

УДК 539.1.074.8

ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА БОННЕРА АКТИВАЦИОННОГО ТИПА

**А.Ю. Буки, С.А. Каленик, И.Л. Семисалов, И.С. Тимченко, А.С. Задворный,
 Н.Г. Шевченко, В.И. Касилов, С.П. Гоков, С.С. Кочетов, Г.И. Ледовской,
 П.Л. Махненко**

*ННЦ "Харьковский физико-технический институт"
 ул. Академическая 1, г. Харьков, Украина, 61108
 E-mail: abuki@ukr.net*

Received 4 September 2012, accepted 22 November 2012

Создан опытный образец шарового нейтронного спектрометра Боннера активационного типа, состоящий из 5-ти полиэтиленовых шаров диаметром от 9,0 до 24,5 см. В качестве активируемого материала, находящегося внутри этих шаров, использован индий. Проведено испытание спектрометра на нейтронном излучении конвертора установленного на тридцати-мэвном канале вывода ускорительного комплекса ЛУЭ-300. В результате математической обработки данных измерений наведенной в индии радиоактивности восстановлен спектр нейтронов. Полученный в этом эксперименте спектр имеет вид, близкий к известному спектру нейтронов из γ, n -реакции на тяжёлых ядрах, которая и продуцирует нейтроны в конверторе ускорителя. Найденны границы рабочего диапазона энергий спектрометра и рассматривается возможность их расширения. Обсуждаются вопросы эффективности, чувствительности и условий применения спектрометра. Полученный в настоящей работе опыт будет использован для оптимизации конструкции рабочего варианта спектрометра.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: спектрометр нейтронов, нейтронные поля, математическое моделирование, наведенная радиоактивность, детектирование гамма-излучения

THE PROTOTYPE OF BONNER NEUTRON SPECTROMETER OF ACTIVATION TYPE

**A.Yu. Buki, S.A. Kalenik, I.L. Semisalov, I.S. Timchenko, A.S. Zadvorny, M.G. Shevchenko, V.J. Kasilov, S.P. Gokov,
 S.S. Kochetov, G.I. Ledovskoy, P.L. Makhnenko**
*NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology"
 1, Akademicheskaya st., Kharkov, Ukraine, 61108*

The prototype of Bonner sphere neutron spectrometer of activation type has been created. It is composed of 5-polyethylene spheres with a diameter from 9.0 to 24.5 cm. Indium as activated material inside these spheres is used. We tested the neutron spectrometer, using neutron radiation from converter which was installed at the thirty-MeV output channel of the accelerator complex LINAC-300. As a result of mathematical processing of the measurement data of the induced radioactivity in indium, neutron spectrum was restored. The spectrum, which obtained in this experiment, is similar to the well-known neutron spectrum from the γ, n -reaction with heavy nuclei, which produces neutrons in converter of the accelerator. Energy range of spectrometer was determined and we consider possibility of its expansion. An issue of efficiency, sensitivity and use conditions of the spectrometer is being discussed. The experience, obtained in this work, will be used to optimize the design of a working version of the spectrometer.

KEY WORDS: neutron spectrometer, neutron fields, simulation, induced radioactivity, gamma-radiation detection

ДОСЛІДНИЦЬКИЙ ЗРАЗОК НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРУ БОННЕРА АКТИВАЦІЙНОГО ТИПУ

**О.Ю. Буки, С.А. Каленик, И.Л. Семисалов, И.С. Тимченко, А.С. Задворный, М.Г. Шевченко,
 В.И. Касилов, С.П. Гоков, С.С. Кочетов, Г.И. Ледовской, П.Л. Махненко**

*ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут"
 вул. Академічна 1, м. Харків, Україна, 61108*

Створено дослідницький зразок кульового нейтронного спектрометра Боннера активаційного типу, що складається з 5-ти поліетиленових куль діаметром від 9,0 до 24,5 см. У якості матеріалу, що активується усередині цих куль, використано індій. Проведено випробування спектрометра на нейтронному випромінюванні конвертора який встановлювався на тридцяти-мэвному каналі виводу прискорювального комплексу ЛПЕ-300. В результаті математичної обробки даних вимірів наведеної в індії радіоактивності отримано спектр нейтронів. Цей експериментальний спектр має вигляд, близький до відомого спектру нейтронів з γ, n -реакції на важких ядрах, яка і продукує нейтрони в конверторі прискорювача. Знайдено межі робочого діапазону енергій спектрометра і розглядається можливість їх розширення. Також обговорюються питання ефективності, чутливості і умов застосування спектрометра. Отриманий у цій роботі досвід буде використано для оптимізації конструкції робочого варіанту спектрометра.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: спектрометр нейтронів, нейтронні поля, математичне моделювання, наведена радіоактивність, детектування гамма-випромінювання

