

# НОВЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО РАДИОМЕТРА НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**В.Э. Дрейзин, А.А. Гримов, Д.И. Логвинов И.Н. Мазепа**

*Курский государственный технический университет, г. Курск*



Изложены результаты моделирования нового способа создания спектрометрического радиометра нейтронного излучения, основанного на совместной обработке сигналов от нескольких детекторов с различными спектральными характеристиками чувствительности с последующим вычислительным восстановлением энергетического спектра измеряемого излучения с помощью нейронной сети, предварительно обученной на имитационных моделях потоков нейтронов с различными энергетическими спектрами.

**Ключевые слова:** нейтронное излучение, энергетический спектр, измерение, имитационное моделирование.

**Key words:** neutron radiation, energy spectrum, measurement, simulation.

## ВВЕДЕНИЕ

Измерения нейтронного излучения являются наиболее сложной задачей техники измерений ионизирующих излучений, но важность ее эффективного решения для ядерной энергетики и дозиметрического контроля трудно переоценить. При этом в обоих случаях необходимо измерять не только интегральную плотность нейтронных потоков, но и их энергетический спектр. Все остальные измеряемые величины легко вычислить на основании результатов двух указанных видов измерений. В настоящее время не существует приборов, в полной мере решающих эту задачу.

Основная проблема при измерении интегральной плотности нейтронного потока состоит в том, что не существует детекторов, имеющих одинаковую чувствительность к нейтронам любых энергий, поэтому единственным путем кардинального повышения точности измерения интегральной плотности нейтронного потока при неизвестном его спектре является переход к спектральным измерениям с последующим вычислением интегральной плотности потока. Для измерения спектральной плотности потока во всем энергетическом диапазоне используются два пути: 1) активационный анализ с помощью набора веществ-индикаторов, помещаемых в измеряемый поток нейтронов на строго фиксированное время с последующим измерением наведенной в них активности и вычислительным восстановлением спектра на ЭВМ; 2) многократные измерения потока при принудительной

последовательной трансформации его энергетического спектра с помощью замедлителей нейтронов различной толщины и кадмиевого фильтра. Первый путь широко применяется для исследования нейтронных полей в различных зонах ядерных реакторов [1], второй используется в многословных нейтронных спектрометрах [2]. Однако и в том, и в другом случаях требуются достаточно длительные измерительные процедуры с последующим вводом результатов в ЭВМ для вычислительного восстановления спектра измеряемого потока по специальным программам. Проводить измерения в реальном масштабе времени с помощью этих методов невозможно.

В [3] предложен новый путь создания спектрометра нейтронного излучения, обеспечивающий возможность проведения измерений в реальном масштабе времени и заключающийся в использовании нескольких параллельно включенных детекторов нейтронного излучения, имеющих различные зависимости чувствительности от энергии нейтронов. При этом выходные сигналы этих детекторов обрабатываются совместно с помощью специально обученной нейронной сети, чем обеспечивается вычислительное восстановление энергетического спектра измеряемого потока нейтронов и вычисление по нему его интегральной плотности и других производных характеристик, а сами детекторы подбираются таким образом, чтобы зависимости их чувствительностей от энергии нейтронов совместно перекрывали весь энергетический диапазон измеряемых нейтронных потоков.

В данной работе методом имитационного моделирования доказывается реальная осуществимость и эффективность данного подхода.

### РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ И СРЕДСТВА ИХ РЕШЕНИЯ

Для обучения нейронной сети решению задачи восстановления энергетического спектра измеряемого потока по выходным сигналам нескольких детекторов с различными зависимостями спектральной чувствительности от энергии нейтронов необходимо иметь обширную обучающую выборку реализаций измеряемых потоков с различными формами энергетического спектра, причем спектральные плотности этих потоков должны быть точно известны во всем возможном энергетическом диапазоне. Кроме того, должны быть известны спектральные характеристики используемых детекторов. Экспериментальное получение таких данных весьма затруднительно (именно этим можно объяснить тот факт, что предлагаемый подход до сих пор не использовался). В работе предложен способ обучения нейронной сети с помощью моделирующей системы, в которой реализации обучающей (и проверочной) выборки получаются не экспериментально, а генерируются имитационной программой, а с помощью другой программы моделируются спектральные характеристики применяемых детекторов.

