

Формирование энергетического спектра нейтронов вблизи мишенного блока портативного нейтронного генератора НГ-24М

В. Д. СЕВАСТЬЯНОВ¹, О. И. КОВАЛЕНКО¹, А. В. ОРЛОВ¹, Р. М. ШИБАЕВ¹,
С. Ю. ОБУДОВСКИЙ², Д. В. ПОРТНОВ², А. В. БАТЮНИН², Ю. А. КАЩУК²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия, e-mail: sevast@vniitri.ru

² Проектный центр «ИТЭР», Москва, Россия, e-mail: y.kashchuk@iterf.ru

Нейтронно-активационным методом измерен спектр нейтронов вблизи мишени портативного нейтронного генератора НГ-24М. Восстановленный спектр нейтронов представлен в аналитической форме в виде суперпозиции известных физически обоснованных спектров.

Ключевые слова: нейтронный генератор, энергетический спектр нейтронов.

A spectrum of neutrons near the target of a neutron generator NG-24M was measured by neutron activation method. Spectrum of neutrons is represented in analytical form as superposition of physically substantiated spectra.

Key words: neutron generator, neutron energy spectrum.

Источники моноэнергетических нейтронов, выполненные на базе электростатических ускорителей заряженных частиц, широко применяют для моделирования полей нейтронов разрабатываемых термоядерных реакторов, исследования радиационного воздействия нейтронного излучения на объекты гражданского и военного назначения, лечения онкобольных, градуировки нейтронной радиометрической аппаратуры [1—3]. Как правило, нейтронное излучение с энергией 14 МэВ сопровождается сопутствующим нейтронным излучением с энергией ниже 2 МэВ, генерируемым им в материале конструктивных элементов мишенного блока в результате неупругих процессов (n, n'), ($n, 2n$). Степень радиационного воздействия такого излучения на исследуемые объекты зависит не только от флюенса, но и спектра нейтронов. Поэтому в настоящей работе авторы исследовали спектр нейтронов моделирующих опорных полей (МОП) вблизи мишенного блока портативного нейтронного генератора нового типа с запаянной ускорительной трубкой НГ-24М [4]. Его мишень находилась на расстоянии 1,5 м от окружающих нейтронную трубку предметов (пол, стены, потолок экспериментального зала).

Спектр и флюенс в МОП нейтронного генератора определяли нейтронно-активационным методом. Так как плотность потоков нейтронов на расстоянии 121 мм от мишени генератора составляла $1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, то спектр нейтронов измеряли не только с помощью активационных, но и высокочувствительных трековых делительных детекторов типа ДКН [2]. Размещение исследуемых точек в аттестуемом поле генератора НГ-24М приведено на рис. 1. Также показаны: мишень генератора, блок охлаждения мишени толщиной 20 мм, детекторы мониторов ИКД КНТ 54-2-1 и КНУ-3 и аттестуемые точки поля «10 см» и «20 см», находящиеся на расстояниях соответственно 121 и

221 мм от центра мишени в направлении падения на неё пучка.

Моделирующее опорное поле нейтронов вблизи мишени генератора формируют преимущественно моноэнергетические нейтроны с энергией ~14 МэВ. Их генерация осуществляется по реакциям $^3\text{H}+^2\text{H}=^4\text{He}+n+17,59 \text{ МэВ}$ и $^2\text{H}+^3\text{H}=^4\text{He}+n+17,59 \text{ МэВ}$ в набивной мишени запаянной ускорительной трубкой. Мишень, содержащую дейтроны и тритоны, бомбардируют ускоренными до энергии 200 кэВ ионами смешанного пучка. В составе пучка присутствуют одноатомные ионы $^2\text{H}^+$, $^3\text{H}^+$ и молекулярные ионы типа $^2\text{H}_2^+$, $^3\text{H}_2^+$, $^3\text{H}_2\text{H}^+$. Угловая анизотропия вылета нейтронов с энергией ~14 МэВ, генерируемых в мишени по указанным реакциям, не превышает 5—6 % [5].

Часть этих нейтронов испытывает неупругие взаимодействия (n, n'), ($n, 2n$) в материале конструктивных элементов мишенного блока (медь, железо и т. д.) [6—8]. Средняя энергия неупруго рассеянных нейтронов при этом ниже 2 МэВ. Другая часть нейтронов упруго рассеивается на лёгких ядрах

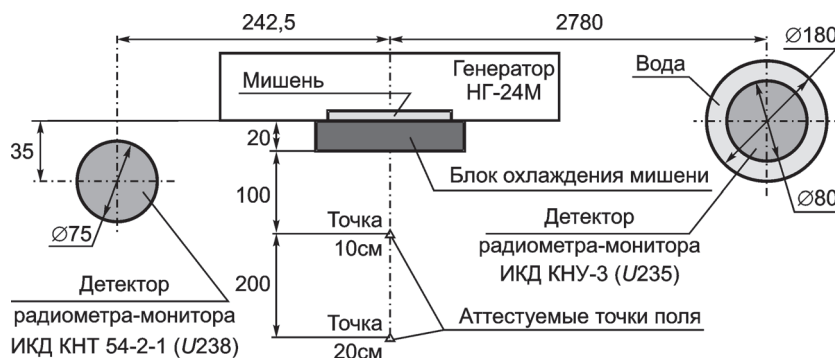


Рис. 1. Размещение исследуемых точек в аттестуемом поле генератора НГ-24М

материалов (воды) конструктивных элементов мишенного блока, например, на охлаждающей жидкости нейтронной трубки. Моноэнергетические нейтроны также упруго рассеиваются и на ядрах тяжёлых элементов (Cu, Fe), которые входят в состав материала отдельных составляющих генератора и находятся вблизи мишенного блока. Нейтроны этой группы преимущественно рассеиваются вперёд в направлении ускоряемого пучка дейтронов. В одном акте упругого рассеивания нейтрон с энергией ~14 МэВ может потерять энергию до 300 кэВ. Это обуславливает разброс нейтронов по энергии 14 МэВ, а также приводит к незначительному снижению их максимальной энергии.