Создан опытный образец нейтронного спектрометра Боннера активационного типа (НСБ-А). Прибор является модификацией предложенного в работе [1] спектрометра, а его отличие от последнего состоит в способе регистрации нейтронов. В первоначальной конструкции спектрометра Боннера нейтрон регистрируется в результате ядерной реакции с выходом заряженной частицы (например, $n + {}^{10}\text{B} \Rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha + 2,79 \text{ МэВ}$), которая вызывает в сцинтилляторе световую вспышку, регистрируемую ФЭУ (спектрометр сцинтилляционного типа). В активационном спектрометре нейтроны поглощаются расположенной внутри шара таблеткой, образуя

© Buki A.Yu., Kalenik S.A., Semisalov I.L., Timchenko I.S., Zadvorny A.S., Shevchenko M.G.,

Kasilov V.J., Gokov S.P., Kochetov S.S., Ledovskoy G.I., Makhnenko P.L., 2012

в ней радиоактивный изотоп. Последующее измерение радиоактивности таблетки показывает количество попавших на неё нейтронов. Основное преимущество НСБ-А состоит в возможности его применения в мощных нейтронных полях, тогда как применение спектрометра сцинтилляционного типа ограничено скоростью срабатывания электроники и её радиационной стойкостью. В качестве примера использования НСБ-А можно привести работы [2] и [3], в которых с помощью таких приборов проводились измерения нейтронных полей в экспериментальных залах ускорителей частиц.

Целью работы является создание и испытание 5-ти шарового НСБ-А для получения практического опыта его эксплуатации. Этот опыт необходим для конструирования рабочего варианта НСБ-А.

КОНСТРУКЦИЯ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА И МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ

Рассматриваемый спектрометр состоит из 5-ти полиэтиленовых шаров различного диаметра от 9,0 до 24,5 см (рис.1). В центре каждого шара находится таблетка, состоящая из индия. У изотопа ^{115}In (его содержание в естественном индии 95,7%) высокое сечение поглощения тепловых нейтронов – 190 барн. В результате поглощения нейтрона ядром ^{115}In образуется изотоп $^{116\text{m}}\text{In}$ ($T_{1/2} = 54,3$ мин.), β^- -распад которого сопровождается излучением гамма-квантов с энергией 416,9 КэВ [4]. Индиевые таблетки имеют форму цилиндра высотой 0,2 см и диаметром 0,4 см. Эти размеры выбраны так, чтобы (80 ÷ 90)% падающих на таблетку тепловых нейтронов поглощалось, а поглощение в ней гамма-квантов распада было невелико.

После экспозиции спектрометра в потоке нейтронов измеряется интенсивность излучения каждой таблеткой гамма-квантов с энергией 416,9 КэВ. Эти измерения проводятся с помощью германий-литиевого детектора, энергетическое разрешение которого в районе 400 КэВ равно 2,5 КэВ и, эффективность регистрации гамма-квантов 0,017 (при расстоянии между таблеткой и передней поверхностью кристалла 5 см). Затем, с помощью уравнения активации, из данных этих измерений определяется число радиоактивных ядер, образовавшихся в каждой таблетке во время облучения нейтронами.

Вероятность замедления нейтрона до энергии активации таблетки зависит от его начальной энергии и объёма шара, а количество попавших в шар нейтронов – от площади его поперечного сечения. Таким образом, зависимость активации таблетки от начальной энергии налетающих на шар нейтронов можно представить в виде функции отклика

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

где отношение $N_i(E_t)/N_i(E_j)$ – вероятность активации таблетки нейтроном; $N_i(E_j)$ – количество нейтронов, налетевших на i -тый шар с начальной энергией E_j и $N_i(E_t)$ – количество нейтронов, которые замедлились до энергии активации E_t , и попали в таблетку; S_i – площадь поперечного сечения i -того шара.