На первом этапе моделирования были использованы произвольно задаваемые формы спектра и спектральные характеристики трехканального блока детектирования серийного радиометра-дозиметра нейтронного излучения МКС-03С. С учетом того, что за биологической защитой реактора нейтронные поля состоят, в основном, из тепловых нейтронов, а их энергетический спектр достаточно хорошо аппроксимируется распределением Максвелла-Больцмана [1]

$$\frac{dn(v)}{n} = \frac{4v^2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m_n}{2kT_n} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_n v^2}{2kT_n}} dv,$$

где  $dn/n$  – удельная плотность нейтронов;  $m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27}$  кг – масса покоя нейтрона;  $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T_n$  – абсолютная средняя температура нейтронного газа (К).

Для моделирования были рассчитаны такие спектры для четырех значений средних температур: 300, 500, 700 и 1000 К. Они были дополнены произвольно заданными линейно возрастающим и линейно убывающим спектрами. Весь энергетический диапазон входных потоков задавался шириной в девять порядков – от 0,025 эВ (средняя энергия тепловых нейтронов при комнатной температуре) до 25 МэВ, который соответственно делился на девять децимальных интервалов, для каждого из которых подсчитывалось усредненное значение спектральной плотности. Таким образом, исходный спектр заменялся ступенчатой аппроксимацией по децимальным энергетическим интервалам, поскольку нейронная сеть должна восстанавливать именно эти усредненные значения спектральной плотности измеряемого потока.

Для получения достаточного объема обучающей выборки и моделирования неизбежных погрешностей измерения на эти опорные спектры накладывались случайные отклонения, распределенные по нормальному закону с математическим ожиданием, равным усредненной для данного децимального интервала спектральной плотности, и среднеквадратическим отклонением в 10 и 20% от математического ожидания. Всего для каждого вида спектра генерировалось 10 реализаций со среднеквадратичным отклонением, равным 10% и 10 реализаций со среднеквадратичным отклонением равным 20%, по восемь из которых использовались в обучающей выборке и по две – в контрольной.

Поскольку производители детекторов нейтронного излучения не приводят их спектральных характеристик в широком энергетическом диапазоне, то пришлось использовать спектральные характеристики блока детектирования серийного прибора МКС-03С, в техническом описании которого [4] такие характеристики представлены на рис. 1, хотя и по числу измерительных каналов, и по их спектральной селективности данный блок детектирования не полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям. Блок детектирования состоит из пяти газонапол-

