

УДК 539.1.074.88

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ ПО ПОКАЗАНИЯМ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА, ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА И НАБОРА АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ*Рябева Е.В., Денисенко А.П., Ибрагимов Р.Ф., Урупа И.В. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)*

e-mail: ivurupa@mephi.ru

Спектр нейтронов несет информацию об их источнике и веществе, с которым взаимодействует. Характеристики взаимодействия нейтронов с веществом существенно зависят от энергии, в связи с чем необходимо как можно более достоверно измерять и оценивать нейтронный спектр. Такие измерения необходимы, например, при проектировании исследовательских источников и источников для нейтронно-радиационных и активационных технологий, разработке источников терапевтических облучательных установок, для дозиметрии в медицине в режиме реального времени, а также для оценки дозы радиационного повреждения и модификации нейтронами материалов. Для прикладных нейтронных технологий важно измерять спектр нейтронов, генерируемый применяемыми технологичными источниками, например, портативными генераторами с энергией нейтронов 2,5 и 14 МэВ.

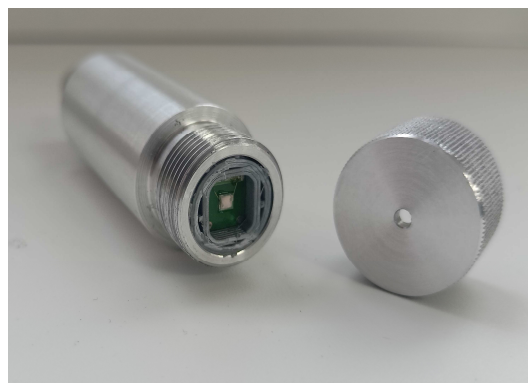
Известны методы спектрометрии нейтронов с применением сфер Боннера, органических сцинтилляторов с возможностью разделения нейтронов и γ -квантов по форме импульса, наборов активационных детекторов, времяпролетных техник, полупроводниковых детекторов и др. Методы спектрометрии нейтронов описаны, например, в работах [1, 2].

Спектр нейтронов восстанавливают численными методами решения обратных задач физики. Анализ методов восстановления спектров, измеренных с помощью сфер Боннера, пузырьковых детекторов, пропорционального ^3He -счетчика и органического жидкого сцинтиллятора, приведен в работах [3—5]. Погрешность и устойчивость методов восстановления спектров нейтронов зависит от погрешности решения прямой задачи, т.е. от корректности аппаратурных спектров и устойчивости ядра решаемого уравнения. Погрешность в решении прямой задачи зависит от типа используемого регистрирующего устройства. Однако математические методы не зависят от типа регистратора, поэтому необходим корректный анализ методов и для выбора из имеющихся методов восстановления.

Целью настоящей работы является анализ методов восстановления спектра нейтронов: метода наименьших квадратов с наложенными условиями на решения, нейронных сетей, максимальной энтропии (алгоритм MAXED, доступ предоставлен NEA) и итерационного алгоритма GRAVEL, базирующегося на нелинейном методе наименьших квадратов. Для анализа разработаны и предложены критерии качества восстановления спектра, рассчитаны их значения для выполненных авторами настоящей статьи измерений и детектирующих систем, проведено сравнение полученных критериев для выбора наилучшего метода.

Спектрометрические стенды. Спектрометр с алмазным чувствительным элементом представляет собой широкозонный полупроводник [6]. Принцип регистрации нейтронов основан на сборе заряда, который возникает в процессе торможения в веществе детектора заряженных частиц, образовавшихся при взаимодействии нейтрона с ядрами углерода. Стенд состоит из детектора ДБ-10 с алмазным чувствительным элементом производства ООО ПТЦ «Уралалмазинвест», зарядочувствительного усилителя ПУГ-37 и платы амплитудного анализатора SBS-77 производства ГП «Грин Стар» (рис. 1).

Спектрометр на основе пластмассового сцинтиллятора включает в себя цилиндрический сцинтиллятор EJ-276 размером 40×40 мм, вакуумный фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R6231-100 (Япония), делитель напряжения



Р и с. 1. Алмазный детектор (слева) и коллиматор



Р и с. 2. Сцинтилляционный детектор на основе EJ-276

для ФЭУ и предусилитель [7] (рис. 2). Разделение нейтронов и γ -квантов в аппаратном спектре проводится по форме импульса аппаратурой цифровой обработки сигналов CAEN DT5730B (Италия) [8].