Рис. 1. Шары нейтронного спектрометра.

Зная активацию таблеток в каждом из шаров и располагая функциями отклика этих шаров можно восстановить спектр нейтронов исследуемого потока. Необходимые для этого функции отклика рассчитаны (рис.2) с помощью разработанных нами программ, моделирующих распространение нейтронов в веществе [5,6].

Существует несколько методик восстановления спектра (см., например, монографию [7]). В настоящей

работе применяется полуэмпирическая методика, обычно используемая в анализе данных полученных на спектрометре Боннера. Эта методика состоит в следующем:

- предполагается модель формы нейтронного спектра в виде некоторой функции $\Phi_m(E, a_k)$, в которой содержится P свободных параметров a_k .
- записывается сумма

$$N_{i,m}(a_k) = \sum_j \Phi_m(E_j, a_k) F_i(E_j) \Delta E_j, \quad (2)$$

которая представляет собой расчёт количества активированных ядер в таблетке i -того шара, в том случае, если бы спектр нейтронов описывался функцией $\Phi_m(E, a_k)$ с параметрами a_k .

- составив для I шаров спектрометра уравнения вида (2), и используя экспериментальные данные по активации таблеток $N_{i,act} \pm \Delta N_{i,act}$, запишем функцию хи-квадрата

$$\chi_m^2(a_k) = \frac{1}{I-P} \sum_i \left[\frac{N_{i,act} - N_{i,m}(a_k)}{\Delta N_{i,act}} \right]^2. \quad (3)$$

Варьируя параметры a_k , минимизируем функцию хи-квадрата и находим значения a_k , которые для данной функции спектра $\Phi_m(E, a_k)$ соответствуют расчёту величин $N_{i,m}(a_k)$ наиболее близких к экспериментальным значениям $N_{i,act}$. Если рассматривается несколько различных функций $\Phi_m(E, a_k)$, то та из них, которой соответствует меньшее значение χ^2 , лучше других очерчивает спектр.

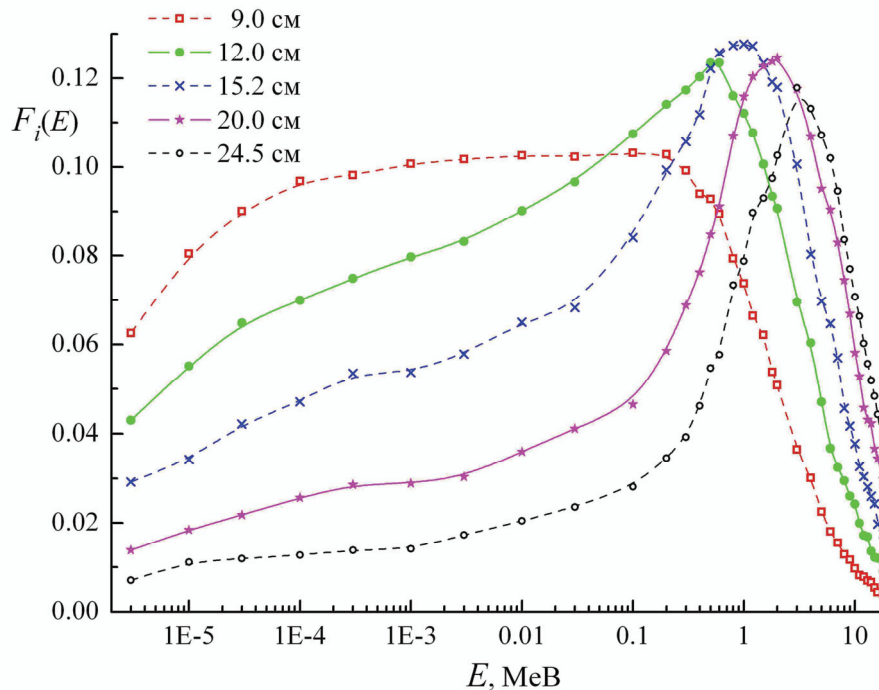


Рис.2. Функции отклика $F_i(E)$ шаров нейтронного спектрометра.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Проверка работы спектрометра состоит в измерении на нём нейтронного излучения, спектр которого известен. Так как у этого спектрометра эффективность регистрации нейтронов порядка 10^{-5} , а время облучения шаров обычно ограничено двумя периодами полураспада ^{116m}In (т.е. в пределах 2 часов), то тестирующий источник нейтронов должен быть достаточно интенсивным. Этим требованиям соответствуют нейтроны из γ, n -реакции в конверторе ускорителя электронов. А именно:

а) спектр нейтронов из γ, n -реакции на тяжёлых ядрах имеет форму асимметричного пика с максимумом $\sim 0,5$ МэВ и средневзвешенной энергией ~ 1 МэВ;

б) конвертор ускорителя электронов генерирует около 10^{12} n/сек на киловатт мощности пучка, что на расстоянии 100 см от источника даёт поток плотностью $p = 10^7$ n/(сек см²).

Следуя изложенным аргументам, проверка спектрометра была проведена на потоке нейтронов из конвертора, установленного на тридцати-мэвном канале вывода ускорительного комплекса ЛУЭ-300.

Электроны с энергией 12 МэВ падают из ускорителя на конвертор. Конвертор состоит из нескольких танталовых и расположенных за ними по направлению пучка свинцовых пластин. Суммарная толщина тантала

0,8 см (2 рад. длины), свинца – 3 см. (6 рад. длин). В танталовых пластинах электронный пучок порождает тормозные фотоны, которые в этих пластинах и в пластинах свинца генерируют нейтроны. Шары нейтронного спектрометра устанавливаются так, что на них попадают нейтроны, излучаемые конвертером под углом 90° к пучку электронов (рис.3.). Чтобы на результаты измерений меньше влияли нейтроны, которые рассеялись на соседних шарах, расстояние между центрами ближайших друг к другу шаров было не менее удвоенной суммы их радиусов. Для учёта фона от тепловых нейтронов, которые в таких экспериментах обычно аккумулируются в районе выхода пучка, в экспозиции кроме таблеток внутри шаров облучались «голые» индиевые таблетки, т.е. таблетки без замедлителя нейтронов. После облучения таблетки как «голые», так и извлечённые из полиэтиленовых шаров по одной помещались в детектор. Из измерений детектором количества гамма-квантов, которые излучают таблетки, определялась их активация за время экспозиции в потоке нейтронов – таблица 1.

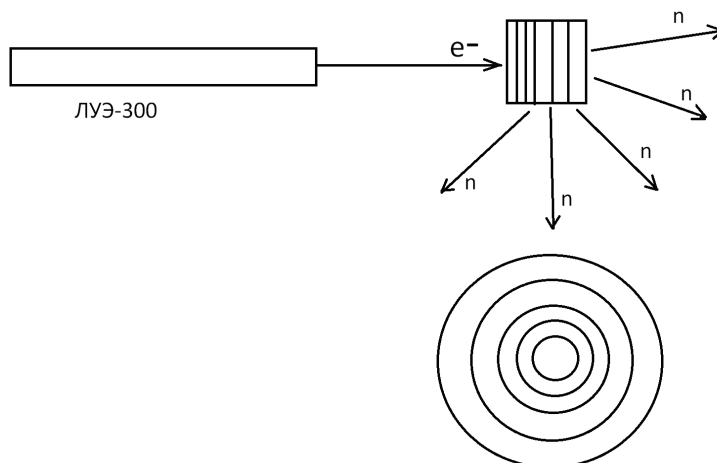


Рис.3. Схема эксперимента (вид сверху).

Таблица 1.

Количество активированных ядер $N_{i,act}$ в таблетке шара номер i и погрешность этой величины $\Delta N_{i,act}$.
Количество ядер активированных фоновыми нейтронами N_{bg} .

i	Диаметр, см	$N_{i,act} + N_{bg}$	$N_{i,act}$	$\Delta N_{i,act}$
1	9,0	$79 \cdot 10^3$	$62 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^3$
2	12,0	$89 \cdot 10^3$	$75 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$
3	15,2	$115 \cdot 10^3$	$107 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^3$
4	20,0	$93 \cdot 10^3$	$88 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$
5	24,5	$68 \cdot 10^3$	$65 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^3$

Из таблицы 1 видно, что максимальное количество активированных ядер находится в таблетке шара номер 3. Функции отклика на рис.2 показывают, что такой случай возможен, только если средневзвешенные энергии нейтронов находятся в интервале $0,5 \div 1,5$ МэВ. Более детальную информацию о спектре нейтронов можно получить с помощью изложенной выше методики восстановления спектра.