Для определения нейтронных характеристик МОП использовали вычислительную программу КАСКАД-620 [9—12]. Отличительная особенность такого способа заключается в том, что поиск исследуемого спектра нейтронов $F(E)$ при его восстановлении может осуществляться в аналитической форме в виде суперпозиции парциальных физически обоснованных спектров: испарительных (Вайскопфа), замедления (Ферми), тепловых нейтронов (Максвелла), моноэнергетических нейтронов в форме распределения Гаусса и спектра нейтронов, предварительно рассчитанного методом Монте—Карло:

$$F(E) = \sum_{i=1}^k A_{B_i} (\alpha_{B_i})^2 E \exp(-\alpha_{B_i} E) + A_M \alpha_M^2 E \exp(-\alpha_M E) + A_\Phi (1/E^{\alpha_\Phi}) \left[1 + (10^{-7}/E)^7 \right]^{-1} \left[1 + (E/0,2)^2 \right]^{-1} + \sum_{i=1}^l A_{G_i} (\sigma_{G_i} \sqrt{2\pi})^{-1} \exp \left[- (E_{G_i} - \alpha_{G_i})^2 / 2\sigma_{G_i}^2 \right], \quad (1)$$

где E — энергия нейтронов; α_B , α_M , α_Φ , α_G — параметры парциальных спектров Вайскопфа, Максвелла, Ферми, Гаусса, соответственно; A_B , A_M , A_Φ , A_G — масштабные коэффициенты указанных выше спектров, рассчитанные из условия

$$\int_0^\infty \varphi(E) dE = 1.$$

Физически обоснованное представление искомого априорного спектра нейтронов по (1) позволяет существенно уменьшить систематическую погрешность восстановления их спектра в нейтронных полях ядерно-физических установок. Измерения нейтронных характеристик в МОП генератора НГ-24М проводили на расстоянии 121 мм от мишени в направлении ускоряемого до 200 кэВ пучка ионов. Количества ядерных реакций активации Q_a^i и деления Q_F^i в i детекторах после их облучения нейтронами рассчитывали из соотношений:

$$Q_a^i = A_t^i t_0^i \left\{ N_{\text{я}}^i \left[1 - \exp(-\lambda^i t_0^i) \right]^{-1} \exp(-\lambda^i t_b^i) \right\}^{-1};$$

$$Q_F^i = N_F^i (\varepsilon_F N_{\text{я}}^i)^{-1},$$

где A_t^i — активность i -го детектора в момент измерения t ; t_0^i — эффективное время облучения i -го детектора нейтронами; $N_{\text{я}}^i$ — число ядер нуклида мишени в i -м детекторе; λ_i — константа распада для продукта активации в i -м детекторе; t_b^i — время выдержки детектора с момента окончания облучения нейтронами до момента измерения его активности; N_F^i — число зарегистрированных актов деления в i -м детекторе за время его облучения нейтронами; ε_F — чувствительность регистрации актов деления в делительном детекторе.

Значение ε_F вычисляли следующим образом [13, 14]:

$$\varepsilon_F = \varepsilon_0 [1 - h/(2R)],$$

где ε_0 — чувствительность регистрации осколков деления для системы делительный детектор—регистратор из слюды—мусковит ($\varepsilon_F = 0,915 \pm 0,005$); $h \leq 0,5$ мг·см⁻² — толщина слоя делящегося вещества в делительном детекторе; R — средний пробег осколков деления в слое делящегося вещества (в виде окиси, закиси) детектора 10 мг·см⁻².

Т а б л и ц а 1

Ядерно-физические характеристики активационных и делительных детекторов нейтронов

Ядерная реакция	Энергетический порог реакции, МэВ	Период полураспада (погрешность)	γ-излучение	
			энергия, кэВ	эмиссия (погрешность), %
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$	9,0	10,150(2) сут	934,440	99,07(4)
$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	2,5	70,860(6) сут	810,775	99,45(1)
$^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$	12,7	35,600(6) час	1377,600	81,70(24)
$^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$	1,2	4,486(4) час	336,200	45,80(22)
$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	2,69517(21) сут	411,800	95,58(12)
$^{238}\text{U}(n, f)$ (ТДДН)	1,2	—	Осколки деления ядра	
$^{237}\text{Np}(n, f)$ (ТДДН)	0,58	—	То же	
$^{235}\text{U}(n, f)$ (ТДДН)	$1,0 \cdot 10^{-10}$	—	То же	

Ядерно-физические характеристики активационных и делительных детекторов нейтронов приведены в табл. 1.

Моделирующее опорное поле нейтронов исследовали с помощью радиометра-монитора (ионизационной камеры деления с радиатором из особо чистого урана 238 (99,999 %)). Размещение блокодирования радиометра-монитора «жестко» фиксировали вблизи мишенного блока генератора. Нейтроны с энергией ~14 МэВ реги-

Таблица 2

Моделирующие физически обоснованные спектры, принятые при восстановлении спектра нейтронов в МОП

Моделирующие физически обоснованные спектры	Параметры α_i при расчёте по (1)	Вклад компонента в восстановленный спектр нейтронов, %
Максвелл	$9,700 \cdot 10^{-1}$	20,97300
Максвелл	$3,200 \cdot 10^7$	0
Ферми	$9,500 \cdot 10^{-1}$	0,00077
Гаусс	14,75	39,52600
Гаусс	14,90	39,49900

стрировали по реакции $^{238}\text{U}(n, f)$ с энергетическим порогом 1,2 МэВ. Сечение реакции при энергии 14,5 МэВ составляет 1,16 барн [15].

В облучённых нейтронами детекторах наведённую активность измеряли на Государственном первичном специальном эталоне единиц плотности потока и флюенса нейтронов для ядерно-физических установок ГЭТ 51—80 [16]. В работе использовали спектрометр γ -излучения с полупроводниковым Ge-детектором. При определении скорости реакции $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ учитывали вклад мешающей сопутствующей реакции $^{115}\text{In}(n, p)^{115}\text{Cd} \xrightarrow{\beta} ^{115\text{m}}\text{In}$ в измеряемую активность [17, 18]. Подсчёт треков от осколков деления в регистраторах из слюды-мусковит осуществляли после их травления в 36 % фтористоводородной кислоте, промывки и просушки. Количество ядерных реакций в делительных детекторах определяли по методике [19].

В ходе проведённых исследований получили оптимальный состав нейтронно-активационных и делительных детекторов нейтронов. Были изготовлены активационные и делительные детекторы нейтронов, проведена аттестация детекторов по числу ядер нуклидов-мишеней основных и мешающих примесных нуклидов, проведены оптимальные по времени облучения указанных выше детекторов в МОП. Погрешность измерений наведённой активности на радиометрическом комплексе ГЭТ 51—80 составила 2—4 % при доверительной вероятности 0,95.