Спектрометрический набор пороговых нейтронно-активационных детекторов служит для измерения наведенной радиоактивности в образцах [9]. Набор активационных детекторов, использованный в настоящей работе, включал пластины из ванадия, алюминия, индия и меди (табл. 1). Активность измерялась на гамма-спектрометре из особо чистого германия.

Методы восстановления нейтронных спектров. Распространенным базовым способом восстановления информации о спектре частиц при известном аппаратном спектре явля-

ется метод наименьших квадратов. Приведем порядок реализации метода. Обозначим переменной R_{ji} известный отклик j -го канала спектрометра на нейтроны i -й энергетической группы. Результатом измерения аппаратного спектра N_j является отклик j -го канала спектрометра на искомое энергетическое распределение F_i — число нейтронов в i -й энергетической группе. Нахождение спектра нейтронов F сводится к решению системы линейных уравнений

$$N = RF. \quad (1)$$

Приближенным решением уравнения (1) методом наименьших квадратов является такой спектр нейтронов, который приведет к минимуму функционал

$$\|RF - N\| \rightarrow \min. \quad (2)$$

Поскольку искомое решение не может иметь отрицательных значений, метод наименьших квадратов был усовершенствован для нахождения условных (неотрицательных) решений. Метод реализован почти во всех известных программных пакетах по обработке данных.

Особенность работы метода регуляризации Тихонова заключается в поиске решения, которое минимизирует выражение (2) с учетом дополнительных ограничений:

Т а б л и ц а 1. Характеристики активационных детекторов при потоке нейтронов из генератора $1,5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ в телесный угол $4\pi \text{ ср}$

Параметр	Детектор				
	V	Al	In		Cu
Образующийся изотоп	^{51}V	^{27}Al	^{113}In	^{115}In	^{63}Cu
Реакция	(n, p)	(n, p)	$(n, 2n)$	(n, n')	$(n, 2n)$
Продукт реакции	^{51}Tl	^{27}Mg	^{112}In	^{115m}In	^{62}Cu
Содержание изотопа в детекторе, мас. доля	0,99	1	0,04	0,96	0,69
Детектор:					
плотность, г/см ³	6,11	2,69	7,31	7,41	8,92
длина, мм	33	51	51	51	40
ширина, мм	40	51	51	51	40
высота, мм	1	1	1	1	1,4
Энергия порога, МэВ	6	4	13	1,2	12,8
Период полураспада, мин	5,76	9,46	14,88	269,16	9,67
Энергия γ -квантов, кэВ	320,08	843,76	511	336,24	511
Время облучения, мин	30	20	30	30	10
Активность на окончание облучения, кБк	$4,9 \pm 0,4$	12 ± 3	$4,8 \pm 0,3$	$2,1 \pm 0,2$	55 ± 2

$$\| \mathbf{RF} - \mathbf{N} \| + \alpha \| \mathbf{F} - \mathbf{F0} \| \rightarrow \min,$$

где α — параметр регуляризации, характеризующий условие $\alpha \| \mathbf{F} - \mathbf{F0} \| \rightarrow \min$; $\mathbf{F0}$ — априорный спектр.

Одним из способов восстановления спектра нейтронов является метод искусственных нейронных сетей. Искусственная нейронная сеть представляет собой математическую модель, состоящую из отдельных нейронов, связь между которыми определяется весовым коэффициентом и функцией активации. Имея базу взаимно однозначных входных и выходных данных, сеть подбором весов обучается сопоставлять эти данные между собой. При восстановлении нейтронных спектров входными данными могут быть показания детекторов, выходными — восстановленный спектр нейтронов [10].

Метод искусственных нейронных сетей был применен для восстановления спектра генератора D—T-нейтронов ИНГ-07Т по показаниям активационных детекторов (см. табл. 1). Сеть реализована с помощью библиотеки TensorFlow на языке Python 3.9. Входными данными является наведенная активность детекторов, выходными — спектр нейтронов. Для обучения сети были смоделированы отклики детекторов на 400 спектров нейтронов, представляющих собой моноэнергетические линии и их комбинации. Отклики получены путем моделирования с помощью программного обеспечения с доступным исходным кодом Geant4 (ЦЕРН).