Для применения этой методики необходимо задать функцию, описывающую предполагаемый вид спектра. В качестве таких функций рассматривается гауссоида – $\Phi_G(E, a_k)$ и функция типа распределения Максвелла – $\Phi_M(E, a_k)$. Их вид соответственно

$$\Phi_G(E, a_k) = a_1 \exp\left(-\frac{(E - a_2)^2}{a_3}\right), \quad (4a)$$

$$\Phi_M(E, a_k) = b_1 E^{b_3} \exp(-b_2 E). \quad (4б)$$

После подстановки в ур.(2) функции (4a) или (4б) и функций отклика показанных на рис.2, получаем явный вид величины $N_{i,m}(a_k)$. Затем, используя эту величину и данные $N_{i,act} \pm \Delta N_{i,act}$ из таб.1, находим функцию хи-квадрата определяемую ур.(3). Минимизация хи-квадрата проводится с помощью вычислительной программы ROOT 5.32.03 [8]. В случае использования функции (4a) параметр a_2 определяет положение максимума этой

функции. Если же в ур.(2) подставляется функция (4б), то её максимум определяется как $E_{\max} = b_3/b_2$. Средневзвешенная энергия этих функций $E_{\text{м а}}$ находится из их численного интегрирования (погрешность этой величины не приводится). Величины, полученные из данных от 5-ти шаров, показаны в первой строке таблицы 2, а их графический вид на рис. 4. В таблице 2 так же приводятся результаты подгонки рассматриваемых функций к данным от 4-х шаров: вторая строка без измерений самого маленького шара (2÷5), третья строка без измерений самого большого шара (1÷4).

Таблица 2.

Результаты подгонки функций (4а) и (4б) к данным таблицы 1 в случае использования данных всех шаров – первая строка, и данных от четырёх шаров: без самого меньшего из шаров – вторая строка и без самого большого из шаров – третья строка. E_{\max} и $E_{\text{м а}}$ – энергия максимума функций спектра и их средневзвешенная энергия, соответственно.

I	Функция (4а)			Функция (4б)		
	$\chi_i^2(a_k)$	$E_{\max} = a_2$	$E_{\text{м а}}$	$\chi_i^2(b_k)$	$E_{\max} = b_3/b_2$	$E_{\text{м а}}$
1÷5	12,5	0,91±0,45	1,02	12,3	0,67±0,46	0,95
2÷5	7,3	0,78±0,02	0,78	15,4	0,71±0,09	0,82
1÷4	25,1	0,00±10,4	0,93	24,5	0,58±0,53	0,93

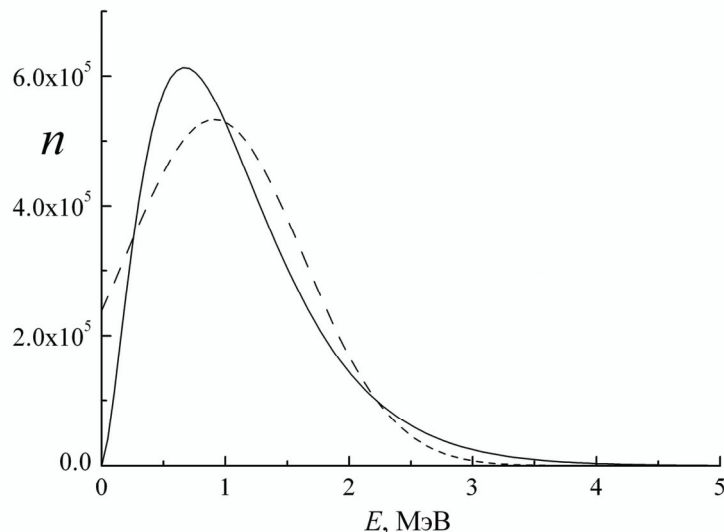


Рис.4. Восстановленный спектр нейтронов.

