

А. Ю. БУКИ, А. С. МАЗМАНИШВИЛИ

СТОХАСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ ПЯТИШАРОВОГО СПЕКТРОМЕТРА БОННЕРА

Проаналізовано дані, які отримані при випробуванні кульового нейтронного спектрометра Боннера активаційного типу, що складається з п'яти поліетиленових куль діаметром від 90 мм до 245 мм. В якості матеріалу, що активується, використовувався індій. Представлені результати математичної обробки даних вимірювань наведеної в індії радіоактивності. Побудована модель, яка заснована на мінімізації функціонала якості і нелінійних регресійних рівняннях. За допомогою побудованого стохастичного рекурентного алгоритму вирішена задача відновлення спектра нейтронів. Для використаної чотирьохпараметричної моделі спектра типу розподілу Максвелла отримані оцінки його параметрів, а також оцінки похибок оцінок параметрів. Отриманий в роботі досвід може бути використаний для оптимізації конструкції нейтронного спектрометра.

Ключові слова: спектр потоку нейтронів, спектрометр Боннера, математичне моделювання, стохастичний рекурентний алгоритм, оцінка параметрів спектру, оцінка похибки оцінок параметрів спектру.

Проанализированы данные, полученные при испытании шарового нейтронного спектрометра Боннера активационного типа, состоящего из пяти полиэтиленовых шаров диаметром от 90 мм до 245 мм. В качестве активируемого материала использовался индий. Представлены результаты математической обработки данных измерений наведённой в Индии радиоактивности. Построена модель, основанная на минимизации функционала качества и нелинейных регрессионных уравнениях. С помощью построенного 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.

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

The data obtained in the testing of an activation type ball type neutron spectrometer consisting of five polyethylene balls with a diameter of 90 mm to 245 mm are analyzed. Indium was used as the activated material. The results of mathematical processing of measurement data of radioactivity induced in India are presented. A model based on minimization of the quality functional and nonlinear regression equations is constructed. The practice of minimizing functions with the help of programs based on the principle of gradient descent shows their frequent hanging or avovts arising when an arbitrary choice of the initial values of the variable parameters. Using the constructed stochastic recurrent algorithm, the problem of reconstructing the neutron spectrum is solved. For the four-parameter model of the Maxwell distribution type used, estimates of its parameters are obtained, as well as estimates of errors in the estimates of the parameters. The experience gained in the work can be used to optimize the design of a neutron spectrometer.

Keywords: a neutron flux spectrum, a Bonner spectrometer, the mathematical modeling, a stochastic recurrent algorithm, an estimation of spectrum parameters, an estimate of the error in estimating the spectral parameters.

Введение. В работе рассматривается применение стохастических расчетов для восстановления спектра нейтронов из измерений шарового спектрометра Боннера [1]. Используемые экспериментальные данные получены в работе [2] для потока нейтронов из конвертора, на который из ускорителя ЛУЭ-300 ХФТИ падал пучок электронов с энергией $E=12$ МэВ. В измерениях использовали пятишаровой нейтронный спектрометр активационного типа.

1. Экспериментальная установка и методика исследований. Пучок электронов, попадая в $e-\gamma-n$ конвертор, генерирует излучение нейтронов (Рис. 1). На расстоянии 1 м от конвертора расположены полиэтиленовые шары диаметром от 90 мм до 245 мм, в центрах каждого из которых находятся таблетки из индия. В результате облучения шаров нейтронами активируется содержащийся в таблетке основной изотоп природного 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 гамма-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.

2. Дифференциация нейтронов по энергии происходит при прохождении ими полиэтиленовых

шаров. Внутри шара нейтроны в результате рассеяния на ядрах замедляются, а когда энергия нейтрона достигает тепловой, то возрастает вероятность его поглощения веществом шара или индиевой таблеткой.

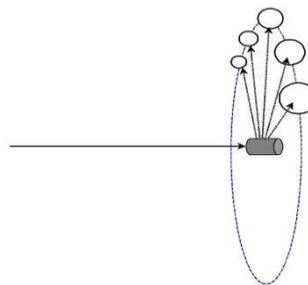


Рис.1 – Схема эксперимента. Сплошная линия – пучок электронов; цилиндр – конвертор; точечные стрелки – нейтроны из конвертора, попадающие в шары спектрометра (обозначенные кружками)

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 отепляться, не доходя до индиевой таблетки. Для нейтрона, ставшего тепловым, возрастает вероятность его поглощения на пути к таблетке и, соответственно, уменьшается вероятность активации этой таблетки. Для i -го шара зависимость вероятности активации таблетки от энергии нейтрона называется функцией отклика

$$F_i(E_j) = \frac{N_i(E_i)}{N_i(E_j)} S_i, \quad (1)$$

где $N_i(E_i)/N_i(E_j)$ – 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, S_i – площадь поперечного сечения i -го шара.