Метод максимальной энтропии является вариантом метода регуляризации. В нем выбирается спектр, который удовлетворяет уравнению (1) и одновременно максимизирует относительную энтропию S [11]

$$S = - \int \mathbf{F}(\mathbf{E}) \ln[\mathbf{F}(\mathbf{E})/\mathbf{F0}(\mathbf{E})] dE.$$

Метод реализован с помощью программного кода MAXED [11].

Итерационный алгоритм GRAVEL [12] представляет собой модификацию алгоритма SANDII и имеет вид

$$F_j^{k+1} = F_j^k \exp \left\{ \left[\sum_i W_{ij}^k \ln(N_i / \sum_{j'} R_{ij'} F_{j'}^k) \right] / \sum_i W_{ij}^k \right\},$$

где N_i — число отсчетов в i -м канале экспериментального спектра; R_{ij} — элемент матрицы

откликов, в которой в соответствие i -му интервалу спектрометра (энергии протонов отдачи) ставится j -й энергетический интервал (энергии нейтронов); W_{ij}^k — весовая функция

$$W_{ij}^k = \left(R_{ij} F_j^k / \sum_{j'} R_{ij'} F_{j'}^k \right) (N_i^2 / \sigma_i^2),$$

где $\sigma_i = \sqrt{N_i}$; $i = [1, n]$; $j = [1, m]$; F_j^k — флюенс нейтронов в j -м энергетическом интервале после k -й итерации.

Восстановление спектра быстрых нейтронов. Описанные спектрометрические сборки были использованы для получения аппаратурных спектров от источника быстрых нейтронов — импульсного нейтронного генератора ИНГ-07Т на основе D—Т-реакции с потоком 10^7 с^{-1} в квазинепрерывном режиме. Измерения проведены в помещении с обычными полом, потолком и стенами. Площадь помещения небольшая (40 м^2), поэтому в спектре могут регистрироваться рассеянные и замедленные нейтроны. В первом приближении вклад в измеряемый спектр рассеянных и замедленных нейтронов не будет превышать вклад нейтронов энергией 14,1 МэВ более чем в 10—100 раз.

Критерии оценки качества восстановленных спектров. Одним из распространенных для оценки качества восстановления и одновременно остановки итерационных процессов является критерий χ^2 , показывающий близость полученного решения к истинному. Результат восстановления $\mathbf{F}$ должен быть таким, чтобы приводить к минимуму разницу по норме уравнения (2). Однако минимальность такой нормы ограничена погрешностью вектора откликов $\mathbf{N}$. Считая, что $\mathbf{N}$ имеет нормальное распределение, величина

$$H_0 = \sum_{i=1}^n [(R_{ji} F_i - N_j)^2 / \sigma_j^2] \sim \chi_{n-1}^2 \quad (3)$$

подчиняется распределению χ^2 с числом степеней свободы $n - 1$.

Приведем еще три параметра, которые предложены для оценки качества восстановления, а именно соответствия восстановленного и тестового, если таковой имеется, спектров:

норма отклонения между тестовым $\mathbf{F0}$ и восстановленным $\mathbf{F}$ спектром

$$H_1 = \|F - F_0\| = \sum_{i=1}^n (F_i - F_0)_i^2 \rightarrow \min; \quad (4)$$

отношение флюенса нейтронов, т.е. площадей под восстановленным и тестовым спектром

$$H_2 = \sum_{i=1}^n \Delta E_i F_i / \sum_{i=1}^n \Delta E_i F_0 \rightarrow 1; \quad (5)$$

где ΔE — ширина энергетического интервала;

разница положения пиков исследуемых спектров

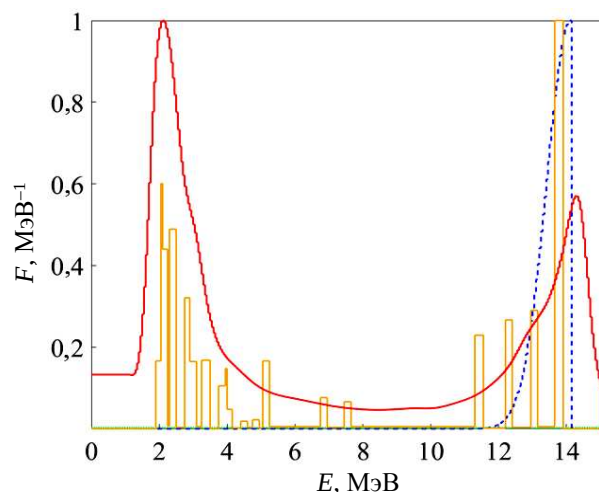
$$H_3 = (E_{\max} - E_{0\max}) / E_{\max} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Среди критериев оценки качества восстановления могут быть также оценки временных затрат на восстановление, устойчивость, т.е. зависимость от погрешности входных данных, устойчивость к изменению числа каналов и энергетических групп и др. В рамках настоящей работы ограничимся приведенными четырьмя критериями.

