

УДК 681.3.06 + 539.1.074.8

А.Ю. БУКИ, А.С. МАЗМАНИШВИЛИ
 Национальный Научный Центр «Харьковский Физико-Технический Институт»

ВЫБОРОЧНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ 5-ШАРОВОГО СПЕКТРОМЕТРА БОННЕРА

Проанализированы данные, полученные при создании шарового нейтронного спектрометра Боннера активационного типа, состоящего из 5 полиэтиленовых шаров. В качестве активируемого материала использовался индий. Проведены измерения, в которых пучок электронов с энергией $E=12$ МэВ преобразовывался в 100-микронном танталовом (e,γ) -конверторе в γ -излучение, которое попадало на свинцовый

(γ, n) -конвертор. Нейтроны из конвертора падали на шары спектрометра, в каждом из них отеплялась неодинаковая их часть, и поэтому активация индиевых таблеток была разной. После облучения на ускорителе из шаров извлекались индиевые таблетки и помещались в γ -спектрометр, где определялась степень активации таблетки. Таким образом, результатом измерений были 5 чисел, характеризующих активацию таблеток из 5 шаров. Предполагая некоторую функцию $F(E, a_j)$, которая может описать спектр нейтронов и зависит от нескольких параметров a_j , и, располагая функцией отклика i -ого шара $\phi_i(E)$, активация может быть представлена как свёртка функций $F(E, a_j)$ и $\phi_i(E)$. Предложена модель математической обработки данных измерений наведенной в индии радиоактивности. Построена модель, основанная на минимизации функционала качества и нелинейных регрессионных уравнениях. С помощью стохастического рекуррентного алгоритма решена задача восстановления спектра нейтронов. Для использованной четырехпараметрической модели спектра типа распределения Максвелла получены оценки его параметров, а также оценки погрешностей оценок параметров.

Ключевые слова: спектр потока нейтронов, спектрометр Боннера, стохастический рекуррентный алгоритм, оценка параметров спектра, оценка погрешности оценки.

О.Ю. БУКІ, О.С. МАЗМАНІШВІЛІ
 Національний Науковий Центр «Харківський Фізико-Технічний Інститут»

ВИБІРКОВИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ 5-КУЛЬКОВОГО СПЕКТРОМЕТРА БОННЕРА

Проаналізовані дані, які отримані при створенні кулькового нейтронного спектрометра Боннера активаційного типу, що містить 5 поліетиленованих кульок. У якості активованого матеріалу використовувався індій. Здійснено вимірювання, в яких пучок електронів із енергією $E=12$ МеВ перетворювався в 100-мікронному танталовому (e, γ) -конверторі на γ -випромінювання, яке потрапляло на свинцовий (γ, n) -конвертор. Нейтрони з конвертора потрапляли на кульки спектрометра, в кожному з них отеплялася неоднакова їх частина, і тому активція індієвих таблеток була різною. Після опромінювання на прискорювачі з кульок вилучалися індикаторні таблетки і розміщувалися в γ -спектрометрі, де визначався ступінь активації таблеток. Таким чином, результатом вимірювань є 5 чисел, які характеризують активацію таблетки з 5 кульок. Передбачаючи деяку функцію $F(E, a_j)$, яка може описати спектр нейтронів і залежить від декількох параметрів a_j , і, маючи функцію

відгуку i -ої кульки $\phi_i(E)$, активація може бути представлена як згортка функцій $F(E, a_j)$ та $\phi_i(E)$. Запропоновано модель математичної обробки даних вимірювань наведеної в індії радіоактивності. Побудовано модель, яка заснована на мінімізації функціонала якості та нелінійних регресійних рівнянь. За допомогою стохастичного рекурентного алгоритму розв'язана задача відновлення спектра нейтронів. Для використаної чотирьохпараметричної моделі спектра типу розподілу Максвелла отримано оцінки його параметрів, а також оцінки похибок оцінок параметрів.

Ключові слова: спектр потоку нейтронів, спектрометр Боннера, стохастичний рекурентний алгоритм, оцінка параметрів спектра, оцінка похибки оцінки.

