

*И.М. ПРОХОРЕЦ, С.И. ПРОХОРЕЦ, А.И. СКРЫПНИК, В.П. ЛУКЬЯНОВА,  
М.А. ХАЖМУРАДОВ*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ МНОГОШАРОВОГО СПЕКТРОМЕТРА**

---

Рассматривается возможность регистрации тепловых нейтронов на фоне гамма-квантов  $^{239}\text{Pu}$ - $\text{Be}$  источника. Экспериментально показывается, что путем дискриминации сигналов от гамма-квантов низких энергий возможно их отделение от сигналов, вызванных нейтронами в сцинтилляторе  $\text{ZnS}(\text{Ag})$ . Регистрация сигнала с  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  осуществлялась фотоэлектрическим умножителем. Амплитудное разрешение системы регистрации, в которой использовались предварительный усилитель и основной усилитель с R-C-формирователя, достигало 15%. Показывается изменение спектра нейтронов в эксперименте. Для этого использовалась программа моделирования прохождения нейтронов через полиэтиленовый замедлитель на основе кода MCNP.

### **1. Введение**

Дозиметрические измерения вокруг источников нейтронного излучения связаны с определенными трудностями, так как в прямой видимости этих объектов или за их защитой наблюдается широкий энергетический спектр нейтронов от  $10^{-2}$  до  $10^7$  эВ [1]. В технике радиационного контроля мощность дозы нейтронов вместо прямого измерения часто определяют по потоку нейтронов, используя сведения об энергетическом спектре нейтронов. Тепловые ( $\sim 0,025$  эВ) и промежуточные нейтроны измеряют с помощью реакций  $(n, \alpha)$  на элементах  $^{10}\text{B}$  и  $^6\text{Li}$ . Измерение быстрых нейтронов с энергией от нескольких десятых до нескольких десятков МэВ основано на регистрации протонов отдачи, образующихся при упругом рассеянии быстрых нейтронов в водосодержащих материалах. Измерение потока нейтронов, не зависящее от энергии, в диапазоне от  $10^{-2}$  до  $10^9$  эВ осуществляется с помощью многошарового метода [2, 3].

Спектрометр нейтронов, работающий по этому принципу, состоит из датчика тепловых нейтронов, расположенного в центре шаров различного диаметра, каждый из которых выполняет роль замедлителя нейтронов. Чувствительность каждого шара имеет максимум при определенной энергии нейтронов, положение которого зависит от диаметра шара. Информация о спектре нейтронов содержится в измерениях, проведенных с использованием шаров различного диаметра. Получение такой информации является непростой задачей, так как она требует решения, основанного на некорректных методах [4, 5].

Чувствительность многошарового спектрометра зависит от диаметра шара и датчика тепловых нейтронов. Она характеризуется функциями отклика, для получения которых используются экспериментальные и расчетные методы.

Экспериментальный метод определения функций отклика использовался в работе Боннера с сотрудниками [2]. Для этих целей понадобились моноэнергетические нейтроны в диапазоне энергий от 50 кэВ до 15 МэВ и нейтроны с тепловыми энергиями, а в качестве детектора замедленных в полиэтиленовых сферах нейтронов – сцинтиллятор  $\text{Li}^6\text{I}(\text{Eu})$ . Сцинтилляции, возникающие в результате экзотермической реакции  $\text{Li}^6(n, \alpha)\text{H}^3$  ( $Q=4,8$  МэВ), регистрировались фотоумножителем.