Количество активированных ядер в каждой из таблеток шаров спектрометра приведено в табл. 1. В ней указано: 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

На рис. 2 показаны, рассчитанные в работе [3], функции отклика шаров, которые использовались в эксперименте. По горизонтальной оси отложена энергия налетающих нейтронов E_j в логарифмическом масштабе.

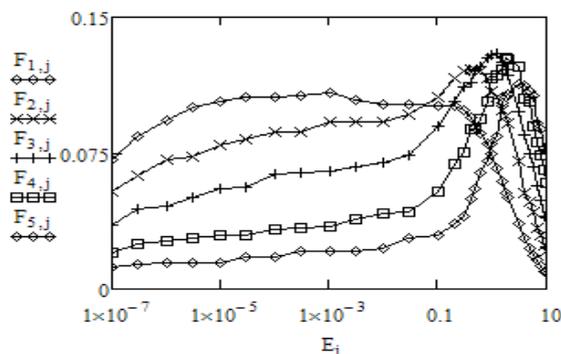


Рис. 2 – Функции отклика $F_{i,j}$

3. 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. Как показано в работе [2], рабочий диапазон рассматриваемого спектрометра 0.05–5 МэВ. При этих энергиях нейтронный поток из свинцового конвертора имеет вид пика с максимумом при энергии около 0.5 МэВ (см. [4]). Форма этого пика может быть описана функцией типа распределения Максвелла [4, 5]

$$\Phi(E, a) = a_1 E^{a_3} \exp(-a_2 E) + \frac{a_4}{E}. \quad (2)$$

В (2) к функции Максвелла добавлено слагаемое, описывающее вклад в спектр тех нейтронов, энергия которых значительно меньше, чем 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 количества активированных ядер в таблетках полученного в эксперименте. То есть, в нашем случае, 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 $\Phi(E, a)$.

Существует несколько методик восстановления параметров спектра (см. [5, 6]). В настоящей работе применяется стохастическая методика, применяемая в задачах обработки данных [6, 7]. Она представляет собой реализацию глобального 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, активированных таблетку в i -м шаре, записывается в виде

$$N_i = \int_0^{\infty} F_i(E) \Phi(E, a) dE, \quad (3)$$

после чего интегральное представление для N_i заменяется конечной суммой

$$H_i = \sum_{j=1}^J F_{i,j} \Phi(E_j, a) \Delta E_j, \quad (4)$$

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 набору из $I = 5$ уравнений регрессионного типа

$$N_i = H_i, \quad i=1, \dots, I, \quad (5)$$

статистический анализ которых 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 (2).

Аналогичная последовательность действий осуществляется при нахождении оценок погрешностей оценок.

4. 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 расчета:
 - 2.1. N – количество итерационных шагов глобального поиска;
 - 2.2. K – количество шагов локального поиска на каждом шаге итерации;
 - 2.3. $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ – относительные радиусы поиска на шагах глобальной итерации по n .
 - 2.4. Построение критерия качества

$$\chi_{n,k} = \sum_{i=1}^I \left(\frac{N_i - \sum_{j=1}^J F_{i,j} \Phi(E_j, a_{n,m}) \Delta E_j}{\Delta N_i} \right)^2, \quad (6)$$

где $m=1, 2, 3, 4$ – индексы оцениваемых параметров.

3. Сформировать глобальный цикл 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

$$a_{n,m} = a_{n-1,m} \sigma_m (0.5 + \text{rnd}(1)), \quad m=1, 2, 3, 4, \quad (7)$$

с использованием функции $\text{rnd}(1)$ – стандартный датчик равномерно распределенных случайных величин на $(0;1)$.

