

Д. И. Комар¹, Р. В. Лукашевич¹, В. Д. Гузов¹, С. А. Кутень²

¹Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», Минск, Беларусь

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

ИСТОЧНИК ЗАХВАТНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЯМИ ДО 7 МэВ И ДО 10 МэВ НА ОСНОВЕ ПОВЕРОЧНОЙ УСТАНОВКИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Широкое распространение и использование техногенных источников ионизирующих излучений, в частности таких, как ускорители заряженных частиц и ядерные реакторы, приводит к появлению ряда прикладных задач по метрологическому обеспечению спектрометрической и дозиметрической аппаратуры, работающей в полях фотонного излучения с энергией до 10 МэВ.

Контейнер-коллиматор с геометрией тепловых нейтронов установки поверочной нейтронного излучения (УПН-АТ140, УП «АТОМТЕХ») формирует коллимированный пучок нейтронов со значительной составляющей нейтронов тепловых энергий. Расположение в потоке тепловых нейтронов диска из титана позволяет получить поле захватного гамма-излучения до 7 МэВ, а диска из никеля – до 10 МэВ.

Для экспериментального изучения спектральных характеристик поля захватного излучения использовался специализированный спектрометрический блок детектирования на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ с размерами $\varnothing 38 \times 38$ мм с нелинейной характеристикой преобразования канал-энергия в диапазоне до 10 МэВ. На спектрах хорошо различимы основные линии захватного излучения от водорода, бора, титана и никеля.

По полученным на блоке детектирования спектрам можно сделать вывод о возможности калибровки спектрометрических блоков в поле захватного гамма-излучения до 10 МэВ.

Ключевые слова: захватное гамма-излучение, радионуклидный источник нейтронов, геометрия тепловых нейтронов, мишень из титана, мишень из никеля, спектрометрический блок детектирования

D. I. Komar¹, R. V. Lukashevich¹, V. D. Guzov¹, S. A. Kutsen²

¹SPE «ATOMTEX», Minsk, Belarus

²Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus

A SOURCE OF NEUTRON CAPTURE GAMMA-RAY WITH ENERGY TO 7 MeV AND TO 10 MeV BASED ON NEUTRON CALIBRATION FACILITY

Wide spread of technogenic sources of ionizing radiation such as particle accelerators and nuclear reactors leads to appearance of a number of applied metrological tasks aimed at providing spectrometric and dosimetric ionization measurement instruments, located in photon radiation fields with energy to 10 MeV.

Gamma rays with energy higher 3 MeV may be acquired using radioactive thermal neutron capture on target, i.e. (n, γ) -nuclear reaction. Titanium is used in the range of energies to 7 MeV; nickel – to 10 MeV. A simplest source of instantaneous neutron capture gamma-ray should consist of fast neutron source, neutron moderator and a target irradiated with thermal neutrons. The collimator with thermal neutron geometry of AT140 neutron calibration facility with ^{238}Pu -Be fast neutron source may be used (IBN-8-6) as a source of gamma-ray with energy to 10 MeV.

Monte-Carlo models of thermal neutrons geometry, facility and ^{238}Pu -Be fast neutron source were built using MCNP-4b code. Energy distribution of flux density of neutron capture gamma-ray for titanium and nickel targets was defined.

A spectrometric detector based on $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ crystal $\varnothing 38 \times 38$ mm with non-linear characteristics of channel-energy transformation in the range up to 10 MeV, was specifically manufactured for instrumental support of the experiment at SPE «ATOMTEX». The results for Ti, Ni, and for bare ^{238}Pu -Be neutron source were acquired.

During the experiment a possibility to use neutron capture gamma-ray field formed by thermal neutrons geometry of AT140 neutron calibration facility with ^{238}Pu -Be-fast neutron source with Ti and Ni targets for calibration $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ spectrometers for energy to 10 MeV was confirmed. Closely stationing polyethylene plate in collimator channel provides significant increase in output of reference radiation from target simultaneously decreasing unneeded parts of the spectrum.

Keywords: neutron capture gamma-ray, radionuclide neutron source, thermal neutrons geometry, titanium target, nickel target, spectrometric detector

Введение. Корректные оценки дозовых нагрузок на персонал, работающий в полях высокоэнергетического гамма-излучения с энергиями более 3 МэВ, необходимо проводить дозиметрами, калиброванными в эталонных полях с соответствующими энергиями. Создание опорных полей до 7 МэВ имеет существенное значение для дозиметрии фотонного излучения на АЭС, где

значительная составляющая суммарной мощности дозы обусловлена излучением ядерной реакции $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ с энергией 6,13 МэВ, протекающей в водном охлаждающем контуре. Кроме АЭС такие задачи возникают на ускорителях электронов и высокоэнергетических рентгеновских аппаратах, которые могут применяться в терапевтических и промышленных целях. На таких установках энергия вторичного фотонного излучения может достигать нескольких десятков МэВ.

