

УДК 621.039.573

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ РЕАКТОРА ИБР-2

В.Ф.Переседов, А.Д.Рогов

С целью совершенствования расчетных методик многоэлементного нейтронного активационного анализа смоделированы энергетические спектры для трех облучательных каналов реактора ИБР-2. Проведен анализ смоделированных энергетических спектров резонансных нейтронов. На основе результатов анализа рассчитаны коэффициенты перенормировки резонансных интегралов для реального спектра резонансных нейтронов в одном из облучательных каналов реактора ИБР-2.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ.

Simulation and Analysis of Neutron Energy Spectra from Irradiation Channels of the Reactor IBR-2

V.F.Peresedov, A.D.Rogov

With the purpose of perfecting neutron activation analysis calculation methods, neutron energy spectra for three irradiation channels were simulated and analysed. On the basis of the obtained results, the renormalization factors were obtained for resonance integrals of the real resonance neutron spectrum from one of the irradiation channels.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Нейтронный активационный анализ (НАА) является мощным аналитическим методом и широко используется для решения разных научных и прикладных задач, например, в экологии, геологии, геохимии и т.д. Для определения концентраций элементов в образцах с помощью НАА часто используются многоэлементные эталоны (Standard Reference Materials —SRMs), содержащие известные с хорошей точностью макро- и микроколичества некоторых химических элементов, представляющих интерес для различных прикладных исследований. Определение концентраций элементов с помощью эталона — удобная процедура, т.к. позволяет обойтись без использования сечений активации нуклидов нейтронами. Основным недостатком метода является то, что в большинстве доступных эталонов концентрации элементов не оптимальны (избыточные концентрации одних и недостаточные — других элементов). Это обстоятельство иногда не позволяет определять концентрации ряда элементов.

Поэтому методика расчета концентраций элементов с использованием сечений активации нуклидов и величин потоков тепловых и резонансных нейтронов является также важной, позволяющей рассчитывать концентрации не определяемых по

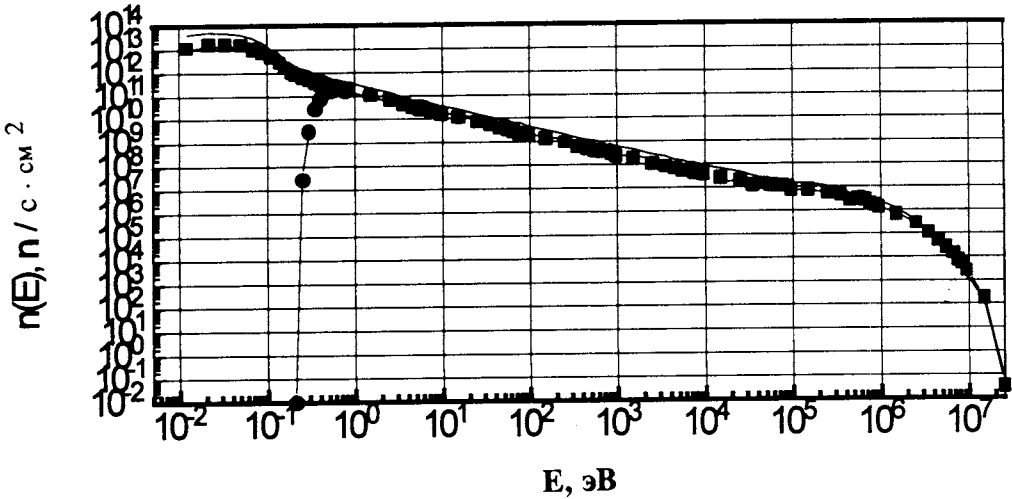


Рис.1. Энергетические спектры нейтронов в каналах ОК1 и ОК3 реактора ИБР-2. Сплошная кривая — спектр для ОК3, символы — для ОК1. В интервале $E < 0,55$ эВ — спектры тепловых нейтронов в ОК1 без и с экраном из Cd

эталону элементов. В прикладных исследованиях, проводимых в ЛНФ с помощью НАА, обычно используются обе методики. Спектр нейтронов в облучательных каналах импульсного реактора на быстрых нейтронах ИБР-2 содержит три компоненты нейтронов — тепловую, резонансную и быструю. Для НАА наиболее важными являются тепловые и резонансные нейтроны, поскольку большая часть нуклидов активируется ими.

