

Радиометрический комплекс с гамма-спектрометрами для измерений характеристик полей нейтронов ядерно-физических установок

В. Д. СЕВАСТЬЯНОВ, О. И. КОВАЛЕНКО, Д. А. ЗЕЛЕНОВ, А. В. ОРЛОВ

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

Приведена методика измерений наведенной активности в активационных детекторах нейтронов с применением гамма-спектрометров со сцинтилляционными и полупроводниковыми детекторами. Измерена зависимость чувствительности гамма-спектрометров от энергии γ -излучения в диапазоне 0,06—3 МэВ.

Ключевые слова: детектор нейтронов, гамма-спектрометр.

The procedure of measurement of the induced activity in activation detectors of neutrons with use of gamma spectrometers with scintillation and semiconductor detectors is given. The dependence of the sensitivity of gamma spectrometers on the γ -radiation energy in the range of 0,06—3 MeV is measured.

Key words: neutron detector, gamma spectrometer.

Измерения характеристик полей нейтронов (плотности потока, флюенса, спектра и др.) ядерно-физических установок (ЯФУ) с целью их аттестации в качестве эталонных полей нейтронов в соответствии с [1] осуществляются с применением нейтронно-активационных детекторов, методик выполнения измерений наведенной активности активационных детекторов после их облучения нейтронами и методик восстановления спектра нейтронов [2, 3]. В табл. 1 приведены ядерно-физические характеристики ряда активационных детекторов [2], используемых для измерений характеристик полей нейтронов на ЯФУ с применением государственного специального эталона (ГСЭ) [1]. Для нуклидов-мишеней активационных детекторов приведены следующие основные характеристики: энергия основного резонанса; сечение активации тепловыми нейтронами, эффективный порог реакции; содержание нуклидов-мишеней в естественной смеси изотопов; период полураспада; энергия и эмиссия γ -излучения продукта активации. Из колонок 8—12 табл. 1 следует, что диапазон значений периодов полураспадов нуклидов—продуктов активации лежит в диапазоне от десятков минут до сотен суток, а значения энергии γ -излучения нуклидов — продуктов активации не превышают 3 МэВ.

При восстановлении спектра нейтронов полей ЯФУ нейтронные характеристики определяют из интегрального уравнения Фредгольма первого рода с дискретным заданием параметра в форме системы интегральных соотношений, связывающих скорость i -й ядерной реакции R_i в активационном детекторе (при его облучении нейтронами), нормированную на одно ядро нуклида-мишени детектора с дифференциальной плотностью потока нейтронов $\varphi(E)$ и сечением i -й ядерной реакции $\sigma_i(E)$:

$$R_i = \int_0^{\infty} \varphi(E) \sigma_i(E) dE, \quad (1)$$

где E — энергия нейтронов.

В соответствии с (1) погрешность измерения $\varphi(E)$ зависит как от погрешностей, связанных с восстановлением спектра нейтронов и дифференциальными сечениями ядерных реакций в нуклидах-мишенях активационных детекторов $\sigma_i(E)$, так и от погрешностей измерений скоростей ядерных реакций в нуклидах-мишенях активационных детекторов. Погрешность измерения $\sigma_i(E)$ для нуклидов-мишеней в активационных детекторах обусловлена достигнутым уровнем точности в мировой практике нейтронных измерений. Погрешность оцененных сечений σ_i в настоящее время составляет 2—4 % ($P = 0,95$) [2, 4].

Из (1) также следует, что нейтронные характеристики в аттестуемых полях рассчитывают исходя из измеренных в них скоростей ядерных реакций R_i ,

$$R_i = A_i / \left(1 - e^{-\lambda_i t_0^i} \right), \quad (2)$$

где A_i — активность нуклида-мишени в i -м детекторе в конце времени его облучения нейтронами; λ_i — константа распада для продукта активации в i -м активационном детекторе; t_0^i — время облучения нейтронами i -го активационного детектора.

Согласно (2) основной измеряемой величиной при определении R_i является активность A_i продукта активации в активационном детекторе нейтронов.

Ниже описана методика измерений наведенной активности нейтронно-активационных детекторов после их облучения в полях нейтронов ЯФУ с применением оптимального количества гамма-спектрометров различных типов, отличающихся как по энергетическому разрешению, так и по чувствительности к γ -излучению.

При измерении наведенной активности продукта активации в активационном детекторе на радиометре со спектрометром γ -излучения его активность рассчитывают по формуле

Ядерно-физические характеристики ряда активационных детекторов специализированного набора ГСЭ [1]

№ п/п	Ядерная реакция	Энергия основного резонанса, эВ	Сечение тепловыми нейтронами, барн	Эффективный порог реакции, МэВ	Природное содержание нуклидов-мишеней		Период полураспада продукта активации		γ-излучение		
					значение	погрешность, %	значение	погрешность, %	энергия, МэВ	значение	погрешность, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	$^{176}\text{Lu}(n, \gamma)^{177}\text{Lu}$	0,142	1953	—	2,59	0,77	6,6475 сут	0,03	0,208	11,0	5,46
2	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	4,906	99,2	—	100	—	2,69517 сут	0,01	0,412	95,6	0,02
3	$^{139}\text{La}(n, \gamma)^{140}\text{La}$	72,17	8,95	—	99,91	0,01	1,6781 сут	0,02	1,596	95,4	1,47
4	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$	132	37,2	—	100	—	5,2713 лет	0,02	1,173 1,333	99,97 99,99	0,01 0,01
5	$^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$	336	13,3	—	100	—	2,5789 ч	0,01	0,847 1,811 2,113	98,9 27,2 14,3	0,30 2,94 2,80
6	$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$	579	4,51	—	69,17	0,03	12,700 ч	0,02	0,511	34,3	—
7	$^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$	2850	0,531	—	100	—	14,9590 ч	0,01	1,37 2,75	100 99,94	— 0,01
8	$^{151}\text{Eu}(n, \gamma)^{152m}\text{Eu}$	0,461	3900	—	47,77	0,02	9,3116 ч	0,01	0,842 0,963 0,344	14,2 11,7 2,4	11,97 11,97 16,67
9	$^{103}\text{Rh}(n, n')^{103m}\text{Rh}$	—	—	0,70	100	—	56,114 мин	0,02	0,040	0,07	7,35
10	$^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$	—	—	1,20	95,7	0,21	4,486 ч	0,09	0,336	45,8	0,48
11	$^{199}\text{Hg}(n, n')^{199m}\text{Hg}$	—	—	1,40	16,84	0,65	42,67 мин	0,21	0,158	52,3	1,91
12	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	—	—	2,50	68,27	0,02	70,86 сут	0,09	0,811 0,864 1,675	99,5 0,68 0,52	0,01 1,61 1,55

Измерения ионизирующих излучений

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	$^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$	—	—	3,00	95,02	0,10	14,284 сут	0,25	1,711	100	—
14	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	—	—	3,00	5,84	0,59	312,03 сут	0,96	0,835	99,98	0,01
15	$^{47}\text{Ti}(n, p)^{47}\text{Sc}$	—	—	3,20	7,44	0,27	3,3492 сут	0,02	0,159	68,3	0,59
16	$^{204}\text{Pb}(n, n')^{204\text{m}}\text{Pb}$	—	—	4,00	1,40	—	1,14 ч	3,508	0,375 0,899 0,912	89 99,17 90,69	0,17 0,02 0,11
17	$^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$	—	—	4,00	100	—	9,458 мин	0,127	1,014 0,844	28,0 71,8	1,43 0,56
18	$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	—	—	6,20	91,72	0,33	2,5789 ч	0,004	0,847 1,811 2,113	98,9 27,2 14,3	0,30 2,94 2,80
19	$^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$	—	—	7,00	78,99	0,04	14,9590 ч	0,008	1,369 2,754	100 99,94	— 0,01
20	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	—	—	7,20	100	—	14,9590 ч	0,008	1,369 2,754	100 99,94	— 0,01
21	$^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$	—	—	8,30	73,72	0,04	43,67 ч	0,206	1,038 0,984 1,312	97,6 100 100	0,72 0,00 0,00
22	$^{68}\text{Zn}(n, \alpha)^{65}\text{Ni}$	—	—	8,8	18,75	2,72	2,5172 ч	0,012	1,482 1,116 0,366	23,59 15,43 4,81	0,17 0,26 1,25
23	$^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$	—	—	10,5	100	—	10,15 сут	0,197	0,934 0,913 1,848	99,07 1,78 0,85	0,04 — —
24	$^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$	—	—	12,8	69,17	0,03	9,673 мин	0,083	0,511	195	—
25	$^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}$	—	—	12,9	51,45	0,78	78,41 ч	0,253	0,909	99,04	0,03
26	$^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$	—	—	13,0	100	—	1,8288 ч	0,016	0,511	193,7	0,14

$$A = C_p C_r C_n C_c N e^{\lambda t_b} / [S(E)\eta], \quad (3)$$

где N — скорость счета импульсов в пике полного поглощения (ПП) аппаратного спектра гамма-спектрометра от γ -излучения определенной энергии измеряемого радионуклида в детекторе; t_b — время выдержки детектора с момента окончания его облучения нейтронами до момента измерения его активности; $S(E)$ — чувствительность гамма-спектрометра к γ -излучению, испускаемому радионуклидом в исследуемом детекторе; η — эмиссия регистрируемого γ -излучения (см. табл. 1, колонки 10—12); C_p, C_r, C_n, C_c — коэффициенты, учитывающие соответственно распад измеряемого радионуклида за время измерения, отличие геометрии измерения исследуемых детекторов от геометрии γ -источников, которые применяют при градуировке гамма-спектрометров, поглощение γ -излучения в измеряемом детекторе, суммирование импульсов от каскадных фотонов с энергией E_1 и E_2 .

Под чувствительностью $S(E)$ понимают отношение скорости счета импульсов в пике ПП аппаратного спектра спектрометра к потоку γ -излучения определенной энергии, излучаемого в телесный угол 4π ср радионуклидом детектора, размещенного в фиксированной геометрии над торцом блока детектирования γ -излучения.

Коэффициенты, входящие в (3), вычисляют по формулам

$$C_p = \lambda\tau / (1 - e^{-\lambda\tau}); \quad (4)$$

$$C_r = (1 + T/L) [(D/2L)^2 / \ln(1 + (D/2L)^2)]; \quad (5)$$

$$C_n = \mu T / (1 - e^{-\mu T}); \quad (6)$$

$$C_c = [1 - \eta(E_2) w S(E_2) / Q(E_2)]^{-1}, \quad (7)$$

где τ — время экспозиции при измерении активности детектора; D, T — диаметр и толщина активационного детектора; L — расстояние от измеряемого детектора до эффективного центра блока детектирования; μ — массовый коэффициент поглощения γ -излучения в материале исследуемого детектора [5]; $\eta(E_2)$ — эмиссия γ -излучения с энергией E_2 ; w — фактор, учитывающий угловую корреляцию γ -квантов; $S(E_2)$ — чувствительность радиометра к γ -излучению с энергией E_2 ; $Q(E_2)$ — отношение числа импульсов в пике ПП с энергией E_2 ко всем зарегистрированным импульсам спектра.

В случаях суммирования с квантами характеристического рентгеновского или аннигиляционного излучений фактор $w = 1$ или 2, соответственно, и не зависит от расстояния гамма-источник—детектор γ -излучения.

Погрешность измерения активности δA радионуклида в измеряемом активационном детекторе при доверительной вероятности 0,95 находили из соотношения

$$\delta A = 2\delta N + 1,1 [(\delta S(E)^2 + (\delta\eta)^2 + (\delta C_p)^2 + (\delta C_r)^2 + (\delta C_n)^2 + (\delta C_c)^2 + (\delta\tau)^2 + (\delta\lambda)^2]^{1/2}, \quad (8)$$

где каждая погрешность является соответственно случайной или систематической погрешностью величин, входящих в (3) для расчета активности при доверительной вероятности 0,95.

Формулы (4)—(7) для расчета поправочных коэффициентов достаточно просты, поэтому их расчет не вызывает затруднений. Константы η, μ, w находят либо рассчитывают с учетом данных, приведенных в справочной литературе [5—7]. Погрешности расчета указанных поправочных коэффициентов незначительны из-за малости самих коэффициентов.

