

3. Болмусов Ю. Д. и др. Эталон единицы коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний // Метрология и измерительная техника в связи. 2004. № 2. С. 24—27.

4. Болмусов Ю. Д. и др. Рабочий эталон единицы девиации частоты частотно-модулированных колебаний // Законодательная и прикладная метрология. 2002. № 3. С. 22—25.

5. ГОСТ Р 8.607—2004. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений девиации частоты.

6. ГОСТ Р 8.717—2010. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний.

Дата принятия 24.02.2014 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

539.125:621.039.55

Исследование характеристик полей нейтронов в каналах графитовой призмы и цилиндрических замедлителей вблизи активных зон реактора БАРС-6

В. Д. СЕВАСТЬЯНОВ*, О. И. КОВАЛЕНКО*, В. П. ЯРЫНА*, А. В. ОРЛОВ*,
В. Н. БОГОМОЛОВ**, П. А. ДВОРНИКОВ**, М. П. ЗЫБИН**, С. Н. КОВТУН**,
Ю. А. ПРОХОРОВ**

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

** Государственный научный центр РФ Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского, Обнинск, Россия

Приведены результаты исследований характеристик полей нейтронов в трех каналах графитовой призмы с радионуклидным источником нейтронов $^{238}\text{Pu}(\alpha, n)^9\text{Be}$, находящимся в ее геометрическом центре, и в центральных каналах цилиндрических замедлителей, установленных вблизи активных зон реактора БАРС-6.

Ключевые слова: плотность потока, спектр и средняя энергия нейтронов, температура максвелловских тепловых нейтронов.

The results of study of neutron fields characteristics in three channels of graphite prism with $^{238}\text{Pu}(\alpha, n)^9\text{Be}$ radionuclide neutron source located in the geometric center, and in central channels of cylindrical moderators installed near the BARS-6 reactor cores are presented.

Key words: neutron flux density, neutron spectrum, average neutron energy and temperature of Maxwellian thermal neutrons.

Нейтронные поля внутри графитовых призм с радионуклидными источниками нейтронов и в замедляющих сборках как внутри, так и вне активной зоны (АЗ) исследовательских реакторов нашли широкое применение для следующих целей [1—4]: градуировки измерительных каналов систем управления и защиты реакторов, систем выгорания ядерного топлива в тепловыделяющих элементах АЗ ядерных реакторов; аттестации нейтронной спектрометрической и радиометрической аппаратуры; исследований радиационной стойкости отдельных узлов и оборудования вновь разрабатываемых ядерных реакторов и в других научных и прикладных исследованиях.

Ниже приведены результаты исследований характеристик четырех моделирующих опорных полей в каналах графитовой

призмы (МОП-МС) метрологического стенда поверки измерительных каналов (МСПИК) и комплекса моделирующих опорных полей (МОП-К) в геометрических центрах экспериментальных устройств (ЭУС-16-1, ЭУС-24) с водородо-содержащими материалами, устанавливаемыми вблизи АЗ реактора БАРС-6.

МОП-МС формируются преимущественно быстрыми нейтронами источника, рассеянными в материале графитовой призмы и не успевшими провзаимодействовать с ядрами материала призмы. Графитовая призма выполнена из реакторного графита размерами $2600 \times 2200 \times 1200$ мм [5], его масса 11440 кг. При исследовании МОП-МС использовали радионуклидный источник быстрых нейтронов $^{238}\text{Pu}(\alpha, n)^9\text{Be}$ с потоком $(1,25 \pm 0,08) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. Средняя энергия нейтронов

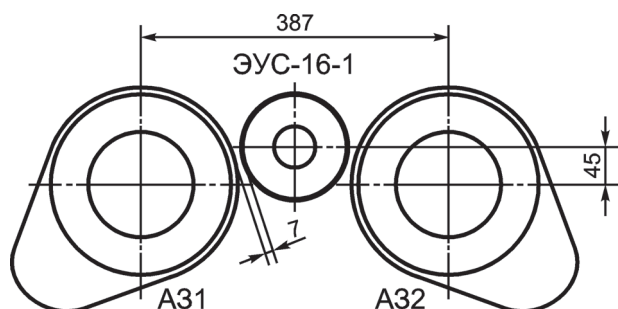


Рис. 1. Размещение ЭУС-16-1 относительно активных зон реактора

этого источника значительна и составляет 4,5 МэВ, максимумы в энергетическом спектре нейтронов наблюдаются при 0,4; 3,1; 5,0; 6,0; 8,0; 10,5 МэВ.

Источник нейтронов размещали в геометрическом центре призмы в ячейке блока G6 [5]. МОП-МС располагались в центральных точках на полувысоте ячеек блоков D6, E6, F6, что соответствует различным расстояниям от источника нейтронов по горизонтальной оси призмы: МОП-МС (1) — 570 мм, МОП-МС(2) — 380 мм, МОП-МС(3) — 190 мм и МОП-МС(3*) — 190 мм. При измерении характеристик МОП-МС (3*) в ячейку блока F6 вместо графитового цилиндра устанавливали аналогичный полый из полиэтилена (CH₂) с внешним и внутренним диаметрами 66 и 43 мм, соответственно.

