

УДК 539.125.52:621.384.654

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ
ГЕНЕРАТОРОВ 14 МэВ-НЕЙТРОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
СПЕКТРОМЕТРОВ НЕЙТРОНОВ С ОРГАНИЧЕСКИМИ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ****В.Д. Севастьянов, О.И. Коваленко, С.А. Калашников, Р.М. Шибяев,
* Ю.А. Кашук, * С.Ю. Обудовский, ** П.И. Руднев***ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, e-mail:sevast@vniiftri.ru*** Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,
Троицк, e-mail: S.Obudovsky [obud@triniti.ru]****Общество с ограниченной ответственностью «Центр-АЦП»,
Москва, e-mail:peter@centeradc.ru*

В статье описывается измерение энергетических спектров генераторов 14 МэВ-нейтронов с применением спектрометров с органическими сцинтилляторами.

The measurements of energy spectrum of neutrons using spectrometers with organic scintillation detectors are described in the article.

Ключевые слова: энергетические спектры, генератор 14 МэВ-нейтронов, спектрометры нейтронов

Спектрометры нейтронов с сцинтилляционными органическими детекторами давно используются для измерения характеристик излучений в смешанных полях нейтронов и γ -излучения радионуклидных источников нейтронов, вблизи мишеней блоков нейтронных генераторов и за биологической защитой ядерных и термоядерных реакторов [1–3]. В указанных спектрометрах для идентификации нейтронов и гамма-квантов, а также для измерения спектральных и временных характеристик смешанных полей излучений используются органические сцинтилляционные детекторы с аналоговой обработкой сигналов поступающих с фотоэлектронного умножителя спектрометров. Идентификация частиц (нейтронов и гамма-квантов) по форме импульсов в аналоговых спектрометрах первого типа основана на том, что для органических сцинтилляторов (монокристаллов стибена и паратерфинала) форма сцинтилляционного импульса от нейтронов и гамма-квантов различна. Оптимальная загрузка таких спектрометров по скорости счета импульсов от фотоумножителя не велика и не превышает 10^3 имп/с [1]. Поэтому эти спектрометры могут использоваться только для измерения характеристик полей нейтронов низкоинтенсивных источников излучений.

В последние годы на основе достижений цифровых технологий регистрации и обработки сигналов разработаны спектрометры нейтронов в смешанных полях излучений второго типа с цифровым методом идентификации частиц по формуле импульса, которые обладают более высокими характери-

стиками, чем аналоговые методы [4]. В этом случае импульсы с фотоумножителя поступают непосредственно на сверхбыстродействующие аналого-цифровые преобразователи (АЦП) сигналов и кодируются в нём по форме импульса. Такие спектрометры работоспособны в более интенсивных полях нейтронов при нагрузках их измерительных трактов до 10^5 имп/с.

В настоящей работе для измерений энергетических спектров в полях 14-МэВ генераторов нейтронов использовали спектрометры нейтронов обоих типов, описанных выше с целью уменьшения возможных систематических погрешностей измерений.

Измерение энергетических спектров нейтронов с применением указанных выше спектрометров с органическими сцинтилляторами в работе преимущественно проводили на двух нейтронных генераторах. Нейтроны энергией ~14 МэВ генерировали на них по реакции $T(d,n)^4He$. Энергия ускоряемых дейтронов, бомбардирующих тритиевую мишень, была 270 кэВ (генератор СНЕГ-13) и 150 кэВ (генератор НГ-160 госэталопа ГЭТ 51-80). Ток ионных пучков нейтронных генераторов при проведении экспериментов варьировали от сотен микроампер до десятков миллиампер. На генераторе СНЕГ-13 энергетический спектр нейтронов измеряли с применением спектрометра первого типа. В качестве детектора спектрометра использовали сцинтилляционный кристалл стибьбена размером 15×10 мм. Измерения проводили на расстоянии 535 мм от тритиевой мишени генератора в направлении ускоряемого пучка дейтронов. Один из измеренных спектров нейтронов приведён на рис. 1 [1].