Такой метод получения функций отклика обладает существенными недостатками, обусловленными трудностями получения и регистрации нейтронов с энергиями меньше нескольких килоэлектронвольт и больше 20 МэВ. По этой причине для получения функций отклика шарового спектрометра начали применять математическое моделирование процессов прохождения нейтронов через замедляющие шары и регистрации их детектором. Распространению этого метода способствовало увеличение быстродействия компьютеров, наличие проверенных библиотек сечений процессов взаимодействия нейтронов с различными химическими элементами и распространением появившихся на их основе программных кодов типа ANISN [3] и MCNP [6, 7]. Используя этот метод, были определе-

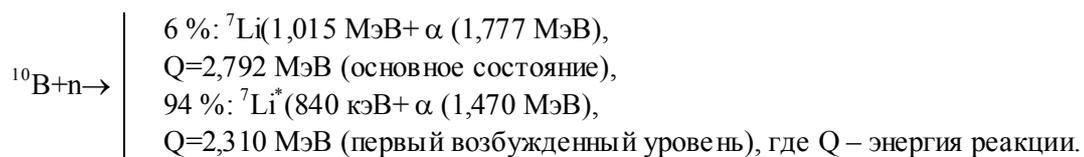
ны функции отклика для шаровых спектрометров с детекторами тепловых нейтронов на основе сцинтилляторов  ${}^6\text{LiI}$ , сферических газоразрядных пропорциональных счетчиков [8] и активационных фольг из индия и золота [3]. Результаты расчетов с использованием, в основном, кода ANISN сравнивались с экспериментальными данными о функциях отклика, полученными за последние годы на моноэнергетических и тепловых нейтронах и нейтронах с изотопных источников. Было получено хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных при высоких энергиях нейтронов, но обнаружено расхождение при тепловых энергиях.

Регистрация нейтронов в различных средах человеческой деятельности сцинтиллятором  $\text{ZnS}$ , обогащенным бором или другими элементами с большими сечениями взаимодействия медленных нейтронов, используется продолжительное время [1, 9, 10, 11]. Такая «продолжительность жизни» метода регистрации нейтронов, прежде всего, обусловлена большим сечением взаимодействия нейтронов теплового диапазона энергий с изотопом  $\text{B}^{10}$ , который в природной смеси химического элемента составляет 19,8% [12]. В работе [1] в примечании переводчика с немецкого упоминается о преимуществе сцинтиллятора  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  по сравнению с другими сцинтиллирующими материалами при регистрации нейтронов при наличии гамма-фона, а З.Я. Соколова и В.Б. Черняев [9] провели исследования дискриминации сигналов при регистрации нейтронов и гамма-излучения и показали, что эффективность регистрации нейтронов и чувствительность детектора зависит от уровня дискриминации регистрируемых сигналов, который можно выбирать из условий допустимого гамма-фона в эксперименте. В работе [11] было показано, что новые сцинтилляторные материалы  $\text{ZnS}:\text{Ag}/{}^6\text{LiF}$ ,  $\text{ZnS}:\text{Ag}/{}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$  обеспечивают лучшую эффективность регистрации тепловых нейтронов по сравнению с коммерческими сцинтилляторами BC-704 фирмы Bicron. В.Д. Рытиков с сотрудниками [10] показали, что тепловые нейтроны от источника Pu-Be и гамма-кванты от источника  ${}^{241}\text{Am}$  с энергией 26,3 и 59,5 кэВ регистрируются фотодиодом типа Si-PIN-PD S-3590 при поглощении сцинтиллятором типа  $\text{ZnS}(\text{Ag})+{}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ .

Учитывая многолетний интерес к нейтронной тематике, приведенные результаты исследований сцинтиллятора  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  с конвертером  ${}^{10}\text{B}$ , представленные в этой работе, являются актуальными и полезными для развития дозиметрии нейтронов на основе многошарового спектрометра.

## 2. Методика исследований и результаты

Детектирование тепловых нейтронов сцинтиллятором  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  с добавкой  ${}^{10}\text{B}$  осуществляется путем реакции  ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ , в результате которой образуются заряженные частицы по двум каналам распада составного ядра с вероятностью 94 и 6 %:



Из зависимости приведенного процесса от энергии нейтронов (рис. 1) следует, что поперечное сечение поглощения тепловых нейтронов (энергия 0,0259 эВ) составляет 3840 барн, оно уменьшается с увеличением энергии нейтронов по закону  $1/\vartheta$ , где  $\vartheta$  – скорость нейтрона. После поглощения нейтрона в 94% реакции образуется ион  ${}^7\text{Li}$  в первом возбужденном состоянии, которое в результате испускания гамма-кванта с энергией 480 кэВ возвращается в основное состояние за время около  $10^{-13}$  секунд [13].