A.Yu. BUKI, A.S. MAZMANISHVILI

National Science Center 'Kharkov Institute of Physics & Technology', Kharkov, Ukraine

SELECTIVE ANALYS OF THE WORK OF 5-BALL BONNER SPECTROMETER

The data obtained during the test of the generated Bonner neutron spectrometer of an activation type consisting of 5 polyethylene balls are analyzed. Indium was used as the activated material. Measurements were made an electron beam with energy $E=12$ MeV was transformed into a 100-micron tantalum (e, γ)-converter into γ -radiation, which fell on the lead plumbum (γ, n)-converter. The neutrons from converter were incident on the spectrometer balls. Different parts of the neutrons arrived in each of them, and therefore the activation of indium tablets was different. After irradiation on the accelerator, indium tablets were extracted from the balls, and was placed in a γ spectrometer, where the degree of activation of the tablet was determined. Thus, the results of the measurements were 5 numbers characterizing the activation of 5-ball tablets. Assuming some function $F(E, a_j)$, which can describe the neutron spectrum and depends on several parameters a_j , and, by having the response function of the i^{th} ball $\phi_i(E)$, activation can be represented as a convolution of functions $F(E, a_j)$ and $\phi_i(E)$. The results of mathematical processing of measurement data of radioactivity induced in Indium are presented. Model based on minimization of the quality functional and nonlinear regression equations is constructed. Using the stochastic recurrent algorithm, the problem of neutron spectrum restoration is solved. For the used four-parameter model of the spectrum, such as the Maxwell distribution, estimates of its parameters are obtained, as well as estimates of the errors of parameter estimates.

Keywords: neutron flux spectrum, Bonner spectrometer, stochastic recurrence algorithm, estimation of spectrum parameters, estimation of estimation error.

Постановка проблеми

При анализе данных, получаемых при использовании шарового нейтронного спектрометра Боннера активационного типа, как правило, применяются поисковые методы градиентного типа. В них рассматривается пробная спектральная функция с параметрами, оценки значений которых ищутся. С увеличением числа используемых параметров возможно возникновение неустойчивостей, что чаще всего связано с использованием неадекватных областей их возможных значений. Методы стохастического поиска используют только начальные значения, при этом устойчивость их работы слабо связана с числом оцениваемых параметров, а длительность выполнения необходимых численных операций зависит от количества исследуемых параметров гораздо медленней, чем при использовании градиентных методов.

Анализ последних исследований и публикаций

Конструкция и применение шарового спектрометра Боннера была изложена в [1]. Примеры расчета зависимости вероятности активации таблетки от энергии нейтрона (функции отклика $F_i(E_j)$) для полиэтиленовых шаров приведены в [2]. Общие свойства нейтронных потоков и процессов их замедления изложены в [3]. Вопросам оптимизации ядерных реакторов и особенностей их проектирования с использованием численного моделирования посвящена работа [4].

Цель исследования

Целью работы является демонстрация применимости стохастических методов при выполнении расчетов по восстановлению спектра нейтронов из измерений шарового спектрометра Боннера. Используемые экспериментальные данные получены для потока нейтронов из конвертора, на который из ускорителя ЛУЭ-300 ХФТИ падал пучок электронов с энергией $E=12$ МэВ. Для проведения измерений используется 5-ти шаровой нейтронный спектрометр активационного типа.

Изложение основного материала исследования

Экспериментальная установка и методика исследований

В ННЦ ХФТИ для работ с нейтронами, которые генерируются в (e,n) -конверторе электронного ускорителя, создан шаровой спектрометр. Спектрометр состоит из 5 полиэтиленовых шаров различного диаметра от 90 до 245 мм. Пучок электронов, попадая в $(e-\gamma-n)$ -конвертор, генерирует излучение нейтронов (рис. 1).

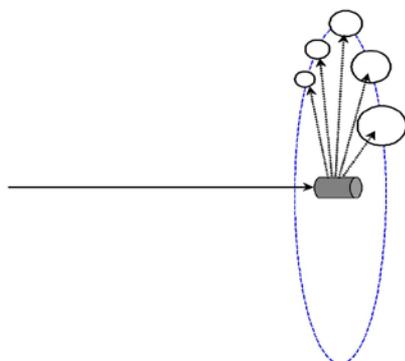


Рис. 1. Схема эксперимента. Пучок электронов (линия), конвертор (цилиндр), нейтроны из конвертора (точечные стрелки), полиэтиленовые шары спектрометра (кружки).

