

# Восстановление абсолютных значений спектральных составляющих в многодетекторном нейтронном спектрометре\*

В статье предложен метод восстановления абсолютных значений спектральных составляющих измеряемого потока по их относительным нормированным на интегральную плотность измеряемого потока значениям с использованием в блоке детектирования спектрометра двух идентичных детекторов, чувствительных к низкоэнергетическим нейтронам, на сцинтиллятор одного из которых надет кадмиевый экран.

**В.Э.Дрейзин, Д.И.Логвинов,  
А.А.Гримов, А.П.Кузьменко**

(Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск)

Одной из проблем, возникающих при создании многодетекторного нейтронного спектрометра реального времени с вычислительным восстановлением спектра с помощью заранее обученной нейронной сети является необходимость восстановления абсолютных значений спектральных составляющих измеряемого нейтронного потока по нормированным на интегральную плотность потока значениям, получаемым по ответам нейронной сети.

Как следует из [1], в этом спектрометре вычислительное восстановление спектральных составляющих измеряемого нейтронного потока осуществляется по откликам детекторов (измерительных каналов) на измеряемый нейтронный поток, предъявляемым на входы заранее обученной на множестве реализаций нейтронных потоков с разнообразной формой энергетических спектров нейронной сети. При этом спектры реализаций обучающей

## **Ключевые слова:**

*нейтронное излучение, энергетический спектр, измерение, нейтронный спектрометр.*

\* Данная публикация является второй статьей цикла, посвященного разработке многодетекторного нейтронного спектрометра-дозиметра реального времени.

выборки формируются из спектров различных нейтронных источников, найденных в литературе, и из спектров потоков, получаемых экспериментально на испытательно-поверочном комплексе, позволяющем от одного первичного радиоизотопного источника нейтронов получать нейтронные потоки с различной формой энергетического спектра [2]. Но спектры экспериментальных потоков, получаемые на испытательно-поверочном комплексе, рассчитываемые с использованием программ, базирующихся на имитационном моделировании с использованием метода Монте-Карло, представлены в нормированном виде относительно интегральной плотности потока, поскольку количество запускаемых при моделировании нейтронов произвольно. Да и спектры различных источников нейтронного излучения, приводимые в литературе, преимущественно представлены в нормированном виде. Конечно это облегчает обучение нейронной сети, поскольку все спектры обучающей выборки отличаются лишь формой, и относительные значения их спектральной плотности представлены числами одного порядка. Однако при этом восстановленные нейронной сетью спектры измеряемых потоков будут также представлены в нормированном виде, а интегральная плотность измеряемого потока остается неизвестной, и ее невозможно непосредственно измерить с достаточной достоверностью, т. к. не существует нейтронных детекторов с постоянной чувствительностью к нейтронам любых энергий в необходимом энергетическом диапазоне (от 0,001 эВ до 20 МэВ). Но целью спектральных измерений является измерение абсолютных значений спектральных составляющих, т. к. без их знания невозможно определить дозовые характеристики излучения (что является наиболее массовой сферой практического применения создаваемого спектрометра), да и решение всех других задач нейтронной спектрометрии становится проблематичным.

Ниже изложено решение задачи восстановления абсолютных значений спектральных плотностей по их нормированным значениям, находимым по ответам нейронной сети, при неизвестной интегральной плотности измеряемого потока.

### Предлагаемое решение задачи

На выходах нейронной сети формируются нормированные на интегральную плотность потока спектральные составляющие по принятым энергетическим интервалам:

$$a_{ij} = \frac{\Phi_{ij}}{\sum_{j=1}^m \Phi_{ij}}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{ij}$  – усредненная по  $j$ -му энергетическому интервалу спектральная плотность  $i$ -го измеряемого потока,  $m$  – количество энергетических интервалов, на которые разделен весь энергетический диапазон измеряемых потоков.

