронов с водородом.

Аналогичный эксперимент был проведен, и для случая, когда в регистрирующих слоях нет добавки бора. Результаты приведены на рис 10(б). В случае отсутствия бора, вклад в счет от тепловых нейтронов не наблюдается. На рис. 10(в) приведена разность

показаний для регистрирующих слоев с бором и без бора. На графике видно, что присутствует только данные, связанные с захватом тепловых нейтронов ядрами бора.



(а)



(б)

Рис. 10. График потери энергии нейтронов в зависимости от первоначальной энергии нейтронов. (а) Состав детектора МДНЗ - (СН-В). (б) Состав детектора МДНЗ - (СН).

Полученные результаты позволяют сделать положительное заключение, что при переходе от газоразрядных детекторов к пластиковым сцинтилляторам, многослойный детектор нейтронов в серии 3 (МДНЗ) будет вести себя аналогично ранее созданным многослойным детекторам нейтронов.

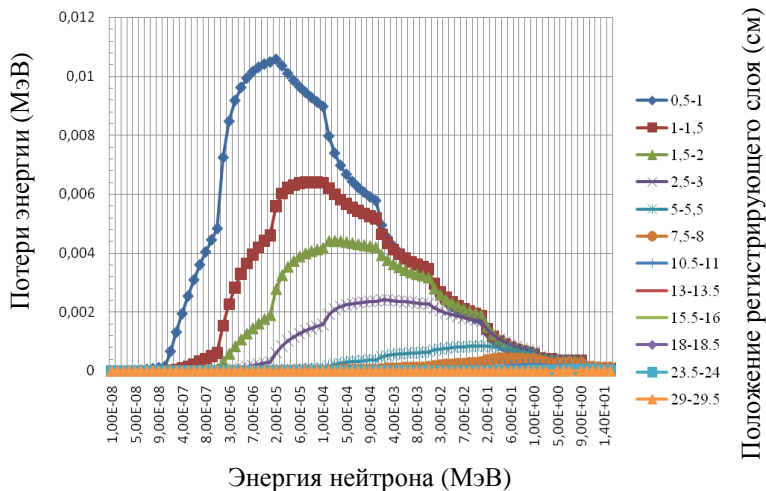


Рис. 10(в). График разности значений потери энергии нейтронов, в зависимости от первоначальной энергии нейтронов, при использованиях разных составов детектора МДНЗ.

Вторая серия экспериментов было направление на получение откликов от описанной выше модели детектора с целью накопления данных для последующей разработки метода восстановления. В этом эксперименте математическая модель детектора была максимально приближено к разрабатываемой модели детектора. Регистрирующие слои с бором располагаются в позициях с четными номерами – регистрирующие слои без бора – с нечетными номерами.

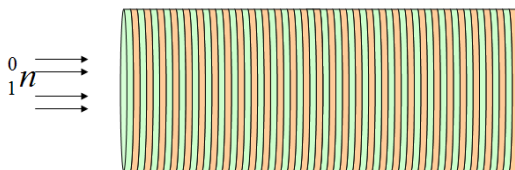


Рис. 11. Новая конструкция многослойного детектора нейтронов.

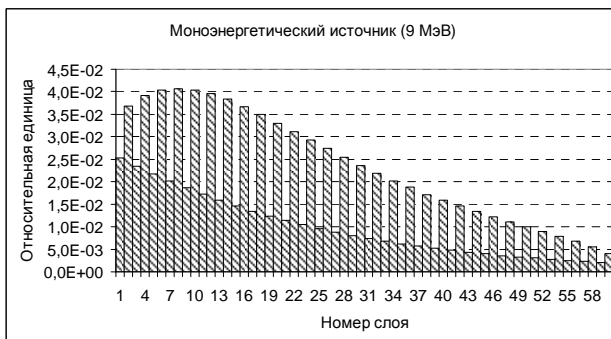
Для изучения поведения очередной модели детектора, было создано моноэнергетических источников. Графики откликов, полученные при бомбардировке разными моноэнергетическими нейтронами, показаны на рис. 12.