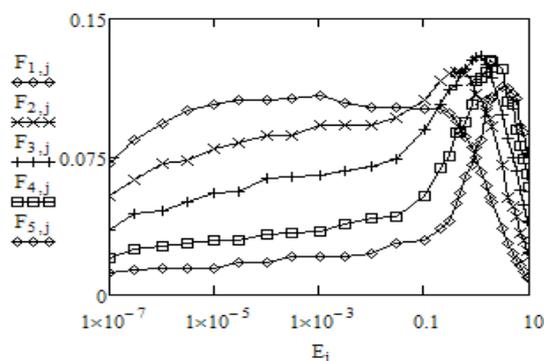


Рис. 2. Функции отклика F_{ij} .

На расстоянии 1 м от конвертора расположены полиэтиленовые шары, в центре каждого из которых находится таблетка из индия. У изотопа ^{115}In высокое сечение поглощения нейтронов с энергиями < 4 эВ. В результате поглощения этим изотопом нейтрона образуется радиоактивное ядро ^{116}In , распад которого приводит к излучению γ -квантов, в основном, с энергией 412 кэВ. В результате облучения шаров нейтронами активируется содержащийся в таблетке основной изотоп индия ^{115}In , который затем распадается с периодом полураспада $T_{1/2}=54.2$ мин. После сеанса облучения из шаров извлекаются таблетки. Величина активации каждой таблетки определяется по интенсивности её γ -излучения с энергией $E=416,9$ МэВ. Для измерения гамма-

излучения используется германий-литиевый гамма спектрометр с энергетическим разрешением в районе 400 кэВ, равным 2,5 кэВ.

На рис. 2 показаны функции отклика шаров, которые использовались в эксперименте. По горизонтальной оси отложена энергия налетающих нейтронов E_j в логарифмическом масштабе.

Дифференциация нейтронов по энергии происходит при прохождении ими полиэтиленовых шаров. Внутри шара нейтроны в результате рассеяния на ядрах замедляются, их энергия уменьшается, при этом по мере достижения нейтроном тепловой энергии возрастает вероятность его поглощения веществом шара или индиевой таблеткой. Нейтроны большей энергии приходят к индиевой таблетке, не успевая замедлиться на столько, чтобы активировать ядра изотопа ^{115}In . Если же энергия нейтронов мала, то они успевают отеплиться, не доходя до индиевой таблетки. Для нейтрона, ставшего тепловым, возрастает вероятность его поглощения на пути к таблетке, при этом уменьшается вероятность активации этой таблетки. Для i -го шара зависимость вероятности активации таблетки от энергии нейтрона называется функцией отклика $F_{i,j}=F_i(E_j)=S_i N_i(E_i)/N_i(E_j)$, где S_i – площадь поперечного сечения i -го шара, $N_i(E_i)/N_i(E_j)$ – вероятность активации i -й таблетки нейтроном, $N_i(E_j)$ – число нейтронов, налетевших на i -й шар с начальной энергией E_j , $N_i(E_i)$ – число нейтронов, которые замедлились до энергии активации E_i и попали в таблетку.

Количество активированных ядер в каждой из таблеток шаров спектрометра приведено в табл. 1. В ней используются обозначения: i и D_i – номер и диаметр шара; $N_i \pm \Delta N_i$ – количество активированных ядер в i -й таблетке.

Таблица 1

Активация ядер в индиевых таблетках шаров

i	D_i , мм	N_i	ΔN_i
1	90	79000	2000
2	120	89000	2200
3	152	115000	2600
4	200	93000	3200
5	245	68000	2600

Подготовка данных к математическому моделированию

Для получения энергетического спектра нейтронного потока, измерения в котором проведены посредством шарового спектрометра Боннера, необходимо задать функцию, способную изобразить этот спектр. Разработана модель, обеспечивающая симуляцию распространения нейтронов в веществе в диапазоне энергий от 10⁻⁸ до нескольких МэВ, которая показала достаточно высокую скорость. На её основе рассчитаны функции отклика шарового нейтронного спектрометра. Как показано в [2], рабочий диапазон рассматриваемого спектрометра 0.05–5.0 МэВ. При этих энергиях нейтронный поток из свинцового конвертора имеет вид пика с максимумом при энергии около 0.5 МэВ [4]. Форма этого пика может быть описана функцией типа распределения Максвелла:

$$\Phi(E, a) = a_1 E^{a_3} \exp(-a_2 E) + a_4 / E, \quad (1)$$

в которой к функции Максвелла добавлено слагаемое, описывающее вклад в спектр тех нейтронов, энергия которых значительно меньше 0.5 МэВ.