МОП-К преимущественно формируются в результате замедления вылетающих из АЗ реактора быстрых нейтронов со средней энергией 1,26 МэВ [4] в материале полых цилиндров ЭУС-16-1 и ЭУС-24. Характеристики МОП-К определяли в центре цилиндрических замедлителей вблизи АЗ исследовательского импульсного реактора БАРС-6 [6, 7]. Ядерный реактор имеет две АЗ, которые в зависимости от требований эксперимента могут располагаться на различных расстояниях друг от друга. Реактор предназначен для работы, как в импульсном, так и в стационарном режимах. В стационарном режиме его мощность может достигать 9 кВт; при исследовании указанных полей детекторы нейтронов облучали при мощности реактора около 2 кВт. Экспериментальный зал, в котором размещен реактор, имеет длину 15, ширину 10,5 и высоту 7,2 м. Центры АЗ реактора находятся на расстояниях не менее 3,31 м от ближайшей стены, 2,5 м от пола, 4,7 м от потолка, 4,6 и 5,9 м от боковых стен. Диаметр каждой АЗ составляет 223 мм, расстояние между их центрами 389 мм.

Поле нейтронов в ЭУС-16-1 находится в геометрическом центре полого цилиндра из полиэтилена (CH₂) длиной 400 мм, наружным и внутренним диаметрами 160 и 51 мм, соответственно. Боковая поверхность и торцы полиэтиленового цилиндра покрыты кадмием толщиной 1 мм. Цилиндр установлен вертикально на равных расстояниях от центров АЗ реактора. Ось цилиндра отстоит от линии, соединяющей центры АЗ, на расстоянии 75 мм (рис. 1).

Активационные детекторы, используемые при исследовании характеристик полей нейтронов в ЭУС-16-1, установлены по центру внутреннего канала цилиндра на половине

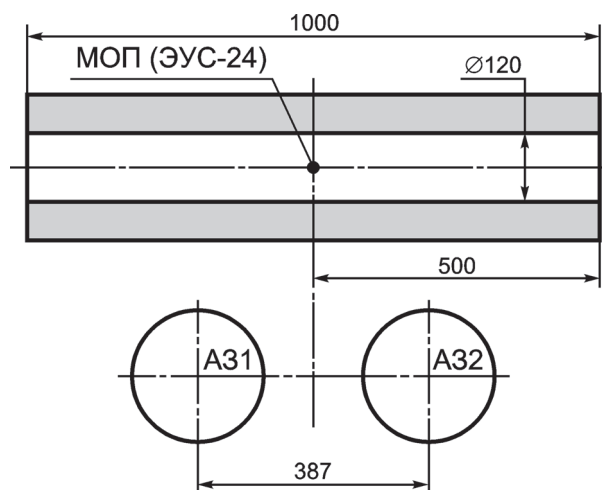


Рис. 2. Вид сверху на ЭУС-24

его высоты. Градиент плотности потока по высоте цилиндра измеряли идентичными по массе активационными детекторами из меди по реакции $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Скорость счета импульсов n в аппаратном пике γ -излучения с энергией 0,511 кэВ ^{64}Cu при разных расстояниях L от центра замедлителя

Номер детектора	L , мм	n , имп./с
Cu 13	-110	1,50
Cu 10	-60	3,36
Cu 11	-13,5	10,44
Cu 12	36	62,88
Cu 4	87	113,14
Cu 9	139	147,83
Cu 22	181	165,91
Cu 39	236	163,56
Cu 25	287	142,67

Поле нейтронов в ЭУС-24 изучали в геометрическом центре расположенного горизонтально полого цилиндра из капролона [—NH—(CH₂)₅—CO—] $_n$ (плотность 1,15 г/см³), длиной 1000 мм, наружным и внутренним диаметрами 250 и 120 мм, соответственно (рис. 2). Для уменьшения влияния на работу реактора боковую поверхность цилиндра покрывали кадмием толщиной 1 мм. Ось цилиндра находилась на 45 мм

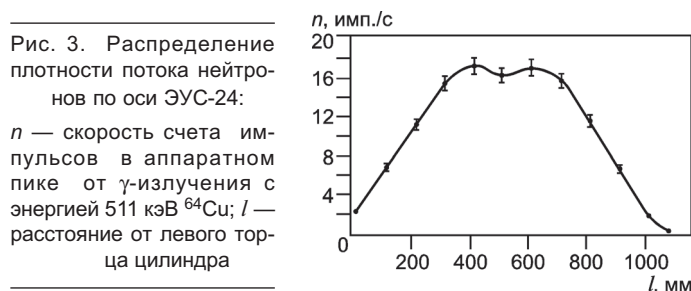


Рис. 3. Распределение плотности потока нейтронов по оси ЭУС-24:

n — скорость счета импульсов в аппаратном пике от γ -излучения с энергией 511 кэВ ^{64}Cu ; l — расстояние от левого торца цилиндра

ниже линии центров АЗ реактора. Между боковыми поверхностями чехлов АЗ реакторов и боковой поверхностью ЭУС-24 расстояние составляло 11 мм, а между центрами АЗ и осью симметрии ЭУС-24 258 мм.

