



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С349а

Б-22

P16 - 12069

959 / 2-79

В.П.Бамблевский, В.В.Гречко

19 / III - 79

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ
В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ 10^{-8} - 15 МЭВ
ПО ПОКАЗАНИЯМ АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ
МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

Дубна 1978

P16 - 12069

В.П.Бамблевский, В.В.Гречко*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ
В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ 10^{-8} - 15 МЭВ
ПО ПОКАЗАНИЯМ АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ
МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

*Направлено на II Международную зимнюю школу
по физике защиты от излучений /Гаусиг, ГДР/*

* Институт ядерных исследований АН СССР, Москва

Бамблевский В.П., Гренко В.В.

P16 - 12069

Восстановление спектров нейтронов в интервале энергий $10^{-8} \div 15$ МэВ по показаниям активационных детекторов методом статистической регуляризации

Описана методика восстановления методом статистической регуляризации (МСР) спектров нейтронов в энергетическом интервале $10^{-8} \div 15$ МэВ одновременно по показаниям активационных детекторов нейтронов: тепловых, резонансных, пороговых и тепловых детекторов в шаровых полиэтиленовых замедлителях. Рассмотрен случай, когда априорная информация о спектре, за исключением информации о гладкости, практически неизвестна; исключена какого-либо рода интерполяция спектра. Полученные результаты подтверждают возможность надежного восстановления МСР спектров нейтронов в широком энергетическом интервале даже в том случае, когда показания активационных детекторов заданы со среднеквадратичной ошибкой 15%. Проведен анализ влияния количества используемых детекторов на результаты восстановления спектров, а также на значения флюенсов и мощностей эквивалентных и поглощенных доз нейтронов, определенных на основании восстановленных спектров.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Bamblevskij V.P., Grechko V.V.

P16 - 12069

Unfolding of Neutron Spectra in the Energy Range $10^{-8} \div 15$ MeV from Activation Detectors Data by the Statistical Regularization Method

Technique of neutron spectra unfolding in the energy range $10^{-8} \div 15$ MeV simultaneously from readings of the neutron activation detectors: thermal, resonance, threshold and thermal detectors in polyethylene sphere moderators by the statistical regularization method (MSR) is described. The case, when a priori information on spectrum except of the information on smoothing of the spectrum is practically unknown, is considered; any kind of spectrum interpolation is expelled. Obtained results confirm the possibility of reliable unfolding of neutron spectra in a wide energy range by the MSR even when data from the activation detectors are given with the 15% standard deviation. The influence of a number of detectors used on the results of unfolding neutron spectra is analyzed, as well as those on meanings of fluences, doses rates equivalent and absorbed doses rates.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna 1978

В настоящее время измерения спектров нейтронов активационными детекторами проводятся практически независимо друг от друга тремя группами детекторов^{/1-3/}. В тепловой области /до $0,5$ эВ/ - детекторами, сечения активации которых подчиняются закону $1/v$ или имеют резонанс. В области энергий нейтронов E от $1,5$ эВ до нескольких кэВ применяются резонансные детекторы, у которых сечения активации имеют сильные резонансы. Наконец, при $E \geq 0,5$ МэВ используются пороговые детекторы с резко выраженными энергетическими порогами в сечениях активации. Причем по показаниям пороговых детекторов достаточно надежную информацию о спектре можно получить при $E \geq 1 \div 2$ МэВ^{/2,12/}. Между указанными областями энергий спектр тем или иным образом интерполируется^{/2,3/}.

В работах^{/4,5/} спектры восстанавливали по показаниям детекторов тепловых нейтронов из индия в полиэтиленовых шаровых замедлителях, и одного порогового детектора. Однако существует большая неопределенность в спектрах, восстановленных по показаниям такого небольшого набора детекторов.

В данной работе описана методика восстановления спектров нейтронов в энергетическом интервале от 10^{-8} до 15 МэВ одновременно по показаниям тепловых, резонансных, пороговых детекторов и активационных детекторов тепловых нейтронов в шаровых полиэтиленовых замедлителях.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Искомый спектр $\phi(E)$ будем определять из решения системы интегральных уравнений

$$Q_i + \epsilon_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \phi(E) R_i(E) dE \quad i=1,2,\dots,m, \quad /1/$$

где Q_i - величины, определяемые на основе экспериментальных результатов; ϵ_i - погрешность в определении Q_i ; R_i - ядро i -го уравнения; $E_{\min} = 10^{-8} \text{ МэВ}$, $E_{\max} = 15 \text{ МэВ}$; m - число уравнений; в данной работе максимальное число $m = 20$.