Для практического решения задач радиационной защиты в этих условиях необходимы приборы, которые прошли калибровку в полях с энергией более 3 МэВ. Из-за отсутствия подходящих радионуклидных источников энергетическая зависимость отклика дозиметров обычно не проверяется для энергий выше 1,25 МэВ (^{60}Co). Дозиметры, откалиброванные в стандартных полях радионуклидных источников ^{137}Cs (662 кэВ) и ^{60}Co (1250 кэВ), могут некорректно измерять мощность дозы, полученной от высокоэнергетического гамма-излучения [1].

Расширение энергетического диапазона измерений мощности дозы гамма-излучения до 7 МэВ диктуется и требованиями международных стандартов, таких как ISO 4037-1 и рекомендациями IEC 61017 [2, 3].

Поля гамма-излучения с более высокими ($E_\gamma > 3$ МэВ) энергиями, пригодные для калибровки приборов, получают с помощью ядерных реакций. Такой способ формирования эталонных калибровочных полей требует значительного количества дорогостоящего лабораторного оборудования, которое доступно нескольким ведущим национальным институтам. При помощи реакции $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ можно генерировать фотоны с энергиями 6,13, 6,92 и 7,12 МэВ [4], а реакции $^{12}\text{C}(p, p'\gamma)^{12}\text{C}$ – фотоны 4,44 МэВ [5]. В таких схемах формирования поля мишени из специальных материалов облучаются пучком протонов, разогнанных полем ускорителя. Облучаемая мишень является источником гамма-излучения. Подобные схемы реализованы в Национальном исследовательском совете Канады (NRC, National Research Council), Национальном институте метрологии Германии (PTB, Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Агентстве атомной энергетики Японии (JAEA, Japan Atomic Energy Agency) и др. [5–7].

Гамма-кванты с энергиями до 10 МэВ испускаются при радиационном захвате теплового нейтрона, то есть ядерной реакции (n, γ). Расположение в потоке тепловых нейтронов из ядерного реактора мишени из титана позволяет сформировать опорное поле до 7 МэВ, а мишени из никеля – до 10 МэВ [8]. Также поток нейтронов с тепловыми энергиями можно получить и от радионуклидных источников быстрых нейтронов [9–11].

Целью данной работы является изучение при помощи метода Монте-Карло, а также экспериментально спектральных характеристик поля захватного гамма-излучения, формируемого геометрией тепловых нейтронов, установки поверочной нейтронной установки УПН-АТ140 с мишенями из титана и никеля.

Материалы и методы исследования. Существует возможность использования радионуклидных источников быстрых нейтронов для создания компактного лабораторного источника захватного гамма-излучения со стационарным во времени полем. Поток быстрых нейтронов от радионуклидного источника (^{238}Pu –Be, ^{252}Cf , ^{241}Am –Be) замедляется до тепловых энергий в полиэтилене и направляется на мишень. При таком подходе простейший источник захватного излучения состоит из источника быстрых нейтронов, замедлителя и мишени.

Контейнер-коллиматор с геометрией тепловых нейтронов установки поверочной нейтронной установки (УПН-АТ140, УП «АТОМТЕХ») формирует коллимированный пучок нейтронов со значительной составляющей нейтронов тепловых энергий. С помощью кода MCNP (версия MCNP-4B [12]) была разработана Монте-Карло-модель контейнера-коллиматора с тепловой вставкой, помещения и ^{238}Pu –Be-источника быстрых нейтронов [13, 14]. В работе [11] проведено исследование возможности получения источника захватного гамма-излучения в «тепловой» геометрии с ^{238}Pu –Be-источником нейтронов (типа ИБН–8–6) и предложены варианты фильтров из свинца и полиэтилена.