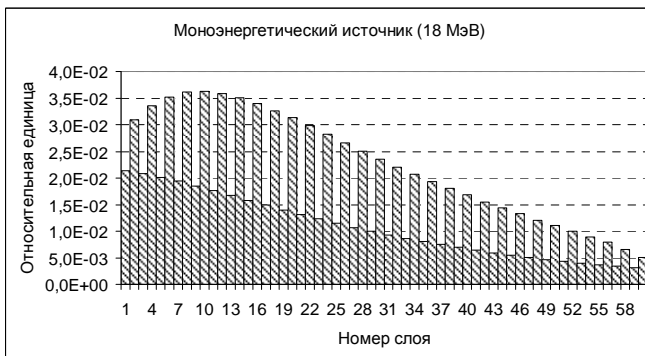
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 12. Отклики за счет разных моноэнергетических источников.

Из показанных рисунков видно, что при увеличении энергии нейтронов, глубина проникновения излучения увеличивается. При бомбардировки нейтронами с малой энергией детектор (рис. 12(а), 12(б)), отклики от слоев с нечетными номерами без бора-10 отсутствует, потому что выделение энергии в ходе взаимодействия нейтронов с малой энергией с пластиком мало (захват нейтронов ядрами водорода). При увеличении значения энергии налетающих нейтронов, выделение энергии растет, и начинает преобладать реакция (n,p) и вклад нейтронов в общий счет системы увеличивается (рис. 12(в), 12(г)).

В ходе одного математического эксперимента МДНЗ выдает 59 откликов от 59 регистрирующих слоев детектора. Так как тепловые нейтроны дают вклад в счет только в слоях пластикового сцинтиллятора с бором, то число выделенных энергетических групп равно 29.

Для восстановления энергетического распределения потока нейтронов используется двухслойная искусственная нейронная сеть со скрытым слоем, и конструкция которой показана на рис. 12. Набор обучаемых данных создан с применением 77 энергетических



распределений потока нейтронов из справочника МАГАТЭ. В первом слое ИНС находятся 59 нейронов, в выходном слое – 29 нейронов. Для того чтобы узнать, сколько нейронов нужно поставить в скрытом слое, было создано две искусственные нейронные сети с разными количествами нейронов в скрытом слое. В скрытом слое первой искусственной сети поставлены 3481 (59×59) нейронов, а в скрытом слое второй сети поставлены 1711 (59×29) нейронов. Параметры нейронных сетей и полученные информации после обучения двух сетей показаны в таблице 5.

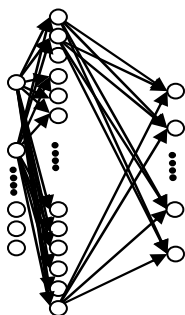


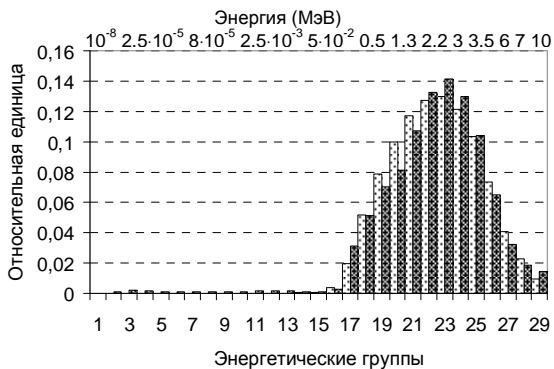
Рис. 13. Двухслойная искусственная нейронная сеть со скрытым слоем.

Таблица 5. Полученные параметры разных ИНС после обучения

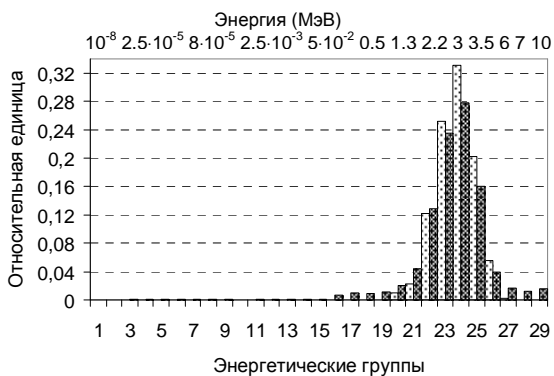
Кол. нейронов в скрытом слое	Полученная погрешность	Кол. циклов обучения
3481 (59×59)	$5,37 \cdot 10^{-4}$	$10^6$
<b>1711 (59×29)</b>	<b><math>4,82 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b><math>10^6</math></b>

Из таблицы 5 видно, что ИНС с 1711 (59×29) нейронов в скрытом слое имеет минимальную погрешность при обучении. Исходя из этого, была выбрана эта структура сети для восстановления энергетического распределения потока нейтронов. Тестирование ИНС происходило по 4-ем энергетическим распределениям нейтронного излучения, которые не входили в набор данных для обучения.

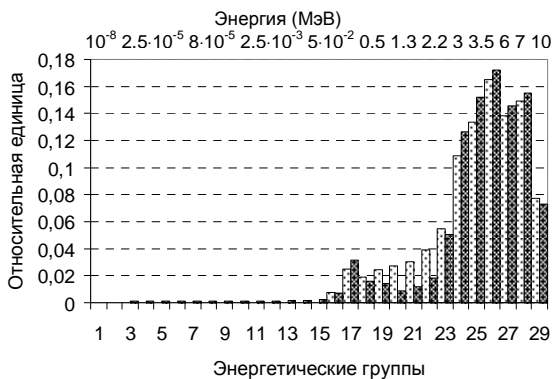
Из рис. 14 видно, что поведения восстановленных энергетических распределений потока нейтронов схоже поведения исходных, и их расхождения не превышают 10%.



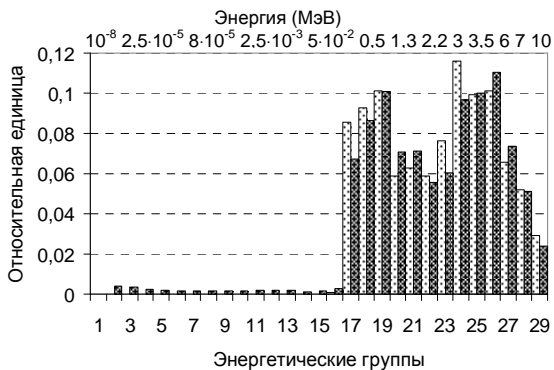
(а)



(б)



(в)



(г)

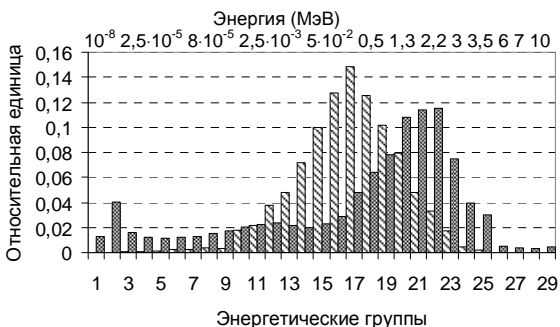
□ Исходное энергетическое распределение нейтронного излучения

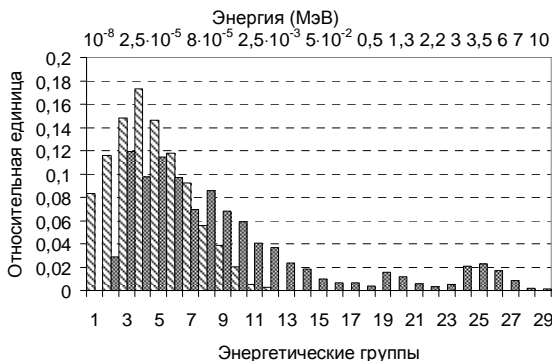
▨ Восстановленное энер. распределение потока нейтронов методом ИНС

Рис. 14. Исходные и восстановленные энергетические распределения потока нейтронов от источника (а)Cf (б)AmB (в)AmBe (г)PuBe методом искусственной нейронной сети.

При дальнейших исследованиях возможность ИНС было выявлено, что данная версия очень плохо восстанавливает энергетическое распределение потока нейтронов, если в спектре присутствуют энергии нейтронов менее 100 кэВ рис. 15.

В первую очередь этого связано с тем, что исходные энергетические распределения потока нейтронов от источников практически не имеют нейтронов с малой энергией, и как следствие ИНС не научилась работать с данными в этой области энергий.





▨ - Исходное энергетическое распределение нейтронного излучения

▣ - Восстановленное энер. распределение потока нейтронов методом ИНС

Рис. 15. Исходные и восстановленные энергетические распределения потока нейтронов методом искусственной нейронной сети.

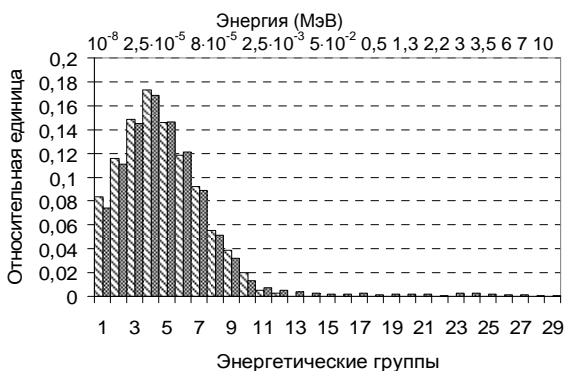
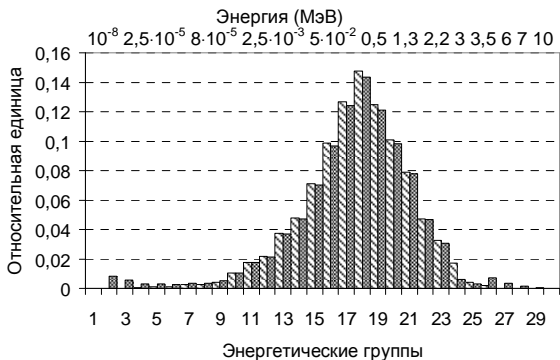
Для устранения этого недостатка были дополнительно смоделированы различные энергетические распределения потока нейтронов в области энергии от 0 до 100 кэВ. Для их моделирования использовалось следующее распределение потока нейтронов:

$$N(\varepsilon_n)dE_n = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot e}} \cdot sh(\sqrt{2 \cdot \varepsilon_n}) \cdot \exp(-\varepsilon_n)dE_n \quad (3)$$

где  $\varepsilon_n = \frac{E_n}{m_e \cdot c^2}$ ,  $E_n$  = энергия нейтрона,  $m_e$  = масса электрона,

$c$  = скорость света.

Было создано новых 13 дополнительных энергетических распределений потока нейтронов, которые вошли в наборы обучаемых данных. После этого ИНС была переобучена. Переобученная искусственная сеть тестирована с использованием исходных энергетических распределений потока нейтронов, которые не входили в наборы обучаемых данных. Значения исходных и восстановленных энергетических распределений потока нейтронного излучения представлены на рис. 16.



▨ - Исходное энергетическое распределение нейтронного излучения

▣ - Восстановленное энерг. распределение потока нейтронов методом ИНС

Рис. 16. Исходные и восстановленные энергетические распределения потока нейтронов.

На рис. 16 видно, что поведения восстановленных энергетических распределений потока нейтронов схожи с поведением исходных, и максимальное расхождение восстановленных значений не превышает 2%. Наряду с этими была проведена проверка способности к восстановлению энергетических распределений потока нейтронов от нейтронных источников Cf, AmB, AmBe, PuBe переобученной искусственной нейронной сети. Полученные результаты не отличаются от ранее полученных значений.

## Основные результаты работы

В ходе выполнения данной работы были получены следующие новые результаты:

1. Разработан новый метод восстановления энергетического распределения потока нейтронов для многослойных детекторов нейтронов 1 и 2 версии. В отличие от ранее созданных методов ошибка восстановления составляет менее 5%. В предшествующих методах (метод минимизации направленного расхождения, метод регуляризации Тихонова) давали результаты с ошибкой 10%, и более. Использование ИНС позволило получить ошибку восстановления энергетического распределения потока нейтронов менее 5%. Так же к плюсам нового метода следует отнести быстроту перенастройки коэффициентов отвечающих за процесс восстановления энергетического распределения потока нейтронов. Для ИНС он составляет  $\sim 1 - 2$  дня машинного времени (компьютер типа Core Duo) в то время как для получения истинной матрицы чувствительности требовался 1 – 2 месяца экспериментального исследования (калибровка на ускорителе заряженных частиц Ван-Ди-Графа).
2. Предложена конструкция нового многослойного детектора нейтронов, который в режиме реального времени позволяет дать информацию об энергетическом распределении потока нейтронов более чем в 29 групповом приближении. Эта конструкция является единственным улучшением по сравнению с версиями МДН 1 и 2.
3. Разработан метод восстановления энергетического распределения потока нейтронов для новой модели МДН. Данный метод, как и в случае с детекторами МДН1 и МДН2 построен на ИНС. В результате проверки работы метода стали следующие выводы: ошибка в расхождении исходного и восстановленного

распределения не превышает 10%. При этом по результатам полученными с помощью МДНЗ можно четко видеть тип спектра. Особенно хорошо различаются спектры AmBe, PuBe,  $^{252}\text{Cf}$ , что является несомненным преимуществом по сравнению с моделями МДН1 и МДН2.

### **Основные публикации по теме диссертации.**

1. Колесников С.В., Новиков Д.В., **То Тун Ко**. Восстановление энергетического распределения потока нейтронов по откликам, полученным от многослойного детектора нейтронов, с применением нейронной сети. // Научная сессия МИФИ – 2007. Сборник научных трудов. Т.5. М.: МИФИ, 2007. с.109 – 110.
2. Колесников С.В., Новиков Д.В., Самосадный В.Т., **То Тун Ко**. Метод восстановления энергетического распределения потока нейтронов по откликам МДН, с применением нейронной сети. // Научная сессия МИФИ – 2008. Сборник научных трудов. Т.4. М.: МИФИ, 2008. с. 154 – 155.
3. Колесников С.В., **То Тун Ко**. Восстановление энергетического распределения потока нейтронов по откликам МДН, с применением искусственной нейронной сети. // XV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2008». Сборник тезисов. с.30 – 31.
4. **То Тун Ко**. Построение искусственной нейронной сети для восстановления энергетического распределения потока нейтронов. // Микроэлектроника и информатика – 2008. 15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. – М: МИЭТ, 2008г. с. 182.
5. **То Тун Ко**. Восстановление энергетического распределения потока нейтронов с применением двухслойной искусственной нейронной сети. // Естественные и технические науки, № 4(36), 2008, с. 22 – 25.
6. Колесников С.В., Новиков Д.В., Кадилин В.В., **То Тун Ко**. Определение энергетического распределения потока нейтронов ИРТ МИФИ с помощью многослойного детектора нейтронов. // Научная сессия МИФИ-2009. Аннотация докладов. Т. 1. М.: МИФИ, 2009. с.268.
7. Колесников С.В., Новиков Д.В., Самосадный В.Т., **То Тун Ко**. Восстановление энергетического распределения потока нейтронов с помощью нейронной сети. // Научная сессия МИФИ-2009. Аннотация докладов. Т. 1. М.: МИФИ, 2009. с.270.

8. Колесников С.В., Новиков Д.В., Самосадный В.Т., Тарасов В.П., **То Тун Ко**. Восстановление энергетического распределения потока нейтронов с помощью искусственной нейронной сети. // Инженерная Физика 5/2009. с. 22 – 25.
9. Колесников С.В., Новиков Д.В., Кадилин В.В., Головчак А.В., Федулов И.Ю., **То Тун Ко**, Самосадный В.Т.. Определение энергетического распределения потока нейтронов ИРТ МИФИ с помощью многослойного детектора нейтронов. // Научная сессия МИФИ-2009, Сборник научных трудов. Том II. с. 229 – 232.
10. **То Тун Ко**, Лэй Вин. Применение нейронных сетей для обработки информации от многомодульных детекторов ядерных излучений. // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM'2009 Т.1, Санкт-Петербург.,2009. с. 235 – 238.
11. **То Тун Ко**, Лэй Вин, Деденко Г.Л., Кадилин В.В., и др. Метод локализации точечного источника гамма- излучения с использованием многомодульного детектирующего устройства и нейронных сетей. // Естественные и технические науки, №3(41), 2009. с. 42 – 44.
12. Колесников С.В., Новиков Д.В., **То Тун Ко**, Головчак А.В. Определение энергетического распределения потока нейтронов методом искусственной нейронной сети с помощью многослойного детектора нейтронов. // 7-я Курчатовская молодежная научная школа, 10-12 ноября 2009 г. Сборник аннотаций работ. с.156.