Детектор тепловых нейтронов представляет собой цилиндр из оргстекла диаметром 10 мм и высотой 40 мм, покрытый слоем  $\text{ZnS}(\text{Ag})+{}^{10}\text{B}$  толщиной 100 мкм, за исключением основания цилиндра, соединенного с фотоумножителем ФЭУ-87 диаметром 40 мм путем оптического контакта. Детектор, за исключением поверхности, примыкающей к ФЭУ, упакован в алюминиевый корпус. Фотоумножитель с детектором размещаются в светонепроницаемом корпусе. В этом же корпусе находятся делитель ФЭУ и предварительный усилитель сигнала (рис. 2). Для подачи напряжения на усилитель и съема с него сигнала используется один и тот же высокочастотный кабель.

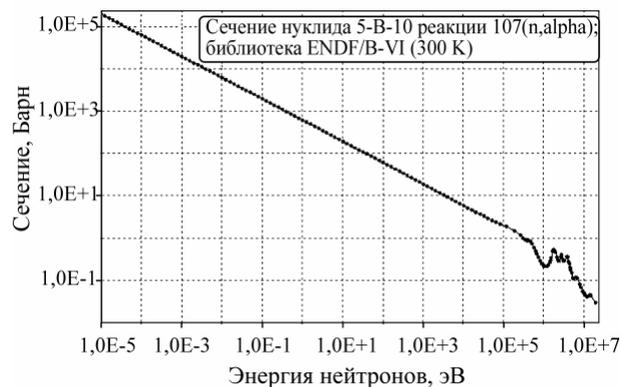


Рис. 1. Сечение взаимодействия нейтронов

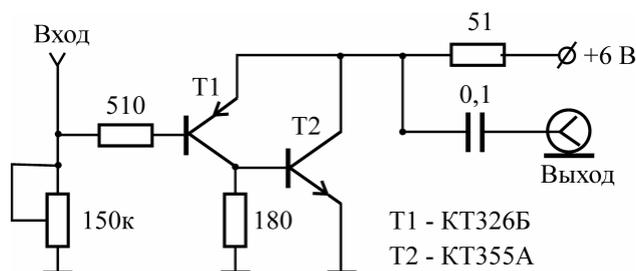


Рис. 2. Схема предварительного усилителя детектора

В экспериментальном варианте шарового спектрометра используются полиэтиленовые шары диаметром 90, 120, 152, 200 и 245 мм. Для регистрации только тепловых нейтронов спектрометр используется без замедляющих шаров световодом, покрытым слоем  $ZnS(Ag)+^{10}B$ . Для использования замедляющих сфер диаметром больше 245 мм в конструкцию спектрометра легко добавляется более длинный световод между фотоумножителем и детектором тепловых нейтронов.

Такая конструкция спектрометра не обладает сферической симметрией, поэтому для детального моделирования влияния геометрических параметров детектора тепловых нейтронов на функцию отклика необходимо использовать современные программные коды, например, MCNP [6, 7].

Экспериментальная установка для исследования возможности разделения сигналов, вызванных нейтронами и фотонами от  $Pu-Be$  источника, была создана на спектрометре без замедляющего шара. Сигнал с фотоумножителя усиливался предварительным усилителем, расположенным в корпусе ФЭУ, дополнительно усиливался и формировался спектрометрическим усилителем типа 1101 фирмы Polon и подавался на амплитудный анализатор, подключенный к персональному компьютеру.

