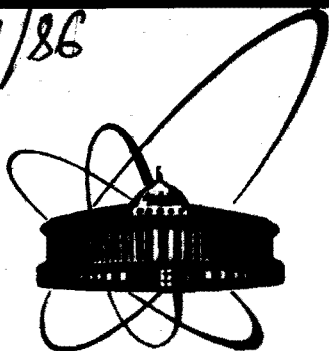


86-155

3229/86



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

СЗЧЧ.1ч

P3-86-155

А.И.Войтов, В.М.Назаров, В.А.Поярков,
В.Ф.Переседов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ
ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИИ НЕЙТРОННЫХ ПОЛЕЙ

1986

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие радиационных исследований на мощных ядерных реакторах выдвигает требования к разработке точных и надежных методов измерения спектров резонансных и быстрых нейтронов на фоне интенсивных потоков гамма-лучей. При этом в ряде случаев необходимы сведения о возмущении нейтронного поля вводимыми в него образцами. Для решения этих задач широкое распространение получили активационные методы с использованием набора из одиночных резонансных и пороговых активационных детекторов. Их применение, связанное с многократным облучением, часто приводит к неконтролируемым ошибкам и превращает каждое измерение спектра в сложный эксперимент, требующий участия специалистов высокой квалификации. Значительно сокращает и упрощает процедуру измерения спектров нейтронов использование многокомпонентных активационных детекторов /МАД/. В данной работе подробно описывается методика построения и использования МАД с целью их применения в радиационных исследованиях на ИБР-2.

1. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Применение активационных детекторов в спектрометрии основано на зависимости активности, наведенной исследуемым полем нейтронов в детекторе, от плотности потока нейтронов. Эту зависимость можно записать в виде

$$a = (1 - e^{-\lambda T_0}) \int_0^{\infty} \phi(E) \sigma(E) dE \quad /1.1/$$

или

$$g = \frac{a}{n_0(1 - e^{-\lambda T_0})} = \int_0^{\infty} \phi(E) \sigma(E) dE, \quad /1.2/$$

где λ - константа распада образующегося радионуклида; T_0 - время облучения; n_0 - количество ядер изотопа, на котором происходит реакция активации; $\phi(E)$ - энергетический спектр плотности потока нейтронов; $\sigma(E)$ - сечение активации; E - энергия нейтронов; g - активность в насыщении, нормированная на количество ядер n_0 , которую называют скоростью реакции.

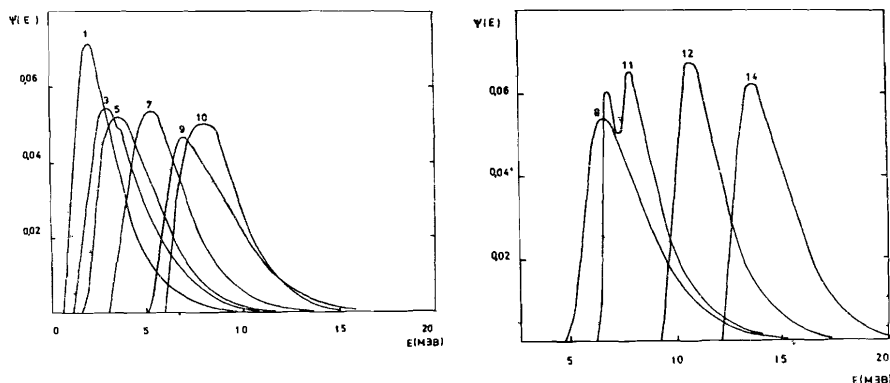


Рис. 1. Функции чувствительности некоторых пороговых реакций. Цифры соответствуют следующим реакциям: 1 - $^{115}\text{In}(n,n')$; 3 - $^{47}\text{Ti}(n,p)$; 5 - $^{54}\text{Fe}(n,p)$; 7 - $^{46}\text{Ti}(n,p)$; 8 - $^{56}\text{Fe}(n,p)$; 9 - $^{48}\text{Ti}(n,p)$; 10 - $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$; 11 - $^{24}\text{Mg}(n,p)$; 12 - $^{93}\text{Nb}(n,2n)$; 14 - $^{90}\text{Zr}(n,2n)$.

Спектрометрическую информацию о потоке нейтронов можно получить, помещая в исследуемое поле активационные детекторы, отличающиеся чувствительностью к нейтронам различной энергии. Используя набор детекторов, получаем систему уравнений относительно $\phi(E)$:

$$g_i = \int_0^{\infty} \phi(E) \sigma_i(E) dE, \quad i=1, N, \quad /1.3/$$

где индекс i обозначает номер реакции активации.

Количество и тип реакций, необходимых для проведения спектрометрического исследования нейтронного поля, определяется конкретными целями этих исследований. Для количественной характеристики вклада, который вносят нейтроны с энергией E в суммарную активность радионуклида, образующегося в реакции, используют функцию чувствительности $\Psi(E)$, определяемую следующим образом:

$$\Psi(E) = \frac{\phi(E) \sigma_i(E)}{\int_0^{\infty} \phi(E) \sigma_i(E) dE}. \quad /1.4/$$

Диапазон энергий нейтронов $R_i(E_{11}, E_{12})$, к которым наиболее чувствительна данная пороговая реакция, можно определить по соотношению

$$\int_{E_{11}}^{E_{12}} \Psi(E) dE = 0,9. \quad /1.5/$$

На рис. 1 приведены функции $\Psi_i(E)$, а диапазоны чувствительности R_i для некоторых широко используемых реакций в поле нейт-

ронов деления ^{235}U указаны в табл. 1. Для получения достоверной информации о спектре нейтронов в некотором энергетическом интервале необходимо, чтобы этот интервал был полностью перекрыт диапазонами чувствительности используемых реакций. Исходя из этого выбирают количество и тип реакций, предназначенных для измерения.

Таблица 1

Реакция	R_i , МэВ	Реакция	R_i , МэВ
$^{115}\text{In}(n,n')$	0,7 - 5,3	$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$	6,3 - 11,1
$^{47}\text{Ti}(n,p)$	1,3 - 6,9	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	6,1 - 11,5
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	1,9 - 7,3	$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$	9,3 - 13,9
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	1,5 - 7,1	$^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89}\text{Zr}$	12,1 - 16,9
$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	4,9 - 10,7	$^{127}\text{J}(n,2n)^{126}\text{J}$	9,3 - 13,9
$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	3,3 - 8,9	$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	3,1 - 8,9
$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	5,3 - 11,7	$^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$	1,7 - 7,3

Далее из полученного набора выбирают те реакции, которые удовлетворяют дополнительным требованиям, накладываемым ядерными константами, аппаратурой и методами, используемыми для определения скоростей реакций. Подробно эти требования изложены в работах /1-3/.

Ввиду того, что величины $\Psi(E)$ и R_i определяются зависимостью от энергии сечений реакций $\sigma_i(E)$ и спектра $\phi(E)$, уже на стадии планирования спектрометрического исследования необходимо использование априорной информации об энергетическом спектре потока нейтронов.

Априорная информация о спектре нейтронов необходима также и для решения системы уравнений /1.3/. Решение этой системы уравнений относительно $\phi(E)$ - математически некорректная задача, и для определения физически обоснованного решения необходимо использование дополнительных ограничений на вид $\phi(E)$.

Процесс определения спектральных характеристик нейтронного поля можно условно разбить на несколько этапов: 1/ планирование исследования и приготовления набора активационных детекторов; 2/ определение скоростей реакций; 3/ интерпретация полученных результатов в терминах спектральных характеристик. Основным является этап определения скоростей реакций g_i . Величины g_i находят при помощи относительных или абсолютных измерений. Относительные измерения подразумевают сравнений активностей,

полученных в исследуемом поле, с активностями, полученными в нейтронном поле с хорошо определенными параметрами. При этом в качестве активационных детекторов используют фольги, таблетки, проволоки, обычно рассчитанные на определение скорости одной-двух реакций из используемого набора. В дальнейшем такую технику определения скоростей реакций будем называть техникой однокомпонентных активационных детекторов. Применение однокомпонентных активационных детекторов для определения наведенной активности позволяет использовать простое оборудование, такое, как сцинтилляционные детекторы, β -счетчики, трековые детекторы, однако требует большого числа актов облучения и измерения наведенной активности. Это превращает этап определения скоростей реакций в длительную и трудоемкую процедуру, требующую высокой квалификации исполнителей. Поэтому совершенствование методов определения скоростей реакций — одна из наиболее важных задач активационной спектрометрии.

Одна из возможностей существенно сократить время и объем работ, затрачиваемых при определении скоростей реакции, заключается в использовании многокомпонентных активационных детекторов^{4,5,6/}. Их применение открывает возможность автоматизации процедуры измерения наведенной активности, уменьшает некоторые погрешности, обусловленные раздельным облучением и измерением активности фольг.

2. СОСТАВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Многокомпонентным назовем активационный детектор, рассчитанный на одновременное определение скоростей всех реакций, используемых для спектрометрических исследований потока нейтронов в заданном энергетическом интервале. Он может быть изготовлен в виде фольги, таблетки и т.п., содержащей гомогенную смесь изотопов, на которых протекают интересующие нас реакции. Скорости реакции рассчитывают по измеренному суммарному спектру гамма-излучения всех радионуклидов, образующихся в таком детекторе.

Применение многокомпонентных активационных детекторов обеспечивает следующие преимущества:

- сокращается количество измерений наведенной активности и время, затрачиваемое на весь цикл определения скоростей реакций;

- повышается радиационная безопасность работ, т.к. сокращается количество операций по распаковке и разделению различных детекторов;

- все изотопы облучаются совместно и, благодаря гомогенности, в идентичных условиях. Это исключает ошибки мониторингования и воспроизводимости геометрии облучения, возникающие при последо-

вательном облучении. При наличии значительных градиентов плотности потока нейтронов в районе активации гомогенность детектора устраняет погрешности, связанные с возможной неоднородностью условий облучения различных фольг;

- при определении наведенной активности фольг в отдельных измерениях возникает дополнительный источник погрешностей, связанный с различиями геометрии измерения каждого детектора, различиями в загрузках спектрометрического тракта и т.д. Это приводит к искажению отношений скоростей реакций и, следовательно, к искажению спектральных характеристик исследуемого потока нейтронов. При использовании МАД активности всех радионуклидов измеряются совместно, поэтому ошибки, связанные с воспроизводимостью условий измерения, не искажают спектральные характеристики, а приводят к ошибкам нормировки;

- использование МАД предполагает, что определение скоростей всех используемых реакций производится при помощи одного гамма-спектрометра. При этом улучшаются метрологические характеристики измерений, облегчаются условия для автоматизации процедуры измерения наведенной активности.

Для того чтобы реакция могла использоваться в МАД, необходимо, чтобы она удовлетворяла как требованиям общего характера, о которых упоминалось выше, так и дополнительным требованиям, определяемым спецификой МАД. Дополнительные требования достаточно полно освещены в^{4,5/} и заключаются в следующем:

- реакции активации, протекающие на изотопах, входящих в состав МАД, не должны приводить к образованию одинаковых радионуклидов. Например, реакции $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$; $^{24}\text{Mg}(n, p)$; $^{23}\text{Na}(n, \gamma)$ имеют один и тот же продукт — ^{24}Na . Поэтому раздельное определение скоростей этих реакции в МАД невозможно;

- реакции должны приводить к образованию радионуклидов, распад которых сопровождается испусканием гамма-фотонов. При этом энергии этих гамма-фотонов должны быть такими, чтобы при помощи гамма-спектрометра можно было надежно определить их интенсивность в суммарном спектре излучения МАД;

- при практической реализации способа многокомпонентных детекторов возникают ограничения на периоды полураспада образующихся радионуклидов. Эти ограничения могут обуславливаться разными причинами. Так, при измерениях спектра нейтронов в стационарных полях период полураспада радионуклидов должен быть больше времени облучения. С другой стороны, фоновые загрузки, возникающие от паразитных активностей, приводят к необходимости введения некоторой выдержки МАД перед измерением наведенной активности, поэтому периоды полураспада полезных активностей должны превышать время выдержки.