В настоящее время в ЛНФ используется программа MNCР-4а с библиотекой нейтронных данных DLC105с, позволяющая вести комплексные монтекарловские расчеты спектров нейтронов в каналах реактора [1]. Для повышения надежности расчетных методик НАА моделирование энергетических спектров нейтронов в облучательных каналах является необходимой процедурой, поскольку позволяет сравнить экспериментально измеренные параметры спектров нейтронов с расчетом. С этой целью смоделированы спектры нейтронов: для двух горизонтальных пневматических каналов ОК1—ОК2, расположенных у гребенчатого замедлителя, и для одного (ОК3) из двух одинаковых наклонных каналов, находящихся в водяном замедлителе за подвижным отражателем (рис.1). Анализ спектров резонансных нейтронов для различных интервалов энергий показывает, что они описываются распределением

$$\varphi'(E) = \Phi_e \cdot 1 \text{ eV}^\alpha / E^{1+\alpha},$$

Таблица 1. Значения параметров спектров резонансных нейтронов в ОК1—ОК3 для разных энергетических интервалов

Номер канала	Интервал энергии, эВ	$\Phi_e \cdot 10^{11}$, н/с · см ²	α	χ^2
ОК1	$E = 1 + 10^1$	$1,33 \pm 0,04$	$-0,123 \pm 0,018$	3,90
ОК1	$E = 1 + 10^2$	$1,38 \pm 0,04$	$-0,076 \pm 0,009$	3,16
ОК1	$E = 1 + 10^3$	$1,36 \pm 0,03$	$-0,085 \pm 0,005$	2,44
ОК1	$E = 1 + 10^3$	$1,15 \pm 0,05 *$	$-0,100 \pm 0,007 *$	4,39
ОК1	$E = 1 + 10^4$	$1,33 \pm 0,03$	$-0,092 \pm 0,004$	2,58
ОК1	$E = 1 + 10^4$	$1,16 \pm 0,05 *$	$-0,101 \pm 0,006 *$	4,57
ОК1	$E = 1 + 10^5$	$1,06 \pm 0,03$	$-0,143 \pm 0,003$	13,0
ОК2	$E = 1 + 10^1$	$1,33 \pm 0,05$	$-0,018 \pm 0,016$	0,84
ОК2	$E = 1 + 10^2$	$1,24 \pm 0,03$	$-0,061 \pm 0,009$	2,05
ОК2	$E = 1 + 10^3$	$1,16 \pm 0,03$	$-0,089 \pm 0,005$	1,90
ОК2	$E = 1 + 10^4$	$1,15 \pm 0,03$	$-0,096 \pm 0,003$	4,77
ОК2	$E = 1 + 10^5$	$0,80 \pm 0,03$	$-0,168 \pm 0,003$	15,0
ОК3	$E = 1 + 10^1$	$3,15 \pm 0,05$	$-0,048 \pm 0,022$	0,67
ОК3	$E = 1 + 10^2$	$3,03 \pm 0,08$	$-0,093 \pm 0,009$	0,84
ОК3	$E = 1 + 10^3$	$2,98 \pm 0,06$	$-0,100 \pm 0,005$	0,82
ОК3	$E = 1 + 10^4$	$2,88 \pm 0,05$	$-0,112 \pm 0,004$	1,28
ОК3	$E = 1 + 10^5$	$2,58 \pm 0,04$	$-0,139 \pm 0,003$	5,30

где $\phi'(E)$ и Φ_e — потоки резонансных нейтронов для единичного интервала энергий нейтронов и для единичного интервала функции $\{1 \cdot \text{эВ}^\alpha \cdot (-E^{-\alpha}/\alpha)\}$ при $E = 1$ эВ соответственно, α — параметр, описывающий отличие спектра резонансных нейтронов от вида $1/E$.

Значения параметра α (для интервалов $E = 1 + 10^4$ и $E = 1 + 10^5$ эВ, в пределах которых активируется основная часть нуклидов), полученные фитированием смоделированных спектров для каналов ОК1—ОК3 отрицательны и лежат в интервале от

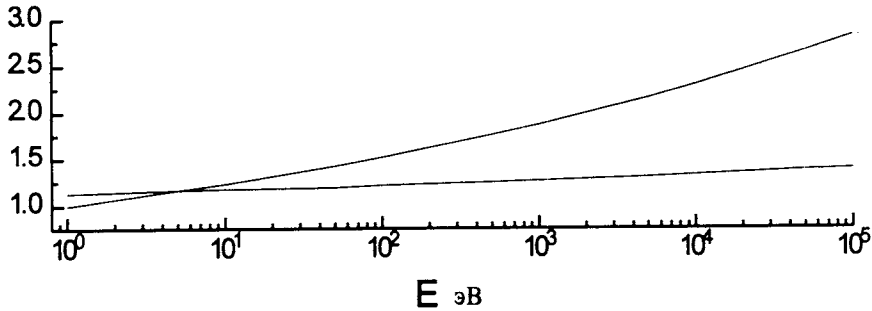


Рис.2. Коэффициенты перенормировки $K = I_0(\alpha)/I_0$ для малого — 0,5 (нижняя кривая) и большого — 500 значений $Q_0 = I_0/\sigma_0$ (верхняя кривая) для $\alpha = -0,1$

–0,168 до –0,085 (табл.1). Для фитов спектров резонансных нейтронов в интервале энергий $E = 1 \div 10^5$ эВ значения χ^2 больше, чем для интервалов с меньшей верхней энергией, что связано с вкладом быстрых нейтронов при $E \geq 10^5$ эВ. За счет этого форма спектров резонансных нейтронов при $E \geq 10^5$ эВ отличается от вида $1/E^{1+\alpha}$. Параметры экспериментально измеренного с помощью методики резонансных индикаторов спектра резонансных нейтронов ОК1 (с кадмиевым экраном) также приведены в табл.1 (значения Φ_e и α отмечены знаком «*»). Сравнение параметров смоделированного и измеренного спектров позволяет говорить об их согласии в пределах 15%. Отрицательная величина параметра α — свидетельство того, что спектры резонансных нейтронов — более жесткие по сравнению с $1/E$ -распределением.