Распределение плотности потока нейтронов по оси ЭУС-24 представлено на рис. 3. Для его измерения использовали также идентичные детекторы из меди по реакции $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$. Детекторы при их облучении нейтронами располагали на расстоянии 3—4 см друг от друга по оси цилиндра. На рис. 3 приведены средние квадратические отклонения (СКО) скоростей счета; при малых скоростях счета (вблизи торцов цилиндра) погрешности незаметны, поскольку они меньше размера точек.

В качестве радиометров-мониторов при исследовании характеристик полей нейтронов в ЭУС-16-1 использовали 3 штатных канала мониторинга, а в ЭУС-24 штатные каналы измерений уровня мощности реактора БАРС-6. Это четыре независимых друг от друга широкодиапазонных ($5 \cdot 10^{-5}$ — $1 \cdot 10^4$ Вт) импульсно-токовых канала (ИТК) контроля и защиты по мощности (по два на каждую АЗ), имеющие следующие рабочие диапазоны: $0,2$ — $2 \cdot 10^5$ имп./с в импульсном режиме; $5 \cdot 10^{-10}$ — $3 \cdot 10^{-3}$ А в токовом режиме. В импульсную часть ИТК входят: ионизационные камеры КНК-15-1, которые скомпонованы в полиэтиленовых блоках — коллиматорах, предназначенных для сведения к минимуму влияния одной АЗ на показания измерительных каналов другой; импульсный усилитель; дискриминатор — усилитель счетных каналов; пересчетный прибор. Сигнал с токовой части ИТК преобразуется в напряжение, пропорциональное мощности реактора. В качестве указателя мощности использовали цифровой вольтметр В7-38, вводимый в режим измерения с автоматическим переключением диапазонов (общий диапазон измеряемых напряжений 10^{-5} — 10^3 В разбит на пять поддиапазонов с пределами 0,2, 2,0; 20; 200; 1000 В). Для питания ИТК использовали стабилизированные источники напряжения.

Облучение нейтронами активационных детекторов при определении характеристик МОП-К проводили при работе реактора БАРС-6 на стационарных уровнях мощности, указанных в табл. 2.

Таблица 2

Режимы работы детекторов

Детектор	Мощность реактора БАРС-6, кВт	СКО мощности, кВт	Длительность облучения, с
ЭУС-16-1	2,076	0,0213	3671
ЭУС-16-1	2,027	0,0152	1876
ЭУС-24	1,996	0,0156	1871

Исследование характеристик полей нейтронов. Спектры нейтронов в МОП-МС и МОП-К измеряли с применением активационных и делительных детекторов [8, 9], а также специальных активационных детекторов «нулевой» толщины [10]. Наведенную активность в детекторах измеряли на эталонном радиометрическом комплексе ВНИИФТРИ [11].

Энергетические спектры нейтронного излучения в МОП-К $F(E)$ определяли активационным методом с применением стандартизированной комплексной вычислительной программы КАСКАД [12, 13]. Энергетический формат программы —

176 групп на интервале 10^{-10} — 18 МэВ, образованных из 620 групп формата ENDF. Библиотеку сечений формировали с использованием данных из [14—16]. Поиск спектральных решений осуществляли в виде суперпозиции парциальных спектров нейтронов деления, испарительных спектров Вайскопфа, максвелловского спектра тепловых нейтронов и спектра замедления Ферми. Спектр единичной плотности потока в исследуемых в работе полях нейтронов представляли в форме

$$F(E) = \sum_{i=1}^3 A_{Fi} \left(2\alpha_{Fi}^{3/2} / \sqrt{\pi} \right) \sqrt{E} \exp(-\alpha_{Fi} E) + \\ + \sum_{i=1}^3 A_{Bi} \alpha_{Bi}^2 E \exp(-\alpha_{Bi}^2 E) + A_M \alpha_M^2 E \exp(-\alpha_M E) + \\ + A_\Phi E^{-\alpha_\Phi} \left[1 + (10^7/E)^7 \right]^{-1} \left[1 + (E/0,2)^2 \right]^{-1},$$

где E — энергия нейтронов; α_{Fi} , α_{Bi} , α_M , α_Φ — константы указанных выше спектров; A_{Fi} , A_{Bi} , A_M , A_Φ — масштабные коэф-

фициенты, подбираемые из условия $\int_0^\infty F(E) dE = 1$.

Оптимизацию параметров A_{Fi} , A_{Bi} , A_M , A_Φ выполняли с использованием полученных экспериментальных данных по скоростям ядерных реакций R_i в активационных и делительных детекторах, нормированных на 1 кВт мощности реактора БАРС-6 для МОП-К либо соответствующих потоку нейтронов радионуклидного источника $(1,25 \pm 0,08) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ для МОП-МС.