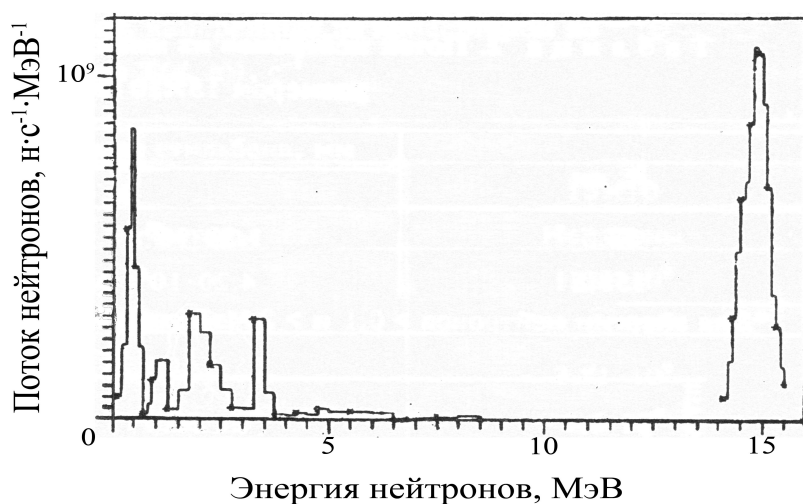


Рис. 1. Спектр нейтронов генератора СНЕГ-13

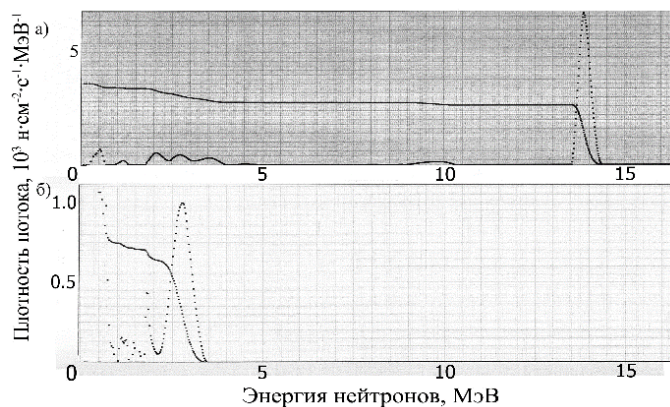


Рис. 2. а) Спектр нейтронов генератора ГЭТ 51-80; б) Спектр нейтронов генератора ИНГ-07Д

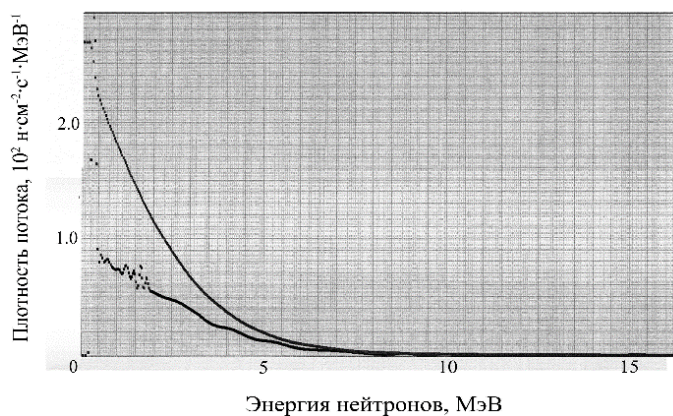


Рис. 3. Спектр нейтронов источника спонтанного деления ^{252}Cf

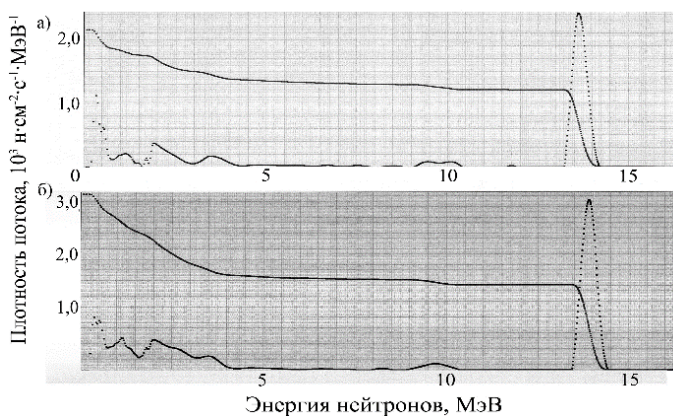


Рис. 4. а) Спектр нейтронов генератора НГ24М;
б) Спектр нейтронов генератора ГЭТ51-80 после слоя свинца 120 мм

На генераторе НГ-160 (ГЭТ 51-80) измерение энергетических спектров нейтронов проводили нейтронным спектрометром второго типа (SDMF-1206 PRO). Измерения также проводили в направлении ускоряемого пучка дейтронов на расстоянии 122 мм от тритиевой мишени генератора. Измеренный спектр нейтронов представлен на рис. 2а (здесь и далее аналогично: * - интегральный спектр нейтронов, ** - дифференциальный спектр нейтронов).

Из данных рис. 1 и 2а можно видеть, что измеренные спектры нейтронов практически идентичны. Однако спектр нейтронов генератора НГ-160 (ГЭТ 51-80) более детален т.к. технические характеристики спектрометра второго типа значительно превышают технические характеристики спектрометра первого типа (быстродействие спектрометра улучшено на порядок). На обоих рисунках просматриваются пики при энергиях: 2,3; 2,7; 3,6; 10 и 14 МэВ. Однако пики 2,3; 2,7; 3,6; 10 МэВ не выделяются в спектре нейтронов спонтанного деления ядер ^{252}Cf , для которого средняя энергия нейтронов составляет 2,14 МэВ (рис. 3). Это означает, что указанные выше пики в спектрах генераторов обусловлены только нейтронами с энергией 14 МэВ.

Пик 14-МэВ нейтронов в спектрометре обусловлен моноэнергетическими нейтронами, вылетающими из мишени в результате взаимодействия ускоренных дейтронов с ядрами трития в тритиевой мишени по реакции $\text{T}(d,n)^4\text{He}$. Незначительный пик 10 МэВ-нейтронов в спектре обусловлен 14-МэВ нейтронами, упруго рассеянными на ядрах кислорода, содержащихся в воде, охлаждающей тритиевую мишень генератора. Ядра отдачи кислорода в результате лобового соударения с 14-МэВ нейтроном приобретают энергию не более 4 МэВ. 10 МэВ-нейтроны вылетают преимущественно в направлении 14 МэВ нейтрона, участвующего в столкновении с ядром кислорода [5].

Пик нейтронов в спектре с энергией 3,6 МэВ в спектрах генераторов 14 МэВ нейтронов обусловлен развалом ядер углерода, содержащихся в материале органических сцинтилляторов спектрометра нейтронов, на нейтрон и три α -частицы при бомбардировке их нейтронами с энергией 14 МэВ (см. п. 4 табл.), рис. 1 и 2а [6].

Пик нейтронов в спектре (рис. 2а) с энергией 2,7 МэВ обусловлен нейтронами с энергией 2,7 МэВ из сопутствующей мешающей реакции $\text{D}(d,n)^3\text{He}$. При длительной работе тритиевой мишени и облучении её ускоренным пучком дейтронов имеют место преимущественно два процесса: выход нейтронов с энергией 14 МэВ из тритиевой мишени падает в результате испарения трития из-за разогрева мишени пучком дейтронов; происходит набивка ускоренных дейтронов в тритиевую мишень, в результате чего выход нейтронов из мишени по сопутствующей реакции увеличивается и вклад нейтронов с энергией $\sim 2,7$ МэВ в общий поток нейтронов также увеличивается. Имеет место и 3-й эффект, а именно распад ядер трития в мишени ($T_{1/2}=12,32(2)$ года), в результате чего поток нейтронов с энергией ~ 14 МэВ из мишени

уменьшается. Для экспериментальной проверки вышеизложенного факта (пика с энергией 2,7 МэВ) был измерен спектр нейтронов $D(d,n)^3\text{He}$ источника нейтронов типа ИНГ-07Д с применением описанного выше спектрометра (см. рис. 2б). На рисунке присутствует пик от нейтронов с энергией 2,7 МэВ.