Поле гамма-излучения формируется в данном случае тремя основными источниками:

- 1) источник захватного излучения от материалов коллиматора и рассеянное в коллиматоре излучение;
- 2) источник захватного излучения от мишени;

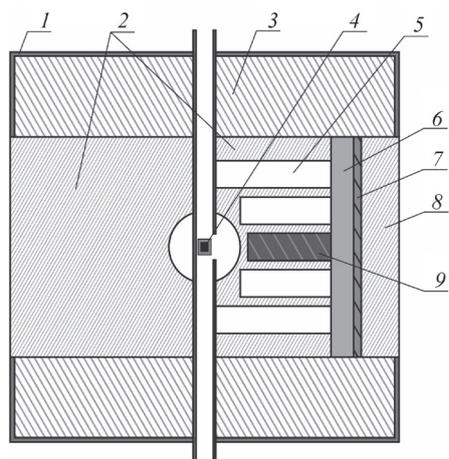


Рис. 1. Монте-Карло-модель контейнера-коллиматора с геометрией тепловых нейтронов: 1 – кожух из алюминия; 2 – вставка для геометрии тепловых нейтронов; 3 – контейнер-коллиматор; 4 – ²³⁸Pu–Be-источник нейтронов ИБН–8–6; 5 – воздушные каналы; 6 – фильтр из свинца; 7 – мишень; 8 – полиэтилен; 9 – вольфрам

Fig. 1. Monte-Carlo model of container-collimator with thermal neutrons geometry: 1 – aluminum casing; 2 – insert for thermal-neutron geometry; 3 – container-collimator; 4 – ²³⁸Pu–Be-fast-neutron source (IBN–8–6); 5 – air channels; 6 – lead; 7 – target; 8 – polyethylene; 9 – tungsten

3) гамма-излучение с энергией 4,439 МэВ, сопутствующее реакции ⁹Be(α, γ)¹²C* в активной части ²³⁸Pu–Be-нейтронного источника.

Особенности получаемого таким способом поля позволяют использовать захватное излучение от мишени и излучение 4,439 МэВ независимо друг от друга при помощи различных фильтров (рис. 1).

Центральный канал тепловой вставки заполнен вольфрамом для фильтрации гамма-излучения от источника нейтронов. Мишень располагается в канале коллиматора.

В международном стандарте ISO 4037-1 для получения эталонного поля гамма-излучения в диапазоне до 7 МэВ и до 10 МэВ рекомендуется использовать мишени из титана и никеля [2], характеристики гамма-линий радиационного захвата для них приведены в табл. 1.

Титан и никель имеют в своем спектре захватного гамма-излучения отдельные линии с высоким выходом гамма-квантов. Необходимо также учитывать гамма-излучение от конструкционных и защитных материалов (табл. 2).

Таблица 1. Наиболее интенсивные линии захватного гамма-излучения для титана и никеля [2]

Table 1. The most intense lines of neutron prompt capture gamma-ray for titanium and nickel [2]

Титан		Никель	
Энергия фотонов, МэВ	Число фотонов на 100 захватов нейтронов	Энергия фотонов, МэВ	Число фотонов на 100 захватов нейтронов
0,342	26,3	0,283	3,3
1,381	69,1	0,465	13
1,498	4,1	0,878	3,9
1,586	8,9	6,581	2,3
1,762	5,6	6,837	10,8
4,882	5,2	7,537	4,5
4,869	3,6	7,819	8,2
6,418	30,1	8,121	3,1
6,557	4,7	8,533	17
6,761	24,2	8,999	37,7

Таблица 2. Захватное гамма-излучение для некоторых веществ [15, 16]

Table 2. Prompt capture gamma-ray for some materials [15, 16]

Ядро мишени	Полное сечение захвата	Число фотонов на 100 захватов тепловых нейтронов							Общее
		0–1 МэВ	1–2 МэВ	2–3 МэВ	3–5 МэВ	5–7 МэВ	7–9 МэВ	Более 9 МэВ	
¹ H	0,3326	–	–	100	–	–	–	–	100
¹⁰ B(n, α)	763	100	–	–	–	–	–	–	100
¹⁰ B	0,0995	–	–	–	110	28	6	1	145

Ядро мишени	Полное сечение захвата	Число фотонов на 100 захватов тепловых нейтронов							Общее
		0–1 МэВ	1–2 МэВ	2–3 МэВ	3–5 МэВ	5–7 МэВ	7–9 МэВ	Более 9 МэВ	
${}^6\text{C}$	0,00353	–	–	–	100	–	–	–	100
${}^{13}\text{Al}$	0,231	236	195	69	62	19	19	–	600
${}^{14}\text{Si}$	0,177	100	63	30	89	11	4	0,1	297
${}^7\text{N}$	0,0795	–	–	–	54	11	15	12	92
${}^{48}\text{Cd}$	2522	135	92	96	73	17	1	0,1	411
${}^{24}\text{Cr}$	3,07	85	41	21	12	23	39	6,4	227
${}^{26}\text{Fe}$	2,56	75	60	27	23	25	38	2	250
${}^{29}\text{Cu}$	3,795	68	47	26	30	27	43	–	241
${}^{22}\text{Ti}$	6,08	54	160	16	24	78	1,3	0,2	333
${}^{28}\text{Ni}$	4,39	84	40	23	23	34	62	0,8	267

Были изготовлены мишени в форме дисков ($d = 300$ мм) из титана (Плита ВТ 1–0, ГОСТ 23755-79) толщиной 15 мм и никеля (Никель Н–1, ГОСТ 849-97) толщиной 10 мм.