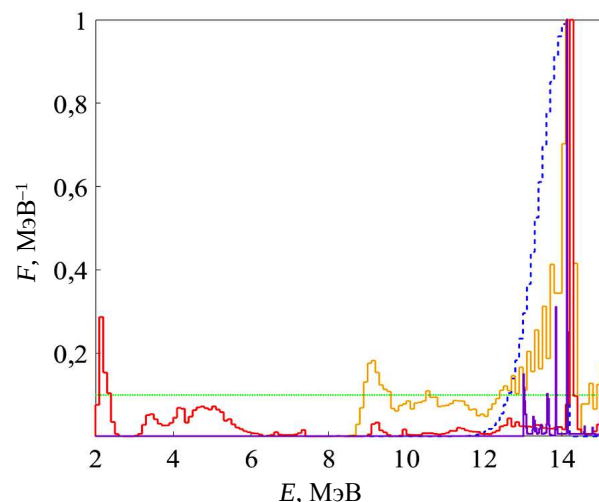
Сравнение и анализ использованных методов восстановления. Приведем описанные критерии восстановления спектров по показаниям сцинтилляционного, алмазного и набора активационных детекторов соответственно (табл. 2). На рис. 3—5 видно, что с помощью

Таблица 2. Критерии восстановления спектра быстрых нейтронов из соотношений (3)—(6) по показаниям детекторов

Метод и алгоритм	Критерий			
	H_0	H_1	H_2	H_3
	Идеальные значения			
	0	0	1	0
Сцинтилляционный детектор				
Наименьших квадратов	0,042	0,4	0,03	0,022
MAXED	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	0,091	0,1
Алмазный детектор				
Наименьших квадратов	35	0,35	0,97	$7,1 \cdot 10^{-3}$
GRAVEL	14	0,49	2,8	0,014
Регуляризации Тихонова	$1,9 \cdot 10^3$	0,14	0,049	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Активационные детекторы				
Наименьших квадратов	15	1,3	0,83	0,5
Искусственных нейронных сетей	0,11	$3,9 \cdot 10^{-3}$	1	0
MAXED	26	0,2	1,6	0

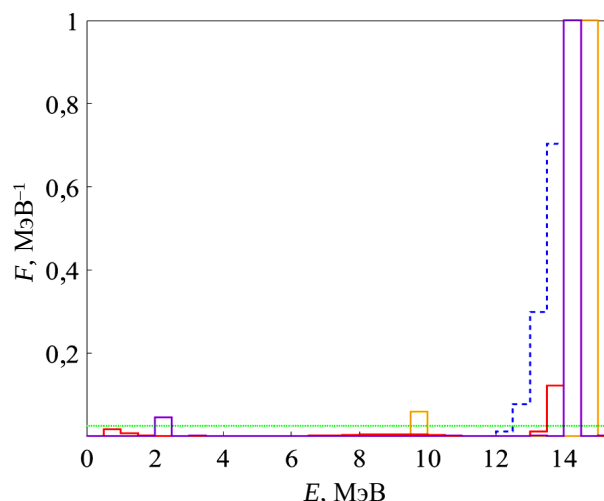


Р и с. 3. Восстановленный спектр быстрых нейтронов генератора ИНГ-07Т в точке измерения по показаниям сцинтилляционного детектора методами наименьших квадратов (—) и максимальной энтропии (—) в сравнении со спектром D—Т-нейтронов (---)



Р и с. 4. Восстановленный спектр быстрых нейтронов генератора ИНГ-07Т в точке измерения по показаниям алмазного детектора методами наименьших квадратов (—), итерационным алгоритмом GRAVEL (—), регуляризации Тихонова (—) в сравнении со спектром D—Т-нейтронов (---) и ненулевым априорным спектром (---)

всех спектрометрических сборок и всеми предложенными методами восстановления спектр источника нейтронного D—Т-генератора был восстановлен. Однако табл. 2 показывает, что приведенные критерии оценки качества восстановления спектров не позволяют сделать однозначного вывода о преимуществе того или иного метода восстановления. Можно лишь отметить, что перспективным является метод искусственных нейронных сетей, который показал хорошие результаты при восстановлении спектра по показаниям набора активационных детекторов.