Штриховая линия – с использованием функции (4а), сплошная линия – функции (4б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ СПЕКТРОМЕТРА И ОЦЕНКА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

Прежде всего, следует отметить, что как видно из таблицы 2, подгонка функций (4а) и (4б) к полному набору шаров (1÷5) приводит к распределениям, положения максимумов которых по энергии и значения средневзвешенной энергии оказались близкими к ожидаемым (около 0,5 и 1 МэВ соответственно).

Тем не менее, сравнение результатов подгонок функций (4а) и (4б) показывает, что как по χ_i^2 так и по средневзвешенной энергии данная конструкция спектрометра в условиях описанных измерений не может по данным пяти шаров отличить симметричный пик гауссиана (4а) от существенно асимметричного пика функции (4б)^{1/}. В связи с этим отметим, что, кроме асимметрии, эти функции различаются ещё и областью определения. Так,

- функция (4а) продолжается в область отрицательных энергий (рис.4), может как угодно далеко смещаться в эту область и даже иметь там максимум^{2/}, тогда как
- функция (4б) не существует в области отрицательных энергий, так как содержит множитель E^{b_3} с не целым показателем степени b_3 .

^{1/} Согласно работе [3] функции (4б), хорошо описывает выход нейтронов в γ, n -реакции на тяжёлых ядрах.

^{2/} При использовании для описания спектра функции (4а) следует оговаривать, что в этом случае рассматривается только та её часть, которая при энергиях больше нуля.

Ввиду указанного различия рассматриваемых функций, максимум функции (4б) может быть только при $E > 0$, а в случае функции (4а) этот максимум в области энергий реального спектра ($E > 0$) может отсутствовать. Известно, что спектр эмиссии нейтронов из ядра должен иметь максимум. Это следует не только из работы [3], но и из физики гигантского дипольного резонанса ядра, частным случаем разрядки которого является некумулятивное излучение нейтронов.

Из вышеизложенного следует, что функция (4а) в отличие от (4б) не всегда может описать спектр нейтронов даже на качественном уровне. По-видимому, это и объясняет то, что в случае использования данных от 4-х шаров (таблица 2) функция (4а) даёт больший разброс характеристик спектра, чем функция (4б), а при наборе шаров 1÷4 положение максимума имеет погрешность на порядок больше ширины пика.

Приведенный анализ результатов восстановления спектра нейтронов указывает на невысокое энергетическое разрешение спектрометра в области энергий измеряемого спектра. По-видимому, это может быть следствием малого количества использованных в спектрометре шаров или/и неоптимального выбора их диаметров для работы в этом диапазоне энергий. Создание описанного прибора, практическая работа с ним и анализ результатов его использования – необходимый этап для оптимизации его конструкции, методики применения и определения пределов его характеристик. В конечном итоге это опыт, который необходимо иметь для успешного построения рабочего варианта нейтронного спектрометра. Ниже кратко излагаются несколько вопросов, понимание которых необходимо в будущей работе по созданию оптимизированного нейтронного спектрометра.

Рабочий диапазон энергий спектрометра

Как можно видеть на рис. 2 при $E < 10^{-4}$ МэВ и $E > 5$ МэВ функции отклика практически подобны между собой, т.е. отличаются друг от друга на множитель. В диапазоне $E = 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-2}$ МэВ подобны 4 функции из 5-ти. Не трудно показать, что если в каком-то диапазоне энергий функции отклика различных шаров подобны, то при этих энергиях невозможно измерение спектра. Таким образом, функции отклика имеющихся шаров, показывают, что рабочий диапазон энергий этого спектрометра $0.05 \div 5$ МэВ.

На рис. 5 приведен расчёт функций отклика для нескольких шаров с диаметрами меньше 12 см и одного шара диаметром 30 см. Поведение этих функций отклика показывает, что если использовать несколько таких дополнительных шаров, то станут возможны измерения спектров нейтронов в диапазоне энергий от $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ до 10 МэВ.

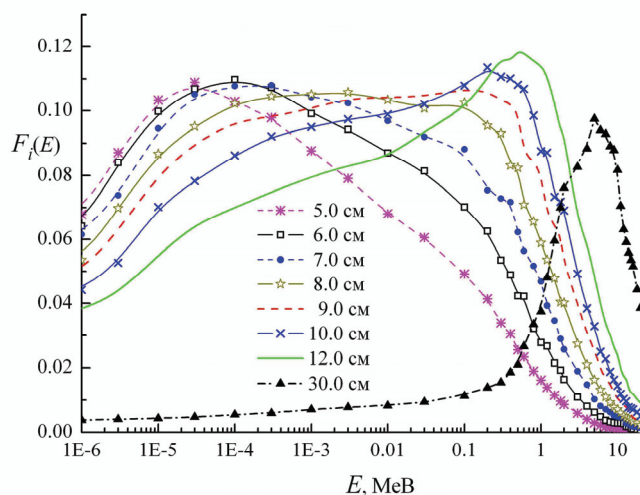


Рис.5. Функции отклика $F_i(E)$ дополнительных шаров нейтронного спектрометра.

Функции отклика дополнительных шаров обозначены линиями с расположенными на них различными значками, а функции отклика шаров используемые в настоящей работе – линиями без значков.

Эффективность нейтронного спектрометра

Эффективность нейтронного спектрометра η это отношение количеств зарегистрированных им нейтронов к попавшим на него. Численное определение этой характеристики необходимо для оценки минимальной плотности потока нейтронов, спектр которого может восстановить спектрометр.

Нейтронный спектрометр состоит из нескольких различных шаров, каждый из которых может рассматриваться как детектор со своей эффективностью и со своей зависимостью этой эффективности от энергии налетающего нейтрона $\eta_i(E)$. Зависимость величин $\eta_i(E)$ от энергии и от номера шара i полностью отражают функции отклика $F_i(E)$. Различие функций $F_i(E)$ и $\eta_i(E)$ в том, что первая показывает вероятность для налетевших на i -тый шар нейтронов активировать таблетку этого шара, а вторая – вероятность для этих нейтронов быть зарегистрированным с помощью гамма-детектора. Эти две функции отличает множитель η_S ,

который не зависит от энергии нейтронов и номера шара, то есть $\eta_i(E) = \eta_\Sigma F_i(E)$. Величина η_Σ является отношением зарегистрированных гамма-детектором распадов ядер к количеству радиоактивных ядер, образовавшихся в таблетке под действием нейтронного облучения. Эта величина является произведением коэффициентов, каждый из которых связан с определенным промежуточным процессом или операцией.

Определим эти коэффициенты, и приведём их значения для случая нашего спектрометра.

а) В течение времени облучения шара в таблетке происходит как наработка радиоактивных ядер, так и распад некоторого их количества. На момент прекращения облучения t_f количество радиоактивных ядер становится меньше, чем образовалось, на коэффициент

$$\eta_f = \frac{1}{t_f/\tau} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_f}{\tau}\right) \right], \quad (5)$$

где τ – время жизни радиоактивного нуклида равно $T_{1/2}/\ln 2$. Примем время облучения $t_f = 90$ мин и, соответственно уравнению (5), $\eta_f = 0,59$.

б) Из всех ядер ^{115}In , поглотивших нейтрон, 27% [4] распадаются, излучая гамма-квант с энергией 416,9 КэВ, которые и регистрируются детектором. Учитывая то, что в природном индии содержание изотопа ^{115}In составляет 95,7%, соответствующий коэффициент $\eta_{dg} = 0,26$.

в) С момента t_f до начала измерения гамма-излучения таблеток проходит время t_{tr} . Соответствующий коэффициент $\eta_{tr} = \exp(-t_{tr}/\tau)$. Для $t_{tr} = 40$ мин. значение $\eta_{tr} = 0,60$.

г) Эффективность используемого в эксперименте гамма-детектора η_{gd} . В нашем случае при энергии $E_\gamma \approx 400$ КэВ $\eta_{gd} = 0,017$.

д) Определение спектра является результатом измерений радиоактивности таблеток всех шаров, поэтому появляется коэффициент эффективности η_g связанный с методикой измерений на гамма-детекторе. Рассмотрение вариантов этих методик показывает, что максимальное значение $\eta_g = 0,16$.

В результате, для рассматриваемого спектрометра коэффициент $\eta_\Sigma = \eta_f \eta_{dg} \eta_{tr} \eta_{gd} \eta_g = 2,5 \cdot 10^{-4}$.

Если обратиться к функциям отклика на рис. 2, то можно видеть, что в рабочем диапазоне энергий их значения находятся в интервале $0,02 \div 0,13$. Отсюда эффективность спектрометра $\eta = (0,5 \div 3,3) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$. Полученный коэффициент эффективности является приведенным к падению 1 нейтрона на 1 см^2 поперечного сечения шара (см. определение $F_i(E)$ ур.(1)).

Используем полученное значение η для грубой оценки минимальной плотности потока нейтронов n , которую может измерять спектрометр. Допустим, что для измерения спектра близкого по форме к горизонтальной линии (плотность потока нейтронов одинакова при всех энергиях) нам необходимо зарегистрировать с помощью каждого из шаров не менее N нейтронов (фоновые счёты не учитываются). Как отмечено выше время экспозиции в потоке нейтронов t_f . Отсюда минимальный поток нейтронов

$$\min(p) = \frac{N}{\eta t_f}. \quad (6)$$

Пусть $N=10^2$, $\eta = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$, $t_f = 90 \text{ мин} = 0,54 \cdot 10^4 \text{ сек}$.

Тогда, согласно уравнению (6), $\min(p) = 4 \cdot 10^3 (\text{см}^2 \text{ сек})^{-1}$.

Особенности использования индия в качестве активируемого элемента

а) У гамма-детектора используемого в измерениях настоящей работы энергетическое разрешение в районе 400 KeV составляет 2,5 KeV. Гамма-облучение индия не приводит к образованию, каких либо радиоактивных ядер, распад которых сопровождается излучением гамма-квантов с энергией $417 \pm 3 \text{ KeV}$. Следовательно, рассматриваемый нейтронный спектрометр совершенно не чувствителен к фоновому гамма-излучению.

б) Благодаря тому, что время полураспада активированного индия около одного часа, индиевые таблетки могут использоваться снова спустя 12 часов после облучения, так как за это время их радиоактивность спадёт на 4 порядка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Создан опытный образец 5-ти шарового нейтронного спектрометра активационного типа и проведены его испытания в потоке нейтронов из конвертора установленного на линейном ускорителе электронов. Полученный из γ, n -реакции спектр нейтронов по положению максимума близок к ожидаемому, но это положение найдено со значительной погрешностью. Определён рабочий диапазон энергий спектрометра – $0,05 \div 5 \text{ MeV}$ и сделан вывод, что при использовании нескольких дополнительных шаров этот диапазон может быть расширен до $\sim 3 \cdot 10^{-5} \div 10 \text{ MeV}$. Для различных шаров спектрометра найдены значения эффективности регистрации нейтронов. Исходя из этого, оценена минимальная плотность потока нейтронов, которую может измерять спектрометр. Показано, что при использовании гамма-детектора спектрометр совершенно не чувствителен к фоновому гамма-излучению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blamblett R.L., Ewing R.J., Bonner T.W. A new type of neutron spectrometer // Nuclear instrument and methods. – 1960. - Vol.9. - P.1-12.
2. Fernández F., Amgarou K., Domingo C. et al. Neutron spectrometry in a PAT cyclotron with a Bonner sphere system // Radiation Protection Dosimetry. – 2007. - Vol.126, №.1-4. - P.371-375.
3. Sannikov A.V., Peleshko V.N., Savitskaya E.N. i dr. Mnogosharovyiy spektrometr neytronov na osnove seriynogo pribora RSU-01 // ANRI. - 2009, №1. - C.62-69.
4. nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/
5. Buki A.Yu., Kalenik S.A., Shapoval I.M. Simplified transportation model of thermal neutrons through matter // PAST. - 2011, №3(55). - P.50-53.
6. Buki A.Yu., Kalenik S.A. Prostaya model' transporta neytronov i eye primeneniye dlya raschyeta funktsiy otklika sharovogo neytronnogo spektrometra // The Journal of Kharkiv National University, physical series “Nuclei, Particles, Fields”. - 2012- №991– Iss.1(53). - S.23-27.
7. Dreyzin V.E., Emel'yanov S.G., Grimov A.A. Spektrometricheskie izmereniya neytronnogo izlucheniya. – Kursk: Yugo-Zap. gos. un-t., 2011. - 316 s.
8. Brun R., Rademakers F. ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework // Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A. – 1997. - Vol. 389. - P. 81-86.