

Передача размера единиц от эталонного источника нейтронов с энергией 14 МэВ

В. Д. СЕВАСТЬЯНОВ*, В. В. БАРАНОВ**

* Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: sevast@vniifri.ru

** Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики, Москва, Россия

Описан метод передачи размера единиц от эталонного источника нейтронов с энергией 14 МэВ при помощи активационных детекторов из фторопласта и алюминия по реакциям $^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$, $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$.

Ключевые слова: источник нейтронов, активационные детекторы.

The method of the unit dimension transfer from the standard neutron source with energy 14 MeV is described. In this method the activative teflon and aluminium detectors at $^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$ and $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ have been used.

Key words: neutron source, activate detectors.

Низкоинтенсивные источники моноэнергетических нейтронов с энергией 14 МэВ (далее нейтронов 14 МэВ) широко используются в науке и технике [1, 2]. Их аттестация осуществляется с применением не только проградированных детекторов протонов отдачи [3—5], но и активационных детекторов. В данной статье приведена методика передачи размера единиц от эталонного источника нейтронов с использованием именно таких активационных детекторов из фторопласта и алюминия. Нейтроны 14 МэВ в детекторах регистрируются по реакциям $^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$ и $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$. Их основные ядерно-физические характеристики приведены в табл. 1 [6,7].

Таблица 1

Основные характеристики ядерных реакций
 $^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$, $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$

Ядерная реакция	Энергетический порог, МэВ	Период полураспада продукта, ч	Энергия регистрируемого γ -излучения продукта, МэВ (эмиссия, %)
$^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$	11,4	1,8293 (4)	0,511 (193,4)
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	6,0	14,9564 (21)	1,3686 (100,0)

При передаче размера единиц к аттестуемым источникам моноэнергетических нейтронов использовался эталонный источник нейтронов 14 МэВ государственного специального эталона ГЭТ 51—80 [8]. Генерация нейтронов как в эталонном, так и в аттестуемых источниках осуществлялась ускоренными до энергии 100—150 кэВ дейтронами в тритийтитановых мишенях по реакции $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} = n + ^4_2\text{He} + 17,5897$ МэВ. Чтобы уменьшить разогрев тритиевого слоя мишени на эталонном источнике, генерация нейтронов проводилась только атомарным пучком дейтронов. Для этого на генераторе нейтронов эталона были дополнительно установлены коммутирующий магнит и квадрупольные линзы. Коммутирующий магнит разделял пучки атомарных и молекулярных дейтронов, в результате чего тритиевую мишень бомбардировали только атомарные дейтроны. Квадрупольные линзы дополнительно фокусировали пучок атомарных дейтронов после прохождения им коммутирующего магнита

для обеспечения равномерного облучения поверхности тритиевой мишени, находящейся в поле видимости детектора сопутствующих α -частиц. Необходимо отметить, что при генерации нейтронов по указанной выше реакции наблюдалась угловая анизотропия между вылетом нейтрона и сопутствующей ему α -частицей [9], которая увеличивалась с ростом энергии ускоряемых дейтронов. В связи с этим потребовалось ввести коэффициенты угловой анизотропии при расчете характеристик полей нейтронов источников (плотности потока и потока).

При передаче размера единиц от эталонного к аттестуемым источникам нейтронов использовали специальные высокочувствительные активационные детекторы из фторопласта и алюминия. Детекторы имели форму либо стакана с внешним и внутренним диаметрами 104 и 73 мм, высотой 74 мм, глубиной полости 54 мм и массой 888,3 г, либо форму кольца с внешним и внутренним диаметрами 112 и 81 мм, высотой 26 мм и массой 264,4 г.

Для аттестации источников нейтронов 14 МэВ чаще всего применяли активационные детекторы из фторопласта. Активационные же детекторы из алюминия использовали только тогда, когда ожидаемый временной интервал с момента конца облучения детекторов нейтронами на аттестуемом источнике до момента измерения их наведенной активности на радиометрическом комплексе эталона превышал 2—3 периода полураспада продукта реакции $^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$. При аттестации одни и те же активационные детекторы облучали как на эталонном, так и на аттестуемых источниках нейтронов в идентичных геометрических условиях (рис. 1, а, б). Наведенную активность γ -излучения активационных детекторов после их облучения нейтронами измеряли в геометрии, представленной на рис. 2, а, б, с применением одного и того же γ -спектрометра радиометрического комплекса ГЭТ 51—80 со сцинтилляционным блоком детектирования типа БДЕГ 2-23, в котором размещен сцинтилляционный кристалл NaJ(Tl) размером 63×63 мм.

Работу спектрометра перед каждым измерением контролировали с помощью источника ^{22}Na из набора образцовых источников γ -излучения. При этом измеряли скорость счета импульсов в фотопиках от γ -излучения с энергией 0,511 или 1,275 МэВ. Плотность потока ϕ и поток нейтронов Φ ат-

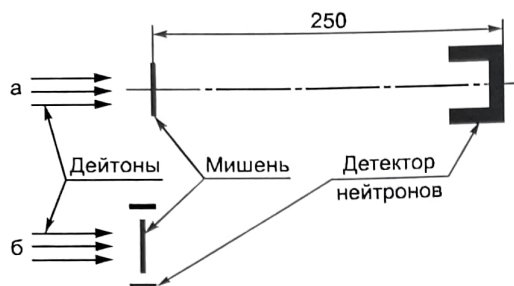


Рис. 1. Схема облучения детекторов нейтронов в форме стакана (а) и кольца (б) при аттестации

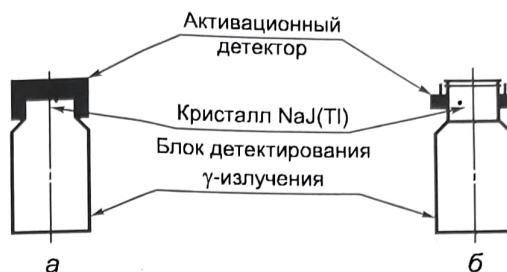


Рис. 2. Схема измерения наведенной активности γ-излучения активационных детекторов в форме стакана (а) и кольца (б)

тестуемого i -го источника нейтронов рассчитывали из соотношений

$$\varphi_a^i = R_a^i(\varphi_3 / R_3); \quad \Phi_a^i = R_a^i(\Phi_3 / R_3), \quad (1)$$

где φ_a^i , φ_3 , Φ_a^i , Φ_3 — плотности потоков нейтронов и потоки нейтронов при измерениях на i -м аттестуемом и эталонном источниках нейтронов; R_a^i , R_3 — величины, пропорциональные скоростям ядерных реакций $^{19}\text{F}(n, 2n)$ и $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$ в активационных детекторах из фторопласта или алюминия при облучении их в i -м аттестуемом или в эталонном источниках нейтронов,

$$R^i = N_0^i \left[1 - E^{-(\lambda^i t_0^i)} \right];$$

N_0^i — скорость счета импульсов в фотопиках от γ-излучения продуктов активации в i -м активационном детекторе после облучения нейтронами в i -м аттестуемом либо эталонном поле нейтронов, приведенная на конец времени облучения нейтронами и с поправкой на распад нуклида продукта реакции в процессе измерения наведенной в нем активности; λ^i — постоянная распада продукта активации в i -м детекторе; t_0^i — время облучения i -го активационного детектора в поле нейтронов.

Плотность потока и поток нейтронов 14,6 МэВ эталонного источника нейтронов рассчитывали по формулам [10—12]:

$$\varphi = \left[n_\alpha / (G_\alpha r^2) \right] K_{ан}^\varphi K_{нт} K_\alpha K_n K_H; \quad (2)$$

$$\Phi = (n_\alpha / G_\alpha) K_{ан}^\Phi K_{нт} K_\alpha K_n K_H,$$

где n_α — скорость счета α-частиц с энергией около 3 МэВ, сопутствующих вылету нейтронов; G_α — геометрический фактор регистрации α-частиц в радиометре; r — расстояние от тритиевого слоя мишени до точки, в которой определяется

плотность потока нейтронов; $K_{ан}^\varphi$, $K_{ан}^\Phi$ — коэффициенты, учитывающие анизотропию вылета нейтронов и α-частиц при расчете φ и Φ ; $K_{нт}$ — коэффициент, учитывающий неточность поверхности тритиевой мишени, бомбардируемой пучком ускоренных дейтронов; K_α — чувствительность радиометра к заряженным частицам из сопутствующих реакций

$^2\text{H}(d, p)^3\text{H}$, $^2\text{H}(^3\text{He}, p)$, а также реакций (n, p) и (n, α) , происходящих в материале детектора радиометра и окружающих его конструкций; K_n , K_H — коэффициенты, учитывающие поглощение нейтронов 14 МэВ в конструкционных элементах мишенного блока и уменьшение их потока вследствие неупругих процессов (n, n') и $(n, 2n)$ в материале мишенного блока.

Коэффициенты анизотропии $K_{ан}^\varphi$ и $K_{ан}^\Phi$ для различных углов регистрации α-частиц к направлению ускоряемых дейтронов определенной энергии приведены в [10—12]. В табл. 2 указаны числовые значения коэффициентов из (2) для расчета плотности потока и потока нейтронов при $G_\alpha = 1,6204 \cdot 10^{-6}$ [13].

Таблица 2

Значения коэффициентов в формуле (2)

Измеряемая величина	Энергия ускоряемых дейтронов, кэВ	$K_{ан}^\varphi$	$K_{нт}^\varphi$	K_α^φ	K_n^φ	K_H^φ
φ	100	1,235	0,999	0,998	0,999	0,996
	148	1,270	0,999	0,998	0,999	0,996
Φ	100	1,175	0,999	0,998	0,999	0,996
	148	1,200	0,999	0,998	0,999	0,996

Из табл. 2 следует, что наиболее значимыми величинами для вычисления φ и Φ являются расчетные коэффициенты анизотропии $K_{ан}$. Поэтому были измерены отношения Φ_3 / R_3 (см. (1)) на эталонном источнике нейтронов для энергий ускоренных дейтронов $E = 100$ и 148 кэВ для активационного детектора разной формы из фторопласта (табл. 3).

Согласно данным табл. 3 отношение Φ_3 / R_3 , которое используется при передаче размера единиц от эталонного к аттестуемым источникам, претерпевает значительные изменения в зависимости от энергии ускоряемых дейтронов (100 или 148 кэВ). Так, для активационного детектора из фторопласта в форме стакана (см. рис. 1, а) отличие составляет 12,8 %, а для детектора в форме кольца (см. рис. 1, б) оно достигает 7,0 %. Из расчетных данных [11] изменение коэффициента анизотропии потока должно быть 6,5 %. Последнее значение хорошо коррелирует с изменением отношения Φ_3 / R_3 при измерении его детектором из фторопласта в форме кольца, установленного в плоскости тритиевой мишени. Активация его проводится практически моноэнергетическими нейтронами с энергией 14,1 МэВ [14]. К тому же, градиент изменения потока нейтронов под углом 90° незначителен [9].

Таблица 3

Измеренные отношения Φ_3 / R_3

Форма детектора	Φ_3 / R_3 при E, кэВ		Отношение
	100	148	
Стакан	62524	55425	1,128
Кольцо	12782	13673	1,0697

К достоинствам спектрометра с активационным детектором в форме кольца следует также отнести то, что его чувствительность в пять раз превышает чувствительность спектрометра с детектором из фторопласта в форме стакана. Завышенное значение Φ_0/R_0 на 12,8 % по сравнению с расчетным значением изменения коэффициента анизотропии обусловлено прежде всего следующими факторами:

регистрацией детектором нейтронов преимущественно в направлении ускоряемого пучка дейтронов, для которого наблюдается наибольший разброс энергии нейтронов 14 МэВ; значительно большим градиентом в распределении потока нейтронов в направлении ускоряемого пучка нейтронов [9];

большим градиентом сечения ядерной реакции $^{19}\text{F}(n, 2n)$ в диапазоне энергии нейтронов 13—16 МэВ [7].

Погрешность определения плотности потока (или потока) при аттестации источников нейтронов рассчитывали (см. формулу (1)) по соотношению

$$\delta\varphi_a = \delta\varphi_3 + 2\sqrt{(\delta R_3)^2 + (\delta R_a)^2},$$

где $\delta\varphi_3$ — погрешность воспроизведения единицы плотности потока нейтронов государственным эталоном ГЭТ 51—80 [15]; δR_3 , δR_a — случайные погрешности измерения величины R_i .

Из изложенного можно сделать следующие выводы. При передаче размера единиц от эталонного источника к аттестуемым необходимо контролировать идентичность не только геометрических условий облучений активационных детекторов на источниках, но и энергии ускоряемых дейтронов. При этом для передачи размера единиц от государственного эталона целесообразно использовать активационные детекторы в форме кольца, так как в этом случае изменение энергии ускоряемых дейтронов менее значимо при расчете характеристик аттестуемых источников нейтронов.

Изложенный метод передачи размера единиц от эталонного источника был использован для аттестации моноэнергетических источников на ряде предприятий России.

Л и т е р а т у р а

1. **Боголюбов Е. П., Рыжков В. И.** Портативные генераторы нейтронов Всероссийского НИИ автоматики (ВНИИА) для физических исследований // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 2. С. 100.
2. **Бессарабский Ю. Г. и др.** Управляемый скваженный излучатель нейтронов // Атомная энергия. 1994. Т. 77. Вып. 3. С. 226.
3. **Севастьянов В. Д.** Детектор моноэнергетических нейтронов с энергией 14 МэВ // Измерительная техника. 1989. № 12. С. 46; **Sevast'yanov V. D.** Detector of monoenergetic neutrons of 14 MeV // Measurement Techniques. 1989. V. 32. N 12. P. 1206.

4. **Севастьянов В. Д., Трыков Л. А.** Исследование характеристик нейтронного и γ -излучения генераторов нейтронов // Атомная энергия. 2008. Т. 104. Вып. 1. С. 60.

5. **Севастьянов В. Д., Трыков Л. А.** Исследование характеристик полей нейтронов и γ -излучения генераторов нейтронов с энергией 14 МэВ при использовании спектрометра с кристаллом стибьбена // Измерительная техника. 2008. № 5. С. 53; **Sevast'yanov V. D., Tрыkov L. A.** Neutron and γ -radiation field characteristics for 14 MeV neutron generators used with a stilbene-crystal spectrometer // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 5. P. 541.

6. **Голашвили Т. В. и др.** Справочник нуклидов / Под ред. В. Н. Михайлова. М.: ЦНИИАтоминформ, 2002.

7. **Бычков В. М. и др.** Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами: Справ. пособие. М.: Энергоатомиздат, 1982.

8. **Васильев Р. Д., Ярына В. П., Севастьянов В. Д.** Государственный специальный эталон единицы плотности потока нейтронов для области измерений на ядерно-физических установках // Измерительная техника. 1974. № 7. С. 10; **Vasil'ev R. D., Yaryna V. P., Sevast'yanov V. D.** Special state standard for unit neutron flux density in the measurement range of nuclear physics installations // Measurement Techniques. 1974. V. 17. N 7. P. 990.

9. **Физика быстрых нейтронов.** Т. 1. Техника эксперимента / Под ред. Дж. Мариона и Дж. Фаулера. М.: Госатомиздат, 1963.

10. **Севастьянов В. Д.** Создание и исследование системы моделирующих опорных полей нейтронов на исследовательских ядерно-физических установках: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. М., 2000.

11. **Мирсалихова Ф. Х., Скородумов Б. Г., Таланин Ю. Н.** К вопросу об измерении абсолютного выхода нейтронов с энергией 14 МэВ по сопутствующим альфа-частицам из реакции $T(d, n)^4\text{He}$ // Изв. АН Уз. ССР, сер. физ.-мат. наук. 1966. № 4. С. 57.

12. **Нефедов Ю. Я. и др.** Измерение флюенса 14 МэВ-нейтронов по сопутствующему альфа-излучению // Тез. докл. 3-го Всесоюз. совещ. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М.: ЦНИИАтоминформ, 1983. Т. 2. С. 92.

13. **Curtis M. L. e. a.** // Nucleonics. 1955. V. 13. N 5. P. 38.

14. **Борисов Г. А., Васильев Р. Д., Шевченко В. Ф.** Кинематические таблицы ядерных реакций d, n и p, n . М.: Изд-во стандартов, 1974.

15. **ГОСТ 8.105—80.** ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений плотности потока и флюенса нейтронов на ядерно-физических установках.

Дата принятия 28.10.2009 г.