Для восстановления абсолютных значений спектральных плотностей измеряемого потока необходимо знать абсолютное значение его интегральной плотности. Но ее нечем измерить, поскольку не существует нейтронных детекторов с постоянной чувствительностью к нейтронам любых энергий (в указанном выше энергетическом диапазоне энергий нейтронов чувствительность детекторов изменяется в тысячи раз). Так называемые «всеволновые» детекторы, основанные на эффекте протонов отдачи, на самом деле тоже имеют ограниченный энергетический диапазон (от 0,05–0,1 до 2–3 МэВ), да и в нем не соблюдается постоянство спектральной чувствительности. Как раз одной из задач нейтронного спектрометра является корректное измерение интегральной плотности измеряемых потоков путем интегрирования спектральных составляющих по всему энергетическому диапазону.

Предлагаемое решение этой задачи состоит в следующем. Хотя невозможно непосредственно корректно измерить интегральную

плотность нейтронного потока с произвольной формой спектра, но можно вполне корректно и достоверно определить плотность тепловой составляющей этого потока, используя метод кадмиевой разности. Для этого в блок детектирования многодетекторного спектрометра должно быть включено два идентичных детектора, чувствительных к нейтронам низких энергий, один из которых не имеет кадмиевого экрана, а на сцинтиллятор второго надет кадмиевый экран (в виде колпачка из кадмия толщиной не менее 1 мм). Получить сцинтилляционные детекторы, чувствительные к низкоэнергетическим нейтронам, можно путем использования полистирольных сцинтилляторов с добавлением в них бора-10. Ядра атомов изотопа бора-10 имеют высокое сечение реакции захвата нейтронов низких энергий, в результате которой из ядра вылетает высокоэнергичная альфа-частица, при торможении которой в веществе сцинтиллятора создается мощная сцинтилляционная вспышка, что обеспечивает высокую чувствительность детектора к нейтронам низких энергий (при повышении энергии нейтронов сечение этой реакции монотонно снижается).

Измерительные каналы указанных двух идентичных детекторов должны работать параллельно с одинаковым временем измерения, что легко реализовать. Кадмиевый экран практически полностью поглощает тепловые нейтроны с энергией до 0,5 эВ. Из отклика детектора без кадмиевого экрана  $\theta_i^{\text{БК}}$  вычитается отклик детектора с кадмиевым экраном  $\theta_i^{\text{К}}$ , в результате чего остается отклик первого из них только на тепловую составляющую измеряемого потока:

$$\theta_i^T = \theta_i^{\text{БК}} - \theta_i^{\text{К}}. \quad (2)$$

Здесь  $\theta_i^T$  представляет собой количество тепловых нейтронов, зарегистрированных первым детектором за время измерения  $T_{\text{И}}$ . Зная эффективность этого детектора к тепловым

нейтронам  $\varepsilon^T$  (ее получают расчетным путем, моделируя спектральную чувствительность детектора с помощью библиотеки программ GEANT-4), время измерения  $T_{\text{И}}$  (оно должно быть одинаковым для обоих детекторов) и площадь сечения их сцинтилляторов  $S_{\text{Д}}$ , несложно рассчитать плотность тепловой составляющей измеряемого потока:

$$\Psi_i^T{}_{\text{ИЗМ}} = [(\theta_i^{\text{БК}} - \theta_i^{\text{К}}) / T_{\text{И}} S_{\text{Д}}] \varepsilon_{\text{Д}}^T. \quad (3)$$

По ответам нейронной сети находится нормированное значение тепловой составляющей измеренного потока:

$$a_i^T = \sum_{j=1}^k a_{ij}, \quad (4)$$

где  $k$  – количество интервалов в тепловой части энергетического диапазона, в которой определяются среднеинтервальные спектральные плотности измеряемых потоков (для обеспечения корректности определения нормированной плотности тепловой составляющей измеряемого потока в тепловой области энергий (0,001–0,5 эВ) должно укладываться целое число  $k$  энергетических интервалов).