Пик нейтронов в спектре с энергией ~ 2 МэВ обусловлен нейтронами, образующимися в результате неупругих процессов (n,n') и $(n,2n)$ взаимодействия 14 МэВ-нейтронов с ядрами железа, содержащихся в материале мишени и мишенного блока генераторов. Сечение указанных ядерных реакций приведены в колонке «Сечение реакции при облучении 14,5 МэВ-нейтронами» таблица [6]. Средняя энергия нейтронов в спектрах, образующихся при бомбардировке ядер железа нейтронами с энергией 14 МэВ, составляет ~ 2 МэВ [7]. Вклад нейтронов с энергией ~ 2 МэВ в спектре нейтронов 14-МэВ источников нейтронов измеренный нейтронно-активационным методом может достигать десятков процентов [8]. Он определяется массой мишенных блоков используемых нейтронных генераторов. Это также видно из измеренного спектра портативного генератора НГ-24М, возле мишенного блока которого находится массивные конструктивные элементы из железа и спектра нейтронов генератора ГЭТ 51-80, за мишенным блоком которого размещён слой свинца толщиной 120 мм (см. рис. 4а и 4б).

Таблица

Ядерно-физические характеристики ядерных реакций на углероде и железе

№ п/п	Реакция, содержание нуклида-мишени, %	Период полураспада в продуктах активации ($T_{1/2}$)	Источник информации	Сечение реакции при облучении 14,5 МэВ-нейтронами, мб	Энергетический порог реакции, МэВ
1	$^{12}\text{C}(n,p)^{12}\text{B}$ 98,89	20,2 0(2) мс	GENDL-3.1	0,395	12,5871
2	$^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$ 98,89	100%	TENDL-3.1	74,418	5,702
3	$^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ 98,89	20,370 (29) м	TENDL-2014	0	18,721
4	$^{12}\text{C}(n,n'3\alpha)$ 98,89	10^{-16} с	GENDL-3.1	213,583	7,275
5	^{12}C elastic			794,7	
6	^{12}C inelastic			425,6	
7	^{16}O elastic		GENDL-3	897,9	
8	$^{16}\text{O}(n,n')$ 99,762(16)		GENDL-3	508,4	
9	$^{16}\text{O}(n,2n)$	2,041 (6) м	GENDL-3	-	15,669
10	$^{56}\text{Fe}(n,n')$ 91,754(36)		GENDL-3	761,5	0,862
11	$^{56}\text{Fe}(n,2n)$ 91,754(36)	2,737 (1) г	GENDL-3	439,1	11,4

Дополнительными целями измерения энергетических спектров нейтронов около мишенных блоков генераторов 14 МэВ-нейтронов также были:

- определение физики формирования энергетических спектров нейтронов, вылетающих из мишени и мишенных блоков нейтронных генераторов;
- проверка корректности методик определения выхода нейтронов из мишени в телесный угол 4π -стерадиан и определения потока нейтронов с энергией 14 МэВ из мишенных блоков нейтронных генераторов.

В результате проведённых исследований можно констатировать, что непосредственно из мишени могут вылетать преимущественно моноэнергетические нейтроны с энергией 14 МэВ, генерируемые по реакции $T(d,n)^4He$, а также нейтроны с энергией $\sim 2,7$ МэВ, генерируемые по мешающей сопутствующей реакции $D(d,n)^3He$. Последняя реакция имеет место в мишени в результате набивки в неё ускоренных дейтронов с энергией 150-200 кэВ. Для корректного измерения выхода нейтронов из мишени и потоков 14 МэВ-нейтронов из мишенных блоков генераторов необходимо использовать «свежие» тритиевые мишени только сразу после их изготовления. В частности, это крайне необходимо для определения выхода нейтронов (W) методом счёта сопутствующих вылету нейтронов с энергией 14 МэВ α -частиц в телесный угол 4π -стерадиан из тритиевой мишени генератора [9].

$$W = \frac{n_\alpha}{G_\alpha} K_{ан} ,$$

где n_α – количество зарегистрированных α -частиц, в единицу времени вылетающих в их телесный угол регистрации; G_α – телесный угол регистрации α -частиц; $K_{ан}$ – коэффициент, учитывающий анизотропию вылета нейтронов и α -частиц из указанной выше реакции.