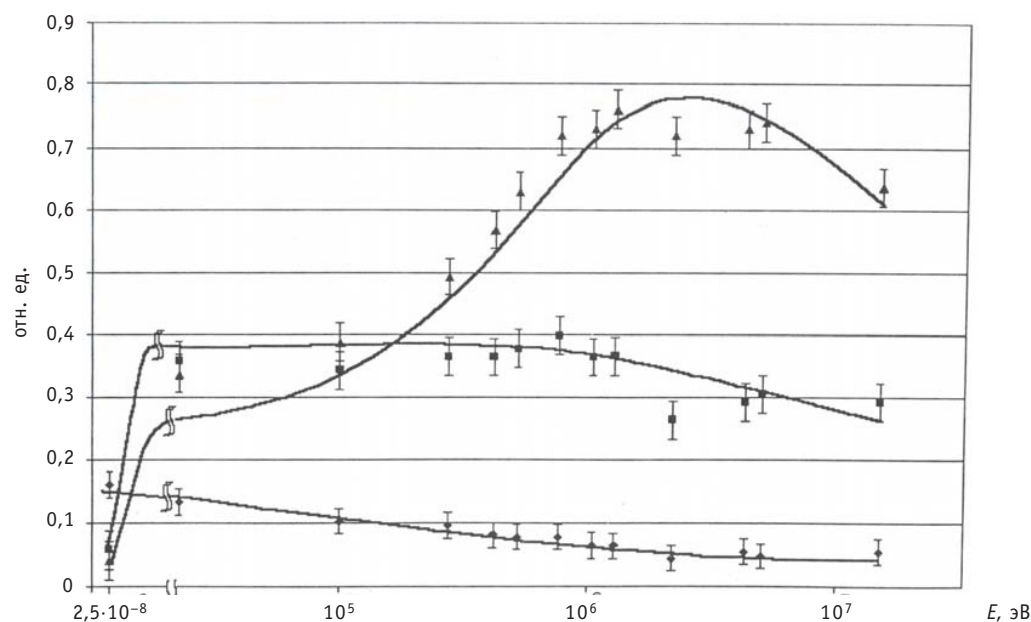


Рис. 1. Зависимость чувствительности трех измерительных каналов прибора МКС-03С от энергии нейтронов: ● – тепловые; ■ – промежуточные; ▲ – быстрые

ненных  $^3\text{He}$  детекторов типов СНМ-16 и СНМ-17, из которых один (СНМ-16) помещен в центре сферы из полиэтиленового замедлителя и образует канал быстрых нейтронов, два других (СНМ-16) погружены в ту же сферу на определенную глубину симметрично от центра сферы и образуют канал промежуточных нейтронов, и два детектора СНМ-17 расположены снаружи сферы и образуют канал тепловых нейтронов.

По графикам рис. 1 были найдены усредненные чувствительности каналов данного блока детектирования для девяти десятичных энергетических интервалов. 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 десятичным интервалам энергии принималась равной единице). Показания на выходах этих каналов при измерении любого из моделируемых потоков нейтронов можно подсчитать как сумму произведений средней плотности  $P_i$  данного потока на  $i$ -ом десятичном интервале на среднюю чувствительность  $S_i$  данного канала для того же десятичного интервала:

$$Q_T = \sum_{i=1}^9 P_i S_{iT}; \quad Q_{\Pi} = \sum_{i=1}^9 P_i S_{i\Pi}; \quad Q_B = \sum_{i=1}^9 P_i S_{iB}.$$

При этом каждое слагаемое этих сумм определяет удельный вклад каждого десятичного интервала. Эти выражения (вместе с таблицей чувствительностей  $S_{ij}$ ) и определяли имитационную модель данного блока детектирования.

Результаты расчетов по этим формулам при поступлении на входы имитационной модели блока детектирования моделируемых потоков нейтронов составили обучающую и проверочную выборки, используемые при обучении нейронных сетей.

Обучались нейронные сети последовательного распространения с сигмоидными передаточными функциями и одним промежуточным слоем двух конфигураций: а) с тремя входными нейронами, тремя нейронами в промежуточном слое и тремя нейронами в выходном слое (будем условно обозначать эту конфигурацию сети 3-3-3) – она моделировала прибор с разделением измеряемого нейтронного потока на три составляющие – тепловые, промежуточные и быстрые; б) с тремя входными нейронами, шестью нейронами в промежуточном слое и девятью нейронами в выходном слое (будем ее условно обозначать как сеть конфигурации 3-6-9) – она моделировала нейтронный спектрометр, измеряющий средние спектральные плотности на каждом десятичном энергетическом интервале. Данные конфигурации оказались оптимальными и по достигаемой точности восстановления, и по быстродействию.

Каждый нейрон выполняет взвешенное суммирование входных сигналов с задаваемыми весовыми коэффициентами (синаптическими весами) и смещениями [5]. Над результатом суммирования выполняется нелинейное преобразование – функция активации нейрона (использовалась сигмоидная функция). Выходы нейронов первого слоя соединялись с входами всех нейронов второго слоя, а выходы последних – с входами всех нейронов третьего слоя. На выходах нейронов третьего слоя формировались соответственно плотности тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов для сети конфигурации 3-3-3 и усредненные по десятичным интервалам энергии спектральные плотности нейтронов для сети конфигурации 3-6-9. Сумма показаний всех выходных нейронов дает интегральную плотность всего измеряемого потока нейтронов.

Раздельно обучались нейронные сети двух указанных конфигураций для каждой формы спектра при значениях среднеквадратических случайных отклонений от опорного спектра в 10 и 20%, а также нейронные сети двух указанных конфи-

гураций для всех видов спектра вместе при среднеквадратических отклонениях 10 и 20%. Обучение нейронной сети проводилось с помощью стандартного программного пакета *Neural Networks Toolbox*, входящего в пакет расширения системы MATLAB 7 SP 2 + Simulink 6, корпорации MathWorks [5]. Для обучения нейронной сети использовалась функция *traingd*, реализующая алгоритм обратного распространения ошибки.