Это обстоятельство нужно учитывать в расчетных методиках определения концентраций, поскольку для достаточно больших значений α ($\alpha \approx -0,1$ является таким) нельзя использовать значения резонансных интегралов I_0 , которые определены для стандартного $1/E$ -спектра ($\alpha = 0$). Для значения $\alpha \approx -0,1$, полученного на основе результатов измерений, для нуклидов, у которых велики энергии эффективного одиночного резонанса $E_{r,eff}(\alpha)$, значения резонансных интегралов $I_0(\alpha)$ существенно больше значений I_0 . Алгоритм перенормировки I_0 для реального $1/E^{1+\alpha}$ -спектра резонансных нейтронов в приближении эффективного одиночного резонанса и значения $E_{r,eff}$ для наиболее важных в НАА нуклидов содержатся в статьях [2,3]. В данной работе в соответствии с алгоритмом [2] рассчитаны коэффициенты перенормировки резонансных интегралов $K = I_0(\alpha)/I_0 = f(Q_0, E_{r,eff}(\alpha), \alpha)$ — для реального спектра резонансных нейтронов в канале ОК1 (рис.2).

Таблица 2. Физические параметры облучательных каналов ОК1—ОК3

Номер канала	$\Phi_{th} \cdot 10^{12}$, н/с · см ² , $E = 0 + 0,55$ эВ	$\Phi_{res} \cdot 10^{12}$, н/с · см ² , $E = 0,55 + 10^5$ эВ	$\Phi_{fast} \cdot 10^{12}$, н/с · см ² , $E = 0,1 + 25$ МэВ	$\langle E_{fast} \rangle$, МэВ, $E = 0,1 + 25$ МэВ
ОК1 (без Cd)	1,58	3,34	4,34	0,91
ОК1 (с Cd)	0,023	3,31	4,32	0,88
ОК2 (без Cd)	1,23	2,96	4,10	0,92
ОК3 (без Cd)	4,24	7,50	7,70	0,76

Для нуклидов с большими $E_{r, eff}(\alpha)$ перенормировки I_0 существенны, величины K для них — в интервале значений 1,4—3. Использование скорректированных с учетом реального спектра резонансных нейтронов значений $I_0(\alpha)$ позволяет с помощью расчетных методик надежно определять концентрации отсутствующих в эталоне элементов.

Интегрируя смоделированные спектры в соответствующих интервалах энергий нейтронов, можно оценить расчетные значения плотностей потоков тепловых, резонансных и быстрых нейтронов для каналов ОК1—ОК3 (табл.2). Для ОК1 (без Cd) и ОК2 (без Cd) значения Φ_{th} , Φ_{res} и Φ_{fast} близки. Максимальное отличие в потоках не более 25%. В канале ОК3 потоки нейтронов выше примерно вдвое. Средние энергии быстрых нейтронов $\langle E_{fast} \rangle$ в ОК1—ОК3 (колонка 5) меньше средней энергии нейтронов спектра деления — ≈ 2 МэВ: что важно, т.к. сечения пороговых реакций на быстрых нейтронах приводятся в литературе для спектра деления.

Поскольку реальный спектр быстрых нейтронов в каналах ОК1—ОК3 мягче спектра деления, то при использовании расчетных методик НАА для реакций на быстрых нейтронах нужно брать величины сечений, перенормированных с учетом реального спектра быстрых нейтронов. Реальные сечения активации нуклидов на быстрых нейтронах нужны также для надежного учета вкладов интерферирующих реакций на быстрых нейтронах в реакции на тепловых и резонансных нейтронах. Для перенормировки сечений реакций на быстрых нейтронах нужно знать их энергетическую зависимость и спектр быстрых нейтронов.

В заключение отметим, что моделирование спектров нейтронов в облучательных каналах позволило лучше понять детали их поведения. На основе результатов моделирования и измерений рассчитаны коэффициенты перенормировки резонансных интегралов, позволяющие вычислять их значения для реального спектра нейтронов в облучательном канале ОК1.

Литература

1. Briesmeister J.F. — «MNCP General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4a», LA-12625, Los Alamos National Lab., 1993.
2. De Cotre F., Moens L, Jovanovic S. et al. — Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol.102, No.1, 1986, p.37.
3. Jovanovic S., De Corte F., Simonits A. et al. — In: Proceed. 7-th Modern Trends in Activation Analysis. Copenhagen, June 23—27, 1986, vol.1, 1986, p.613.