В эксперименте в качестве излучателя использовался  $^{239}Pu-Be$  источник нейтронов. В этом источнике нейтроны образуются в результате экзотермической реакции  $\alpha + ^9_4Be \rightarrow n + ^{12}_6C + 5,71 \text{ МэВ}$ , которую инициируют  $\alpha$ -частицы, вылетающие при распаде ядра  $^{239}Pu$ .

Активность такого источника составляла  $1,13 \cdot 10^5$  нейтронов в секунду в телесный угол  $4\pi$ , а его спектр представлен на рис. 3. Спектр нейтронов жесткий и имеет два максимума, зависящих от возбужденного состояния, в котором остается ядро  $^{12}C$  [14, 15].

Для проведения эксперимента между детектором и  $^{239}Pu-Be$  источником располагался замедлитель нейтронов в виде полиэтиленовой пластины толщиной 5 или 10 см. Спектры нейтронов в диапазоне до 1 МэВ, полученные в результате моделирования по программе на основе кода MCNP-4C [6] прохождения нейтронов спектра источника  $^{239}Pu-Be$  через пластины полиэтилена толщиной 5 и 10 см, показаны на рис. 4.

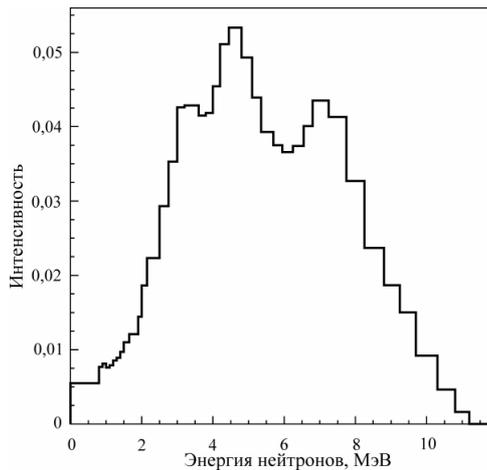


Рис. 3. Спектр  $^{239}\text{Pu}$ -Be источника нейтронов

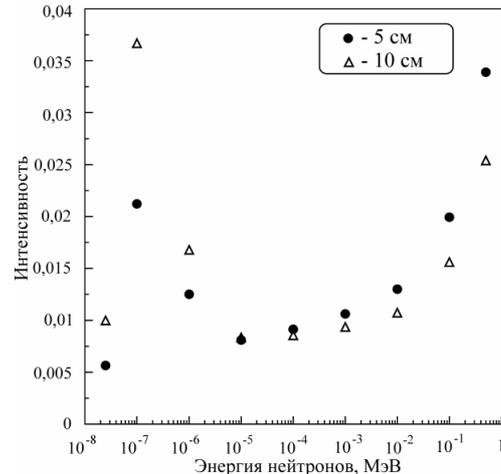


Рис. 4. Спектр нейтронов после прохождения полиэтиленовой пластины толщиной 5 и 10 см

Кроме нейтронов, источник  $^{239}\text{Pu}$ -Be испускает гамма-кванты, которые также регистрируются детектором тепловых нейтронов на основе  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  с добавкой  $^{10}\text{B}$ . Фотоны с энергией 4,44 МэВ возникают в результате перехода возбужденного состояния ядра  $^{12}\text{C}^*$  в основное. После испускания  $\alpha$ -частицы ядром  $^{239}\text{Pu}$  возникает ядро  $^{235}\text{U}$ , переходы которого в основное состояние дают гамма-кванты различных энергий: 12,9; 51,6; 38,6 кэВ с вероятностью на один нейтрон 2096, 1066 и 404 соответственно [14].

### Выводы

Результаты измерения амплитудных спектров для определения рабочего напряжения фотоумножителя в целях выбора оптимального режима, при котором дискриминируются сигналы от низкоэнергетических фотонов источника излучения и шумы фотоумножителя, представлены на рис. 5 и 6,а.