Активационные и делительные детекторы облучали одновременно с регистрацией импульсов с радиометра-монитор. В результате определяли количества ядерных реакций в активационных и делительных детекторах, нормированные на одно ядро нуклида-мишени и на один отсчёт радиометра-монитор. Система моделирующих физически обоснованных спектров, принятая при восстановлении спектра нейтронов в МОП (НГ-24М), представлена в табл. 2.

Дисперсию спектров Гаусса при расчёте результирующего спектра нейтронов приняли 0,2 МэВ.

Результаты измерений спектра нейтронов МОП представлены в табл. 3. Показаны отличия между измеренными и рассчитанными сечениями для активационных и делительных детекторов.

Измеренный флюенс нейтронов на один отсчёт радиометра-монитор составил $4,56 \cdot 10^3$ нейтр·см⁻²·импульс⁻¹, средняя энергия нейтронов в спектре $\langle E_n \rangle = 12,15$ МэВ, среднее квадратическое отклонение (СКО) — 1,23 %. На рис. 2 приведена зависимость измеренного спектра нейтронов МОП.

Из изложенного выше следует, что энергетический спектр нейтронов МОП на генераторе НГ-24М представлен в виде суперпозиции следующих пяти парциальных спектров: неупругого рассеяния со средней энергией 2 МэВ; упругого рассеяния Максвелла; нейтронов замедления Ферми; моноэнергетических нейтронов с энергиями 14,75 и 14,90 МэВ. Вклад нейтронов в спектр МОП от рассеянных в экспериментальном зале нейтронов незначителен и составляет не более $4 \cdot 10^{-4}$ % (см. табл. 2).

Из табл. 3 следует, что спектр нейтронов МОП восстановлен корректно, так как СКО измеренных и вычисленных сечений ядерных реакций по всей совокупности использованных в работе детекторов составляет 1,23 %. Найденные 176-групповые значения флюенса нейтронов в диапазоне энергии нейтронов 10^{-10} —18 МэВ приведены в табл. 4. Спектр нейтронов в МОП формируется преимущественно моноэнергетическими (79,03 %) и неупруго рассеянными нейтронами (20,97 %).

По результатам измерений источник нейтронов с МОП на базе генератора НГ-24М аттестован в качестве рабочего эталона второго разряда в соответствии с поверочной схемой [16, 20] и обеспечивает возможность проведения градуировки, калибровки и поверки аппаратуры, используемой для термоядерных исследований.

Таблица 3

Результаты восстановления спектров нейтронов на расстоянии 121 мм от мишенного блока генератора НГ-24М

Ядерная реакция	Толщина экрана из		Измеренные количества ядерных реакций, ядро ⁻¹ ·имп ⁻¹	Сечения ядерных реакций, барн		Разность, %
	кадмия, мм	бора, г/см ²		Измеренное	Расчётное	
$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	1,0	0,0	$1,32 \cdot 10^{-21}$	$2,90 \cdot 10^{-1}$	$2,91 \cdot 10^{-1}$	0,5
$^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$	1,0	0,0	$1,38 \cdot 10^{-22}$	$3,03 \cdot 10^{-2}$	$3,00 \cdot 10^{-2}$	-0,8
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{93\text{m}}\text{Nb}$	1,0	0,0	$1,73 \cdot 10^{-21}$	$3,80 \cdot 10^{-1}$	$3,78 \cdot 10^{-1}$	-0,6
$^{237}\text{Np}(n, f)$	1,0	0,0	$1,02 \cdot 10^{-20}$	2,24	2,28	2,0
$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	0,0	0,0	$7,19 \cdot 10^{-23}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,5
$^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$	1,0	1,0	$4,06 \cdot 10^{-22}$	$9,13 \cdot 10^{-2}$	$8,77 \cdot 10^{-2}$	-1,6

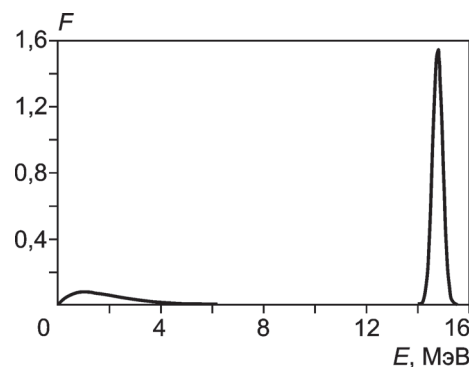


Рис. 2. Измеренный спектр нейтронов МОП

Измеренные групповые значения флюенса нейтронов $F(j)$, $F > E(j)$ ($E(j)$ — энергия нейтронов в группе j)