При численном решении системы /1/ ее необходимо свести к системе линейных алгебраических уравнений

$$Q_i + \epsilon_i = \sum_{j=1}^n \phi(E_j) R_i(E_j) \Delta E_j \quad i = 1,2,\dots,m. \quad /2/$$

Опишем смысл каждого уравнения /1/. Для облученного в пучке нейтронов детектора тепловых нейтронов можно записать:

$$Q_i + \epsilon_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \phi(E) \{1 - \exp[-\sigma_1(E)n]\} \eta(E - E_{Cd}) dE, \quad /3/$$

где Q_i - разность с необходимыми поправками ^{/1-3/} активностей насыщения детектора единичной площади, облученного в кадмии и без него; $\sigma_1(E)$ - микроскопическое сечение реакции активации; n - число ядер на единице площади детектора; E_{Cd} - граничная кадмиевая энергия ^{/2/}; $\eta(x)$ - функция, принимающая значения

$$\eta(x) = 1 \quad \text{при } x \leq 0, \\ \eta(x) = 0 \quad \text{при } x > 0.$$

Сечения активации резонансных детекторов имеют очень острые максимумы, поэтому прямое сведение уравнений /1/ к уравнениям /2/ в этом случае практически невозможно. Набором резонансных детекторов в области энергий $1,5 \text{ эВ} \div 2,85 \text{ кэВ}$ можно определить ^{/1-3/} значения $\phi(E_r^k) / E_r^k$ - энергия резонанса в сечении реакции активации K -го резонансного детектора/. По значениям $\phi(E_r^k)$ можно установить зависимость

$$\phi(E) = f(E) \quad 1,5 \text{ эВ} \leq E \leq 2,85 \text{ кэВ}. \quad /4/$$

Часто $f(E) \sim 1/E^\alpha$. Используя /4/, вычислим

$$Q_i = \int_{E_i^1}^{E_i^2} f(E) dE \quad i = 2,3,4,\dots,7, \quad /5/$$

где E_i^1 и E_i^2 - соответственно границы следующих энергетических интервалов: $1,5 \div 10$; $1,5 \div 100$; $1,5 \div 2850$; $10 \div 100$; $10 \div 2850$ и $100 \div 2850 \text{ эВ}$.

На основании /5/ получим следующие шесть уравнений системы /1/

$$Q_i + \epsilon_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \phi(E) [\eta(E - E_i^2) - \eta(E - E_i^1)] dE \quad i = 2,3,\dots,7. \quad /6/$$

Таким образом, в /6/ Q_i - значение плотности потока нейтронов в i -ом энергетическом интервале $E_i^1 + E_i^2$, а $R_i(E)$ равно единице в этом интервале и равно нулю вне его.

По показаниям пороговых детекторов можно сразу написать следующие семь уравнений системы /1/

$$Q_i + \epsilon_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \phi(E) \sigma_i(E) dE \quad i = 8,9,\dots,14, \quad /7/$$

где Q_i - скорость активации i -го порогового детектора, отнесенная к одному ядру изотопа, $R_i(E) \equiv \sigma_i(E)$ - энергетическая зависимость сечения активации i -го порогового детектора.

Для детекторов тепловых нейтронов, облученных в полиэтиленовых замедлителях диаметрами 2, 3, 5, 8, 10 и 12 дюймов, запишем еще шесть уравнений системы /1/

$$Q_i + \epsilon_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \phi(E) \sigma_i(E) dE \quad i = 15,16,\dots,20, \quad /8/$$

где Q_i - скорость счета от i -го детектора, а $R_i(E) \equiv \sigma_i(E)$ - чувствительность i -го детектора.

Таким образом, восстановление спектра $\phi(E)$ сводится к решению тем или иным методом системы /1/, состоящей в нашем случае из /3/, /6/, /7/ и /8/. Для восстановления спектра применен метод статистической регуляризации /МСР/^{6,7/}. Структура используемой программы описана в^{8/}. Эффективность применения этого метода для восстановления спектров нейтронов показана, например, в^{9,10/}. Кроме надежного метода восстановления

необходимо, во-первых, чтобы особенности /например, пороги, максимумы/ функций чувствительностей $R_i(E)$ были равномерно распределены во всем энергетическом интервале; во-вторых, чтобы погрешности левых частей $1/\epsilon_i$ были минимальны. В немалой степени на величину ϵ_i влияет точность знания $R_i(E)$.