Результаты измерения амплитудного спектра нейтронов и фотонов источника  $^{239}\text{Pu}$ -Be, измеренные с использованием сцинтиллятора на основе  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  с добавкой  $^{10}\text{B}$ , представлены на рис. 6,б.

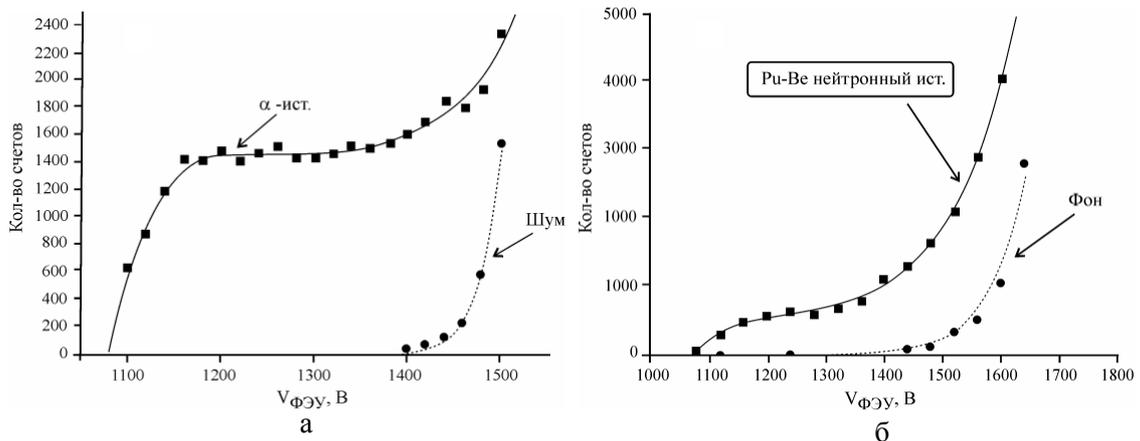


Рис. 5. Спектры сигналов: а – от  $\alpha$ -источника и шума ФЭУ; б – от  $\text{Pu}$ -Be источника нейтронов и фона

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о возможности разделения сигналов рассмотренным выше спектрометром от гамма-квантов и тепловых нейтронов и использования сцинтиллятора на основе  $\text{ZnS}(\text{Ag})+^{10}\text{B}$  совместно с фотоумножителем в качестве детектора тепловых нейтронов в многошаровом спектрометре.

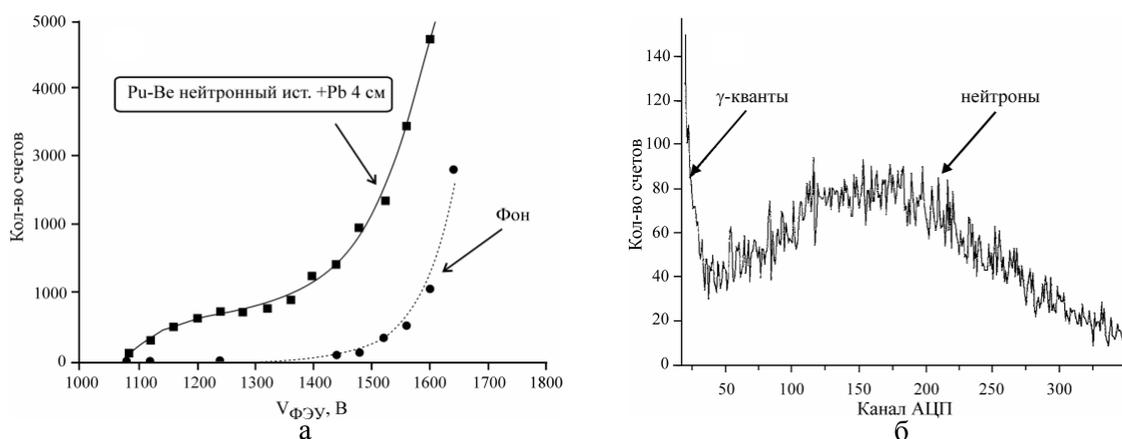


Рис. 6. Результаты измерения: а – спектра Pu-Be нейтронного источника, закрытого свинцом толщиной 4 см; б – амплитудного спектра нейтронов и фотонов Pu-Be источника при  $V_{ФЭУ} = 1340$  В

Для продолжения исследований по многосферному спектрометру необходимо промоделировать его функции отклика на нейтроны различного диапазона энергий и рассмотреть возможность использования методики наведенной активности взамен прямой регистрации нейтронов.