Результаты и их обсуждение. В разработанной MCNP-4B-модели для определения энергетического распределения плотности потока захватного гамма-излучения в заданной точке необходимо учитывать распространение и нейтронов и фотонов. Областью рождения нейтронов в данной задаче является ячейка активного вещества изотропного источника нейтронов, гамма-кванты же являются вторичными частицами и образуются в результате различных взаимодействий во всей области решения задачи. В MCNP-4B можно решать одновременно задачу транспорта нейтронов и гамма-квантов включением специальной функции mode N, P (mode N – для нейтронов, mode P – для гамма-квантов). Плотность потока гамма-излучения рассчитывалась для сферы радиусом 1 мм, расположенной на расстоянии 550 мм от центра источника нейтронов по оси коллиматора, при помощи карты tally F4 [12].

Энергетическое распределение плотности потока фотонов для мишени из титана (рис. 2) и из никеля (рис. 3) получено моделированием методами Монте-Карло (результат нормирован на выход нейтронов из источника). Ширина энергетического интервала составила 50 кэВ.

Наиболее интенсивными линиями являются линии титана и никеля, линия захвата на водороде 2,223 МэВ, а также линия захвата теплового нейтрона ядром ${}^{10}\text{B}$ по реакции ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$

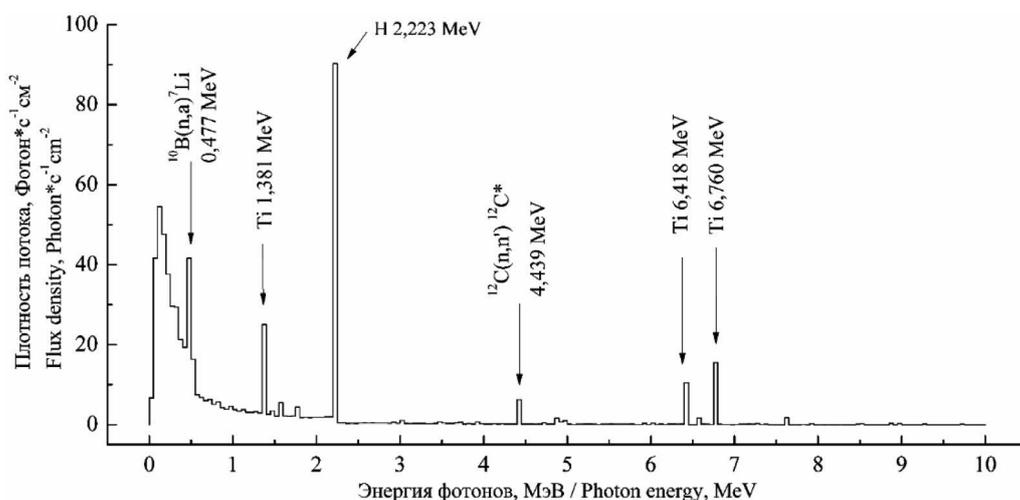


Рис. 2. Спектр захватного гамма-излучения для мишени из титана

Fig. 2. Spectrum of neutron capture gamma-ray for titanium target

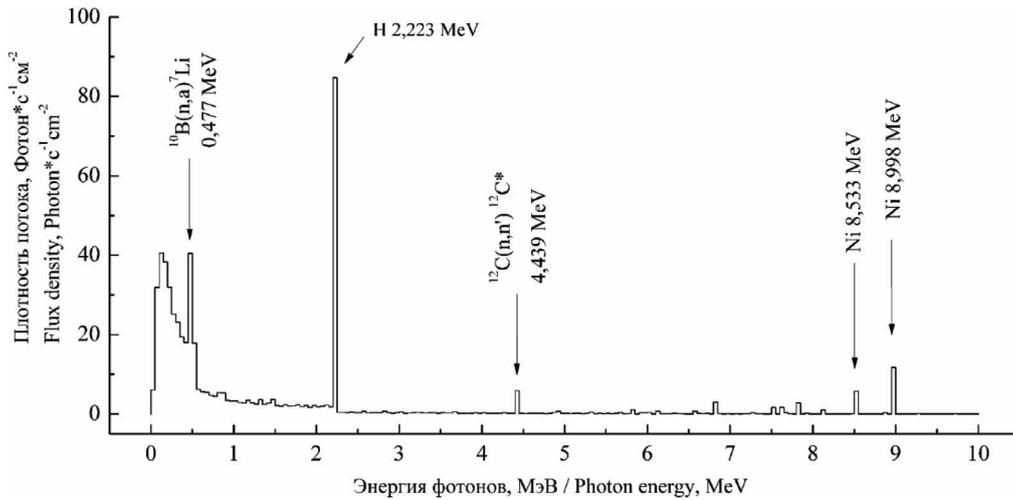


Рис. 3. Спектр захватного гамма-излучения для мишени из никеля

Fig. 3. Spectrum of neutron capture gamma-ray for nickel target

с высвобождением гамма-кванта 0,477 МэВ [17]. Пик 4,439 МэВ соответствует неупругому рассеянию быстрых нейтронов на ядрах углерода $^{12}\text{C}(n, n'\gamma)^{12}\text{C}^*$ [18]. Рядом с линиями 6,418, 6,760 МэВ для титана и 8,533, 8,999 МэВ для никеля нет других достаточно интенсивных гамма-линий.