В данной работе рассмотрен следующий набор детекторов. В качестве теплового детектора можно уверенно рекомендовать детектор из золота, который принято считать образцовым для абсолютных измерений. Для более точного определения $f(E)$ из /4/ необходимо использовать максимальное количество тех резонансных детекторов, параметры которых хорошо известны /1-3/. В качестве пороговых детекторов, сечения активации которых равномерно распределены в области энергий $E > 0,1$ МэВ и хорошо изучены, выбраны детекторы следующих пороговых реакций: $^{103}\text{Rh}(n,n)^{103\text{m}}\text{Rh}$, $^{115}\text{In}(n,n)^{115\text{m}}\text{In}$, $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$, $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$, $^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$, $^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$. Результаты измерений или расчетов функций чувствительностей тепловых детекторов в шаровых замедлителях имеются во многих работах: нами эти значения взяты из /11/.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ "РАСЧЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ"

В "расчетных экспериментах" по заданному спектру и известным $R_i(E)$ вычисляли соответствующие значения Q_i , а затем по ним восстанавливали исходный спектр:

$$\phi_t(E) = k_1 E \exp(-E/a_1) + k_2/E^\alpha + k_3 \exp(-E/a_2) \text{sh}(\sqrt{a_3 E}) + \Delta(E), \quad /9/$$

где $k_1, k_2, k_3, a_1, a_2, a_3$ - постоянные коэффициенты, а $\Delta(E)$ - функция, устремляющая плавно к нулю компоненту k_2/E^α . С целью более точного перехода от /1/ к /2/ в данной работе увеличена, по сравнению с /4,5,10/, в 1,6 раза плотность точек E_j , в которых определяется спектр:

$$E_j = E_{\text{min}} 10^{0,125(j-1)} \quad j = 1, 2, \dots, 74. \quad /10/$$

Это необходимо, так как и функции чувствительности, например, сечения пороговых реакций, и форма спектра могут существенно изменяться.

Результат восстановления исходного спектра /9/ по вычисленным из /3,6,7,8/ для случая $\epsilon_i \equiv 0$ представлен на рис. 1. Видно, что восстановленный спектр $\phi_u(E)$ практически не отличается от заданного $\phi_t(E)$ во всем энергетическом интервале, за исключением тепловой области. Однако и в этой области значения потоков тепловых нейтронов, вычисленных по ϕ_t и ϕ_u , отличаются менее чем на 3%. Спектр ϕ_u , восстановленный лишь по показаниям детекторов в замедлителях диаметрами 2,3,5, 10 и 12 дюймов, сильно отличается от исходного ϕ_t и принимает даже нулевые значения /рис. 2/. Добавление к пяти замедлителям одного порогового детектора улучшает восстановленный спектр, но по-прежнему остаются довольно большим коридор неопределенности и нулевые значения в некоторых точках /рис. 3/. Таким образом, увеличение количества уравнений, или, что то же самое, увеличение числа детекторов, с помощью которых определяется спектр нейтронов, приводит к существенному улучшению и повышению надежности результатов восстановления. Указанной методикой можно без заметного ухудшения восстанавливать спектры без замедлителей большого диаметра /рис. 4/, что становится особенно важным при измерениях в нейтронных пучках диаметром менее 20 см.

Для анализа влияния погрешностей восстанавливали $\phi_t(E)$ по Q'_i , отличные от вычисленных Q_i на величину $\epsilon_i = 0,15 Q_i u_i$; значения u_i взяты из таблиц случайных чисел, распределенных по нормальному закону /13/. При этом максимальное отклонение Q'_i от Q_i достигало $\pm 28\%$. Результат восстановления $\phi_t(E)$ по Q'_i полученный из решения /3,6,7,8/, представлен на рис. 5. Кроме выводов, аналогичных для случая $\epsilon_i \equiv 0$, можно сделать следующие. Для более надежного восстановления спектра в области энергий $10^{-3} - 10^{-1}$ МэВ необходимо ввести детектор, имеющий особенность в ходе чувствительности в этой области. По характеру рассматриваемых в этой работе детекторов такими могут быть, например, трековые или активационные детекторы в борных фильтрах /3/. Добавление детектора, имеющего зависимость чувствительности,