Радиометрические установки с гамма-спектрометрами используются для целей обеспечения единства измерений характеристик полей нейтронов на ЯФУ [1—3] в диапазонах 10^6 — 10^{13} см²/с плотности потока и 10^{-10} — 18 МэВ энергии нейтронов с требуемой для практики нейтронных измерений точностью.

Как уже было отмечено, исходной измеряемой величиной для определения нейтронных характеристик полей ЯФУ является наведенная активность A в активационных детекторах нейтронов. Она входит в формулу (2) для расчета скоростей ядерных реакций R_i в активационных детекторах, чтобы обеспечить корректное определение нейтронных характеристик в полях ЯФУ. Погрешность определения δR_i в соответствии с (1) не должна превышать погрешности 2—4 % оцененных сечений ядерных $\delta\sigma_i(E)$. Из изложенного следует, что погрешность измерения активности активационных детекторов не должна существенно превышать погрешностей измерений скоростей ядерных реакций, указанных выше. Эти значения погрешностей и являлись главным условием при выборе средства и методов измерений активности активационных детекторов, применяемых для исследования полей нейтронов ЯФУ.

Из формулы (3) для расчета наведенной активности активационных детекторов нейтронов (измеряемой с применением гамма-спектров) следует, что основными величинами для корректного определения активности являются скорость N счета импульсов в пике ПП аппаратного спектра гамма-спектрометра и его чувствительность к γ -излучению, испускаемому радионуклидом — продуктом активации в измеряемом детекторе. Скорость N счета импульсов определяют достаточно корректно с использованием программ поставляемых фирмами — изготовителями гамма-спектрометров. Однако отметим, что корректность расчета скоростей N счета импульсов также зависит от следующих величин: энергетического разрешения гамма-спектрометра. Аппаратурные пики от близлежащих линий γ -излучения радионуклида в измеряемом активационном детекторе могут накладываться друг на друга, что затрудняет обработку аппаратных пиков и приводит к увеличению погрешности определения скорости счета N , а следовательно, и погрешности измерения активности A ;

чувствительности спектрометра. Скорость счета N , с точки зрения корректности измерений, должна лежать в оптимальном диапазоне регистрации спектрометра. Малое значение N приводит к длительному времени измерения и, соответственно, к большему значению статистической погрешности ее определения. Большое же значение N может вызвать наложение аппаратных пиков от близких по энергии гамма-линий измеряемого радионуклида и, как результат, к увеличению погрешности значения N . Чтобы обеспечить оптимальный диапазон регистрации скорости счета N , целесообразно для измерения активности применять несколько гамма-спектрометров, существенно отличающихся по чувствительности регистрации γ -излучений. Из (2) и основного условия для выбора метода измерений наведенной активности активационных детекторов следует, что каждую радио-

Измерения ионизирующих излучений

Таблица 2

Измеренные значения чувствительности спектрометров радиометрического комплекса ГСЭ [1]