При создании МАД необходимо также избегать включения в его состав таких элементов, на изотопах которых возможно возникновение значительных паразитных активностей с большими периодами полураспада. Их наличие может привести к невозможности измере-

ния тех полезных активностей, периоды полураспада которых значительно меньше, чем у паразитных.

Совокупность перечисленных требований и ограничений приводит к тому, что число изотопов, которые могут составить МАД, невелико.

Примеры возможных вариантов МАД для измерений спектров резонансных и быстрых нейтронов приведены в ^{4,5,6/}. Описанный в ^{4/} детектор для измерения спектра быстрых нейтронов включает в себя изотопы Al, Ti, Fe, Ni, Nb, In и рассчитан на измерение скоростей следующих реакций: $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$; $^{46}\text{Ti}(n,p)$, $^{47}\text{Ti}(n,p)$; $^{48}\text{Ti}(n,p)$; $^{58}\text{Ni}(n,p)$; $^{115}\text{In}(n,n')$; $^{54}\text{Fe}(n,p)$; $^{56}\text{Fe}(n,p)$; $^{93}\text{Nb}(n,2n)$. Соотношения между массами отдельных компонентов детектора выбирались исходя из условий оптимизации измерительного эксперимента - минимальные массы, минимальное время измерения при достижении необходимой статистической точности в скоростях реакций ^{7/}. Как видно из рис.1 и табл.1, такой детектор обеспечивает определение спектра нейтронов в диапазоне энергий /1,5-10/ МэВ. При этом область от 8,5 до 9,5 МэВ плохо перекрыта функциями чувствительности применяемых реакций. Если необходимо получить информацию о спектре нейтронов выше 10 МэВ, указанный МАД можно дополнить J, Zr, Tl и определять скорости реакций $^{90}\text{Zr}(n,2n)$; $^{127}\text{J}(n,2n)$; $^{203}\text{Tl}(n,2n)$.

Для того, чтобы увеличить степень перекрытия интересующего диапазона энергий функциями чувствительности реакций, некоторые исследователи идут на определение большого числа скоростей реакций с близкими характеристиками. При этом возможно использование нескольких МАД различного состава. Так, применяя описанный МАД и детектор, рассчитанный на реакции $^{199}\text{Hg}(n,n')$; $^{56}\text{Fe}(n,p)$; $^{54}\text{Fe}(n,p)$; $^{58}\text{Ni}(n,p)$; $^{51}\text{V}(n,\alpha)$; $^{24}\text{Mg}(n,p)$; $^{64}\text{Zn}(n,p)$; $^{93}\text{Nb}(n,2n)$, можно определять скорости большинства используемых в активационной спектроскопии реакций.

Как указывалось выше, возможно создание многокомпонентных детекторов для определения спектра надтепловых нейтронов путем использования резонансных реакций. Состав ^{5/} такого детектора и технология его изготовления приведены в ^{5/}. Необходимо отметить, что использование подобных детекторов требует тщательной проверки степени неоднородности толщины пленок, получаемых путем испарения, и особой техники определения масс отдельных компонентов.

Следует также сказать, что при всех достоинствах МАД они не могут обеспечить определение спектра нейтронов в области энергий /0,5 ÷ 1,5/ МэВ. Это связано с тем, что применяемые в этой области реакции $^{103}\text{Rh}(n,n')$; $^{203}\text{Tl}(n,n')$; $^{93}\text{Nb}(n,n')$, а также реакции деления не могут использоваться в МАД. Первые - потому, что активность их продуктов определяется по характеристическому излучению, которое также может возбуждаться гамма- и бета-излучением других радионуклидов, входящих в МАД; вторые - ввиду сложности обработки и интерпретации гамма-спектров продуктов деления.

Этот недостаток МАД, возможно, будет устранен путем поиска новых реакций, имеющих низкие пороги и приемлемые характеристики образующихся радионуклидов, например $^{111}\text{Cd}(n,n')$.

Серьезным препятствием на пути широкого распространения МАД для спектроскопии быстрых нейтронов являются особые требования к чистоте всех материалов, входящих в их состав. Малейшие примеси Na, Mn, Sc могут существенно исказить скорости реакций, приводящих к образованию ^{24}Na , ^{56}Mn , ^{46}Sc по реакции (n,γ) . Поэтому все материалы, используемые для приготовления МАД, должны подвергаться активационному анализу, а Al, Mn, Fe, Ti могут тестироваться на наличие мешающих примесей способом, предложенным в ^{8/}.

3. ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ НАВЕДЕННОЙ АКТИВНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАД

Как отмечалось в п.1 настоящей работы, задача восстановления спектра нейтронов является математически некорректной. Это значит, что существует множество точных решений системы интегральных уравнений /1.3/. Наличие экспериментальных погрешностей в скоростях реакций g_1 приводит к дополнительному расширению множества возможных решений и неустойчивости задачи /1.3/ по отношению к вариациям g_1 в пределах погрешностей. Это обстоятельство накладывает повышенные требования к точности измерения скоростей реакций. Некоторые авторы ^{9/} считают, что удовлетворительную точность восстановления спектра нейтронов можно достичь только в том случае, когда погрешности в скоростях реакций не превышают 1-2%. Подобное ограничение, по всей видимости, чрезмерно, так как точность сечений в /1.3/ ниже. Во всяком случае, как показывают результаты многих работ, погрешности восстановленного спектра в области энергий, перекрываемой диапазонами чувствительности нескольких реакций, в 3-5 раз превышают погрешности исходных данных. В других энергетических интервалах погрешности существенно больше.

Точность расчета скоростей реакций в основном определяется погрешностями измерения активности, наведенной в активационном детекторе. Погрешностями в определении количества ядер изотопов, временных интервалов в большинстве случаев можно пренебречь /по крайней мере, при спектроскопии быстрых нейтронов/. При измерении потоков тепловых и резонансных нейтронов возникает еще один источник возможных погрешностей - самокранировка нейтронов такими детекторами, однако в данной работе этот вопрос не рассматривается.

Определение активности радионуклидов в МАД по суммарному спектру их гамма-излучения возможно осуществить только при помощи гамма-спектрометров с высокой разрешающей способностью, таких, как полупроводниковые Ge(Li)-спектрометры. Анализ и об-

работка аппаратурных спектров, получаемых при измерении гамма-спектра МАД, - сложная и трудоемкая процедура, поэтому эффективное использование МАД, обеспечивающее их преимущества перед традиционными фольговыми однокомпонентными детекторами, стало возможным только после появления программ обработки аппаратурных спектров типа АСТIV^{/10/}, SAMPO-80^{/11/} и др. Для того чтобы достичь требуемой точности при измерении активностей в МАД, необходимо учитывать эффекты, связанные с поглощением гамма-фотонов в объеме детектора, каскадным суммированием импульсов, случайными наложениями импульсов в тракте гамма-спектрометра.

Изменение эффективности по объему МАД и поглощение гамма-фотонов в его объеме могут приводить к возникновению 10-15% поправок даже для МАД малых размеров. Эти эффекты можно учесть при помощи полуэмпирической методики, изложенной в^{/12,13/}. В этой методике Ge(Li)-детектор моделируется поглощающей гамма-лучи поверхностью, расположение и конфигурация которой находятся в калибровочных измерениях.

Минимизация эффектов каскадного суммирования, которые могут давать поправки, достигающие 10%^{/14,15/}, проводится путем выбора расстояния МАД - Ge(Li)-детектор и геометрии измерения по методике, изложенной в^{/15/}. В случае, когда низкая активность МАД требует проводить измерения в "близкой" геометрии, учет каскадных эффектов проводят аналогично изложенному в^{/14,16/}, пренебрегая угловыми корреляциями каскадных гамма-фотонов.

Случайные наложения импульсов искажают аппаратурный спектр и приводят к утечке импульсов из пиков полного поглощения. При использовании в составе спектрометра стандартных блоков системы "Вектор" величина утечки может достигать 10-15% при интегральной загрузке порядка $6 \cdot 10^8$ имп.с. Искажения площадей пиков, обусловленные случайными наложениями, зависят от типа используемой аппаратуры, вида амплитудного распределения импульсов и проявляются в большой степени при улучшении разрешающей способности спектрометра. Авторы учитывают эти эффекты при помощи модификации генераторной методики, описанной в^{/19/}, при этом генератор одновременно используется для стабилизации спектрометрического тракта.

Таким образом, применяя описанные выше способы учета различных эффектов, влияющих на связь наведенной активности с площадью пика полного поглощения, можно достичь точности определения скоростей реакций порядка $2 \pm 5\%$ для любого радионуклида, входящего в состав МАД.

4. ПРИМЕНЕНИЕ МАД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Авторы использовали МАД для измерения спектров быстрых нейтронов в активной зоне, бериллиевом отражателе и на выведенном пучке № 10 реактора ВВР-М ИЯИ АН УССР, а также выведенном

пучке № 11 реактора ИБР-2^{/17/}. В состав МАД входили Mg, Ti, Fe, Ni, Nb, Zr, In. Детекторы изготавливались из смеси порошков металлов или их окислов путем упаковки тщательно перемешанной смеси в тонкостенные контейнеры из полистирола, фторопласта или оргстекла. Типичный состав МАД для измерения в активной зоне приведен в табл.2.

Таблица 2

Основные компоненты МАД для измерения в активной зоне

Изотоп	Количество ядер
²⁴ Mg	$2,5 \cdot 10^{20}$
⁴⁶ Ti	$2,5 \cdot 10^{20}$
⁴⁷ Ti	$1,5 \cdot 10^{20}$
⁴⁸ Ti	$4,5 \cdot 10^{20}$
⁵⁴ Fe	$3,0 \cdot 10^{20}$
⁵⁶ Fe	$5,6 \cdot 10^{20}$
⁵⁸ Ni	10^{20}
⁹³ Nb	$3,0 \cdot 10^{20}$
¹¹⁵ In	10^{18}

Таблица 3

Основные компоненты МАД для измерения на выведенном пучке

Изотоп	Количество ядер
²⁴ Mg	$3,5 \cdot 10^{21}$
⁴⁶ Ti	$3,8 \cdot 10^{21}$
⁴⁷ Ti	$1,2 \cdot 10^{21}$
⁴⁸ Ti	$2,6 \cdot 10^{21}$
⁵⁴ Fe	$2,9 \cdot 10^{21}$
⁵⁶ Fe	$8,8 \cdot 10^{21}$
⁵⁸ Ni	$2,0 \cdot 10^{21}$
⁹⁰ Zr	$2,5 \cdot 10^{21}$
⁹³ Nb	$3,5 \cdot 10^{21}$

Для измерений на выведенных пучках применялись дискообразные МАД диаметром ~ 20 мм и толщиной ~ 5 мм. Количественные характеристики одного из них приведены в табл.3, а на рис.2 изображен аппаратурный спектр гамма-излучения МАД после активации на пучке № 10 ВВР-М. Следует отметить, что при измерениях на выведенных пучках использование МАД имеет значительные преимущества перед обычными детекторами. Дело в том, что при плотности потока быстрых нейтронов 10^8 нейтр./см².с, которая характерна для выведенных пучков, для получения необходимых активностей применяют детекторы относительно больших размеров. Обычные однокомпонентные детекторы можно активировать либо совместно, либо поочередно, сопровождая каждый фольгой-монитором. Если производится совместное облучение детекторов, то их большие массы приводят к ослаблению плотности потока нейтронов и искажению его спектра в объеме набора. Это приводит к тому, что различные активационные детекторы набора активируются в неодинаковых условиях и, следовательно, искажаются измеренные спектральные ха-

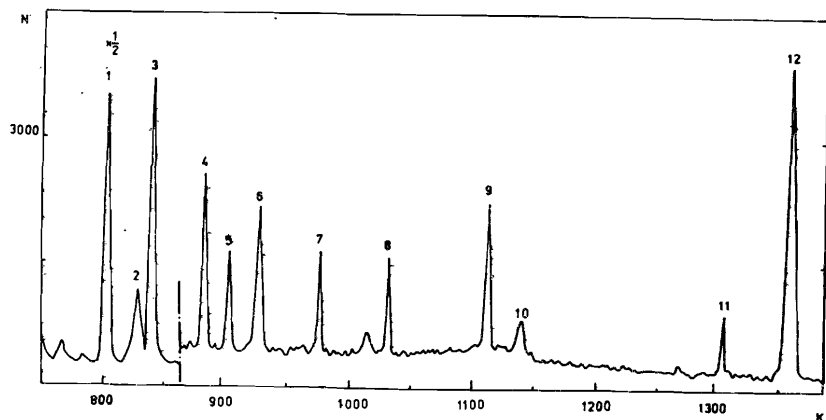


Рис.2. Участок аппаратного спектра гамма-излучения МАД, состав которого приведен в табл.2. Время активации - 70 ч; время охлаждения - 1 ч; время измерения - 3 ч.

рактические. Последовательное облучение фольг приводит к значительному увеличению трудоемкости процедуры измерения. Гомогенность МАД позволяет измерить усредненные по его объему характеристики потока нейтронов, что приводит к значительно меньшим погрешностям при несравнимо меньших затратах времени и труда.

На рис.3 приведены примеры спектров быстрых нейтронов, измеренных при помощи МАД.

Обработка аппаратных спектров Ge(Li)-спектрометра, расчет активационных интегралов производились на ЭВМ СМ-3 при помощи созданного для этих целей пакета программ. Спектр нейтронов восстанавливался на этой же ЭВМ программой ITR-84, в основу которой положен итерационный алгоритм, описанный в [18].

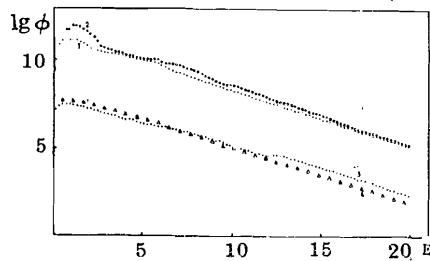


Рис.3. Примеры спектров быстрых нейтронов, измеренных при помощи МАД: 1 - спектр нейтронов в бериллиевом отражателе реактора ВВР-М, измеренный при мощности реактора 500 кВт, в окрестности точки измерения - выгоревшие

точки измерения свежие ТВЭЛы; 2 - то же, что и 1, мощность реактора 200 кВт, в окрестности точки измерения свежие ТВЭЛы; 3 - спектр нейтронов выведенного пучка № 10 реактора ВВР-М; 4 - спектр нейтронов выведенного пучка № 11 реактора ИБР-2. Спектры нейтронов $\phi(E)$ приведены в единицах н/см²·с·МэВ, энергия нейтронов E - в МэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достоинство МАД в первую очередь состоит в создании возможности автоматизации и значительного ускорения измерения спектра нейтронов активационным способом.

Кроме того, измерение спектров превращается в единообразную для всех измерений спектров процедуру, в значительной степени исключающую влияние субъективных факторов на конечный результат.

В разработанной методике использования МАД для измерения спектров быстрых нейтронов центральное место занимает определение скоростей реакций. В эту процедуру введена коррекция на учет самопоглощения гамма-излучения в образце, случайные наложения импульсов, эффекты каскадного суммирования. Все это позволяет использовать МАД в широком диапазоне плотности потоков нейтронов от 10^8 до 10^{13} н/см²·с.

С помощью МАД можно не только решать практические задачи измерения плотности потоков и энергетических спектров в активных зонах и околорпусном пространстве, эта методика может явиться инструментом для фундаментальных исследований в немонохроматических потоках нейтронов.

Используемые в настоящее время МАД в основном ограничены количеством реакций, сечения которых достаточно хорошо известны. По мере уточнения сечений в состав МАД могут быть добавлены другие компоненты, которые повысят информативность восстановленных спектров нейтронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломакин С.С., Петров В.И., Самойлов П.С. Радиометрия нейтронов активационным методом. Атомиздат, М., 1975.
2. Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С., Тихонов Е.Г. Активационные методы спектрометрии нейтронов. Атомиздат, М., 1976.
3. Лапенас А.А. Измерение спектров нейтронов активационным методом. "Зинатне", Рига, 1975.
4. Sandberg J.V., Lund P.D. Journ. of Rad.Chem., 1983, v.76, No.1, p.151.
5. Sandberg J.V. Acta Polytechnica Scandinavia, 1984, No.46.
6. Бекуц К., Виртц К. Нейтронная физика, Атомиздат, М., 1968, с.279.
7. Aarnio P.A., Koskelo M.J. Nuclear Technology, 1982, v.59, p.170.
8. Власов М.Ф. и др. Нейтронная физика, т.4. Материалы IV Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 2-6 октября, 1983 г., ЦНИИАтоминформ, М., 1984, с.228.
9. Direx R. В сб.: Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках. Материалы I Всесоюзной школы, ЦНИИАтоминформ, М., 1976, с.167.

10. Злоказов В.Б. ОИЯИ, P10-82-105, Дубна, 1982.
11. Aarnio P.A., Koskela M.J. Report ТКК-F-A427, 1980.
12. Моргунов Э.И., Поярков В.А., Стрижак В.И. Прикладная ядерная спектроскопия, 1984, вып.13, с.55.
13. Моргунов Э.И., Поярков В.А., Стрижак В.И. Нейтронная физика, т.4, Материалы VI Всесоюзной конференции по нейтронной физике, ЦНИИАтоминформ, М., 1984, с.364.
14. Debertin K., Schötzig U. Nucl.Inst.and Meth., 1979, v.158, p.471.
15. Войтов А.И. и др. Прикладная ядерная спектроскопия, 1984, вып.13, с.64.
16. Войтов А.И. и др. Прикладная ядерная спектроскопия, 1984, вып.13, с.60.
17. Назаров В.М., Переседов В.Ф., Сысоев В.П. Краткие сообщения ОИЯИ, № 6-85, Дубна, 1985, с.42.
18. Najzer M, Glumac B., Pauko H. Proceedings 3-rd ASTM Euratom Symp.Reactor Dosim. Brussel-Luxemburg, 1980, v.2, p.721.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 марта 1986 года.

Войтов А.И. и др.

P3-86-155

Использование многокомпонентных активационных детекторов для спектрометрии нейтронных полей

В работе описывается активационная методика измерения спектров нейтронов в интенсивных нейтронных полях, основанная на использовании не набора из одиночных резонансных или пороговых индикаторов, а одного или двух многокомпонентных активационных детекторов /МАД/, состоящих из смеси различных изотопов. Подробно рассматриваются требования к выбору изотопов и реакций для МАД, используемых для измерения спектров резонансных и быстрых нейтронов в пучках ядерных реакторов. Приводится их состав и характеристики. Рассмотрены вопросы измерения наведенной активности МАД с учетом ряда поправок /каскадное суммирование, самопоглощение квантов в МАД, наложения импульсов и др./. Приводятся результаты измерения спектров быстрых нейтронов в интенсивных пучках реакторов ИБР-2 ОИЯИ и ВВР-М ИЯИ АН УССР. Спектры нейтронов восстанавливались итерационным методом на мини-ЭВМ СМ-3.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой.

Voytov A.I. et al.

P3-86-155

Application of Multicomponent Activation Detectors to Neutron Field Spectrometry

Activation method for neutron spectrum measurement in intensive neutron fields based not on a set of single resonant and threshold indicators, but on one or two multicomponent activation detectors (MAD) composed of a mixture of different isotopes is described. The requirements to the choice of isotopes and reactions for MAD used in resonant and fast neutron spectrum measurements are discussed in detail. Its composition and characteristics are presented. The questions of MAD induced activity with the account of some corrections (cascade coincidence, gamma self-absorption in MAD, pulse interference, etc) are reviewed. The results of measurements of fast neutron spectra in intensive beams of nuclear reactors IBR-2 (JINR) and VVR-M (INR of Ac. of Sciences of UkSSR) are given. Neutron spectra were deconvoluted by interaction method using the SM-3 mini-computer.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986