j	$E(j)$	$E(j+1)$	$F(j)$	$F > E(j)$	j	$E(j)$	$E(j+1)$	$F(j)$	$F > E(j)$
1	$1,000 \cdot 10^{-10}$	$1,275 \cdot 10^{-10}$	$8,818 \cdot 10^{-15}$	$1,000 \cdot 10^0$	57	$4,000 \cdot 10^{-5}$	$5,000 \cdot 10^{-5}$	$3,781 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
2	$1,275 \cdot 10^{-10}$	$1,600 \cdot 10^{-10}$	$1,316 \cdot 10^{-14}$	$1,000 \cdot 10^0$	58	$5,000 \cdot 10^{-5}$	$6,300 \cdot 10^{-5}$	$3,989 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
3	$1,600 \cdot 10^{-10}$	$2,000 \cdot 10^{-10}$	$2,026 \cdot 10^{-14}$	$1,000 \cdot 10^0$	59	$6,300 \cdot 10^{-5}$	$8,000 \cdot 10^{-5}$	$4,202 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
4	$2,000 \cdot 10^{-10}$	$2,550 \cdot 10^{-10}$	$3,515 \cdot 10^{-14}$	$1,000 \cdot 10^0$	60	$8,000 \cdot 10^{-5}$	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$4,000 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
5	$2,550 \cdot 10^{-10}$	$3,200 \cdot 10^{-10}$	$5,241 \cdot 10^{-14}$	$1,000 \cdot 10^0$	61	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$1,275 \cdot 10^{-4}$	$4,438 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
6	$3,200 \cdot 10^{-10}$	$4,000 \cdot 10^{-10}$	$8,059 \cdot 10^{-14}$	$1,000 \cdot 10^0$	62	$1,275 \cdot 10^{-4}$	$1,600 \cdot 10^{-4}$	$4,230 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
7	$4,000 \cdot 10^{-10}$	$5,000 \cdot 10^{-10}$	$1,256 \cdot 10^{-13}$	$1,000 \cdot 10^0$	63	$1,600 \cdot 10^{-4}$	$2,000 \cdot 10^{-4}$	$4,238 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
8	$5,000 \cdot 10^{-10}$	$6,300 \cdot 10^{-10}$	$2,043 \cdot 10^{-13}$	$1,000 \cdot 10^0$	64	$2,000 \cdot 10^{-4}$	$2,550 \cdot 10^{-4}$	$4,710 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
9	$6,300 \cdot 10^{-10}$	$8,000 \cdot 10^{-10}$	$3,365 \cdot 10^{-13}$	$1,000 \cdot 10^0$	65	$2,550 \cdot 10^{-4}$	$3,200 \cdot 10^{-4}$	$4,498 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
10	$8,000 \cdot 10^{-9}$	$1,000 \cdot 10^{-9}$	$4,956 \cdot 10^{-13}$	$1,000 \cdot 10^0$	66	$3,200 \cdot 10^{-4}$	$4,000 \cdot 10^{-4}$	$4,521 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
11	$1,000 \cdot 10^{-9}$	$1,275 \cdot 10^{-9}$	$8,551 \cdot 10^{-13}$	$1,000 \cdot 10^0$	67	$4,000 \cdot 10^{-4}$	$5,000 \cdot 10^{-4}$	$4,633 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
12	$1,275 \cdot 10^{-9}$	$1,600 \cdot 10^{-9}$	$1,266 \cdot 10^{-12}$	$1,000 \cdot 10^0$	68	$5,000 \cdot 10^{-4}$	$6,300 \cdot 10^{-4}$	$4,938 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
13	$1,600 \cdot 10^{-9}$	$2,000 \cdot 10^{-9}$	$1,929 \cdot 10^{-12}$	$1,000 \cdot 10^0$	69	$6,300 \cdot 10^{-4}$	$8,000 \cdot 10^{-4}$	$5,288 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
14	$2,000 \cdot 10^{-9}$	$2,550 \cdot 10^{-9}$	$3,305 \cdot 10^{-12}$	$1,000 \cdot 10^0$	70	$8,000 \cdot 10^{-3}$	$1,000 \cdot 10^{-3}$	$5,157 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
15	$2,550 \cdot 10^{-9}$	$3,200 \cdot 10^{-9}$	$4,848 \cdot 10^{-12}$	$1,000 \cdot 10^0$	71	$1,000 \cdot 10^{-3}$	$1,275 \cdot 10^{-3}$	$5,942 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
16	$3,200 \cdot 10^{-9}$	$4,000 \cdot 10^{-9}$	$7,310 \cdot 10^{-12}$	$1,000 \cdot 10^0$	72	$1,275 \cdot 10^{-3}$	$1,600 \cdot 10^{-3}$	$5,991 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
17	$4,000 \cdot 10^{-9}$	$5,000 \cdot 10^{-9}$	$1,112 \cdot 10^{-11}$	$1,000 \cdot 10^0$	73	$1,600 \cdot 10^{-3}$	$2,000 \cdot 10^{-3}$	$6,489 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
18	$5,000 \cdot 10^{-9}$	$6,300 \cdot 10^{-9}$	$1,753 \cdot 10^{-11}$	$1,000 \cdot 10^0$	74	$2,000 \cdot 10^{-3}$	$2,550 \cdot 10^{-3}$	$8,084 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
19	$6,300 \cdot 10^{-9}$	$8,000 \cdot 10^{-9}$	$2,772 \cdot 10^{-11}$	$1,000 \cdot 10^0$	75	$2,550 \cdot 10^{-3}$	$3,200 \cdot 10^{-3}$	$9,023 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$
20	$8,000 \cdot 10^{-9}$	$1,000 \cdot 10^{-8}$	$3,884 \cdot 10^{-11}$	$1,000 \cdot 10^0$	76	$3,200 \cdot 10^{-3}$	$4,000 \cdot 10^{-3}$	$1,100 \cdot 10^{-6}$	$1,000 \cdot 10^0$
21	$1,000 \cdot 10^{-8}$	$1,275 \cdot 10^{-8}$	$6,288 \cdot 10^{-11}$	$1,000 \cdot 10^0$	77	$4,000 \cdot 10^{-3}$	$5,000 \cdot 10^{-3}$	$1,426 \cdot 10^{-6}$	$1,000 \cdot 10^0$
22	$1,275 \cdot 10^{-8}$	$1,600 \cdot 10^{-8}$	$8,602 \cdot 10^{-11}$	$1,000 \cdot 10^0$	78	$5,000 \cdot 10^{-3}$	$6,300 \cdot 10^{-3}$	$2,011 \cdot 10^{-6}$	$1,000 \cdot 10^0$
23	$1,600 \cdot 10^{-8}$	$2,000 \cdot 10^{-8}$	$1,198 \cdot 10^{-10}$	$1,000 \cdot 10^0$	79	$6,300 \cdot 10^{-3}$	$8,000 \cdot 10^{-3}$	$2,977 \cdot 10^{-6}$	$1,000 \cdot 10^0$
24	$2,000 \cdot 10^{-8}$	$2,550 \cdot 10^{-8}$	$1,860 \cdot 10^{-10}$	$1,000 \cdot 10^0$	80	$8,000 \cdot 10^{-3}$	$1,000 \cdot 10^{-2}$	$4,081 \cdot 10^{-6}$	$1,000 \cdot 10^0$
25	$2,550 \cdot 10^{-8}$	$3,200 \cdot 10^{-8}$	$2,593 \cdot 10^{-10}$	$1,000 \cdot 10^0$	81	$1,000 \cdot 10^{-2}$	$1,275 \cdot 10^{-2}$	$6,715 \cdot 10^{-6}$	$1,000 \cdot 10^0$
26	$3,200 \cdot 10^{-8}$	$4,000 \cdot 10^{-8}$	$4,528 \cdot 10^{-10}$	$1,000 \cdot 10^0$	82	$1,275 \cdot 10^{-2}$	$1,600 \cdot 10^{-2}$	$9,655 \cdot 10^{-6}$	$1,000 \cdot 10^0$
27	$4,000 \cdot 10^{-8}$	$5,000 \cdot 10^{-8}$	$1,184 \cdot 10^{-9}$	$1,000 \cdot 10^0$	83	$1,600 \cdot 10^{-2}$	$2,000 \cdot 10^{-2}$	$1,450 \cdot 10^{-5}$	$1,000 \cdot 10^0$
28	$5,000 \cdot 10^{-8}$	$6,300 \cdot 10^{-8}$	$4,757 \cdot 10^{-9}$	$1,000 \cdot 10^0$	84	$2,000 \cdot 10^{-2}$	$2,550 \cdot 10^{-2}$	$2,471 \cdot 10^{-5}$	$9,999 \cdot 10^{-1}$