Корrekтность восстановления спектра в исследуемых полях нейтронов по программе КАСКАД оценивали, сравнивая измеренные интегральные сечения ядерных реакций σ_i (усредненных по восстановленному спектру нейтронов, определяемых из соотношения $\sigma_i = R_i / \phi$, где ϕ — плотность потока нейтронов, которым облучен i -й активационный детектор) с теми же сечениями, но рассчитанными с использованием дифференциальных сечений ядерных реакций, имеющихся в библиотеке программы и восстановленного спектра нейтронов.

Погрешность определения дифференциального спектра нейтронов МОП-МС и МОП-К установлена для диапазонов энергии нейтронов при доверительной вероятности 0,95 не более: 5—10 % для 10^{-10} —0,5 эВ; 15 % для 0,5 эВ—10 кэВ; 20 % для 10 кэВ—0,25 МэВ; 5—8 % для 0,25—8 МэВ; 8 % для 8—12 МэВ; 10 % для 12—18 МэВ.

В табл. 3, 4 представлены обобщенные результаты восстановления спектра в исследуемых полях нейтронов: плотность потока ϕ и средняя энергия E нейтронов; СКО S результатов определения скорости ядерных реакций для всей совокупности используемых детекторов при их облучении нейтронами; константы α_i парциальных спектров и их вклады в восстанавливаемые спектры A_i .

Из табл. 3 следует, что вклад тепловых нейтронов A_M в восстанавливаемый спектр увеличивается с 28,3 до 87,0 % по мере удаления исследуемых полей от радионуклидного источника быстрых нейтронов. При этом температура максвелловских тепловых нейтронов в первых трех полях отличается на 272—316 °С от температуры замедлителя (графита). Однако при введении в МОП-МС(3) полого цилиндра из

Таблица 3

Обобщенные результаты восстановления спектра нейтронов в каналах графитовой призмы

Поле нейтронов	Φ , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	s , %	E , МэВ	Компонент спектра, α , отн. ед.							
				$\alpha_{B1} (A_{B1})$	$\alpha_{B2} (A_{B2})$	$\alpha_{B3} (A_{B3})$	$\alpha_{B4} (A_{B4})$	$\alpha_{B5} (A_{B5})$	$\alpha_{B6} (A_{B6})$	$\alpha_M (A_M)_{T^{**}}$	$\alpha_\Phi (A_\Phi)$
МОП-МС(1) (570 мм)	$4,67 \cdot 10^4$	0,74	0,0249	0,28 ($2,33 \cdot 10^{-4}$)	0,32 ($3,40 \cdot 10^{-4}$)	0,50 ($2,26 \cdot 10^{-3}$)	1,7 ($8,40 \cdot 10^{-3}$)	—	—	$1,94 \cdot 10^7$ (0,870) 305 °C**	1,00 (0,119)
МОП-МС(2) (380 мм)	$1,49 \cdot 10^5$	0,96	0,889	0,28 ($1,59 \cdot 10^{-3}$)	0,32 ($1,72 \cdot 10^{-3}$)	0,50 ($2,34 \cdot 10^{-3}$)	0,97 ($3,78 \cdot 10^{-3}$)	5,0 (0,0208)	14 (0,271)	$2,05 \cdot 10^7$ (0,513) 272 °C**	0,972 (0,186)
МОП-МС(3) (190 мм)	$3,74 \cdot 10^5$	0,79	0,2588	0,28 ($1,57 \cdot 10^{-3}$)	0,32 ($2,76 \cdot 10^{-3}$)	0,50 (0,0122)	0,97 (0,0671)	5,0 (0,0207)	20 (0,280)	$1,90 \cdot 10^7$ (0,289) 316 °C**	0,910 (0,328)
МОП-МС(3*) (190 мм)	$3,84 \cdot 10^5$	0,26	0,1812	0,28 ($2,38 \cdot 10^{-3}$)	0,32 ($2,85 \cdot 10^{-3}$)	0,50 ($7,90 \cdot 10^{-3}$)	0,97 (0,0506)	—	—	$2,05 \cdot 10^7$ (0,283) 58 °C**	1,00 (0,654)

Примечание: (3*) — измерение проводили в канале (3) призмы с вкладышем из полиэтилена; ** — отличие температуры максвелловских тепловых нейтронов (нейтронного газа) в исследуемых каналах графитовой призмы от температуры замедлителя нейтронов.