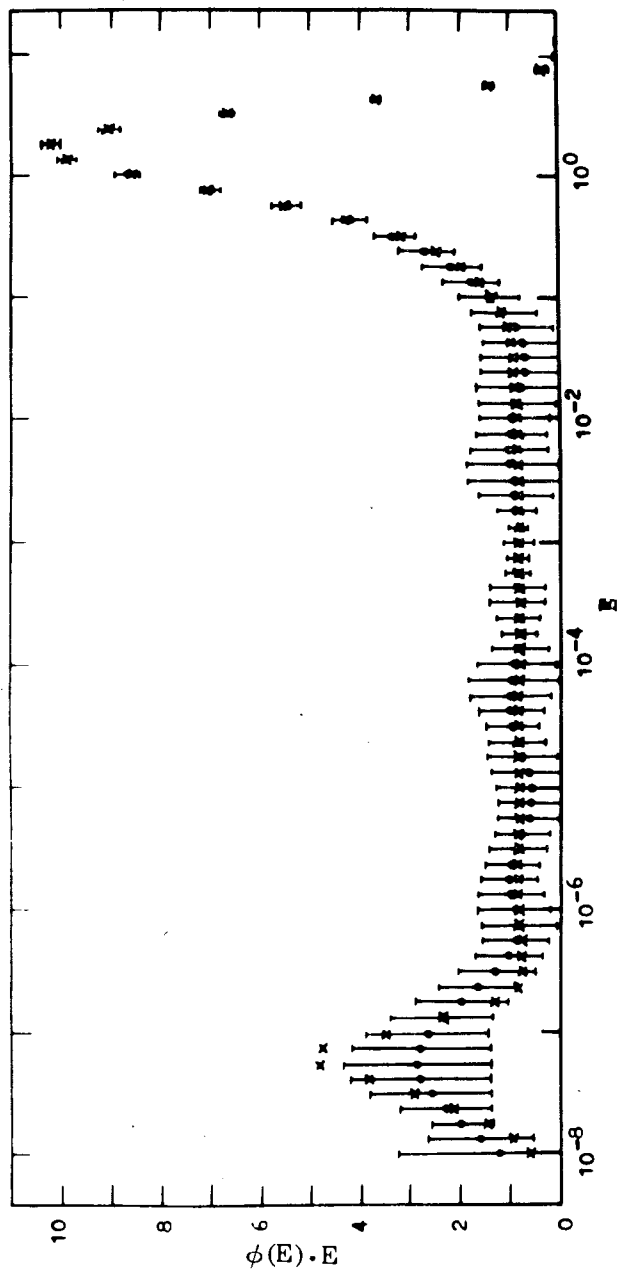


Рис. 1. Результат восстановления заданного спектра $\phi_t(E)$ по двадцати уравнениям /3,6,7,8/ для случая $\epsilon_i \equiv 0$.
 \times - $\phi_t(E)$, \circ - восстановленный спектр ϕ_u .

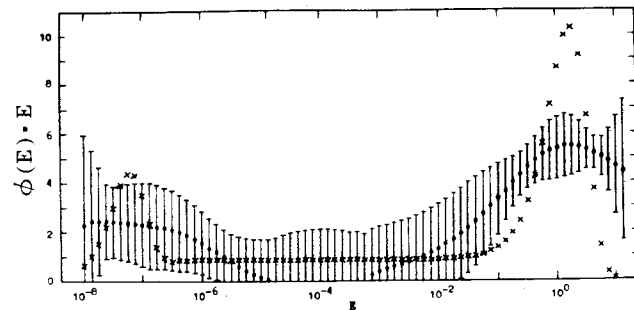


Рис. 2. Результат восстановления $\phi_t(E)$ с помощью пяти детекторов в замедлителях диаметрами 2,3,5,10,12 дюймов, $\epsilon_i \equiv 0$; \times - $\phi_t(E)$; \circ - $\phi_u(E)$.

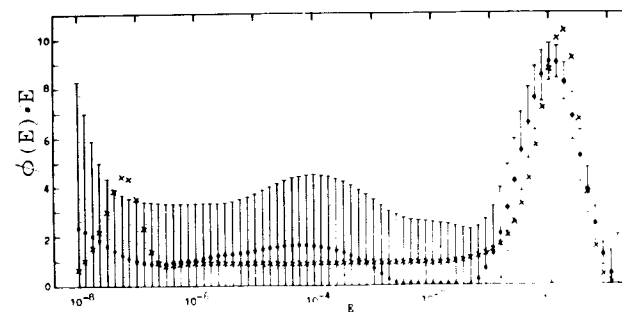


Рис. 3. Восстановление $\phi_t(E)$ с помощью пяти детекторов в замедлителях диаметрами 2,3,5,10 и 12 дюймов и одного порогового детектора, $\epsilon_i \equiv 0$; \times - $\phi_t(E)$; \circ - $\phi_u(E)$.