29	$6,300 \cdot 10^{-8}$	$8,000 \cdot 10^{-8}$	$2,235 \cdot 10^{-8}$	$1,000 \cdot 10^0$	85	$2,550 \cdot 10^{-2}$	$3,200 \cdot 10^{-2}$	$3,632 \cdot 10^{-5}$	$9,999 \cdot 10^{-1}$
30	$8,000 \cdot 10^{-8}$	$1,000 \cdot 10^{-7}$	$7,448 \cdot 10^{-8}$	$1,000 \cdot 10^0$	86	$3,200 \cdot 10^{-2}$	$4,000 \cdot 10^{-2}$	$5,524 \cdot 10^{-5}$	$9,999 \cdot 10^{-1}$
31	$1,000 \cdot 10^{-7}$	$1,275 \cdot 10^{-7}$	$1,769 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	87	$4,000 \cdot 10^{-2}$	$5,000 \cdot 10^{-2}$	$8,522 \cdot 10^{-5}$	$9,998 \cdot 10^{-1}$
32	$1,275 \cdot 10^{-7}$	$1,600 \cdot 10^{-7}$	$2,232 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	88	$5,000 \cdot 10^{-2}$	$6,300 \cdot 10^{-2}$	$1,372 \cdot 10^{-4}$	$9,997 \cdot 10^{-1}$
33	$1,600 \cdot 10^{-7}$	$2,000 \cdot 10^{-7}$	$2,387 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	89	$6,30 \cdot 10^{-2}$	$8,000 \cdot 10^{-2}$	$2,233 \cdot 10^{-4}$	$9,996 \cdot 10^{-1}$
34	$2,000 \cdot 10^{-7}$	$2,550 \cdot 10^{-7}$	$2,686 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	90	$8,00 \cdot 10^{-2}$	$1,000 \cdot 10^{-1}$	$3,244 \cdot 10^{-4}$	$9,994 \cdot 10^{-1}$
35	$2,550 \cdot 10^{-7}$	$3,200 \cdot 10^{-7}$	$2,566 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	91	$1,00 \cdot 10^{-1}$	$1,150 \cdot 10^{-1}$	$2,856 \cdot 10^{-4}$	$9,991 \cdot 10^{-1}$
36	$3,200 \cdot 10^{-7}$	$4,000 \cdot 10^{-7}$	$2,569 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	92	$1,15 \cdot 10^{-1}$	$1,350 \cdot 10^{-1}$	$4,352 \cdot 10^{-4}$	$9,988 \cdot 10^{-1}$
37	$4,000 \cdot 10^{-7}$	$5,000 \cdot 10^{-7}$	$2,615 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	93	$1,35 \cdot 10^{-1}$	$1,600 \cdot 10^{-1}$	$6,279 \cdot 10^{-4}$	$9,983 \cdot 10^{-1}$
38	$5,000 \cdot 10^{-7}$	$6,300 \cdot 10^{-7}$	$2,758 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	94	$1,60 \cdot 10^{-1}$	$1,900 \cdot 10^{-1}$	$8,702 \cdot 10^{-4}$	$9,977 \cdot 10^{-1}$
39	$6,300 \cdot 10^{-7}$	$8,000 \cdot 10^{-7}$	$2,905 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	95	$1,90 \cdot 10^{-1}$	$2,200 \cdot 10^{-1}$	$9,900 \cdot 10^{-4}$	$9,968 \cdot 10^{-1}$
40	$8,000 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^{-6}$	$2,765 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	96	$2,20 \cdot 10^{-1}$	$2,550 \cdot 10^{-1}$	$1,296 \cdot 10^{-3}$	$9,958 \cdot 10^{-1}$
41	$1,000 \cdot 10^{-6}$	$1,275 \cdot 10^{-6}$	$3,066 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	97	$2,55 \cdot 10^{-1}$	$3,000 \cdot 10^{-1}$	$1,873 \cdot 10^{-3}$	$9,945 \cdot 10^{-1}$
42	$1,275 \cdot 10^{-6}$	$1,600 \cdot 10^{-6}$	$2,920 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	98	$3,00 \cdot 10^{-1}$	$3,600 \cdot 10^{-1}$	$2,822 \cdot 10^{-3}$	$9,927 \cdot 10^{-1}$
43	$1,600 \cdot 10^{-6}$	$2,000 \cdot 10^{-6}$	$2,922 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	99	$3,60 \cdot 10^{-1}$	$4,250 \cdot 10^{-1}$	$3,422 \cdot 10^{-3}$	$9,899 \cdot 10^{-1}$
44	$2,000 \cdot 10^{-6}$	$2,550 \cdot 10^{-6}$	$3,241 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	100	$4,25 \cdot 10^{-1}$	$5,00 \cdot 10^{-1}$	$5,346 \cdot 10^{-3}$	$9,864 \cdot 10^{-1}$
45	$2,500 \cdot 10^{-6}$	$3,200 \cdot 10^{-6}$	$3,087 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	101	$5,00 \cdot 10^{-1}$	$5,750 \cdot 10^{-1}$	$4,696 \cdot 10^{-3}$	$9,821 \cdot 10^{-1}$
46	$3,200 \cdot 10^{-6}$	$4,000 \cdot 10^{-6}$	$3,089 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	102	$5,75 \cdot 10^{-1}$	$6,600 \cdot 10^{-1}$	$5,657 \cdot 10^{-3}$	$9,774 \cdot 10^{-1}$
47	$4,000 \cdot 10^{-6}$	$5,000 \cdot 10^{-6}$	$3,144 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	103	$6,60 \cdot 10^{-1}$	$7,600 \cdot 10^{-1}$	$6,996 \cdot 10^{-3}$	$9,717 \cdot 10^{-1}$
48	$5,000 \cdot 10^{-6}$	$6,300 \cdot 10^{-6}$	$3,316 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	104	$7,60 \cdot 10^{-1}$	$8,800 \cdot 10^{-1}$	$8,716 \cdot 10^{-3}$	$9,647 \cdot 10^{-1}$
49	$6,300 \cdot 10^{-6}$	$8,000 \cdot 10^{-6}$	$3,493 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	105	$8,80 \cdot 10^{-1}$	$1,000 \cdot 10^0$	$8,901 \cdot 10^{-3}$	$9,560 \cdot 10^{-1}$
50	$8,000 \cdot 10^{-6}$	$1,000 \cdot 10^{-5}$	$3,324 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	106	$1,000 \cdot 10^0$	$1,000 \cdot 10^0$	$7,457 \cdot 10^{-3}$	$9,471 \cdot 10^{-1}$
51	$1,000 \cdot 10^{-5}$	$1,275 \cdot 10^{-5}$	$3,687 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	107	$1,100 \cdot 10^0$	$1,200 \cdot 10^0$	$7,417 \cdot 10^{-3}$	$9,397 \cdot 10^{-1}$
52	$1,275 \cdot 10^{-5}$	$1,600 \cdot 10^{-5}$	$3,511 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	108	$1,200 \cdot 10^0$	$1,300 \cdot 10^0$	$7,322 \cdot 10^{-3}$	$9,322 \cdot 10^{-1}$
53	$1,600 \cdot 10^{-5}$	$2,000 \cdot 10^{-5}$	$3,513 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	109	$1,300 \cdot 10^0$	$1,400 \cdot 10^0$	$7,182 \cdot 10^{-3}$	$9,249 \cdot 10^{-1}$
54	$2,000 \cdot 10^{-5}$	$2,550 \cdot 10^{-5}$	$3,897 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	110	$1,400 \cdot 10^0$	$1,500 \cdot 10^0$	$7,006 \cdot 10^{-3}$	$9,177 \cdot 10^{-1}$
55	$2,550 \cdot 10^{-5}$	$3,200 \cdot 10^{-5}$	$3,711 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	111	$1,500 \cdot 10^0$	$1,600 \cdot 10^0$	$6,800 \cdot 10^{-3}$	$9,107 \cdot 10^{-1}$
56	$3,200 \cdot 10^{-5}$	$4,000 \cdot 10^{-5}$	$3,713 \cdot 10^{-7}$	$1,000 \cdot 10^0$	112	$1,600 \cdot 10^0$	$1,700 \cdot 10^0$	$6,573 \cdot 10^{-3}$	$9,039 \cdot 10^{-1}$

j	$E(j)$	$E(j+1)$	$F(j)$	$F>E(j)$	j	$E(j)$	$E(j+1)$	$F(j)$	$F>E(j)$
113	$1,700 \cdot 10^0$	$1,800 \cdot 10^0$	$6,331 \cdot 10^{-3}$	$8,974 \cdot 10^{-1}$	145	$6,800 \cdot 10^0$	$7,000 \cdot 10^0$	$3,393 \cdot 10^{-4}$	$7,923 \cdot 10^{-1}$
114	$1,800 \cdot 10^0$	$1,900 \cdot 10^0$	$6,077 \cdot 10^{-3}$	$8,910 \cdot 10^{-1}$	146	$7,000 \cdot 10^0$	$7,200 \cdot 10^0$	$2,876 \cdot 10^{-4}$	$7,920 \cdot 10^{-1}$
115	$1,900 \cdot 10^0$	$2,000 \cdot 10^0$	$5,816 \cdot 10^{-3}$	$8,850 \cdot 10^{-1}$	147	$7,200 \cdot 10^0$	$7,400 \cdot 10^0$	$2,435 \cdot 10^{-4}$	$7,917 \cdot 10^{-1}$
116	$2,000 \cdot 10^0$	$2,100 \cdot 10^0$	$5,552 \cdot 10^{-3}$	$8,791 \cdot 10^{-1}$	148	$7,400 \cdot 10^0$	$7,600 \cdot 10^0$	$2,060 \cdot 10^{-4}$	$7,914 \cdot 10^{-1}$
117	$2,100 \cdot 10^0$	$2,200 \cdot 10^0$	$5,288 \cdot 10^{-3}$	$8,736 \cdot 10^{-1}$	149	$7,600 \cdot 10^0$	$7,800 \cdot 10^0$	$1,742 \cdot 10^{-4}$	$7,912 \cdot 10^{-1}$
118	$2,200 \cdot 10^0$	$2,300 \cdot 10^0$	$5,025 \cdot 10^{-3}$	$8,683 \cdot 10^{-1}$	150	$7,800 \cdot 10^0$	$8,000 \cdot 10^0$	$1,472 \cdot 10^{-4}$	$7,911 \cdot 10^{-1}$
119	$2,300 \cdot 10^0$	$2,400 \cdot 10^0$	$4,765 \cdot 10^{-3}$	$8,633 \cdot 10^{-1}$	151	$8,000 \cdot 10^0$	$8,200 \cdot 10^0$	$1,243 \cdot 10^{-4}$	$7,909 \cdot 10^{-1}$
120	$2,400 \cdot 10^0$	$2,500 \cdot 10^0$	$4,510 \cdot 10^{-3}$	$8,585 \cdot 10^{-1}$	152	$8,200 \cdot 10^0$	$8,400 \cdot 10^0$	$1,049 \cdot 10^{-4}$	$7,908 \cdot 10^{-1}$
121	$2,500 \cdot 10^0$	$2,600 \cdot 10^0$	$4,261 \cdot 10^{-3}$	$8,540 \cdot 10^{-1}$	153	$8,400 \cdot 10^0$	$8,600 \cdot 10^0$	$8,846 \cdot 10^{-5}$	$7,907 \cdot 10^{-1}$
122	$2,600 \cdot 10^0$	$2,700 \cdot 10^0$	$4,020 \cdot 10^{-3}$	$8,497 \cdot 10^{-1}$	154	$8,600 \cdot 10^0$	$8,800 \cdot 10^0$	$7,456 \cdot 10^{-5}$	$7,906 \cdot 10^{-1}$
123	$2,700 \cdot 10^0$	$2,800 \cdot 10^0$	$3,786 \cdot 10^{-3}$	$8,457 \cdot 10^{-1}$	155	$8,800 \cdot 10^0$	$9,000 \cdot 10^0$	$6,281 \cdot 10^{-5}$	$7,905 \cdot 10^{-1}$
124	$2,800 \cdot 10^0$	$2,900 \cdot 10^0$	$3,562 \cdot 10^{-3}$	$8,419 \cdot 10^{-1}$	156	$9,000 \cdot 10^0$	$9,200 \cdot 10^0$	$5,289 \cdot 10^{-5}$	$7,905 \cdot 10^{-1}$
125	$2,900 \cdot 10^0$	$3,000 \cdot 10^0$	$3,346 \cdot 10^{-3}$	$8,384 \cdot 10^{-1}$	157	$9,200 \cdot 10^0$	$9,400 \cdot 10^0$	$4,451 \cdot 10^{-5}$	$7,904 \cdot 10^{-1}$
126	$3,000 \cdot 10^0$	$3,200 \cdot 10^0$	$6,084 \cdot 10^{-3}$	$8,350 \cdot 10^{-1}$	158	$9,400 \cdot 10^0$	$9,600 \cdot 10^0$	$3,744 \cdot 10^{-5}$	$7,904 \cdot 10^{-1}$
127	$3,200 \cdot 10^0$	$3,400 \cdot 10^0$	$5,335 \cdot 10^{-3}$	$8,289 \cdot 10^{-1}$	159	$9,600 \cdot 10^0$	$9,800 \cdot 10^0$	$3,148 \cdot 10^{-5}$	$7,903 \cdot 10^{-1}$
128	$3,400 \cdot 10^0$	$3,600 \cdot 10^0$	$4,661 \cdot 10^{-3}$	$8,236 \cdot 10^{-1}$	160	$9,800 \cdot 10^0$	$1,000 \cdot 10^1$	$2,646 \cdot 10^{-5}$	$7,903 \cdot 10^{-1}$
129	$3,600 \cdot 10^0$	$3,800 \cdot 10^0$	$4,059 \cdot 10^{-3}$	$8,189 \cdot 10^{-1}$	161	$1,000 \cdot 10^1$	$1,050 \cdot 10^1$	$4,908 \cdot 10^{-5}$	$7,903 \cdot 10^{-1}$
130	$3,800 \cdot 10^0$	$4,000 \cdot 10^0$	$3,524 \cdot 10^{-3}$	$8,149 \cdot 10^{-1}$	162	$1,050 \cdot 10^1$	$1,100 \cdot 10^1$	$3,168 \cdot 10^{-5}$	$7,902 \cdot 10^{-1}$
131	$4,000 \cdot 10^0$	$4,200 \cdot 10^0$	$3,051 \cdot 10^{-3}$	$8,114 \cdot 10^{-1}$	163	$1,100 \cdot 10^1$	$1,150 \cdot 10^1$	$2,040 \cdot 10^{-5}$	$7,902 \cdot 10^{-1}$
132	$4,200 \cdot 10^0$	$4,400 \cdot 10^0$	$2,635 \cdot 10^{-3}$	$8,083 \cdot 10^{-1}$	164	$1,150 \cdot 10^1$	$1,200 \cdot 10^1$	$1,311 \cdot 10^{-5}$	$7,902 \cdot 10^{-1}$
133	$4,400 \cdot 10^0$	$4,600 \cdot 10^0$	$2,272 \cdot 10^{-3}$	$8,057 \cdot 10^{-1}$	165	$1,200 \cdot 10^1$	$1,250 \cdot 10^1$	$8,412 \cdot 10^{-6}$	$7,901 \cdot 10^{-1}$
134	$4,600 \cdot 10^0$	$4,800 \cdot 10^0$	$1,954 \cdot 10^{-3}$	$8,034 \cdot 10^{-1}$	166	$1,250 \cdot 10^1$	$1,300 \cdot 10^1$	$5,389 \cdot 10^{-6}$	$7,901 \cdot 10^{-1}$
135	$4,800 \cdot 10^0$	$5,000 \cdot 10^0$	$1,678 \cdot 10^{-3}$	$8,014 \cdot 10^{-1}$	167	$1,300 \cdot 10^1$	$1,350 \cdot 10^1$	$3,448 \cdot 10^{-6}$	$7,901 \cdot 10^{-1}$
136	$5,000 \cdot 10^0$	$5,200 \cdot 10^0$	$1,438 \cdot 10^{-3}$	$7,998 \cdot 10^{-1}$	168	$1,350 \cdot 10^1$	$1,400 \cdot 10^1$	$3,318 \cdot 10^{-5}$	$7,901 \cdot 10^{-1}$
137	$5,200 \cdot 10^0$	$5,400 \cdot 10^0$	$1,231 \cdot 10^{-3}$	$7,983 \cdot 10^{-1}$	169	$1,400 \cdot 10^1$	$1,450 \cdot 10^1$	$4,930 \cdot 10^{-2}$	$7,901 \cdot 10^{-1}$
138	$5,400 \cdot 10^0$	$5,600 \cdot 10^0$	$1,052 \cdot 10^{-3}$	$7,971 \cdot 10^{-1}$	170	$1,450 \cdot 10^1$	$1,500 \cdot 10^1$	$5,789 \cdot 10^{-1}$	$7,408 \cdot 10^{-1}$
139	$5,600 \cdot 10^0$	$5,800 \cdot 10^0$	$8,981 \cdot 10^{-4}$	$7,960 \cdot 10^{-1}$	171	$1,500 \cdot 10^1$	$1,550 \cdot 10^1$	$1,614 \cdot 10^{-1}$	$1,619 \cdot 10^{-1}$
140	$5,800 \cdot 10^0$	$6,000 \cdot 10^0$	$7,657 \cdot 10^{-4}$	$7,952 \cdot 10^{-1}$	172	$1,550 \cdot 10^1$	$1,600 \cdot 10^1$	$5,003 \cdot 10^{-4}$	$5,118 \cdot 10^{-4}$
141	$6,000 \cdot 10^0$	$6,200 \cdot 10^0$	$6,520 \cdot 10^{-4}$	$7,944 \cdot 10^{-1}$	173	$1,600 \cdot 10^1$	$1,650 \cdot 10^1$	$2,364 \cdot 10^{-7}$	$5,347 \cdot 10^{-7}$
142	$6,200 \cdot 10^0$	$6,400 \cdot 10^0$	$5,546 \cdot 10^{-4}$	$7,937 \cdot 10^{-1}$	174	$1,650 \cdot 10^1$	$1,700 \cdot 10^1$	$1,465 \cdot 10^{-7}$	$2,983 \cdot 10^{-7}$
143	$6,400 \cdot 10^0$	$6,600 \cdot 10^0$	$4,712 \cdot 10^{-4}$	$7,932 \cdot 10^{-1}$	175	$1,700 \cdot 10^1$	$1,750 \cdot 10^1$	$9,292 \cdot 10^{-8}$	$1,518 \cdot 10^{-7}$
144	$6,600 \cdot 10^0$	$6,800 \cdot 10^0$	$4,001 \cdot 10^{-4}$	$7,927 \cdot 10^{-1}$	176	$1,750 \cdot 10^1$	$1,800 \cdot 10^1$	$5,888 \cdot 10^{-8}$	$5,888 \cdot 10^{-8}$