Таким образом, на каждом $(n+1)$ -м шаге глобального счетчика стохастический поиск осуществляется внутри 4-куба, центр которого имеет координаты $(a_{n,1}, a_{n,2}, a_{n,3}, a_{n,4})$, 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 (6).

$$\chi_n = \min(\chi_{n,k}), \quad k=1, \dots, K. \quad (8)$$

3.3. В цикле по n найти глобальный минимум среди выборки из N значений критерия (7):

$$\chi_N = \min(\chi_n), \quad n=1, \dots, N. \quad (9)$$

4. Присвоить значения оценок параметров:

$$\hat{a}_1 = \hat{a}_{N,1}, \quad \hat{a}_2 = \hat{a}_{N,2}, \quad \hat{a}_3 = \hat{a}_{N,3}, \quad \hat{a}_4 = \hat{a}_{N,4}. \quad (10)$$

Полученные значения оценок $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4$ являются по своей природе случайными величинами. Поэтому для их 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 (5)

$$\delta N_i = \delta H_i, \quad i=1, \dots, I, \quad (11)$$

где

$$\delta H_i = \sum_{j=1}^J F_{i,j} \left(\sum_{m=1}^4 \frac{\partial \Phi(E_j, a)}{\partial a_m} \delta a_m \right) \Delta E_j. \quad (12)$$

В результате приходим к набору из $I=5$ уравнений регрессионного типа

$$\Delta N_i = \Delta H_i, \quad i=1, \dots, I, \quad (13)$$

и построим критерий качества

$$\eta_{n,k} = \sum_{i=1}^I \left(\frac{\Delta N_i - \sum_{j=1}^J F_{i,j} \left(\sum_{m=1}^4 \frac{\partial \Phi(E_j, a)}{\partial a_m} \Delta a_m \right) \Delta E_j}{\Delta N_i} \right)^2 \quad (14)$$

при $a_m = \hat{a}_m$, $m=1, 2, 3, 4$.

5. Опираясь на найденные значения \hat{a}_m , $m=1, 2, 3, 4$, выполнить над критерием $\eta_{n,k}$ действия, описанные в п. 3 алгоритма, и найти глобальный минимум среди выборки из N значений критерия (14):

$$\eta_N = \min(\eta_n), \quad n=1, \dots, N \quad (15)$$

6. Присвоить найденные значения оценок погрешностей оценкам параметров:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{a}_1 &= \Delta \hat{a}_{N,1}, & \Delta \hat{a}_2 &= \Delta \hat{a}_{N,2}, \\ \Delta \hat{a}_3 &= \Delta \hat{a}_{N,3}, & \Delta \hat{a}_4 &= \Delta \hat{a}_{N,4}. \end{aligned} \quad (16)$$

5. Результаты вычислений и их обсуждение. В вычислительной среде MathCAD было создано программное средство для нахождения искомых оценок. При проведении вычислений оказалось достаточным выбрать: границы циклов $N=1000$, $K=100$ и относительные 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 $J=33$, что видно на рис. 2.

На рис. 3 показана итерационная динамика критериев (6) и (14). 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 значения функционала η_n , то они также после $n=400$ в основном флуктуируют вокруг одного среднего.

На рис. 4–7 показаны динамика искомых 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 искомые оценки \hat{a}_1 и $\Delta \hat{a}_1$ вышли на свои стационарные значения.

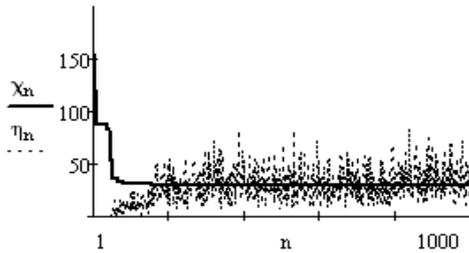


Рис. 3 – Динамика минимума функционалов (6) и (14)

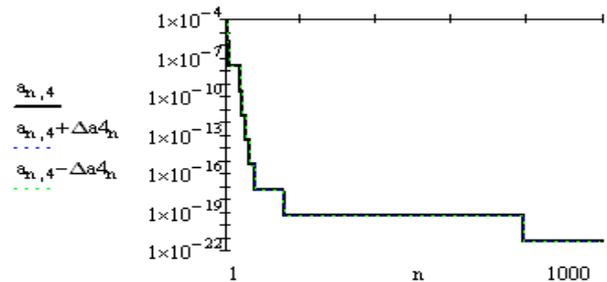


Рис. 7 – Динамика оценок \hat{a}_4 и $\Delta \hat{a}_4$

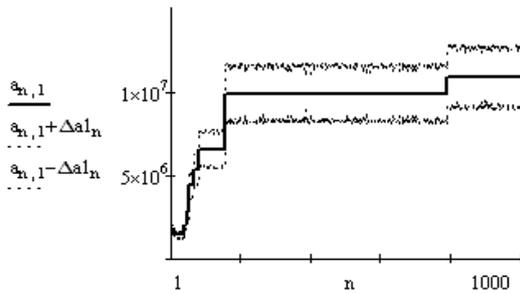


Рис. 4 – Динамика оценок \hat{a}_1 и $\Delta \hat{a}_1$

На рис. 5, рис. 6 и рис. 7 показаны аналогичные зависимости для оценок \hat{a}_2 , $\Delta \hat{a}_2$, \hat{a}_3 , $\Delta \hat{a}_3$ и \hat{a}_4 , $\Delta \hat{a}_4$ соответственно.