№ п/п	Радионук- лид	Период полураспада продукта активации		γ-излучение			Чувствительность спектрометров $S(E) \cdot 10^3$, имп/фотон		
		значение	погреш- ность, %	энергия, кэВ	эмиссия		ДГДК	УДС-ГЦ-63×63-USB	УДС-Canberra-63×63-USB
					значение	погреш- ность, %			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	¹⁴¹ Am	432,6 года	0,14	59,537	35,78	0,252	3,9768	39,0	23,0
2	¹³³ Ba	10,540 лет	0,06	80,997	34,1	0,880	10,5124	39,9	23,8
3	¹⁵² Eu	13,53 лет	0,04	121,782	28,41	0,458	14,4758	39,5	24,3
4	⁵⁷ Co	271,74 сут	0,02	122,061	85,60	0,199	14,3747	—	24,7
5	⁵⁷ Co	271,74 сут	0,02	136,474	10,68	0,749	14,6137	—	23,0
6	¹³³ Ba	10,540 лет	0,06	223,313	—	—	11,4060	—	—
7	¹⁵² Eu	13,537 лет	0,04	244,698	—	—	—	27,3	17,3
8	¹³³ Ba	10,540 лет	0,06	276,402	—	—	8,9336	—	15,7
9	¹³³ Ba	10,540 лет	0,06	302,852	18,33	0,327	8,0208	—	14,5
10	¹⁵² Eu	13,537 лет	0,06	344,279	26,59	0,451	6,9144	23,7	12,4
11	¹³³ Ba	10,540 лет	0,06	356,013	—	—	—	20,5	12,0
12	¹⁵² Eu	13,537 лет	0,04	411,116	—	—	5,8384	—	10,42
13	¹⁵² Eu	13,537 лет	0,04	443,965	—	—	—	—	9,08
14	²² Na	2,6027 года	0,04	511, 0	—	—	4,5801	16,5	7,36
15	¹³⁷ Cs	30,07 лет	0,10	661,6	85,1	0,235	3,59	14,0	5,95
16	¹⁵² Eu	13,537 лет	0,04	778,904	—	—	2,9862	—	4,65
17	⁵⁴ Mn	312,03 сут	0,01	834,848	99,976	0,001	—	11,3	4,64
18	¹⁵² Eu	13,537 лет	0,04	867,373	—	—	2,8208	—	4,10
19	⁸⁸ Y	106,616 сут	0,01	898,047	93,7	0,320	2,575	9,52	—
20	¹⁵² Eu	13,537 лет	0,04	1005,272	—	—	2,3623	—	—
21	¹⁵² Eu	13,537 лет	0,04	1112,069	13,41	0,447	2,2349	—	—
22	⁶⁰ Co	5,2713 лет	0,01	1173,237	99,974	0,001	—	5,87	—
23	¹⁵² Eu	13,537 лет	0,04	1212,948	—	—	1,7898	—	—
24	²² Na	2,6027 года	0,10	1274,543	99,940	0,044	1,9626	6,17	2,59
25	¹⁵² Eu	13,536 лет	0,04	1299,14	—	—	1,8913	—	—
26	⁶⁰ Co	5,2713 лет	0,01	1332,492	99,986	0,001	—	5,77	2,63
27	¹⁵² Eu	13,537 лет	0,04	1408,006	20,85	0,384	1,7667	5,25	—
28	⁸⁸ Y	106,616 сут	0,01	1836,066	99,2	0,302	1,48	4,35	—
29	²⁴ Na	14,9590 ч	0,01	2754,0	99,944	0,004	0,8745	2,33	0,99

метрическую установку с гамма-спектрометром необходимо отградуировать по чувствительности к γ -излучению с погрешностью не более 1—3 % при доверительной вероятности 0,95;

значения периода полураспада измеряемого радионуклида в активационном детекторе.

Аттестуемые поля нейтронов на ЯФУ могут находиться на большом расстоянии от радиометрического комплекса ГСЭ (десятки-сотни километров). Поэтому в составе радиометрического комплекса эталона требуется иметь один или два портативных гамма-спектрометра, которые можно транспортировать непосредственно на ЯФУ для измерения активности радионуклидов в активационных детекторах, имеющих небольшой период полураспада (минуты—часы) непосредственно на месте.

В результате анализа методов выполнения измерений активности нейтронно-активационных детекторов с применением гамма-спектрометров было принято оптимальным и целесообразным на радиометрическом комплексе для измерений активности реализовать три методики с применением стационарного гамма-спектрометра с полупроводниковым Ge-детектором типа ДГДК с высоким энергетическим разрешением; малогабаритного переносного гамма-спектрометра со сцинтилляционным кристаллом NaJ(Tl) с высокой чувствительностью к γ -излучению; малогабаритного переносного гамма-спектрометра со сцинтилляционным кристаллом LaBr с повышенным энергетическим разрешением.

Создание такого комплекса средств и методов измерений уменьшит систематические погрешности при измерении активности радионуклидов в активационных детекторах, повысит его эксплуатационную надежность; обеспечит измерения наведенной активности активационных детекторов непосредственно на ЯФУ заказчика.

Каждый радиометр с гамма-спектрометром должен содержать гамма-спектрометр либо со сцинтилляционными, либо полупроводниковым германиевым блоком детектирования, защитный домик из свинца, набор эталонных гамма-источников типа ОСГИ для градуировки спектрометра, металлическую оснастку к блоку детектирования, обеспечивающую жесткую фиксацию активационных детекторов нейтронов и эталонных источников типа ОСГИ относительно торца блоков детектирования гамма-спектрометров при измерениях с ними.

Таким образом, в состав исследуемого радиометрического комплекса включили три типа гамма-спектрометров, отличающихся существенно как по энергетическому разрешению, так и по чувствительности $S(E)$:

стационарный гамма-спектрометр с полупроводниковым блоком детектирования типа ДГДК и энергетическим разрешением 5,0 кэВ по гамма-линии 1332,5 кэВ ^{60}Co .

малогабаритный переносный гамма-спектрометр УДС-ГЦ-63×63-USB фирмы «Аспект» со сцинтилляционным блоком детектирования NaJ(Tl) размером 63×63 мм и энергетическим разрешением 8,2 % по гамма-линии 661,7 кэВ ^{137}Cs ;

малогабаритный переносный гамма-спектрометр УДС-Canberra-15×5-USB со сцинтилляционным блоком детектирования LaBr размером 38×38 мм и энергетическим разрешением 2,9 % по гамма-линии 661,7 кэВ ^{137}Cs .

Основными измеряемыми характеристиками указанных выше спектрометров были: чувствительность $S(E)$ к потоку γ -излучения от точечного источника в телесный угол 4π ср в энергетическом диапазоне 0,06 — 3 МэВ (см. табл. 2) и погрешность $\delta S(E)$ определения чувствительности при доверительной вероятности 0,95.

Чувствительность спектрометров $S(E)$ определяли для фиксированного положения эталонных источников γ -излучения относительно блоков детектирования гамма-спектрометров. Применяли эталонные точечные гамма-источники ОСГИ либо источники, аттестованные на рабочем эталоне единицы активности радионуклидов с погрешностью 0,5—2 % при доверительной вероятности 0,95. Обработку спектрограмм при работе со спектрометром ДГДК-125В-3 осуществляли по программе SpectraLineGP фирмы Аспект, со спектрометром УДС-ГЦ-63×63-USB — по программе SpectraLineBG той же фирмы, а со спектрометром УДС-Canberra-15×15-USB — по программе, поставляемой фирмой вместе с этим спектрометром.

Измеренные значения чувствительности для трех спектрометров в диапазоне энергии γ -излучения 0,60—2,7 МэВ приведены в табл. 2. Было установлено, что зависимости $S(E)$ для всех исследованных спектрометров достаточно корректно аппроксимируется выражением

$$S(E) = \exp\{C_1 + C_2 \ln(E) + C_3 [\ln(E)]^2 + C_4 [\ln(E)]^3 + C_5 [\ln(E)]^4\}.$$

Коэффициенты C_i для каждого спектрометра приведены в табл. 3, где L_1, L_2 — расстояния от центра гамма-источника соответственно до торца и эффективного центра блока детектирования.

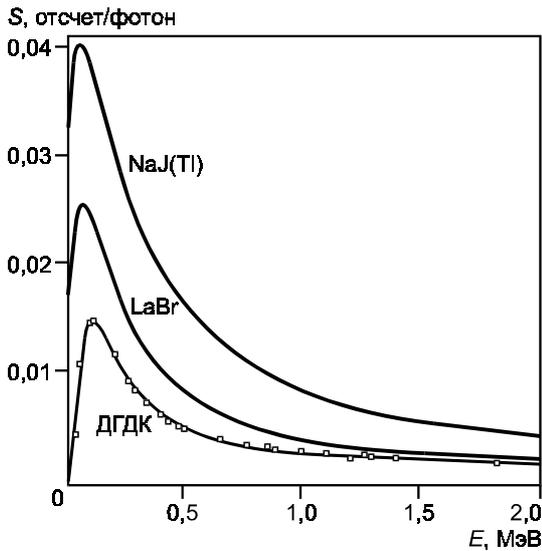
На рисунке для иллюстрации приведены аппроксимирующие кривые чувствительности рассматриваемых спектрометров. Для спектрометра ДГДК отмечены измеренные значения чувствительности, которые достаточно близки к аппроксимирующей кривой.

Из колонок 8—10 табл. 2 и рисунка следует, что чувствительности всех спектрометров существенно отличаются, она максимальна для спектрометра УДС-ГЦ-63×63-USB. Это можно объяснить только большими габаритными размерами и массой сцинтилляционного кристалла NaJ(Tl) — чувствительного элемента к γ -излучению в его составе.

Таблица 3

Значения коэффициентов C_i для гамма-спектрометров радиометрического комплекса

Спектрометр	L_1, L_2 , мм	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
ДГДК	51,5; 82,8	151,18043	94,21474	-22,17287	2,27628	-0,086948
УДС-ГЦ-63×63-USB	51,7; 86,79	-6,07363	-0,20632	0,67842	-0,14495	0,0079467
УДС-Canberra-15×15-USB	51,9; 69,05	42,68479	-49,27151	19,61726	-3,68905	0,33008



Энергетическая зависимость чувствительности различных гамма-спектрометров

Чувствительность гамма-спектрометра при его градуировке рассчитывали по формуле

$$S(E) = N_i e^{(\ln 2/T_i)t_b} / (A_i \eta_i), \quad (9)$$

где N_i — скорость счета импульсов в пике ПП аппаратного спектра спектрометра от i -го нуклида эталонного источника γ -излучения; T_i , η_i — период полураспада и эмиссия γ -излучения i -го нуклида; A_i — активность i -го источника на момент его аттестации; t_b — время выдержки источника с момента его аттестации до момента начала калибровки спектрометра.

В соответствии с (9) для доверительной вероятности 0,95 погрешность чувствительности спектрометра вычисляли как

$$\delta S(E) = 2\delta N + 1,1 \sqrt{(\delta A)^2 + (\delta \eta)^2 + (\delta T)^2}$$

при двух значениях $\delta A = 2$ и 1% , а также $\delta N = 0,5\%$, $\delta \eta = 0,4\%$, $\delta T = 0,1\%$ ($\delta \eta$ и δT взяты из колонок 4 и 7 табл. 2). Погрешности $S(E)$ составили 3,3 и 2,2%, соответственно. Оцененные по (8) погрешности измерений активности активационных детекторов для двух указанных вариантов δA и других погрешностей чувствительности спектрометра составили соответственно 4,6 и 3,5%.

Как уже отмечалось, погрешности расчета активности δA_i активационных детекторов оказываются определяющими при расчете погрешностей скоростей ядерных реакций δR_i в исследуемых полях нейтронов ЯФУ (см. (2)). Это означает также, что погрешность их определения близка к 4%, т. е. будет находиться на уровне погрешности 2—4% оцененных в мировой практике сечений ядерных реакций,

что гарантирует корректность восстановления спектров нейтронов ЯФУ.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы. С учетом требований нейтронно-активационного метода восстановления спектров нейтронов на ЯФУ выбраны и отработаны методики измерений наведенной активности активационных детекторов с применением трех типов гамма-спектрометров, существенно отличающихся как по энергетическому разрешению, так и по чувствительности к γ -излучению. Установлена зависимость чувствительности гамма-спектрометров от энергии γ -излучения для всех рассмотренных типов спектрометров, которую можно представить в единой форме, и отработана процедура градуировки гамма-спектрометров по данному параметру. Исследованные средства и методы измерений активности активационных детекторов с применением гамма-спектрометров с успехом можно применять в радиометрическом комплексе ГСЭ для аттестации опорных и моделирующих полей нейтронов на ЯФУ России.

Литература

1. **ГОСТ 8.105—80.** ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений плотности потока и флюенса нейтронов на ядерно-физических установках.
2. **Севастьянов В. Д., Кошелев А. С., Маслов Г. Н.** Характеристики полей нейтронов. Источники мгновенных нейтронов деления и 14 МэВ — генераторы нейтронов, исследовательские и энергетические реакторы, специальные конвертирующие нейтронное излучение устройства: Справочник. Менделеево: Изд-во ВНИИФТРИ, 2007.
3. **ГСССД МР 182—2011.** Севастьянов В. Д. Кошелев А. С. Методика восстановления спектров нейтронов ядерных реакторов и нейтронных генераторов КАСКАД 200(176).
4. **Севастьянов В. Д.** Анализ согласуемости и «оценка» корректности системы, наиболее изученных интегральных сечений дозиметрических ядерных реакций в полях мгновенных нейтронов деления ядер ^{235}U тепловыми нейтронами и спонтанного деления ядер ^{252}Cf // Измерительная техника. 2012. № 2. С. 67—72; **Sevastyanov V. D.** Consistency analysis and evaluation of the correctness of the system of most widely-studied integrated cross sections for dosimetric nuclear reactions in prompt neutron fields from fission of ^{235}U nuclei by thermal neutrons and spontaneous fission of ^{252}Cf nuclei // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 2. P. 213—219.
5. **Немец О. Ф., Гофман Ю. В.** Справочник по ядерной физике, Киев: Наукова думка, 1975. С. 218—275.
6. **Зигбан К.** Альфа-бета-гамма-спектрометрия / Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1969. Вып. 1.
7. **Голашвили Т. В., Чечев В. П., Бадиков С. А.** Справочник нуклидов / Под ред. Г. В. Голашвили. М.: Изд. дом МЭИ, 2011.

Дата принятия 25.09.2012 г.

Вниманию читателей предлагается подборка статей по материалам Второй Всероссийской конференции «Метрология и стандартизация нефтегазовой отрасли— 2012», которая также была посвящена 170-летию со дня основания ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и проходила с 3 по 5 октября 2012 года в Санкт-Петербурге.

В предлагаемых статьях освещаются нормативные аспекты метрологического обеспечения производства, состояние нормативно-методической базы измерительных технологий, используемых в нефтегазовой отрасли; формирование единой национальной системы аккредитации, порядок аккредитации на право поверки средств измерений; процедуры проведения межлабораторных сравнительных испытаний и поверки средств измерений; рассматриваются системы измерения параметров качества нефти, метрологическое (лабораторное) оборудование; аттестация методик выполнения измерений, отбора и подготовки проб нефти к анализу в химико-аналитических лабораториях, рекомендации по проведению измерений содержания химических и механических примесей в нефти и их влияние на метрологические характеристики средств измерений; типовые программы и методики аттестации аппаратуры; выбор газоаналитического оборудования; вопросы обеспечения технической и экологической безопасности.

681.2.089

Современная практика и проблемы применения промышленных и лабораторных спектрофотометрических анализаторов физико-химических свойств нефти и нефтепродуктов

А. Б. КОПЫЛЬЦОВА, Б. П. ТАРАСОВ, О. В. КЛИМ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,
С.-Петербург, Россия, e-mail: kab@b10.vniim.ru

Рассмотрены вопросы применения инфракрасных анализаторов в ближней и средней инфракрасных областях для оценки показателей качества нефти и нефтепродуктов. Проведено сравнение метрологических характеристик этих анализаторов и аппаратуры, работающей по традиционным методикам измерений. Рассмотрены вопросы сертификации указанных анализаторов и предложены пути решения проблем их метрологического обеспечения.

Ключевые слова: инфракрасные анализаторы, показатели качества нефти и нефтепродуктов.

The problems of application of IR-analyzers for crude oil and oil products quality coefficients control are considered. The comparison of metrological characteristics of IR-analyzers and traditional measuring methods is carried out. The problems of IR-analyzers certification are considered and the ways of metrological assurance problem solution are suggested.

Key words: IR-analyzers, oil and oil products quality coefficients.

Всего 20 лет назад произошла революция в области аналитической химии применительно к самым разнообразным материалам. Ее первым этапом стало развитие математической теории многопараметрических нелинейных корреляций, созданной примерно в 80-е годы XX века, практическое приложение которой стало возможным только с появлением в начале XXI века мощных промышленных компьютеров, вторым — разработка приборов инфракрасной (ИК)

спектроскопии в ближней и средней областях ИК-диапазона.

Такие анализаторы в ближней ИК-области (НИР-анализаторы) стали применять для контроля качества самых разнообразных материалов и совершенно далеких от ИК-спектроскопии показателей. Например, в области нефтепереработки и нефтехимии с их помощью контролировали октановое число (ОЧ) бензина или цетановое число (ЦЧ) дизельно-