В данном алгоритме функция ошибки представляет собой сумму квадратов рассогласования (ошибки) желаемого выхода сети и реального. Алгоритм действует циклически (итеративно), и его циклы принято называть *эпохами*. На каждой эпохе на вход сети поочередно подаются все обучающие реализации, выходные значения сети сравниваются с известными значениями входного спектра и вычисляется ошибка. Значение ошибки, а также градиента поверхности ошибок используется для корректировки весов и смещений нейронов, после чего все действия повторяются. Начальные параметры сети выбираются случайным образом. Процесс обучения прекращается либо когда пройдено определенное количество эпох, либо когда ошибка достигнет некоторого определенного уровня малости, либо когда ошибка перестает уменьшаться.

Для обучения нейронных сетей столь простых конфигураций вполне достаточными являются вычислительные ресурсы любого современного ПК. В данном случае использовался ПК Pentium IV 2,66 МГц, 2 ГБ RAM, ОС Windows XP Professional SP2. Время обучения составляло от единиц секунд для сетей конфигурации 3-3-3 до 20 секунд для сетей конфигурации 3-6-9 при 100 эпохах обучения. Время получения выходных данных для уже обученных сетей составляло менее 1 с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Нейронные сети конфигурации 3-3-3 для измерения потоков нейтронов с линейно возрастающими и линейно убывающими спектрами характеризуются быстрым обучением. Уже за 10 эпох обучения среднеквадратическая погрешность ответов сети снижалась почти на пять порядков. Ошибки при измерении реализаций проверочной выборки остаются того же порядка, что и для обучающей. Максимальные ошибки нейронной сети по отдельным реализациям во много раз превышают среднеквадратические ошибки по всем реализациям выборки (которые имеют порядок 0,0001%), но и они не превосходят 0,01 – 0,03% при измерении тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов и 0,1% при измерении интегральной плотности потока при величине случайных отклонений и в 10, и в 20%. Таким образом, специализированные для каждого вида спектров нейронные сети дают практически идеальное восстановление плотности тепловых промежуточных и быстрых нейтронов в измеряемом потоке.

Наиболее интересным является случай, когда на входы обучаемой нейронной сети подаются реализации потоков со спектрами всех вышеприведенных видов вместе. Здесь уже для стабилизации ошибки сети требуется до 60 эпох обучения, среднеквадратическая ошибка сети уменьшается до величины  $(0,3 - 0,6) \cdot 10^{-4}$ . Максимальные ошибки для отдельных реализаций, естественно, существенно выше и достигают десятых долей процента для реализаций обучающей выборки и единиц процентов – для проверочной. Это очень хорошие результаты. Для сравнения было проведено моделирование показаний прибора МКС-03С при измерении тех же потоков нейтронов (но без добавления случайных отклонений) – погрешности указанных каналов оказались значительными – более 30%.

Аналогичным образом обучались нейронные сети конфигурации 3-6-9: специализированные для каждого вида спектров и общая – для всех видов спектров

вместе. Как и в первом случае, специализированные сети оказались точнее, но и для общей сети были получены вполне приемлемые результаты. Конечно, процесс обучения сети в этом случае оказался более длительным и потребовал проведения порядка сотни эпох, но и в этом случае на обучающих выборках достигнуты весьма малые среднеквадратические погрешности (0,007% на реализациях с 10-процентными отклонениями и 0,02% на реализациях с 20-процентными отклонениями). На контрольных выборках они существенно выше и достигают единиц процентов. Того же порядка и максимальные погрешности для отдельных реализаций и обучающих, и проверочных выборок. Лишь для реализаций с максвелловским спектром они превышают 10%, что объясняется тем, что спектр таких реализаций практически целиком попадает в первый десятичный интервал (для которого максимальные погрешности также не превышают 1%) и лишь малая часть потока попадает во второй десятичный интервал, поэтому незначительные абсолютные погрешности в этом интервале приводят к сравнительно большим относительным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты убедительно доказывают эффективность предложенного подхода к разработке приборов для спектрометрических измерений потоков нейтронов. Следует ожидать, что при более совершенном блоке детектирования с большим числом каналов и лучшей их селективностью окажется возможным восстановление спектров измеряемых потоков нейтронов с более высокой детальностью (например, с разделением не на 9, а на 18 или даже 90 энергетических полос). Основными задачами дальнейших исследований являются проведение подобных исследований на нейтронных потоках с реальными формами энергетических спектров и поиск путей совершенствования блока детектирования нейтронного излучения с целью повышения спектральной селективности каналов детектирования и увеличения числа этих каналов, что даст возможность восстанавливать энергетические спектры измеряемых нейтронных потоков с большей детальностью.