Если набор параметров $\{a\}$ такой, что задаваемый ими вид функции $\Phi(E, a)$ близок к реальному спектру нейтронов, то свёртки функции $\Phi(E, a)$ с функциями отклика $F_i(E_j)$ должны дать набор чисел, который с точностью до общего множителя пропорционален набору из количеств активированных ядер в таблетках, полученного в эксперименте, то есть набору N_i из табл. 1. В рамках такого подхода задача сводится к процедуре нахождения оценки $\hat{a}=(\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4)$ значений четырех параметров $a=(a_1, a_2, a_3, a_4)$, фигурирующих в (2). Из вышеизложенного следует, что для восстановления спектра нейтронов необходимо путём подбора параметров $\{a\}$ функции $\Phi(E, a)$ минимизировать разности между всеми экспериментальными значениями N_i и соответствующих им свёртками функций $F_i(E_j)$ и $\Phi(E, a)$.

В работе применяется стохастическая процедура, состоящая из цикла поиска из N шагов. На каждом из них формируется подвыборка объемом K , в которой ищется локальный минимум критерия качества. Найденный локальный минимум используется на очередном шаге глобального цикла. Длительность глобального цикла поиска регулируется так, чтобы осуществить выход в периферийную область стационарных значений критерия. В рамках алгоритма число нейтронов, активировавших таблетку в i -ом шаре, записывается в виде:

$$N_i = \int_{-\infty}^{\infty} F_i(E)\Phi(E, a) dE, \quad (2)$$

после чего это представление для N_i заменяется конечной суммой:

$$H_i = \sum_{j=1}^J F_{i,j} \Phi(E_j, a) \Delta E_j, \quad (3)$$

где E_j – набор энергий ($j=1, \dots, J$), $\Delta E_j = E_j - E_{j-1}$, $F_{i,j}=F_i(E, j)$. В результате приходим к системе из 5 уравнений регрессионного типа $N_i=H_i$, $i=1, \dots, 5$, статистический анализ которой дает возможность найти решение – искомые оценки $\hat{a}=(\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4)$ параметров $a=(a_1, a_2, a_3, a_4)$ распределения. Аналогичный алгоритм осуществляется при нахождении оценок погрешностей оценок.

Математическое моделирование

Алгоритм нахождения искомых оценок можно описать в виде следующей последовательности шагов:

1. Выбор начальных значений $a_{0,1}, a_{0,2}, a_{0,3}, a_{0,4}$ параметров a_1, a_2, a_3, a_4 .
2. Выбор параметров численного расчета
 - 2.1. N – количество итерационных шагов глобального поиска;
 K – количество шагов локального поиска на каждом шаге итерации;
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ – относительные радиусы поиска на шагах итерации по n .
 - 2.2. Построение критерия качества ($m=1, 2, 3, 4$ – индексы оцениваемых параметров):

$$\chi_{n,k} = \sum_{i=1}^I \left[\frac{1}{\Delta N_i} \left(N_i - \sum_{j=1}^J F_{i,j} \Phi(E_j, a_{n,m}) \Delta E_j \right) \right]^2. \quad (4)$$

3. Формирование глобального цикла по $n=1, \dots, N$.
 - 3.1. На каждом шаге цикла по n построить локальную подвыборку объемом K , в

которой для каждого из K значений критерия параметры $a_{n,m}$ задавать согласно формуле $a_{n,m} = a_{n-1,m} + \sigma_m(\text{rnd}(1)-0.5)$, $m=1, 2, 3, 4$, с использованием стандартного датчика $\text{rnd}(1)$ равномерно распределенных случайных величин на $(0;1)$. Таким образом, на каждом $(n+1)$ -ом шаге глобального счетчика стохастический поиск осуществляется внутри 4-куба, центр которого имеет координаты $\hat{a}=(\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4)$, при этом размеры ребер этого 4-куба составляют $a_{n,m}\sigma_m$, $m=1, 2, 3, 4$.