Таблица 4

Обобщенные результаты восстановления спектра нейтронов в центре замедляющих сборок реактора БАРС-6

Поле нейтронов	Φ , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	s , %	E , МэВ	Компонент спектра, α , отн. ед.						
				$\alpha_{F1} (A_{F1})$	$\alpha_{F2} (A_{F2})$	$\alpha_{B1} (A_{B1})$	$\alpha_{B2} (A_{B2})$	$\alpha_{B3} (A_{B3})$	$\alpha_M (A_M)_{T^{**}}$	$\alpha_\Phi (A_\Phi)$
МОП (ЭУС-16)	$2,91 \cdot 10^4$	0,2	0,298	0,786 (0,0227)	0,780 (0,0197)	0,69 (0,0170)	0,97 (0,258)	5,0 (0,264)	$3,90 \cdot 10^7$ (0,497) 4 °C**	0,960 (0,154)
МОП (ЭУС-24)	$6,02 \cdot 10^9$	0,9	0,229	0,786 (0,0244)	0,700 (0,0244)	0,69 (0,0246)	0,97 (0,0244)	5,0 (0,00374)	$3,70 \cdot 10^7$ (0,636) 20 °C**	0,960 (0,262)

полиэтилена толщиной стенки 11,5 мм удалось снизить эту температуру до 58 °C и увеличить вклад эпитепловых нейтронов с 32,8 до 65,4 %. Высокая температура в первых трех полях МС может быть обусловлена либо большой жесткостью энергетического спектра нейтронов источника $^{238}\text{Pu}(\alpha, n)$ (средняя энергия нейтронов в спектре 4,5 МэВ), либо поверхностными загрязнениями графита, имеющими большое сечение поглощения тепловых нейтронов.

Применение водородосодержащих материалов в качестве замедлителей в ЭУС-16-1 и ЭУС-24 на реакторе БАРС-6 (см. табл. 4) позволило получить значительный вклад тепловых нейтронов (49,7 и 63,6 %) в спектры МОП. Незначительное содержание примесных элементов в материале замедлителя ЭУС-24 увеличило температуру тепловых нейтронов с 4 до 20 °C из-за их поглощения.

В табл. 5, 6 для детекторов, облучаемых МОП, представлены измеренные скорости ядерных реакций R_i и сечения σ_i , а также $\Delta\sigma_i = \sigma_i - \sigma_p$, где σ_p — рассчитанное сечение для каждого детектора. Небольшие значения $\Delta\sigma_i$ (менее 2 %) свидетельствуют о высоком уровне восстановления спектров нейтронов в полях МОП-МС и МОП-К.

Из табл. 6 следует, что наибольший вклад в спектр тепловых нейтронов наблюдается в МОП-МС(1) на расстоянии

570 мм от источника $^{238}\text{Pu}(\alpha, n)^9\text{Be}$ и в МОП-К в центральных каналах экспериментальных устройств реактора БАРС-6 (см. первые три группы нейтронов).

В табл. 7 приведены 28-групповые энергетические спектры для всех исследованных полей нейтронов. По результатам выполненных измерений можно сделать следующие выводы.

В ГНЦ РФ — ФЭИ создан комплекс полей нейтронов внутри графитовой призмы (4 шт.) и в центре водородосодержащих замедлителей из полиэтилена (CH_2) и капролона, установленных вблизи двух активных зон импульсного ядерного реактора БАРС-6, с плотностью потока тепловых нейтронов в диапазоне $1\text{--}10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ и различной температурой максвелловских тепловых нейтронов (20—316 °C). Широкие диапазоны воспроизведения указанных характеристик нейтронов в исследуемых МОП обеспечивают определение линейности измерения плотности потока нейтронов в градуируемых средствах измерений (СИ) и оценку систематической погрешности этих СИ вследствие неодинаковой температуры тепловых нейтронов при градуировке в МОП и рабочих полях нейтронов ядерно-физических установок, применяемых на практике. Погрешность может достигать 28 %, например, в случае использования в СИ камер деления с