Для экспериментального изучения спектральных характеристик поля захватного излучения использовался специализированный спектрометрический блок детектирования на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размерами $\varnothing 38 \times 38$ мм с нелинейной характеристикой преобразования канал-энергия в диапазоне до 10 МэВ (количество каналов – 1024). На рис. 4 изображено взаимное расположение блока детектирования, контейнера-коллиматора и мишени.

Измерения спектров гамма-излучения проводились с фильтрацией из полиэтилена толщиной 5 см. В центральный канал тепловой вставки был установлен вольфрамовый фильтр ($l = 10$ см). Экспериментальные спектры за вычетом собственной радиоактивности кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и фона без нейтронного источника приведены на рис. 5.

Пики полного поглощения 4,439 МэВ от ^{238}Pu -источника нейтронов и эталонных линий от мишени сопровождаются ярко выраженными пиками однократного (SE – single escape) и двукратного вылета (DE – double escape). Фильтр из полиэтилена толщиной 5 см применялся для увеличения интенсивности излучения мишени на фоне остального спектра.

По полученным аппаратурным спектрам можно сделать вывод о возможности калибровки спектрометрических блоков в поле захватного гамма-излучения до 10 МэВ, полученного в геометрии тепловых нейтронов установки УПН-АТ140 с помощью мишеней из никеля и титана.

Заключение. Размещение в канале контейнера-коллиматора с геометрией тепловых нейтронов дисков из титана и никеля позволяет сформировать поле захватного гамма-излучения с энергиями до 7 МэВ и до 10 МэВ. Моделирование методом Монте-Карло показало, что наиболее ин-

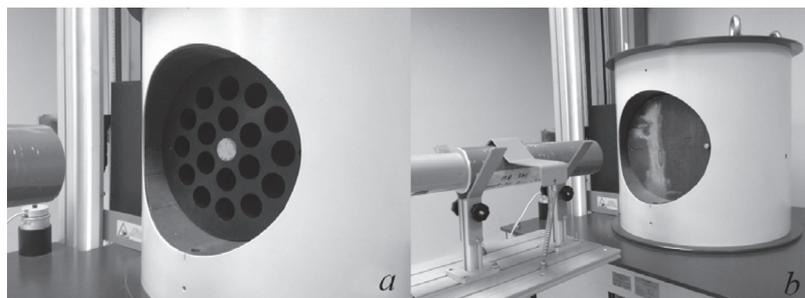


Рис. 4. Контейнер-коллиматор с геометрией тепловых нейтронов без мишени (a) и с мишенью из никеля (b)

Fig. 4. Container-collimator with thermal-neutrons geometry without target (a) and with nickel target (b)

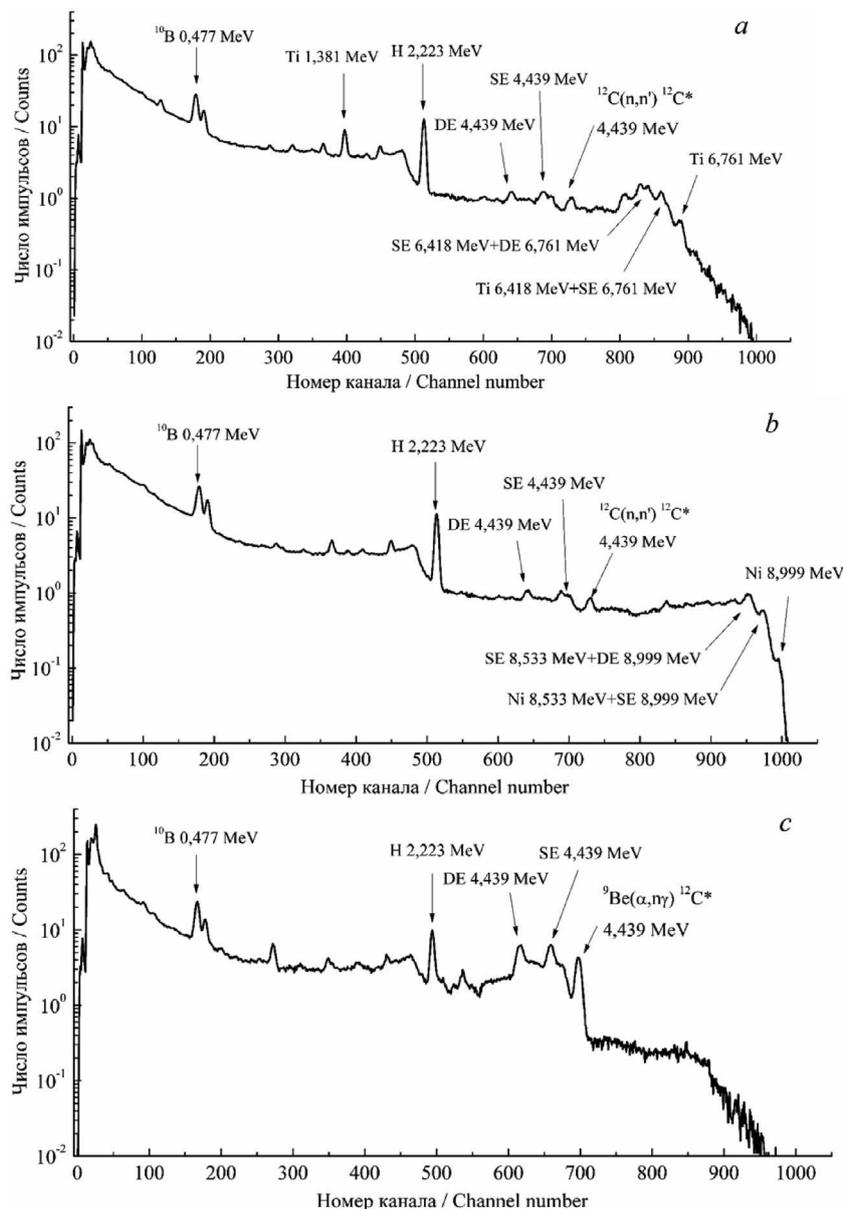


Рис. 5. Экспериментальные спектры гамма-излучения для мишени из титана (а), никеля (б) и открытого ^{238}Pu –Be-источника (с)

Fig. 5. Experimental gamma-ray spectra for titanium target (a), nickel target (b) and bare ^{238}Pu –Be-source (c)

тенсивные линии (кроме линий мишеней) соответствуют захвату теплового нейтрона ядрами водорода и ядрами бора.

Экспериментальные аппаратные спектры были получены с помощью специализированного спектрометрического блока детектирования на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размерами $\text{Ø } 38 \times 38$ мм с нелинейной характеристикой преобразования канал-энергия в диапазоне до 10 МэВ. Анализ экспериментальных данных подтвердил возможность калибровки спектрометров до 10 МэВ по линиям захватного излучения.

Список использованных источников

1. Capture Gamma Ray Beam for the Calibration of Radioprotection Dosimeters between 5 and 9 MeV / F. Bermann [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 1990. – Vol. 30. – P. 237–243.
2. International Electrotechnical Commission «Radiation Protection Instrumentation – Transportable, Mobile or Installed Equipment to Measure Photon Radiation for Environmental Monitoring» 23/10/2015. IEC 61017 Ed. 1.

3. International Standart «X and gamma radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy». 15/12/1996. ISO 4037-1.
4. Duvall, K. C. The development of a 6–7 MeV photon field for instrument calibration / K. C. Duvall, H. T. Heaton, C. G. Soares // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 1985. – Vol. 10–11, iss. 2. – P. 942–945.
5. Guldbakke, S. Properties of high-energy photon fields to be applied for calibration purposes / S. Guldbakke, D. Schaffer // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 1990. – Vol. 299, iss. 1–3. – P. 367–371.
6. Rogers, D. O. A nearly mono-energetic 6–7 MeV photon calibration source / D. O. Rogers // *Health Physics*. – 1983. – Vol. 45, N 1. – P. 127–137.
7. Croft, S. The determination of the absolute response function of a deuterated benzene total energy detector to 6.13 MeV gamma-rays / S. Croft, M. Bailey // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 1991. – Vol. 302, iss. 2. – P. 315–326.
8. Bermann, F. Étalonnage de détecteurs de radioprotection avec des gammas d'énergie supérieure à 1 MeV: utilisation de faisceaux de gammas de capture / F. Bermann, G. Portal // *Radioprotection*. – 1991. – Vol. 26, N 3. – P. 493–513.
9. Kroupa, M. Wide energy range gamma-ray calibration source / M. Kroupa, C. Granja, Z. Janout // *Journal of Instrumentation*. – 2011. – Vol. 6, N 1. – P. 6–11.
10. Rogers, J. G. A 7–9 MeV isotopic gamma-ray source for detector testing / J. G. Rogers, M. S. Andreaco, C. Moisan // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 1998. – Vol. 413, iss. 2–3. – P. 249–254.
11. Формирование поля захватного гамма-излучения до 10 МэВ для метрологического обеспечения приборов радиационной защиты / Д. И. Комар [и др.] // *Приборы и методы измерений*. – 2016. – № 3. – С. 296–304.
12. MCNP–A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B / ed. J. F. Briesmeister. – Report LA-12625-M. – Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, 1997. – 736 p.
13. Комар, Д. И. Монте-Карло моделирование метрологических характеристик установки поверочной нейтронного излучения УПН-АТ140 / Д. И. Комар, С. А. Кутень, В. Д. Гузов // *Эколог. вестн.* – 2016. – № 3. – С. 53–58.
14. Комар, Д. И. Влияние рассеянного нейтронного излучения на метрологические характеристики поверочной установки нейтронного излучения УПН-АТ140 / Д. И. Комар, С. А. Кутень // *Приборы и методы измерений*. – 2017. – № 1. – С. 23–31.
15. Choi, H. D. Database of prompt gamma-rays from slow neutron capture for elemental analysis / H.D. Choi, R.B. Firestone, R.B. Lindstrom. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006.–252 p.
16. Atlas of Neutron Capture Cross Sections / ed. J. Kopecky. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1997. – 370 p.
17. Ceberg, C. P. Neutron capture imaging of ^{10}B in tissue specimens / C. P. Ceberg, L. G. Salford // *Radiotherapy and Oncology*. – 1993. – Vol. 26, iss. 2. – P. 139–146.
18. Hugh, E. H. Neutron Inelastic Scattering in ^{12}C , ^{14}N and ^{16}O . – Houston, Texas, 1959. – 256 p.
19. Baldini, A. A NaI activation method for the measurement of the weak thermal neutron field around the MEG experiment / A. Baldini, C. Bemporad, F. Ceci // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 2007. – Vol. 570, iss. 3. – P. 561–564.
20. Gardner R. P. NaI detector neutron activation spectra for PGNAА applications / R. P. Gardner, E. Sayyed, Y. Zheng // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2000. – Vol. 53, iss. 4–5. – P. 483–497.

References

1. Bermann F., Bordy J. M., Chassende-Baroz P., Detroussel P., Dhermain J., Jaureguy J. C., Sollier T. Capture Gamma Ray Beam for the Calibration of Radioprotection Dosimeters between 5 and 9 MeV. *Radiation Protection Dosimetry*, 1990, no. 4, pp. 237–243. Doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a080623
2. International Electrotechnical Commission. *Radiation Protection Instrumentation – Transportable, Mobile or Installed Equipment to Measure Photon Radiation for Environmental Monitoring*. 23/10/2015 no. IEC 61017 Ed. 1.
3. International Standart “X and gamma radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy”. 15/12/1996. ISO 4037-1.
4. Duvall K. C., Heaton H. T., Soares C. G. The development of a 6–7 MeV photon field for instrument calibration. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1985, vol. 10–11, no. 2, pp. 942–945. Doi: 10.1016/0168–583X(85)90145–4
5. Guldbakke S., Schaffer S. Properties of high-energy photon fields to be applied for calibration purposes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1990, vol. 299, no. 1–3, pp. 367–371. Doi: 10.1016/0168–9002(90)90806–H
6. Rogers D. O. A nearly mono-energetic 6–7 MeV photon calibration source. *Health Physics*, 1983, vol. 45, no. 1, pp. 127–137. Doi: 10.1097/00004032–198307000–0001
7. Croft S., Bailey M. The determination of the absolute response function of a deuterated benzene total energy detector to 6,13 MeV γ -rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1991, vol. 302, no. 2, pp. 315–326. Doi: 10.1016/0168–9002(91)90415–M
8. Bermann F. Étalonnage de détecteurs de radioprotection avec des gammas d'énergie supérieure à 1 MeV: utilisation de faisceaux de gammas de capture, *Radioprotection*, 1991, vol. 26, no. 3, pp. 493–513. Doi: 10.1051/radiopro/1991017
9. Kroupa M., Granja C., Janout Z. Wide energy range gamma-ray calibration source. *Journal of Instrumentation*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 6–11. Doi: 10.1088/1748–0221/6/11/T11002
10. Rogers J. G., Andreaco M. S., Moisan C. A 7–9 MeV isotopic gamma-ray source for detector testing. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1998, vol. 413, no. 2–3, pp. 249–254. Doi: 10.1016/S0168–9002(98)00097–7