Р и с. 5. Восстановленный спектр быстрых нейтронов генератора ИНГ-07Т в точке измерения по показаниям активационных детекторов методами наименьших квадратов (—), максимальной энтропии (—), искусственных нейронных сетей (—) в сравнении со спектром D—Т-нейтронов (---) и ненулевым априорным спектром (---)

Заключение. В настоящей работе проанализированы методы восстановления энергетических спектров быстрых нейтронов. Для измерения спектра нейтронов использовались спектрометрические сборки с алмазным чувствительным элементом, пластмассовым сцинтиллятором и набором активационных детекторов. Для оценки качества восстановления спектров нейтронов предложены математические критерии: известный критерий χ^2 , критерии близости спектров, флюенса нейтронов и положения пиков спектров. Предложенные критерии рассчитаны для восстановления измеренного спектра импульсного нейтронного генератора ИНГ-07Т.

Сравнительный анализ показал, что нет однозначно преимущественного метода восстановления спектра. При выборе метода восстановления следует опираться на возможности методов и целевые задачи, которые должны быть решены: восстановление флюенса, положения пика или общей близости тестовых и восстановленных спектров. Для достижения наилучшего результата при наличии ресурса эффективным, возможно, будет комбинация методов восстановления. Для повышения качества

восстановления, кроме совершенствования экспериментальной базы, например, повышения точности калибровки, уменьшения погрешности входных данных необходимы оптимизация методов восстановления, например, числа каналов спектрометра и энергетических групп, оптимизация и модификация матриц чувствительности, построение устойчивых алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Brooks F., Klein H.** Neutron spectrometry — historical review and present status. — Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2002, v. 476, p. 1—11.
2. **Thomas D.** Neutron spectrometry for radiation protection. — Rad. Prot. Dos., 2004, v. 110, p. 141—149.
3. **Matzke M.** Unfolding procedures. — Ibid., 2003. v. 107, p. 149—168.
4. **Matzke M.** Propagation of uncertainties in unfolding procedures. — Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2002, v. 476, p. 230—241.
5. **Simonetti C., Labalme M., Trolet J., Mary P.** Deconvolution methods used for the development of a neutron spectrometer. — EPJ Web Conf., 2021, v. 253, p. 09003.
6. **Gaganov V., Ryabeva E., Molodtsev D. e.a.** Experimental characterization of diamond-based neutron spectrometer. — JINST, 2022, v. 17, p. T09001.
7. **Ryabeva E., Molodtsev D., Urupa I. e.a.** EJ-276 based neutron spectrometer with neutron—gamma pulse shape discrimination capability. — Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2022, v. 1034, p. 166791.
8. **Ryabeva E., Urupa I., Lupa E. e.a.** Calibration of EJ-276 plastic scintillator for neutron—gamma pulse shape discrimination experiments. — Ibid., 2021, v. 1010, p. 165495.
9. **Ibragimov R., Kokorev Y., Denisenko A.** Experimental determination of the induced activity in activation detectors of a complex geometric shape. — Nucl. Energy Technol., 2020, v. 6. p. 156—167.
10. **Hossein S.** Neutron spectrum unfolding using artificial neural network and modified least square method. — Rad. Phys. Chem., 2016, v. 126, p. 75—84.
11. **Reginatto M., Goldhagen P.** MAXED, a computer code for maximum entropy deconvolution of multispectrum neutron spectrometer data. — Health Phys., 1999, v. 77, p. 579—583.
12. **YongHao C., XiMeng C., JiaRong L. e.a.** Unfolding the fast neutron spectra of a BC501A liquid scintillation detector using GRAVEL method. — Sci. China (Phys. Mech. & Astr.), 2014, v. 57, № 10, p. 1885—1890.

Поступила в Редакцию 14.06.22