Таблица 5

Результаты измерений в исследуемых полях графитовой призмы

Ядерная реакция	Фильтр		МОП—МС(1) [D6]			МОП—МС(3) [E6]			МОП—МС(3) [F6]			МОП—МС(3*) ¹ [F6/CH ₂]		
	Cd, мм	¹⁰ B, г/см ²	R_p (ядро·с) ⁻¹	σ_p , мбарн	$\Delta\sigma_p$, %	R_p (ядро·с) ⁻¹	σ_p , мбарн	$\Delta\sigma_p$, %	R_p (ядро·с) ⁻¹	σ_p , мбарн	$\Delta\sigma_p$, %	R_p (ядро·с) ⁻¹	σ_p , мбарн	$\Delta\sigma_p$, %
¹⁹⁷ Au(n, γ)	1,00	—	$0,300 \cdot 10^{-18}$	6300	0,1	$0,181 \cdot 10^{-17}$	$0,119 \cdot 10^5$	-0,8	$0,604 \cdot 10^{-17}$	$0,158 \cdot 10^5$	0,2	$0,181 \cdot 10^{-17}$	$0,158 \cdot 10^5$	0,2
⁵⁸ Ni(n, p)	—	—	$0,525 \cdot 10^{-22}$	1,103	-0,9	$0,366 \cdot 10^{-21}$	2,406	-0,7	$0,468 \cdot 10^{-20}$	12,3	-1,4	—	—	—
²⁷ Al(n, α)	—	—	$0,179 \cdot 10^{-23}$	$0,376 \cdot 10^{-1}$	-0,1	0,000	0,000	0,0	$0,972 \cdot 10^{-22}$	0,254	0,4	$0,970 \cdot 10^{-22}$	0,2478	0,0
⁶³ Cu(n, γ)	—	—	$0,117 \cdot 10^{-18}$	2457	0,2	$0,237 \cdot 10^{-18}$	1558	-0,4	$0,350 \cdot 10^{-18}$	918	1,0	—	—	—
¹⁹⁷ Au(n, γ)	—	—	$0,285 \cdot 10^{-17}$	$0,599 \cdot 10^5$	-1,5	$0,636 \cdot 10^{-17}$	$0,418 \cdot 10^5$	-1,5	$0,115 \cdot 10^{-16}$	$0,302 \cdot 10^5$	-0,6	—	—	—
⁶³ Cu(n, γ)	1,00	—	—	0,000	0,0	$0,978 \cdot 10^{-20}$	64,30	1,4	0,000	0,00	0,00	—	—	—
²³⁷ Np(n, f)	1,00	—	$0,851 \cdot 10^{-21}$	17,87	0,4	$0,621 \cdot 10^{-20}$	40,8	0,8	$0,560 \cdot 10^{-19}$	147	1,2	$0,440 \cdot 10^{-19}$	112	-0,1
²³⁵ U(n, f)	—	—	$0,142 \cdot 10^{-16}$	$0,298 \cdot 10^6$	0,4	$0,280 \cdot 10^{-16}$	$0,184 \cdot 10^6$	1,2	$0,405 \cdot 10^{-16}$	$0,106 \cdot 10^6$	-0,6	$0,531 \cdot 10^{-16}$	$0,136 \cdot 10^6$	0,3
²³⁹ Pu(n, f)	—	1,00	—	0,000	0,0	$0,850 \cdot 10^{-19}$	559	-0,8	$0,465 \cdot 10^{-18}$	1220	-0,2	—	—	—
²³⁹ Pu(n, f)	—	—	$0,294 \cdot 10^{-16}$	$0,617 \cdot 10^6$	0,7	$0,564 \cdot 10^{-16}$	$0,371 \cdot 10^6$	0,4	$0,876 \cdot 10^{-16}$	$0,230 \cdot 10^6$	0,0	$0,438 \cdot 10^{-18}$	1119	0,1
⁹³ Nb(n, 2n)	—	—	$0,329 \cdot 10^{-23}$	$0,691 \cdot 10^{-1}$	0,6	$0,384 \cdot 10^{-22}$	0,253	0,4	—	—	—	—	—	—

Примечание: В случае МОП—МС(3*) в канал F6 дополнительно вставлен полый цилиндр из полиэтилена (CH₂) с внешним диаметром 66 мм и толщиной стенки 11,5 мм.

Таблица 6

Результаты измерений в центре замедляющих сборок реактора БАРС-6

Ядерная реакция	Фильтр Cd, мм	МОП (ЭУС-16)			МОП (ЭУС-24)		
		R_p (ядро·с) ⁻¹	σ_p , мбарн	$\Delta\sigma_p$, %	R_p (ядро·с) ⁻¹	σ_p , мбарн	$\Delta\sigma_p$, %
¹⁹⁷ Au(n, γ)	1,00	$0,439 \cdot 10^{-12}$	$0,151 \cdot 10^5$	0,0	—	—	—
¹⁹⁷ Au(n, γ)	—	—	—	—	$0,481 \cdot 10^{-12}$	$0,799 \cdot 10^5$	1,2
²⁷ Al(n, α)	1,00	$0,288 \cdot 10^{-17}$	$0,988 \cdot 10^{-1}$	0,3	—	—	—
⁶³ Cu(n, γ)	1,00	—	—	—	$0,528 \cdot 10^{-15}$	87,70	-0,3
⁶³ Cu(n, γ)	—	$0,593 \cdot 10^{-13}$	2035	-0,1	—	—	—
¹⁷⁶ Lu(n, γ)	—	$0,457 \cdot 10^{-10}$	$0,157 \cdot 10^7$	0,1	$0,128 \cdot 10^{-10}$	$0,212 \cdot 10^7$	-0,9
⁵⁸ Ni(n, p)	0,5	$0,310 \cdot 10^{-15}$	10,64	-0,3	$0,757 \cdot 10^{-16}$	12,57	0,0

²³⁵U и облучения их в МОП-МС(3) и МОП-МС(3*) из-за существенного различия интегральных сечений деления в спектрах указанных выше полей нейтронов (106 и 136 барн, соответственно, см. табл. 5). Указанные поля нейтронов аттестованы в ранге рабочих эталонов второго разряда в соответствии с [17].

Созданные эталонные поля нейтронов использовали при проведении государственных испытаний дополнительной системы контроля реактора ЭГП-6 Билибинской АЭС и секторной системы контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов реактора БН-800 Белоярской АЭС.

МОП-МС применяли также для контроля идентичности материала образцов, поглощающих нейтроны [5], и градуировки нейтронной спектрометрической и дозиметрической аппаратуры.

Литература

1. Севастьянов В. Д. и др. Высокоинтенсивные поля нейтронов для градуировки детекторов штатной аппаратуры мощных ядерных реакторов // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 6. С. 13—22.

Групповые значения плотности потока в исследуемых полях нейтронов

№ п/п	Диапазон энергии, МэВ	Графитовая призма с источником $^{238}\text{Pu}(\alpha, n)$				Реактор БАРС-6	
		МОП-МС(1) [D6]	МОП-МС(2) [E6]	МОП-МС(3) [F6]	МОП-МС(3*) [F6]	МОП (ЭУС-16)	МОП (ЭУС-24)
1	$0,100 \cdot 10^{-9} - 0,100 \cdot 10^{-6}$	0,504143	0,313262	0,164823	0,206082	0,448121	0,562673
2	$0,100 \cdot 10^{-6} - 0,215 \cdot 10^{-6}$	0,297540	0,171258	0,106153	0,101326	0,051560	0,078720
3	$0,215 \cdot 10^{-6} - 0,465 \cdot 10^{-6}$	0,07578	0,042413	0,034044	0,043569	0,007572	0,013019
4	$0,465 \cdot 10^{-6} - 0,100 \cdot 10^{-5}$	0,007843	0,008997	0,010553	0,034850	0,006598	0,011224
5	$0,100 \cdot 10^{-5} - 0,215 \cdot 10^{-5}$	0,006453	0,008566	0,010617	0,034252	0,006700	0,011402
6	$0,215 \cdot 10^{-5} - 0,465 \cdot 10^{-5}$	0,006563	0,008968	0,011565	0,034825	0,007022	0,011900
7	$0,465 \cdot 10^{-5} - 0,100 \cdot 10^{-4}$	0,006554	0,009150	0,012385	0,034805	0,007233	0,012247
8	$0,100 \cdot 10^{-4} - 0,215 \cdot 10^{-4}$	0,006430	0,009105	0,013089	0,034282	0,007348	0,012509
9	$0,215 \cdot 10^{-4} - 0,465 \cdot 10^{-4}$	0,006534	0,009470	0,014286	0,034839	0,007698	0,013111
10	$0,465 \cdot 10^{-4} - 0,100 \cdot 10^{-3}$	0,006544	0,009766	0,015246	0,034791	0,007930	0,013448
11	$0,100 \cdot 10^{-3} - 0,215 \cdot 10^{-3}$	0,006438	0,009817	0,016095	0,034255	0,008056	0,013662
12	$0,215 \cdot 10^{-3} - 0,465 \cdot 10^{-3}$	0,006551	0,010235	0,017535	0,034821	0,008442	0,014290
13	$0,465 \cdot 10^{-3} - 0,100 \cdot 10^{-2}$	0,006544	0,010364	0,018752	0,034787	0,008700	0,014794
14	$0,100 \cdot 10^{-2} - 0,215 \cdot 10^{-2}$	0,006438	0,010576	0,019997	0,034250	0,008846	0,014989
15	$0,215 \cdot 10^{-2} - 0,465 \cdot 10^{-2}$	0,006549	0,011249	0,022422	0,034809	0,009317	0,015756
16	$0,465 \cdot 10^{-2} - 0,100 \cdot 10^{-1}$	0,006530	0,012889	0,026790	0,034745	0,009790	0,016233
17	$0,100 \cdot 10^{-1} - 0,215 \cdot 10^{-1}$	0,006399	0,018896	0,039071	0,034053	0,010796	0,016461
18	$0,215 \cdot 10^{-1} - 0,465 \cdot 10^{-1}$	0,006382	0,039316	0,073462	0,033922	0,014776	0,017065
19	$0,465 \cdot 10^{-1} - 0,100$	0,005892	0,085081	0,126453	0,031114	0,027503	0,016678
20	0,100—0,200	0,004149	0,108120	0,109461	0,021222	0,053840	0,013159
21	0,200—0,400	0,002882	0,066371	0,044266	0,012858	0,094207	0,011642
22	0,400—0,800	0,002855	0,015233	0,019854	0,010444	0,094461	0,015064
23	0,800—1,40	0,002866	0,003313	0,018053	0,012574	0,039412	0,019340
24	1,40—2,50	0,002567	0,00228	0,023594	0,017809	0,025456	0,026827
25	2,50—4,00	0,001210	0,001905	0,017283	0,013070	0,017093	0,019819
26	4,00—6,50	0,00766	0,001717	0,009857	0,007628	0,009192	0,011018
27	6,50—10,5	0,000441	0,001164	0,003418	0,002968	0,002162	0,002722
28	10,5—14,0	0,000114	0,000391	0,000715	0,000742	0,000155	0,000205

2. **Севастьянов В. Д. и др.** Нейтронные поля исследовательских реакторов для градуировки внутриреакторных детекторов АЭС // Атомная энергия. 2006. Т. 100. Вып. 2. С. 97—107.

3. **Севастьянов В. Д. и др.** Характеристики поля нейтронов в центре активной зоны исследовательского водородного реактора ИВВ-2М // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 3. С. 46—53.