## Литература

1. Климентов В.Б., Кончинский Г.А., Фрунзе В.В. Активационные измерения потоков и спектров нейтронов в ядерных реакциях // Изд. стандартов, 1974.
2. Санников А.В., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н. и др. Многошаровой спектрометр нейтронов на основе серийного прибора РСУ-01/Препринт ИФВЭ 2007-21. – Протвино, 2007.
3. 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/Заявка на изобретение № 2008114992 с приоритетом от 16.04.2008.
4. Дозиметр-радиометр МКС-03С: техническое описание. – 67 с.
5. Дьяконов В.П., Круглов В.В. Matlab 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2. – М: Солон-Пресс, 2006. – 456 с.

Поступила в редакцию 5.10.2009



## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.543.6

*Dose Characteristics of Neutrons Fields of Spent Ceramic Nuclear Fuel of Various Types* \S.V. Bedenko, F.V. Gnetkov, S.D. Kadochnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 tables, 1 illustration. – References, 16 titles.

The dose characteristics of the neutron fields spent ceramic uranium compounds were analyzed. A procedure for calculating the neutron component of the radiation characteristics of spent ceramic nuclear fuel was proposed. The causes of significant differences contributions of ( $\alpha$ , n)-reactions in the neutron radiation intensity of spent UO<sub>2</sub>, UC and UN were determined. The simulation results of the radiation field characteristics near the transport container with the results of radiometric experiments were compared.

### УДК 621.039.564

*Informational Approach to Solving Problems of Power Distribution Control in a Nuclear Reactor* \A.M. Zagrebayev, N.V. Ovsyannikova, I.V. Prokhorova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 tables, 6 illustrations. – References, 7 titles.

Informational approach to solving the problems of power distribution control in a nuclear reactor is offered. The definitions of information value of an in-core detector and information of the system of detectors are introduced. Connection between accuracy of a restoration algorithm and its informational properties is shown. The sequence of in-core detectors graduation (repair) definition on the basis of their informational value is offered.

### УДК 621.039.51

*New approach on designing spectrometric neutron radiation radiometer* \V.E. Dreizin, A.A. Grimov, D.I. Logvinov I.N. Mazepa; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 1 illustration. – References, 5 titles.

Results of modeling new method of spectrometric measurements neutron radiation are considered here. This method based on combined signal processing from several detectors with different spectral characteristic with following computer rebuilding energy spectrum of measuring radiation with assistance of neuron net. This net was preliminary trained on simulation models of neuron flow with different energy characteristic.

### УДК 621.039.56

*The Working out of the Finite-Element Dynamic Model of the Third Generation Fuel Assembly of the WWER-440 for the Strength Prove under Seismic Impact* \M.S. Khvostov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 7 illustrations. – References, 3 titles.

A description is given for working out of the finite-element dynamic model of the WWER-440 fuel assembly for the strength prove under seismic impact. The finite-element fuel assembly model worked out in ANSYS code is described. The eigenfrequencies and forms of the structure oscillations are received. The response to the seismic impact by the linear spectrum analysis is calculated. The estimation of the results precision is produced.

### УДК 621.039

*Analysis of the Radiation Monitoring Data by the Distribution-Free Statistic Methods (by the example of the River System Techa-Iset-Tobol-Irtysk Pollution)* \K.V. Lunyova, A.I. Kryshev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 5 tables, 1 illustration. – References, 7 titles.