- 3.2. Найти в подвыборке локальный минимум среди K значений критерия $\chi_n = \min(\chi_{n,k})$, $k=1, \dots, K$.
- 3.3. В цикле по n найти глобальный минимум среди выборки из N значений критерия (4): $\chi_N = \min(\chi_n)$, $n=1, \dots, N$.
4. Присвоить значения оценок параметров: $\hat{a}_1 = \hat{a}_{N,1}$, $\hat{a}_2 = \hat{a}_{N,2}$, $\hat{a}_3 = \hat{a}_{N,3}$, $\hat{a}_4 = \hat{a}_{N,4}$.
5. Полученные значения оценок $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4$ являются по своей природе случайными величинами. Поэтому для их статистической аттестации необходимо предъявить оценку их погрешности $\Delta\hat{a}=(\Delta\hat{a}_1, \Delta\hat{a}_2, \Delta\hat{a}_3, \Delta\hat{a}_4)$. С этой целью рассмотрим вариацию уравнений: $\delta N_i = \delta H_i$, $i=1, \dots, 5$, где

$$\delta H_i = \sum_{j=1}^J F_{i,j} \left(\sum_{m=1}^4 \delta a_m \partial \Phi(E_j, a) / \partial a_m \right) \Delta E_j. \quad (5)$$

В результате приходим к системе из 5 уравнений регрессионного типа $\Delta N_i = \Delta H_i$, $i=1, \dots, 5$, и построим при $a_m = \hat{a}_m$, $m=1, \dots, 4$, критерий качества:

$$\eta_{n,k} = \sum_{i=1}^I \left[\frac{1}{\Delta N_i} \left(\Delta N_i - \sum_{j=1}^J F_{i,j} \left(\sum_{m=1}^4 \Delta a_m \partial \Phi(E_j, a) / \partial a_m \right) \Delta E_j \right) \right]^2. \quad (6)$$

6. Опираясь на найденные значения \hat{a}_m , $m=1, 2, 3, 4$, выполнить над критерием $\chi_{n,k}$ действия, описанные в п. 3 алгоритма, и найти глобальный минимум среди выборки из N значений критерия $\chi_N = \min(\chi_n)$, $n=1, \dots, N$, после чего присвоить найденные значения оценок погрешностей оценкам параметров: $\Delta\hat{a}_1 = \Delta\hat{a}_{N,1}$, $\Delta\hat{a}_2 = \Delta\hat{a}_{N,2}$, $\Delta\hat{a}_3 = \Delta\hat{a}_{N,3}$, $\Delta\hat{a}_4 = \Delta\hat{a}_{N,4}$.

Результаты вычислений и их обсуждение

Сформулирована модель математической обработки данных измерений наведенной в индии радиоактивности. На основании модели, основанной на минимизации функционала качества и нелинейных регрессионных уравнениях, с помощью стохастического рекуррентного алгоритма рассматривалась задача восстановления спектра нейтронов. Было создано программное средство для нахождения оценок. При проведении вычислений оказалось достаточным выбрать: границы циклов $N=1000$, $K=100$ и радиусы поиска $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$, равные 0,6. На старте вычислений было выбрано: $a_{0,1}=1800000$; $a_{0,2}=1.0$; $a_{0,3}=1.0$; $a_{0,4}=0.01$. Количество точек по энергетической шкале выбиралось на этапе расчета функций отклика $F_i(E_j)$ и составило 33, что видно на рис. 2.

На рис. 3 показана итерационная динамика критериев (4) и (6). Видно, что начиная с $n=200$ значение функционала χ_n остается неизменным. Это дает основание полагать оценки, определяемые после $n=200$, достаточно статистически обоснованными. Что касается реализаций функционала η_n , то они также после $n=400$ в основном флуктуируют вокруг одного среднего.

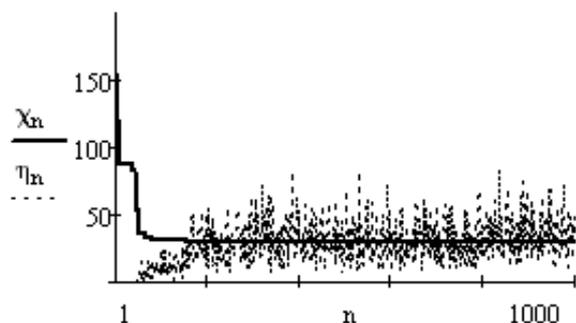


Рис. 3. Динамика минимума функционалов (4) и (6).

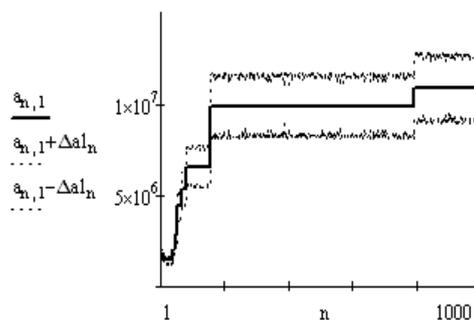


Рис. 4. Динамика оценок \hat{a}_1 и $\Delta \hat{a}_{n,1}$.