4. **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.

5. **Богомолов В. Н., Зыбин М. П., Севастьянов В. Д.** Контроль идентичности образцов поглощающих материалов // Измерительная техника. 2013. № 1. С. 65—68; **Bogomolov V. N., Zybin M. P., Sevast'yanov V. D.** Monitoring the identity of samples of absorbing materials // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 1. P. 98—103.

6. **Леваков Б. Г. и др.** Импульсные ядерные реакторы // Под ред. А. В. Лукина. Снежинск: Изд-во РФЯЦ—ВНИИТФ, 2002.

7. **Колесов В. Ф.** Апериодические импульсные реакторы: Монография в 2-х т., Т. 1. Саров: РФЯЦ—ВНИИЭФ, 2007.

8. **Григорьев Е. И. и др.** Стандартные образцы в системе метрологического обеспечения нейтронных измерений на атомных реакторах // Стандартные образцы в системе метрологического обеспечения качества материалов, здравоохранения и охраны окружающей среды: Тез. докл. междунар. симп. М.: Изд-во стандартов, 1979. С. 57.

9. **Борисов Г. А. и др.** Прецизионные измерения с делящимися детекторами нейтронов в реакторе БИР-2 // Тез. докл. 5-го Всесоюз. совещ. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М.: ВНИИФТРИ, 1990. С. 131—133.

10. **Кошелев А. С. и др.** Источник тепловых нейтронов для калибровки детекторов «нулевой» толщины // Приборы и техника эксперимента. 1999. № 3, С. 19—26.

11. **Севастьянов В. Д. и др.** Радиометрический комплекс с гамма-спектрометрами для измерения характеристик полей нейтронов ядерно-физических установок // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 44—50; **Sevast'yanov V. D., Kovalenko O. I., Zelenov D. A., Orlov A. V.** Radiometric Complex with Gamma Spectrometers for Measuring the Characteristics of Neutron Fields at Nuclear-Physics Installations // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 3. P. 314—321.

12. **Маслов Г. Н., Севастьянов В. Д., Кошелев А. С.** Метод расчета спектра нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами, реализованный в новой версии программы KASKAD // Измерительная техника. 2003. № 5. С. 58—62; **Maslov G. N., Sevast'yanov V. D., Koshelev A. S.** A Method of Calculating the Spectrum of Neutrons from the Results of Measurements with Integrated Detectors Realized in a New Version of the KASKAD Software // Measurement Techniques. 2003. V. 46. N. 5. P. 505—512.

13. **ГСССД МР 182—2011.** Методика восстановления спектров нейтронов ядерных реакторов и нейтронных генераторов KASKAD 200(176).

14. **ENDF/B-IV.** Dosimetry File, BNL-NCS-50446 (ENDF-216), 1975.

15. **Solwerer O.** ENDL-78, LLLEvaluatedNuclearDataLibrary-IAEA-NDS-11 (Rev.1). 1980.

16. **ГСССД 131—89.** Нейтронно-активационные детекторы для реакторных измерений. Сечения реакций взаимодействия нейтронов с ядрами.

17. **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 27.01.2014 г.

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

53.082.9:612.172.2

Структурно-частотный анализ ритмограмм больных людей

А. А. КУЗНЕЦОВ

Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,
Владимир, Россия, e-mail: artemi-k@mail.ru

Предложен параметрический метод структурно-частотного анализа электрокардиографической информации, позволяющий качественно классифицировать условное функциональное состояние организма больных людей и по его динамике судить об эффективности назначенных врачом процедур интенсивной терапии. Обнаружены и проанализированы отличия распределения мощности спектральных составляющих ритма на параметрической диаграмме функциональных уровней больных и здоровых людей.

Ключевые слова: диаграмма ритма сердца, функциональное состояние организма, управление и регуляция ритма сердца.

The offered parametric method of electrocardiography information structure-frequency analysis allows to classify qualitatively the sick people organisms conditional functional state and by its dynamics to estimate the effectiveness of intensive therapy procedures. The rhythm spectral components power distribution differences on the functional levels parametric diagram of sick and healthy people were disclosed and analyzed.

Key words: heart rhythm diagram, functional state of organism, heart rhythm control and regulation.

При формировании новых принципов, подходов и методов интегративной медицины базовым постулатом для оценки функционального состояния организма (ФСО) человека является переход от кластерной модели анализа гомеостатических параметров к модели системы, наиболее реактивной на стимулы среды влияния. На данный момент общепризнанной реактивной системой организма является сердечно-сосудистая, а единственным, разработанным до уров-

ня стандартов методом оценки ФСО — метод вариабельности ритма сердца (ВРС) [1].

Автор считает, что существуют три основания для распространения на больных людей логики структурно-топологического анализа диаграмм ритма сердца (ДРС), применяемой в рамках донозологической диагностики ВРС [2—5]: регуляторные и адаптационные механизмы одинаковы для здоровых и больных людей [1]; эффективность совмещения