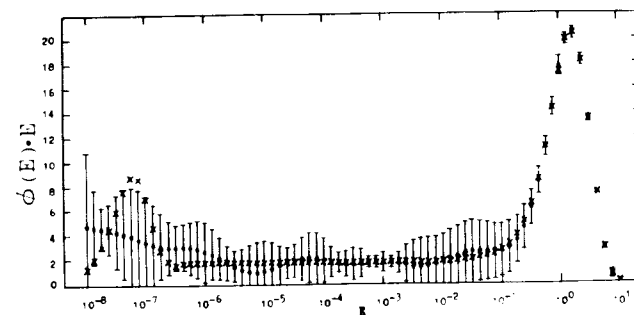


Рис. 4. То же, что и на рис. 1, но при восстановлении исключены показания детекторов в замедлителях диаметрами 8,10 и 12 дюймов.

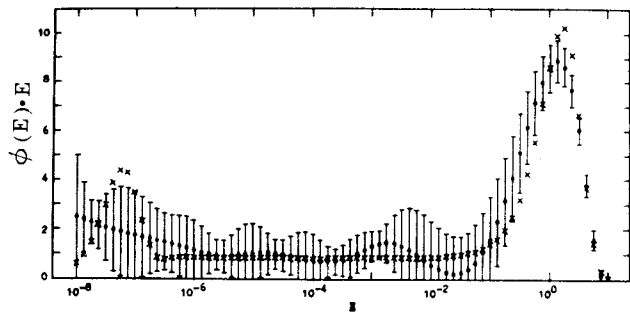


Рис. 5. Результат восстановления заданного спектра $\phi_t(E)$ по двадцати уравнениям /3,6,7,8/ при внесении в Q_i среднеквадратичной погрешности $\epsilon = 15\%$; \times - $\phi_t(E)$, \circ - восстановленный спектр $\phi_u(E)$.

сходную с чувствительностью какого-либо рассмотренного здесь детектора, уже не улучшает восстановленный спектр.

Вычисляемые по восстановленному спектру такие интегральные величины, как плотности потоков нейтронов, поглощенные и эквивалентные дозы оказываются гораздо менее чувствительны к погрешностям ϵ_i , чем сам восстанавливаемый спектр. Соответствующие разницы этих величин между вычисленными по заданному спектру и восстановленному по описанной методике, т.е. решением /3,6,7,8/, не превышают 2%.

В данной работе, как следует из /10/, значения E_j выбраны таким образом, что $\ln(E_{j+1}/E_j) \approx \text{const}$, т.е. разбиение по энергии равномерно в логарифмическом масштабе. Однако в программе предусмотрена возможность выбора произвольного разбиения, вид которого в каждом конкретном случае следует выбирать из условия минимальности погрешности перехода от /1/ к /2/.

В заключение можно утверждать, что, восстанавливая методом статистической регуляризации спектр нейтронов одновременно по показаниям детекторов тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов, можно получить вполне удовлетворительные результаты для целей дозиметрии и физики защиты. Очевидно, что такими детекторами могут быть не обязательно активационные детекторы.

Авторы благодарят М.М.Комочкова за постоянное внимание к работе и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломакин С.С., Петров В.И., Самойлов П.С. Радиометрия нейтронов активационным методом. Атомиздат, М., 1975.
2. Лапенас А.А. Измерение спектров нейтронов активационным методом. "Зинатне", Рига, 1975.
3. Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С., Тихонов Е.Г. Активационные методы спектрометрии нейтронов. Атомиздат, М., 1976.
4. Aleinikov V.E. et al. Proceedings of IVth International Congress, IRPA; v.3, p.831; Paris, 20-30 April, 1977.
5. Алейников В.Е., Бамблевский В.П., Череватенко Е.П. ОИЯИ, Р16-9123, Дубна, 1975.
6. Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М.С. УФН, 1970, 102, с.345.
7. Туровцева Л.С., Турчин В.Ф. Препринт ИМП №30, М., 1971.
8. Туровцева Л.С. Решение обратных некорректных задач методом статистической регуляризации. Препринт ИПМ, М., 1975.
9. Алейников В.Е., Бамблевский В.П., Комочков М.М. АЭ, 1977, т.42, вып. 2, с.129.
10. Алейников В.Е., Гердт В.П., Комочков М.М. В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.2, с.240.
11. Алейников В.Е., Гердт В.П., Комочков М.М. Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes, IAEA, Vienna, 1973, v.1, p.31.
12. Борисов Г.А. и др. В сб.: Труды II Всесоюзного совещания "Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. ВНИИФТРИ, М., 1974, т.2, с.106.
13. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. "Наука", М., 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 декабря 1978 года.