На рис. 4–7 показаны динамика искоемых оценок (указаны сплошной линией) и их погрешностей (указаны пунктирной линией). Пример эволюции оценки параметра \hat{a}_1 и оценки погрешности оценки параметра $\Delta \hat{a}_1$ приведен на рис. 4. Видно, что в результате итерационного процесса искоемые \hat{a}_1 и $\Delta \hat{a}_1$ оценки вышли на свои стационарные значения.

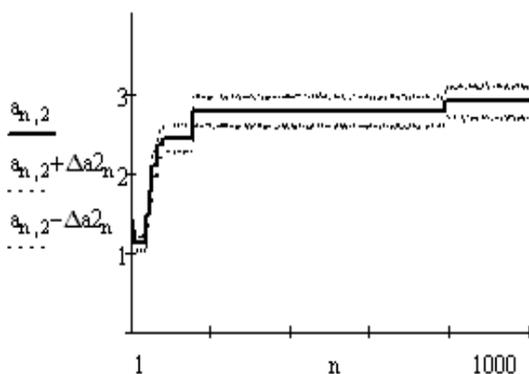


Рис. 5. Динамика оценок \hat{a}_2 и $\Delta \hat{a}_{n,2}$.

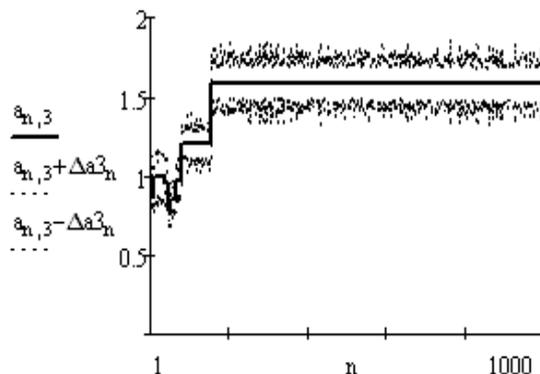


Рис. 6. Динамика оценок \hat{a}_3 и $\Delta \hat{a}_{n,3}$.

На рис. 5, 6 и 7 показаны аналогичные зависимости для оценок \hat{a}_1 , \hat{a}_2 , \hat{a}_3 и \hat{a}_4 соответственно. Из рис. 7 следует, что $\hat{a}_4=0$. Поскольку у спектрометра граница рабочего диапазона со стороны малых энергий порядка 0.01 МэВ, то заметный вклад гиперболического члена должен проявляться при более низких энергиях.

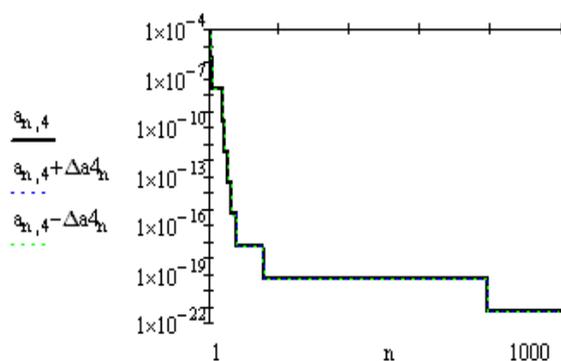


Рис. 7. Динамика оценок \hat{a}_4 и $\Delta \hat{a}_{N,4}$.

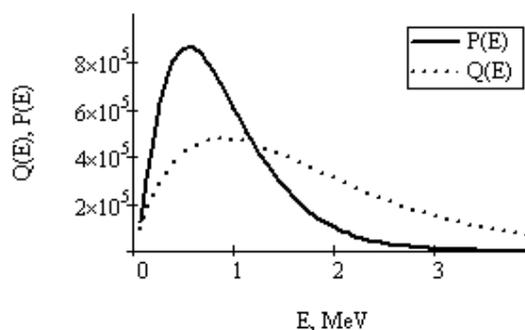


Рис. 8. Энергетические спектры нейтронов: исходный $Q(E)$ и восстановленный $P(E)$.

На рис. 8 приведены исходный спектр $Q(E)$, рассчитанный с помощью начальных значений параметров $a_{0,1}$, $a_{0,2}$, $a_{0,3}$, $a_{0,4}$, и результирующий спектр $P(E)$, полученный на основе найденных оценок \hat{a}_1 , \hat{a}_2 , \hat{a}_3 и \hat{a}_4 . Из рис. 8 видно, что максимум спектра нейтронов приходится на энергию 0.5 МэВ.

Итак, в результате получены следующие значения для оценок искомых величин:

Таблица 2

Основные результаты расчета

$a_{0,1}=1800000$	$a_{0,2}=1.0$	$a_{0,3}=1.0$	$a_{0,4}=0.010$
$\hat{a}_1=1086000 \pm 189000$	$\hat{a}_2=2.889 \pm 0.202$	$\hat{a}_3=1.579 \pm 0.102$	$\hat{a}_4=0.000$

Как видно из табл. 2 и рис. 8, подстановка найденных оценок параметров приводит к распределению, общий вид и положение максимума которого оказались близкими к ожидаемому. Практика минимизации функций с помощью программ, базирующихся на принципе градиентного спуска, показывает их нередкое зависание или авосты. Как видно из полученных результатов, стохастический метод лишен этого недостатка. Это явилось преимуществом для практики применения этого метода.

Выводы

Создан шаровой нейтронный спектрометр активационного типа, состоящий из 5-ти полиэтиленовых шаров, содержащих цилиндрическую таблетку из индия. Пучок электронов с энергией $E=12$ МэВ преобразовывался в танталовом (e, γ)-конверторе в гамма-излучение, которое попадало на свинцовый (γ, n)-конвертор. Нейтроны из этого конвертора падали на шары спектрометра. Так как размеры шаров разные, то в каждом из них активация индиевых таблеток была разной. После облучения из шаров были извлечены индиевые таблетки и каждая из них помещалась в гамма-спектрометр, где по интенсивности линии излучения 413 кэВ определялась степень активации таблетки 5 чисел, характеризующие активацию таблеток из 5-ти шаров. Рассматривая функцию, которая описывает спектр нейтронов и зависит от нескольких параметров, и, располагая функцией отклика i -ого шара, активация может быть представлена как свёртка этих двух функций. Поэтому для 5 экспериментальных значений N_i образуется 5 уравнений, из решения которых оценивается спектр нейтронов.

Предложена модель математической обработки данных измерений наведенной в индии радиоактивности. Построена модель, основанная на минимизации функционала качества и нелинейных регрессионных уравнениях.

С помощью стохастического рекуррентного алгоритма решена задача восстановления спектра нейтронов. Для использованной четырехпараметрической модели спектра типа распределения Максвелла получены оценки его параметров, а также оценки погрешностей оценок параметров.

Полученный в работе опыт может быть использован для оптимизации конструкции нейтронного спектрометра.

Список использованной литературы

1. Bramblett R. L., Ewing R. I., Bonner T. W. A New Type of Neutron Spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1960. № 9. P. 1–12.
2. Буки А. Ю., Каленик С. А., Семисалов И. Л. Опытный образец нейтронного спектрометра Боннера активационного типа. *Вестник Харьковского Национального Университета. Серия физическая: Ядра, частицы, поля*. 2012. Вып. 4(56), № 1025. С. 35–42.
3. Власов Н. А. Нейтроны. Москва : Наука, 1971. 551 с.
4. Рудик А. П. Оптимизация физических характеристик ядерных реакторов. Москва : Атомиздат, 1979. 280 с.

References

1. Bramblett, R. L., Ewing, R. I., & Bonner, T. W. (1960). A New Type of Neutron Spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. **9**, 1–12.
2. Buki, A. Yu., Kalenik, S. A., & Semisalov, I. L. (2012). Opyitnyiy obrazets neytronnogo spektrometra Bonnera aktivatsionnogo tipa. *Vestnik Harkovskogo Natsionalnogo Universiteta. Seriya fizicheskaya: Yadra, chastitsyi, polya*. **4(56)**, 1025, 35–42.
3. Vlasov, N. A. (1971). *Neytronyi*. Moskva : Nauka.
4. Rudik, A. P. (1979). *Optimizatsiya fizicheskikh harakteristik yadernyih reaktorov*. Moskva : Atomizdat.

Буки Александр Юрьевич – д.ф.-м.н., старший научный сотрудник НИЦ ХФТИ, e-mail: abuki@ukr.net.

Мазманишвили Александр Сергеевич – д.ф.-м.н., профессор, старший научный сотрудник НИЦ ХФТИ, e-mail: mazmanishvili@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0373-0626.