Это нормированное значение потока тепловых нейтронов сопоставляется с измеренной плотностью тепловой составляющей потока, представленной выражением (3), что позволяет получить коэффициент соответствия между ними:

$$K_i^T = \Psi_i^T{}_{\text{ИЗМ}} / a_i^T. \quad (5)$$

Коэффициенты соответствия одинаковы для составляющих потока по всем энергетическим интервалам, т. е.  $K_i^T = K_{ij}$ . Поэтому умножая ответы нейронной сети  $a_{ij}$  на этот коэффициент соответствия, получаем абсолютные значения спектральных плотностей по всем энергетическим интервалам:

$$\Psi_{ij\text{ИЗМ}} = a_{ij} K_i^T. \quad (6)$$

Просуммировав их по всем энергетическим интервалам, получаем интегральную плотность измеряемого потока:

$$\Psi_{i\text{ИЗМ}} = \sum_{j=1}^m \Psi_{ij\text{ИЗМ}}. \quad (7)$$

Все эти вычисления несложно выполнить с помощью встроенного в спектрометр микроконтроллера. Если спектрометр будет снабжен цифробуквенным дисплеем, то результат измерений будет отображаться в виде цифровых значений спектральных плотностей измеренного потока по  $m$  энергетическим интервалам (с указанием граничных энергий этих интервалов). Если же будет использован знакографический дисплей, то помимо этих цифровых данных спектр может быть представлен в графическом виде (ступенчатом по данным энергетическим интервалам или в непрерывном, восстановленном с использованием сплайн-аппроксимации по  $m$  точкам, отображающим среднеинтервальные значения спектральных плотностей).

### Заключение

Таким образом, для восстановления абсолютных значений спектральных плотностей измеряемого нейтронного потока и определения его интегральной плотности в блок детектирования многодетекторного нейтронного спектрометра должны быть включены (в составе тех, по откликам которых должен восстанавливаться нормированный спектр)

два идентичных детектора, чувствительных к низкоэнергетическим нейтронам (с добавлением бора-10 в сцинтиллятор), на сцинтиллятор одного из которых надет кадмиевый экран. В программное обеспечение спектрометра должна быть добавлена программа вычисления по откликам этих детекторов плотности тепловой составляющей измеряемого потока и сопоставления измеренного абсолютного значения тепловой составляющей потока с ее нормированным значением, определяемым по ответам нейронной сети, что позволяет найти коэффициент соответствия между ними. Умножая на него нормированные значения спектральных составляющих потока, определяемых по ответам нейронной сети, получаем их абсолютные значения, а просуммировав их, – интегральную плотность измеряемого потока. В то же время, отклики этих детекторов должны использоваться и для восстановления нормированного спектра, т. е. поступать на входы нейронной сети вместе с откликами других используемых детекторов.

Публикация подготовлена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашения N 075-15-2021-1155 и N 075-15-2021-1213).

## Литература

1. Дрейзин В.Э. Нейтронная спектрометрия: концепция построения нейтронного спектрометра реального времени // АНРИ. 2010. N 4(63). С. 13-19.
2. Дрейзин В.Э., Логвинов Д.И., Гримов А.А. Создание опорных нейтронных полей для калибровки нейтронных спектрометров // АНРИ. 2013. N 4(75). С. 8-13.

## Reconstruction of Absolute Values of Spectral Components in Another Detector Neutron Spectrometer

Dreyzin Valeri, Logvinov Dmitri, Grimov Aleksandr, Kuzmenko Aleksandr (South-Western State University, Kursk, Russia)

**Abstract.** The article proposes a method for reconstructing the absolute values of the spectral components of the measured flux from their relative values normalized to the integrated density of the measured flux using two identical detectors in the detection unit of the spectrometer that are sensitive to low-energy neutrons, one of which has a cadmium screen on the scintillator.

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

В.Э.Дрейзин (профессор, д.т.н., дирек.), Д.И.Логвинов (инж.), А.А.Гримов (к.т.н., ст.преп.),  
А.П.Кузьменко (профессор, д.ф.-м.н., г.н.с.) – Юго-Западный гос. университет, г. Курск.  
Контакты: тел. +7 (4712) 51-00-89, e-mail: dreyzin-ve@yandex.ru.