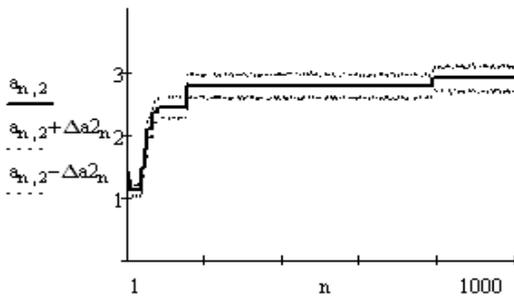


Рис. 5 – Динамика оценок \hat{a}_2 и $\Delta \hat{a}_2$

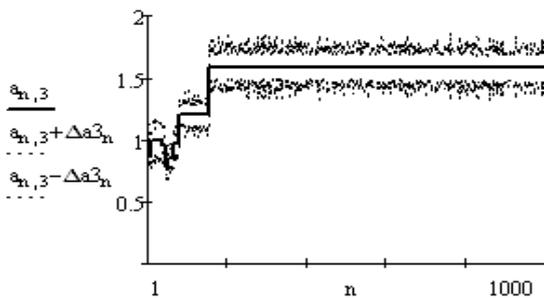


Рис. 6 – Динамика оценок \hat{a}_3 и $\Delta \hat{a}_3$

Из рис. 7 следует, что $\hat{a}_4 = 0$. Это можно объяснить тем, что у использовавшегося спектрометра граница рабочего диапазона со стороны малых энергий порядка 10^{-2} МэВ, а заметный вклад гиперболического члена должен проявляться при более низких энергиях, что и показывает результат расчёта программы.

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 , \hat{a}_4 . Из рис. 8 видно, что максимум спектра нейтронов приходится на энергию 0.5 МэВ.

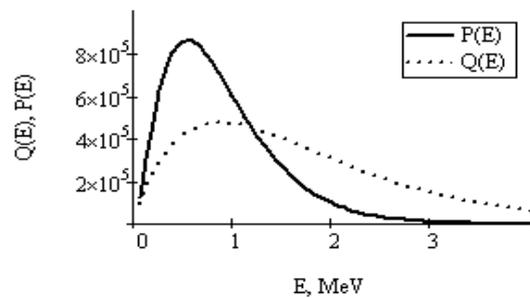


Рис. 8 – Исходный $Q(E)$ и восстановленный $P(E)$ энергетические спектры потока нейтронов

Итак, в результате расчетов получены значения для оценок искомых величин, представленные в табл. 2. Как видно из табл. 2, подстановка найденных оценок параметров приводит к распределению, общий вид и положение максимума которого оказались близкими к ожидаемому.

Таблица 2 – Результаты стохастического оценивания параметров нейтронного спектра

$a_{0,1}$	$a_{0,2}$	$a_{0,3}$	$a_{0,4}$
1800000	1.0	1.0	0.010
$\Delta \hat{a}_1$	$\Delta \hat{a}_2$	$\Delta \hat{a}_3$	$\Delta \hat{a}_4$
10860000 ± 1890000	2.889 ± 0.202	1.579 ± 0.102	0.000

Практика минимизации функций с помощью программ, базирующихся на принципе градиентного спуска, показывает их нередкое зависание или авосты, возникающие при произвольном выборе начальных значений варьируемых параметров [8]. Как видно из полученных результатов, стохастический метод лишен этого недостатка. Это явилось преимуществом для практики применения данного метода.

Выводы. Предложена и обоснована модель математической обработки данных измерений наведенной в индии радиоактивности. Использована 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 вариантов нейтронного спектрометра.