Из изложенного выше также следует, что из мишенных блоков могут вылетать:

- моноэнергетические нейтроны с энергией 14 МэВ, генерируемые в мишени по реакции $T(d,n)^4He$;
- нейтроны с средней энергией < 2 МэВ, генерируемые в материале мишенного блока (железо) в результате неупругих процессов (n,n') и $(n,2n)$;
- нейтроны с средней энергией ~ 10 МэВ, получаемые в результате упругого рассеяния нейтронов на ядрах кислорода, присутствующих в воде, охлаждающей тритиевую мишень в мишенном блоке генератора нейтронов;
- нейтроны с энергией $\sim 2,7$ МэВ в результате мешающей сопутствующей реакции $D(d,n)^3He$.

В этом случае поток моноэнергетических нейтронов с энергией 14 МэВ из мишенного блока рассчитывали по формуле [9, 10]:

$$\Phi = \frac{n_\alpha}{G_\alpha} K_{ан} K_{п} ,$$

где n_α – количество α -частиц, вылетающих в телесный угол регистрации α -частиц, $K_{ан}$ – коэффициент, учитывающий угловую анизотропию вылета нейтронов и α -частиц; $K_{п}$ – коэффициент, учитывающий уменьшения пото-

ка 14 МэВ-нейтронов в результате поглощения нейтронов в стенке мишенного блока и неупругого рассеяния нейтронов на ядрах железа, входящих в состав материала мишенных блоков.

Литература

1. Севастьянов В.Д., Трыков Л.А., Колеватов Ю.И., Волков В.С., Ковальчук В.Д., Мартаков Ю.П. Исследование характеристик полей нейтронов и гамма-излучения высокоинтенсивного источника нейтронов с энергией 14,8 МэВ, созданного на базе нейтронного генератора // *Атомная энергия*, 1997, т. 82, в. 6, с. 432-439.
2. Севастьянов В.Д., Коваленко О.И., Орлов А.В., Шибяев Р.М., Обудовский С.Ю., Портнов Д.В., Кашук Ю.А. Формирование энергетического спектра нейтронов вблизи мишенного блока источника моноэнергетических нейтронов с энергией ~14 МэВ // *Измерительная техника*, 2016, № 9, с. 59-64.
3. Севастьянов В.Д., Трыков Л.А. Исследование характеристик нейтронного и γ -излучения генераторов нейтронов // *Атомная энергия*, 2008, вып. 1, т. 104, с. 60-63.
4. Прокуронов М.В., Руднев П.И., Севастьянов В.Д. Спектрометр нейтронного и гамма-излучения на основе цифровых методов регистрации и обработки сигналов // *Современная электроника*, 2011, № 8, с. 38-41.
5. Физика быстрых нейтронов. Эксперименты и теория / Под. ред. Дж. Мариона и Дж. Фаулера // Перев. с англ. Под ред. д.ф.-м.н. Н.А. Власова, т. 1, А. – М., 1966, с. 37-54.
6. Бычков В.М., Манохин В.Н., Пашенко А.Б., Пляскин В.И. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами. Справочник. – М.: Энергоиздат, 1982, 216 с.
7. Стрижак В.И., Гуртовой М.Е., Лещенко Б.Е., Прокопец Г.А., Ситько С.П. Физика быстрых нейтронов / Под. ред. Стрижака. – М.: Атомиздат, 1977, с. 265.
8. Севастьянов В.Д., Маслов Г.Н., Ковальчук В.Д., Терешкин В.И., Литвин В.И., Мокичев Г.В., Игнатъев Г.Н. Исследование спектров генераторов нейтронов с энергией 14 МэВ // *Приборы и техника эксперимента*, 2006, № 3, с. 5- 13.
9. Мирсалихова Ф.Х. Скородумов Б.Г., Таланин Ю.Н. К вопросу об измерении абсолютного выхода нейтронов с энергией 14 МэВ по соответствующим альфа-частицам из реакции $T(d,n)^4He$ // *Известия АН Уз. ССР*, 1966, сер. физико-математических наук, № 4, 57-60.
10. Нефедов Ю.Я., Швецов М.С., Нагорный В.И., Суров Л.М. Измерение флюенса 14 МэВ нейтронов по сопутствующему альфа-излучению/ *Материалы III Всесоюзного совещания по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях*, т. 2, М.: ЦНИИАтоминформ, 1983, 92-98.