Работа выполнена при поддержке Проектного центра «ИТЭР» в рамках государственного контракта № Н.4К.52.9Б.16.1042 от 06.04.2016.

Л и т е р а т у р а

1. Севастьянов В. Д., Маслов Г. Н., Ковальчук В. Д., Тёрёшкин В. И., Литвин В. И., Игнатъев Г. Н. Исследование спектров генераторов нейтронов с энергией 14 МэВ // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 3. С. 5—13.
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. Т. 1. Менделеево: Изд-во ВНИИФТРИ, 2014.
3. Обудовский С. Ю., Батюнин А. В., Севастьянов В. Д., Воробьев В. А., Кащук Ю. А. Метрологическое обеспечение нейтронных измерений на стенде диагностики плазмы // Измерительная техника. 2015. № 4. С. 40—46.
4. Сыромуков С. В., Степанов В. В., Добров Р. В., Сысоев В. И., Мельник А. В., Богатиков К. В., Старостин А. Н., Летичевский Р. Д. Генератор нейтронов НГ-24 для ядерной медицины и термоядерных исследований // Атомная энергия. 2015. Т. 119. Вып. 1. С. 58—60.

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

6. Физика быстрых нейтронов / Под ред. В. И. Стрижика, М.: Атомиздат, 1977.

7. Физика быстрых нейтронов. Эксперименты и теория / Под. ред. Дж. Мариона, Дж. Фаулера: Т. 2. М.: Атомиздат, 1966.

8. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика. М.: Атомиздат, 1968.

9. Маслов Г. Н., Севастьянов В. Д., Кошелев А. С. Метод расчёта спектров нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами, реализованный в новой версии программы КАСКАД // Измерительная техника. 2003. № 5. С. 58—62.

10. 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 / Под. ред. В. Д. Севастьянова, Менделеево: Изд-во ВНИИФТРИ, 2007.

11. ГСССД МР182—2011. Методика восстановления спектров нейтронов ядерных реакторов и нейтронных генераторов КАСКАД 200 (176).

12. Кошелев А. С., Севастьянов В. Д. Метод оценки погрешности определения спектров полей нейтронов ядерно-физических установок // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 4. С. 1—7.

13. Александров Б. М., Жерехов В. Г., Ламаев С. Л., Николаев В. А., Соловьёв С. М., Солошенко П. С., Севастьянов В. Д. Эффективность регистрации осколков деления твёрдотельными трековыми детекторами на основе слюды // Атомная энергия. 1980. Вып. 4. Т. 48. С. 252—253.

14. White P. H. Alpha and fission counting of thin foils of fissile material // Nucl. Instrum. Methods. 1970. V. 79. N. 1. P. 1—12.

15. Бычков В. М., Манохин В. Н., Пашенко А. Б., Пляскин В. И. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами: Справочник, М.: Энергоиздат, 1982.

16. Севастьянов В. Д., Коваленко О. И., Зеленов Д. А., Орлов А. В. Радиометрический комплекс с гамма-спектрометрами для измерения характеристик полей нейтронов ядерно-физических установок // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 44—50.

17. Воинов А. С., Лебедев Б. Л. Особенности использования реакции $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ при измерении «жестких» спектров нейтронов / Тез. докл. 5-го Всесоюз. совещ. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М.: ВНИИФТРИ, 1990. С. 126—127.

18. Борташ А. И. Измерение скоростей реакций $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ и $^{65}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$ в полях нейтронов с энергией 14 МэВ / Тез. докл. 4-го Всесоюз. совещ. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М.: ВНИИФТРИ, 1985.

19. МИ 2071—2005. Реакторные нейтронные поля. Методика выполнения измерений с делящимися нейтронно-активационными детекторами с трековыми регистраторами осколков деления.

20. 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: 24.05.2016.

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

576.332:621.3.005.1

Относительная погрешность измерений коэффициента поляризуемости клеток

К. В. ГЕНЕРАЛОВ¹, В. М. ГЕНЕРАЛОВ¹, М. В. КРУЧИНИНА², Г. В. ШУВАЛОВ³,
Г. А. БУРЯК¹, А. С. САФАТОВ¹

¹ Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор», Новосибирская область, п. Кольцово, Россия, e-mail: gkv@vector.nsr.ru

² Научно-исследовательский институт терапии и профилактики СО РАМН, Новосибирск, Россия, e-mail: kruchmargo@yandex.ru

³ Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, Новосибирск, Россия, e-mail: gvshuvalov@mail.ru

Проанализирована относительная погрешность измерений поляризуемости эритроцитов крови человека методом диэлектрфореза. Полученная погрешность обеспечивает объективную оценку динамики течения заболевания и эффективность назначенного лечения.

Ключевые слова: диэлектрфорез, поляризуемость, клетка.

The theoretical analysis of a relative error of measurement of polarizability off cells, using a dielectrophoresis method is described. The error magnitude allows ensuring the objective evaluation of the course of the disease dynamics and the effectiveness of the treatment.

Key words: dielectrophoresis, polarizability, cell.

В середине прошлого века была создана теория диэлектрфореза, описывающая поведение клеток в неоднородном переменном электрическом поле (НПЭП) [1, 2]. Накопленные экспериментальные данные за последние пятьдесят лет свидетельствуют о новых уникальных возможностях исследования клеток с помощью НПЭП в широком диапазоне частот. Молекулы, белки, многочисленные компоненты

клетки и она сама, как единое целое, поляризуются во внешнем электрическом поле. Поляризация характеризует процесс перераспределения электрических зарядов по всему объёму частицы и клетки, в частности, её физико-химическую структурную уникальность [3, 4]. Количественное описание поляризации достигается введением феноменологического коэффициента пропорциональности объёмной поля-