Список 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, no 9, pp. 1–12.
2. Буки А. Ю. Опытный образец нейтронного спектрометра Боннера активационного типа / А. Ю. Буки, С. А. Каленик, И. Л. Семисалов и др. // Журнал Харьковского Национального Университета, серия «Ядра, частицы, поля», 2012, вып. 4(56), № 1025 - С. 35–42.
3. Буки А. Ю. Простая модель транспорта нейтронов и её применение для расчёта функции отклика шарового нейтронного спектрометра / А. Ю. Буки, С. Ф. Каленик // Журнал Харьковского Национального Университета, серия «Ядра, частицы, поля». – 2012, вып. 1(53), № 991. – С. 23–27.
4. Власов Н.А. Нейтроны. М.: Наука, 1971. – 551 с.
5. Рудик А.П. Оптимизация физических характеристик ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1979. – 280 с.
6. Дрейзен В. Э. Спектрометрические измерения нейтронного излучения / В. Э. Дрейзен, С. Г. Емельянов, А. А. Гримов // ЮЗГУ. Курск. – 2011. – 316 с.
7. Граничин О. Н. Введение в методы стохастической оптимизации и оценивания. – СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2003. – 131 с.

8. Гурский Д. А. Вычисления в MathCad. Минск: Новое знание, 2003. – 814 с.

References (transliterated)

1. Bramblett R.L., Ewing R.I., Bonner T.W. A new type of Neutron spectrometer // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1960, no 9, pp. 1–12.
2. Buki A.Yu., ed. Opytnyi obrazec nejtronnogo spektrometra Bonnera aktivazionnogo tipa [An experimental sample of the activation type Bonner neutron spectrometer] *Gurnal Khar'kovskogo Natsional'nogo Universiteta* [Journal of the Kharkov Natuonale University. Series: Kernels, particles, fields]. *Seriya: Yadra, chastitsy, polya*. 2012, vol. 4(56), no. 1025, pp. 35–42.
3. Buki A.Yu., ed. Prostaya model' transporta neytronov i eye primeneniye dlya racheta funktsii otklika sharovogo neytronnogo spektrometra [A simple model of neutron transport and its application for calculating the response function of a spherical neutron spectrometer]. *Gurnal Khar'kovskogo Natsional'nogo Universiteta* [Journal of the Kharkov Natuonale University. Series: Kernels, particles, fields]. *Seriya: Yadra, chastitsy, polya*. 2012, vol. 1(53), no. 991, pp. 23–27.
4. Vlasov N.A. Neytrony [Neutrons]. Moscow, Nauka P., 1971. 551 p.
5. Rudik A.P. Optimisatsiya fisicheskikh harakteristik yadernyih reaktorov [Optimization of physical characteristics of nuclear reactors]. Moscow, Atomisdat Publ., 1979. 280 p.
6. Dreyzen V.E., ed. *Spektrometricheskie ismereniya neytronnogo izlucheniya* [Spectrometric measurements of neutron radiation]. YuSGU. Kursk, 2011. 316 p.
7. Granichin O. N. *Vvedeniye v metody stohasticheskoy optimizatsii i otsenivaniya* [Introduction to stochastic optimization and estimation methods]. SPb. S.-Peterburg's University Publ., 2003. 131 p.
8. Gurskiy D. A. *Vychisleniya v MathCad* [Calculation in MathCad]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2003. 814 p.

Поступила (received) 21.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Стохастичний аналіз вимірювань п'ятишарового спектрометра Боннера / О. Ю. Буки, О. С. Мазманішвілі // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 55 (1276). – С. 8–12. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0023.

Стохастический анализ измерений пятишарового спектрометра Боннера / А. Ю. Буки, А. С. Мазманішвілі // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 55 (1276). – С. 8–12. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0023.

Stochastic analysis of measurements of the fiveball Bonner spectrometer / A. Yu. Buki, O. S. Mazmanishvili // Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 55 (1276). – P. 8–12. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Буки Александр Юрьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории ННЦ ХФТИ, г. Харьков; тел.: (068) 918–73–65; e-mail: abuki@ukr.net.

Буки Олександр Юрійович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, начальник лабораторії ННЦ ХФТИ, м. Харків; тел.: (068) 918–73–65; e-mail: abuki@ukr.net.

Buki Alexandr Yuriyovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior staff scientist, head of laboratory, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkov; tel.: (068) 918–73–65; e-mail: abuki@ukr.net.

Мазманішвілі Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник ННЦ ХФТИ, г. Харьков; тел.: (067) 799–38–64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.

Мазманішвілі Олександр Сергійович – доктор фізико-математичних наук, професор, старший науковий співробітник ННЦ ХФТИ, м. Харків; тел.: (067) 799–38–64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.

Mazmanishvili Oleksandr Serhiyovych – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, senior staff scientist, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkov; tel.: (067) 799–38–64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.