11. Komar D., Lukashevich R., Guzov V., Kutsen S. Neutron capture gamma ray field with energy to 10 MeV for metrological support of radiation protection devices. *Pribory i metody izmerenii* [Devices and Methods of Measurements], 2016, vol. 7, no. 3, pp. 296–304. Doi: 10.21122/2220–9506–2016–7–3–296–304 (in Russian).
12. Briestmeister J. F. [ed.]. *MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4A*. Report LA–12625–M. Los Alamos, NM, Los Alamos National Laboratory, 1994. 736 p.
13. Komar D. I., Kutsen S. A., Guzov V. D. Monte-Carlo simulation metrological characteristics of the neutron calibration facility. *Ekologicheskij vestnik* [Ecological proceedings], 2016, no. 3, pp. 54–61 (in Russian).
14. Komar D., Kutsen S. Influence of scattered neutron radiation on metrological characteristics of AT140 Neutron Calibration Facility. *Pribory i metody izmerenii* [Devices and Methods of Measurements], 2017, vol. 8, no. 1, pp. 23–31. Doi: 10.21122/2220–9506–2017–8–1–23–31 (in Russian).
15. Choi H. D., Firestone R. B., Lindstorm R. B. *Database of prompt gamma-rays from slow neutron capture for elemental analysis*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2006. 252 p.
16. Kopecky, J. [ed.] *Atlas of Neutron Capture Cross Sections*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1997. 370 p.
17. Ceberg C. P., Salford L. G. Neutron capture imaging of ^{10}B in tissue specimens. *Radiotherapy and Oncology*, 1993, vol. 26, no. 2, pp. 139–146. Doi: 10.1016/0167–8140(93)90095–P
18. Hugh E. H. *Neutron Inelastic Scattering in ^{12}C , ^{14}N and ^{16}O* . Houston, Texas, 1959. 256 p.
19. Baldini A., Bemporad C., Cei F. A NaI activation method for the measurement of the weak thermal neutron field around the MEG experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2007, vol. 570, no. 3, pp. 561–564. Doi: 10.1016/j.nima.2006.10.101
20. Gardner R. P., Sayyed E., Zheng Y. NaI detector neutron activation spectra for PGNAА applications. *Applied Radiation and Isotopes*, 2000, vol. 53, no. 4–5, pp. 483–497. Doi: 10.1016/S0969–8043(00)00198–6

Информация об авторах

Комар Дамиан Игваррович – инженер, Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ» (ул. Гикало, 5, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: damiankomar@yandex.ru

Лукашевич Роман Васильевич – ведущий инженер, Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ» (ул. Гикало, 5, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lukashevich@atomtex.com

Гузов Владимир Дмитриевич – главный метролог – начальник отдела радиационной метрологии, Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ» (ул. Гикало, 5, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: guzov@atomtex.com

Кутень Семен Адамович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией теоретической физики и моделирования ядерных процессов, Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета (ул. Бобруйская, 11, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: semen_kuten@list.ru

Для цитирования

Источник захватного гамма-излучения с энергиями до 7 МэВ и до 10 МэВ на основе поверочной установки нейтронного излучения / Д. И. Комар [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 2. – С. 96–103.

Information about the authors

Komar Damian Igyarrovich – engineer, SPE “ATOM-TEX” (5, Gikalo Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: damiankomar@yandex.ru

Lukashevich Raman Vasil'evich – lead engineer, SPE “ATOMTEX” (5, Gikalo Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lukashevich@atomtex.com

Huzau Uladzimir Dzmitryevich – Head of Metrology Department, SPE “ATOMTEX” (5, Gikalo Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: guzov@atomtex.com

Kuten Semen Adamovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of Laboratory of Theoretical Physics and Simulation of Nuclear Processes, Research Institute for Nuclear Problems of Belarussian State University (11, Bobrujskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: semen_kuten@list.ru

For citation

Komar D. I., Lukashevich R. V., Guzov V. D., Kutsen S. A. A source of neutron capture gamma-ray wiht energy to 7 MeV and to 10 MeV based on neutron calibration facility. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 2, pp. 96–103 (in Russian).