**Список литературы:** 1. Франк М., Штольц В. Твердотельная дозиметрия ионизирующего излучения / Под ред. И.Б. Керим-Маркуса. М.: Атомиздат, 1973. 247с. 2. Bramblett R.L., Eving R.J., Bonner T.W. A new type of neutron spectrometer // Nucl. Instrum. Meth. 1960. Vol.9. P.1-12. 3. Thomas D.J., Alevra A.V. Bonner sphere spectrometers – a critical review // Nucl. Instrum. Meth. 2002. A476. P.12-20. 4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 142с. 5. Reginatto M. Bayesian approach for quantifying the uncertainty of neutron doses derived from spectrometric measurements // Radiat. Prot. Dosim. 2006. Vol.121, No.1. P.64-69. 6. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4C / Ed. J.F. Briesmeister. 2000. 7. MCNPX 2.4.0. RSICC Computer Code Collection. Monte Carlo N-Particle Transport Code System for Multiparticle and High Energy Applications. CCC-715. 2002. 8. Mares V., Schraube H. Improved response matrices of Bonner sphere spectrometers with  $^6\text{LiI}$  scintillation detector and  $^3\text{He}$  proportional counter between 15 and 100 MeV // Nucl. Instrum. Meth. 1995. A366. P.203-206. 9. Соколова З.Я., Черняев В.Б. Параметры сцинтилляторов на основе ZnS(Ag) для регистрации нейтронов // АЭ. 1970. Т.78. Вып.2. С.162-164. 10. Ryzhikov V., Chernikov V., Nagornaya L. et al. Oxide and Semiconductor Scintillators in Scintillometric Detectors for detection of Neutrons. <http://www.ndt.net/article>. 11. Kojona T., Katagiri M., Tsutsui N. et al. Neutron scintillators with high detection efficiency // Nucl. Instrum. Meth. 2004. A259. P.325-328. 12. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.М. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232с. 13. McGregor D.S., Vernon S.M., Gersch H.K. et al. Self-Biased Boron-10 Coated High-Purity Epitaxial GaAs Thermal Neutron Detectors // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2000. NS-47. P.1364-1370. 14. Sagatova-Perdochova A., Dubecky F., Zatko B. et al. Detector of fast neutron based on semi-insulating GaAs with neutron converter layers // Nucl. Instrum. Meth. 2007. A576. P.56-59. 15. [http://www.ornl.gov/sci/scal/papers/RPSD2002\\_Origen\\_sources.pdf](http://www.ornl.gov/sci/scal/papers/RPSD2002_Origen_sources.pdf).

Поступила в редколлегию 13.03.2010

**Прохорец Иван Михайлович**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт. Научные интересы: математическое моделирование физических процессов и систем. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-68-46. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

**Прохорец Светлана Ивановна**, канд. техн. наук, научный сотрудник Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт. Научные интересы: математическое моделирование, программирование. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-68-46. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

**Скрыпник Анна Ивановна**, студентка Харьковского университета. Научные интересы: математическое моделирование. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-68-46. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

**Лукьянова Валентина Петровна**, ведущий инженер-программист Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт. Научные интересы: математическое моделирование, программирование. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-68-46. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

**Хажмурад Манап Ахмадович**, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт. Научные интересы: математическое моделирование физических процессов и систем, автоматизация проектирования, программирование. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-68-46, e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua