

PACS: 28.20.-v, 29.30.Kv, 29.40.-n

**EFFICIENT DETECTOR OF NEUTRONS FOR  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$  GENERATOR****A.N. Dovbnya, E.L. Kuplennikov, S.S. Kandybei***National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"**1, Akademicheskaya Str., Kharkov 61108, Ukraine**e-mail: kupl@kipt.kharkov.ua**Received March 12, 2018*

Two  ${}^9\text{Be}(d,n)$ - neutron sources have been developed and produced at the NSC KIPT. Neutrons result from the interaction of accelerated deuterons with the nuclei of beryllium target in reaction  ${}^2\text{H}+{}^9\text{Be}\rightarrow{}^{10}\text{B}+n$ . One of the sources is large-sized neutron source (LNS) with the medium energy of 5 MeV [1]. The neutron source is aimed to produce  ${}^{99}\text{Mo}$  by the reaction  ${}^{98}\text{Mo}(n,\gamma){}^{99}\text{Mo}$ . The maximum fluence in a limited volume is provided by the polyethylene or Be moderator. The  ${}^9\text{Be}$  moderator, except deceleration, provides reproduction of nucleons due to the  $(n,2n)$  reaction. The second source is a portable (PNS) with a medium energy of 2,5 MeV [2]. It is intended for the treatment of oncological diseases. The major part of the dose in the phantom is absorbed in close vicinity of the neutron source  $\sim(1,5-2\text{ cm})$ . The fast neutron yield is about  $10^9$  neutron/s. The present paper deals with the possibility of using modern techniques of measuring of neutron radiation to build of relatively simple, compact, sensitive neutron detector on the proposed sources. It is shown that the neutron detector based on  $\text{LiI}(\text{Eu})$  can be considered as one of the effective options for the measurements of neutron fields.

**KEY WRDS:** neutron source, ionization radiation, thermal and fast neutrons, fluence, detectors, efficiency.

**ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ ДЛЯ  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$  ГЕНЕРАТОРА****А.Н. Довбня, Э.Л. Купленников, С.С. Кандыбей***Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»**ул. Академическая 1, Харьков 61108, Украина*

В ННЦ ХФТИ разработаны и изготовлены два источника нейтронов. Частицы образуются в результате взаимодействия ускоренных дейтронов с ядрами бериллиевой мишени в реакции  ${}^2\text{H}+{}^9\text{Be}\rightarrow{}^{10}\text{B}+n$ . Один из генераторов - крупногабаритный (КИН) [1] со средней энергией нейтронов около 5 МэВ. Он предназначен для получения  ${}^{99}\text{Mo}$  по реакции  ${}^{98}\text{Mo}(n,\gamma){}^{99}\text{Mo}$ . Максимальную плотность потока нейтронов в ограниченном объеме для наработки наибольшего количества  ${}^{99}\text{Mo}$  обеспечивает замедлитель из полиэтилена или бериллия.  ${}^9\text{Be}$  кроме замедления осуществляет размножение нейтронов за счет реакции  $(n,2n)$ . Второй источник - портативный (ПИН) [2]. Его задача - лечение ряда онкологических заболеваний. Основная часть дозы в фантоме поглощается в непосредственной близости от источника нейтронов  $\sim(1,5-2\text{ см})$ . Средняя энергия нейтронов около 2,5 МэВ. Выход быстрых нейтронов порядка  $10^9$  нейтрон/с. В настоящей работе изучена возможность использования современных технологий регистрации нейтронного излучения для создания на указанных источниках относительно простого, компактного, чувствительного детектора нейтронов. Показано, что одним из вариантов доступного и эффективного детектора нейтронов может быть устройство на базе монокристалла  $\text{LiI}(\text{Eu})$ .

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** источник нейтронов, ионизирующие излучения, тепловые и быстрые нейтроны, флюенс, детекторы, эффективность

**ВИБІР ЕФЕКТИВНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНІВ ДЛЯ  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$  ГЕНЕРАТОРА****А.М. Довбня, Е.Л. Купленніков, С.С. Кандибей***Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»**вул. Академічна 1, Харків 61108, Україна*

У НДЦ ХФТІ розроблено та виготовлено два джерела нейтронів. Частиці утворюються у результаті взаємодії прискорених дейтронів з ядрами берилієвої мішені у реакції  ${}^2\text{H}+{}^9\text{Be}\rightarrow{}^{10}\text{B}+n$ . Перше джерело - великогабаритне (ВДН) [1] з середньою енергією біля 5 МеВ. Воно призначено для отримання  ${}^{99}\text{Mo}$  по реакції  ${}^{98}\text{Mo}(n,\gamma){}^{99}\text{Mo}$ . Максимальну щільність потоку нейтронів в обмеженому об'ємі для напрацювання найбільшої кількості  ${}^{99}\text{Mo}$  забезпечує уповільнювач з поліетилену або  ${}^9\text{Be}$ , який крім уповільнення здійснює розмноження нейтронів за рахунок реакції  $(n,2n)$ . Друге джерело нейтронів - портативне (ПДН) [2]. Його завдання - лікування низки онкологічних захворювань. Основна частина дози поглинається у фантомі в безпосередній близькості від джерела нейтронів  $\sim(1,5-2\text{ см})$ . Середня енергія нейтронів коло 2,5 МеВ. Вихід швидких нейтронів порядку  $10^9$  нейтрон/с. У даній роботі вивчена можливість використання сучасних технологій реєстрації нейтронного випромінювання для створення на запропонованих джерелах відносно простого, компактного, чутливого детектора нейтронів. Показано, що одним з варіантів доступного та ефективного детектора може бути пристрій на основі монокристалу  $\text{LiI}(\text{Eu})$ .

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** джерело нейтронів, іонізуюче випромінювання, теплові та швидкі нейтрони, флюенс, детектори, ефективність

Разнообразие реакций, вызываемых нейтронами широкого энергетического диапазона, сложная зависимость сечения от энергии частиц обусловили появление большого количества оригинальных конструкций для измерения параметров нейтронного поля. Ниже приведен краткий анализ основных методов регистрации и спектрометрии тепловых, медленных и, частично, быстрых нейтронов (ТН, МН и БН

соответственно). В работе опущены сведения об активационных технологиях, т.к. они не позволяют в полной мере автоматизировать получение и обработку данных в режиме on-line.

Целью публикации является выбор оптимальной конструкции детектора нейтронов для эффективной работы на  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$  генераторах.

### ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Наиболее простым и часто используемым детектором нейтронов является цилиндрический борный счетчик, работающий в ионизационном или пропорциональном режиме. Детектор заполняется газообразным  $\text{BF}_3$ , обогащенным до 96% изотопом  ${}^{10}\text{B}$ . Чувствительность ионизационной камеры ( $10^{-12}$ - $10^{-7}$ ) имп./( $\text{н}/\text{см}^2\cdot\text{с}$ ), измеряемая плотность потока ( $10^6$ - $10^{10}$ )  $\text{н}/\text{см}^2\cdot\text{с}$ , радиационная стойкость до  $10^{19}$   $\text{н}/\text{см}^2$ . Эффективность регистрации нейтронов  $\varepsilon=(20-90)\%$  зависит, в основном, от давления газа (р), активной длины трубки (l) и энергии нейтронов, падающих на счетчик вдоль его оси. Она определяется выражением  $\varepsilon = 1 - \exp(-1,7 \cdot 10^{-2} (p/\sqrt{E_n}))$ . Например, для  $p=1$  атм.,  $l=20$  см и  $E_n=0,0253$  эВ,  $\varepsilon \sim 0,90$  и, соответственно,  $\varepsilon \sim 0,03$  при 100 эВ, т.е. типичный борный счетчик пригоден для детектирования только медленных нейтронов. Реже в опытах применяют датчики, стенки которых покрыты тонким слоем аморфного бора примерно равным пробегу в нем  $\alpha$ -частицы (0,8-1)  $\text{мг}/\text{см}^2$ . Эффективность такого устройства меньше, чем у ионизационной камеры или пропорционального борного детектора. Достоинством борных счетчиков является высокая эффективность, энергетическое разрешение, радиационная стойкость, простота конструкции. В тоже время они обладают рядом негативных свойств [3]: аппаратный спектр состоит из двух пиков; вероятность образования ядра  ${}^7\text{Li}$  не остается постоянной; фронт нарастания выходных импульсов  $\sim 1$  мкс; заметные краевые эффекты; зависимость эффективности от рабочих параметров; слабая избирательность в смешанных полях с высоким уровнем  $\gamma$ -излучения.

На практике мониторинг ТН, в большинстве случаев, проводится пропорциональными  ${}^3\text{He}$ -счетчиками, заполненными смесью (95-97)%  ${}^3\text{He}$  и Аг. Детекторы выдерживают облучение до  $\sim 10^{13}$   $\text{н}/\text{см}^2$  и регистрируют относительно слабые потоки нейтронов в присутствии  $\gamma$ -фона  $< 1$  Р/ч (для надежной работы в условиях больших мощностей  $\gamma$ -доз применяют газонаполненные счетчики коронного разряда [4]. Они позволяют регистрировать слабый нейтронный поток на фоне  $\gamma$ -излучения в несколько тысяч Р/час). Эффективность регистрации ТН зависит от рабочего газа, давления, конструкции датчика и составляет (50-96)% [4]. С увеличением  $E_n$  эффективность падает. Энергетическое разрешение по «тепловому» пику (2-3)%. На рис. 1 приведен идеализированный амплитудный спектр  ${}^3\text{He}$ -счетчика. Реакция  ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$  используется и для регистрации БН в области 200 кэВ – 2 МэВ. При больших энергиях импульсы, возникающие от ядер отдачи  ${}^3\text{He}$ , вносят уже существенный вклад.

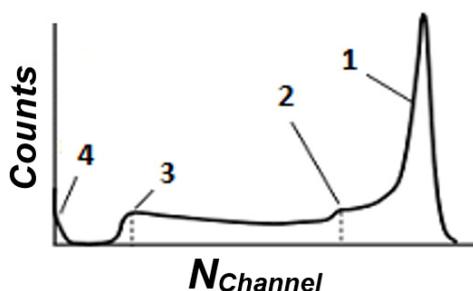


Рис. 1. Амплитудный спектр  ${}^3\text{He}$ -счетчика  
1- пик полной энергии, 2-, 3- и 4- вклады краевых эффектов поглощения части энергии протона и  ${}^3\text{H}$  в стенках детектора и  $\gamma$ -фона

практически не зависела от их энергии в области 10 кэВ – 3 МэВ. С целью улучшения характеристик детектора многие авторы совершенствовали предложенную конструкцию. Так, чувствительность длинного 31 см счетчика, созданного в 1958 г МакТаггартом, изменялась на 3% в области 25 кэВ – 5 МэВ. Созданные в дальнейшем аналоги имели ограниченный диапазон регистрируемой энергии  $< 10$  МэВ и низкую эффективность  $\leq 0,1$  [7].

Недостатком газонаполненных трубок является зависимость от конструкции, объема и давления газовой смеси. Поэтому, типичные  ${}^3\text{He}$ -счетчики, так же, как и  ${}^{10}\text{B}$ -детекторы, выпускаются достаточно большой длины [4,5]. Например, известный за рубежом  ${}^3\text{He}$ -счетчик RS-P4-0810-204 фирмы Reuter-Stokes (США) имеет:  $\phi 25$  мм,  $p=10$  атм.,  $l=305$  мм и  $\varepsilon \sim 90\%$ . Уменьшение габаритов приводит к падению чувствительности, т.е. высокоэффективные детекторы (с точки зрения длины) не вполне удовлетворяют требованиям компактности. Кроме того, отрицательным моментом является возможная утечка гелия из уже имеющихся счетчиков и высокая цена изделия.

Для регистрации быстрых нейтронов Хансен и МакКиббен в 1947 г. разработали устройство, названное позже «всеволновым», которое представляло собой длинный  $\text{BF}_3$ -счетчик и парафиновый замедлитель [6]. Эффективность регистрации нейтронов прибором

практически не зависела от их энергии в области 10 кэВ – 3 МэВ. С целью улучшения характеристик детектора многие авторы совершенствовали предложенную конструкцию. Так, чувствительность длинного 31 см счетчика, созданного в 1958 г МакТаггартом, изменялась на 3% в области 25 кэВ – 5 МэВ. Созданные в дальнейшем аналоги имели ограниченный диапазон регистрируемой энергии  $< 10$  МэВ и низкую эффективность  $\leq 0,1$  [7].

### АЛМАЗНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Алмазные материалы сравнительно недавно используются для регистрации и спектрометрии ионизирующих  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучений и нейтронных потоков. В последнем случае регистрируется суммарная энергия продуктов ядерных реакций в теле алмаза. Уникальная температурная, радиационная и химическая стойкость, малые размеры чувствительного элемента, наносекундное быстрое действие, энергетическое

разрешение (1-3)% позволяют детекторам работать и в обычных и экстремальных условиях эксплуатации. В ГНЦ РФ «ТРИНИТИ» созданы спектрометры, чувствительным элементом которых являются пластины природного алмаза. Электронные тракты устройства обеспечивают спектрометрию при нагрузках от  $7 \cdot 10^5$  (аналоговые тракты) до  $10^7$  отсчетов/с (цифровые тракты), рабочий объем 0,1-10 мм<sup>3</sup>. В таблице 1 приведены основные параметры алмазных детекторов нейтронов, производимых НТЦ РФ «УРАЛАЛМАЗИНВЕСТ» [8].

Таблица 1

Характеристика детекторов нейтронов			
Диапазон энергий, МэВ	До 20	Рабочее напряжение, В	100
Регистрируемые потоки, н/см <sup>2</sup> ·с	До $10^{15}$	Площадь элемента, мм <sup>2</sup>	9-100
Эффективность регистрации, %	Не менее 1,0	Радиационная стойкость, н/см <sup>2</sup>	$>10^{14}$
Темновой ток элемента, А	$\leq 0,5 \cdot 10^{-12}$	Нестабильность за 8 часов, %	$\leq 0,5$

Широкое применение получили приборы на основе искусственного CVD (Chemical Vapor Deposition) алмаза. В частности, на его основе и конвертера  ${}^6\text{LiF}$  создан детектор ТН [9]. В опытах с ТН детектор размещался в центре замедлителя из полиметилметакрилата радиусом 10 см. В результате реакции  ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$  в аппаратном спектре появлялись пики трития и  $\alpha$ -частиц, которые видны на рис. 2 слева. Эффективность сбора  $\alpha$ -частиц  $\sim 100\%$  с разрешением  $\sim 1,5\%$ ; пики трития и  $\alpha$ -частиц четко разделяются; поляризационные эффекты отсутствуют; наблюдается линейная зависимость скорости счета от начального потока нейтронов.  ${}^6\text{LiF}$ -CVD-детектор способен измерять не только тепловые, но и БН (рис. 2 справа, где число счетов  $\times 100$ ). Континуум при энергии  $\sim 9,1$  МэВ обусловлен реакцией  ${}^{12}\text{C}(n,\alpha_0){}^9\text{Be}$  ( $\alpha_0$ -  $\alpha$ -частица, испускаемая из основного состояния  ${}^9\text{Be}$ ). Пик хорошо отделяется от сопутствующего процесса  ${}^{12}\text{C}(n,n'){}^3\alpha$ . Успешное использование алмаза как спектрометра БН возможно при  $E_n > 5,7$  МэВ. При размере чувствительного элемента  $4,5 \times 4,5 \times 0,5$  мм измеряемый поток БН  $\leq 10^{10}$  с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>.

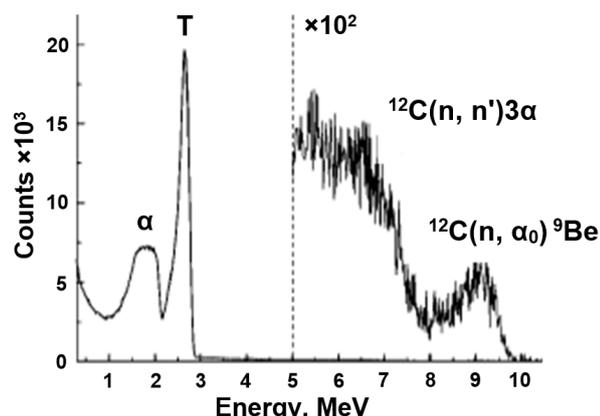


Рис. 2. Аппаратурные спектры нейтронов

#### ПРИБОРЫ НА БАЗЕ LiI(Eu)

Одними из давно применяемых для регистрации ТН детекторов являются устройства на основе сцинтиллятора LiI(Eu). Под действием нейтронов в кристалле возникают сцинтилляции, обусловленные суммарной энергией  ${}^3\text{H}$  и  $\alpha$ -частицы, с амплитудой пропорциональной энергии нейтрона. Энергия  ${}^4\text{He}$  и  ${}^3\text{H}$  составляет, соответственно, 2,05 и 2,73 МэВ, а их пробеги в LiI - 9,9 и 45,8 мкм. Время высвечивания  $\sim 1$  мкс, длина волны испускаемого света в максимуме  $\lambda_{\text{max}} = 460$  нм. Временное разрешение  $\sim 0,3$  мкс. Энергетическое разрешение в фотопике (14-15)% для  $E_\gamma = 661,7$  кэВ и (9-10)% для пика ТН. Выход света составляет (20-30)% от аналогичной величины кристалла NaI(Tl). Сенсор чувствителен к  $\gamma$ -квантам,

однако только фотоны с энергией  $\geq 5$  МэВ создают вспышку света, которая по интенсивности была бы сравнима со вспышкой от нейтрона. Таких  $\gamma$ -квантов в фоновом излучении обычно немного. Фотоны с энергией  $< 5$  МэВ дают амплитуду меньше, чем у нейтрона и их вклад убирается дискриминатором. Кроме того,  $\gamma$ -фон подавляют, уменьшая толщину сенсора.

Сцинтилляторы обычно изготавливают в виде шайб диаметром  $\varnothing(10-40)$  мм, толщиной  $d \sim (2-40)$  мм. Их часто размещают непосредственно на фотокатоде ФЭУ. Эффективность детектирования ТН зависит от толщины монокристалла и степени обогащения  ${}^6\text{Li}$ . Она приведена в техническом паспорте, но ее можно и оценить. Если пренебречь многократным рассеянием, эффективность равна  $\varepsilon = 1 - \exp(-N\sigma d)$ , где  $d$  - толщина кристалла в см,  $N$  - число атомов в 1 см<sup>3</sup>,  $\sigma$  - сечение реакции (n, $\alpha$ ) в барнах (б) при  $E_n = 0,025$  эВ. Для естественного Li:  $N = 1,827 \cdot 10^{22}$  атомов/см<sup>3</sup>,  $\sigma = 71$  б и получаем для  $d = 1$  см  $\varepsilon \sim 69\%$  и  $\leq 90\%$  для  $d = 2$  см. При обогащении (94-96)% эффективность доходит до  $\sim 98\%$ , 2% относится к захвату нейтрона на йоде [3]. Та же величина для энергии  $\sim 10$  эВ при  $d = 1$  см  $\sim 60\%$ . По сравнению с газонаполненными счетчиками большая эффективность может быть достигнута при меньших размерах LiI(Eu) детектора [3]. Недостатком датчика является сдвинутый в область большой длины волн спектр люминесценции, относительно высокая чувствительность к  $\gamma$ -излучению и малый выход света.

Для спектрометрии нейтронов используются разные методики, в том числе и, так называемые, сферы Боннера [6]. Предложенный метод заключался в детектировании ТН датчиками, размещенными в центре набора полиэтиленовых (ПЭ) шаров-замедлителей, с последующим восстановлением первичного спектра по откликам детекторов. Авторы использовали комбинацию из пяти сфер диаметром от 5 до 30 см, в центре

которых последовательно размещался чувствительный датчик ТН. Каждая сфера со своим сенсором чувствительна к нейтронам в определенном энергетическом интервале. Энергетическая зависимость чувствительности (ЭЗЧ) сферических счетчиков разного диаметра от энергии нейтронов в области 0,05 до 14 МэВ с датчиком LiI(Eu) приведена в [6,10-12]. Показано, что с увеличением размера, максимум чувствительности перемещается в область высокой энергии. Для источника нейтронов  $^{239}\text{PuBe}$  с энергией  $\sim(1-10,7)$  МэВ наибольшая ЭЗЧ детектора наблюдается при диаметре шара (20-25) см. Кроме  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$  применяют  $^{10}\text{B}$ - детекторы, сферические  $^3\text{He}$ - пропорциональные счетчики SP90, активационные фольги. В первых трех случаях отклик спектрометра представляет собой пик суммарного энерговыделения продуктов реакции. По мнению [10] наилучшим датчиком является  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$ . Оптимальная плотность потока нейтронов ( $10^3-10^5$ ) н/см<sup>2</sup>·с. Спектрометрическая информация получается путем решения интегрального уравнения. Достоинством метода является широкий диапазон измеряемой энергии нейтронов (от тепловых до 100 МэВ при разумных размерах замедлителей), хорошая селективность нейтронов на фоне других частиц, возможность детектирования нейтронов при наличии сильных электромагнитных полей и пр. В тоже время, спектрометры Боннера имеют недостаточное энергетическое разрешение; при малом числе сфер ошибки велики; измерения просты в реализации, но довольно длительны. Ниже приведен ряд оригинальных конструкций спектрометров.

Прибор для измерения нейтронного излучения на базе ПЭ сферы плотностью  $0,92 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ , диаметром 7,5 см, окруженной экраном из Cd толщиной 1 мм (для исключения влияния прямых ТН), и кристалла LiI(Eu)  $\varnothing 10 \times 10 \text{ мм}^3$ , упакованного предприятием-изготовителем в Al контейнер толщиной 1 мм, разработан в [13]. Отверстие диаметром 18 мм для размещения сенсора в центре шара выполнено по его радиусу. Регистрирующее устройство устанавливалось в центр замедлителя с помощью ПЭ вкладыша  $\varnothing 18 \text{ мм}$ . Световод из оргстекла  $\varnothing 10 \times 30 \text{ мм}^3$  обеспечивал уменьшение влияния полости в замедлителе, равномерное распределение света сцинтилляций по поверхности фотокатода, практически полное собирание заряда на ФЭУ-60 и неплохое энергетическое разрешение пика ТН  $\sim 15\%$ . Схема шара-замедлителя приведена на рис. 3. На рис. 4 показана структурная схема датчика нейтронов, световода и сопутствующей электроники.

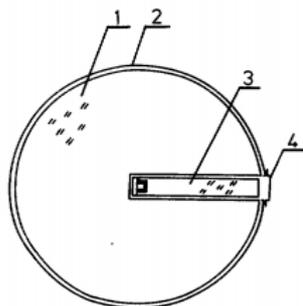


Рис. 3. Замедлитель

1- ПЭ шар; 2- Cd-экран; 3- вкладыш; 4- ПЭ заглушка

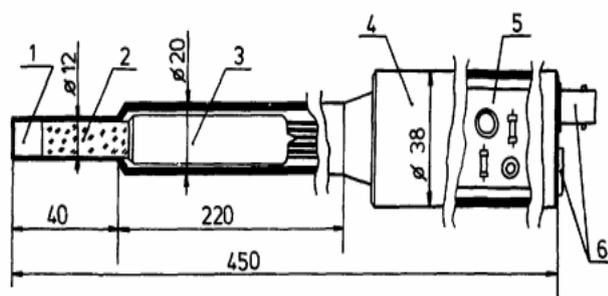


Рис. 4. Вкладыш

1- LiI(Eu) диаметром 10 мм; 2- световод; 3- ФЭУ; 4- корпус, 5- электроника, 6- сигнальные разъемы

В статье [14] экспериментальные данные получены в области энергии  $1 \text{ кэВ} \leq E_n \leq 3 \text{ МэВ}$ . Энергия нейтронов определялась методом времени пролета. В процессе исследований отработан оптимальный вариант прибора. Кристалл LiI(Eu) диаметром 16 мм, толщиной 2 и 4 мм помещался в капсулу из Al с толщиной дна 0,5 мм, стеклянным окном 0,5 мм и слоем отражателя  $\text{MgO} \leq 2 \text{ мм}$ . ФЭУ-71 имел кварцевое окно. Энергетическое разрешение устройства  $\sim 7\%$ .

В ОИЯИ (Россия) для регистрации нейтронов использовалась установка, приведенная на рис. 5 [12]. Сенсором замедленных нейтронов является кристалл LiI(Eu)  $\varnothing 4,3 \text{ мм}$ , высотой 4,0 мм, соединенный с ФЭУ. Обогащение изотопом  $^6\text{Li}$  составляло 90%. Импульсы ФЭУ подаются на спектрометрический усилитель (СУ) и затем на многоканальный анализатор. В спектре импульсов спектрометра от нейтронов  $^{239}\text{PuBe}$  источника, средняя энергия которого  $E_{\text{ср}} = 4,5 \text{ МэВ}$ , с замедлителем  $\varnothing 25 \text{ см}$  доминирует пик ТН с разрешением 11,4%.

Отметим, что в экспериментальных исследованиях используются и другие сенсоры. Так, в ОИЯИ [11] малогабаритный детектор на основе  $^{10}\text{B}$  счетчика СНМ-14 длиной 153 мм с эффективностью к ТН 15% измеряет дозу нейтронов в интервале энергий 0,4 эВ – 20 МэВ. Введение поправочных коэффициентов, обусловленных ЭЗЧ, расширяет диапазон энергий до сотен МэВ. С учетом анизотропии максимально возможная погрешность может составлять 46%. Выходные импульсы устройства регистрируются либо в счетном режиме, либо поступают на дальнейшую обработку в соответствующие электронные устройства. Счетчик расположен внутри ПЭ комбинированного замедлителя, состоящего из двух разъемных ПЭ цилиндров с верхней полусферой, разделенных фольгой из Cd толщиной 1 мм, служащей для улучшения ЭЗЧ. Прибор предназначен для измерения широкого класса спектров нейтронов за защитой ядерно-физических установок ОИЯИ. Конструкция детектора показана на рис. 6.

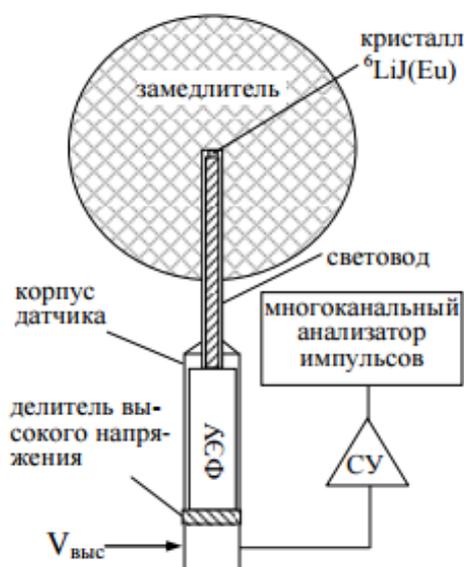
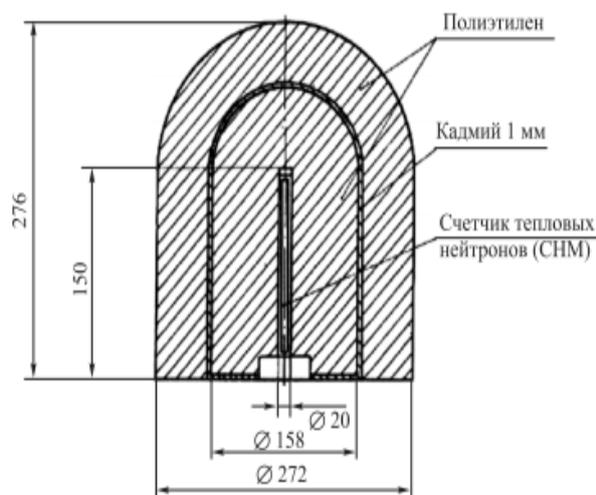


Рис. 5. Конструкция спектрометра

Рис. 6.  $^{10}\text{B}$ -счетчик в замедлителе

Высокочувствительный спектрометр Боннера GSF описан в [15]. Он основан на сферическом пропорциональном  $^3\text{He}$  счетчике SP90 производства Centronic Ltd. Счетчик диаметром 32 мм наполнен газом  $^3\text{He}$  до давления 172 кПа и криптоном до 100 кПа. Стенка счетчика изготовлена из нержавеющей стали 0,51 мм. Нейтроны регистрируются по реакции  $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ . Для измерений в высокоэнергетических полях излучения спектрометр дополнен 22,5 см сферой со свинцовой прослойкой между диаметрами 7,5 и 11,25 см. Сравнение этих данных с функциями чувствительности, полученными на основе широко используемого детектора LiI (4×4 мм) показало, что чувствительность  $^3\text{He}$  спектрометра примерно на порядок выше. Рассчитанные события от высокоэнергетических нейтронов для датчика LiI указывают на некоторые неопределенности при интерпретации аппаратного спектра и вычитании фона [15], что несущественно для  $^3\text{He}$  счетчика. Однако, по мнению [12], размеры SP90 «не столь малы, что создает трудности для замедлителей малого диаметра».

### ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Полупроводниковые детекторы (ППД) характеризуются компактностью, высоким пространственным, временным и энергетическим разрешением, линейной зависимостью амплитуды сигнала от энергии, высокой скоростью счета, измерением флюенса до  $10^{12}$  см $^{-2}$ , низкой чувствительностью к  $\gamma$ -фону. Параметром, определяющим качество детектора, является средняя энергия, расходуемая на образование пары первичных носителей заряда. Например, для Ge это 2,96, Si – 3,67, Li(Eu) – 330 эВ. Ниже в [16-17] описан ряд удачных конструкций детекторов для нейтронных измерений. Статья [16] посвящена описанию устройств для регистрации ТН на основе ППД с покрытием  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{157}\text{Gd}$ . В таблице 2 даны основные параметры конвертеров (E- энергия частицы, R- пробег, t- оптимальная толщина,  $\epsilon^{\text{max}}$ - максимальная эффективность). Недостатки - малая рабочая область  $\leq 100 \times 100$  мм $^2$ , высокая эффективность только для  $^{157}\text{Gd}$ ; быстрое старение, исключая конвертер из Gd. В этой же публикации описан детектор, измеряющий параметры поля ТН с помощью реакции (n, $\gamma$ ) и гибридной системы Cd-YAP-SIPM. YAP ( $\text{Y}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$ )- сцинтиллятор (время высвечивания  $\tau \sim 27$  нс,  $\lambda_{\text{max}} \sim 370$  нм). SIPM- матрица ЛФД. Динамический диапазон ЛФД от 1 фотона,  $\lambda_{\text{max}} = 400$  нм, размер (1×1-6×6) мм $^2$ , пиксель (25-100) мкм, усиление  $\sim 10^6$ , работа в магнитных полях до 15 Тл. Система Cd-YAP-SIPM в широкой области энергии нейтронов (1-200) МэВ имеет высокое временное разрешение, постоянную, но малую эффективность, низкое соотношение сигнал/фон.

Таблица 2

Основные параметры конвертеров

Ядро	Заряж. частица	E, МэВ	R, мкм	t, мкм	$\epsilon^{\text{max}}$ , %
$^6\text{Li}$	T	2,7	130	97	10
$^{10}\text{B}$	$\alpha$	1,47	3	3,5	4
$^{157}\text{Gd}$	$e^-$	<0,18	12	3	60

В качестве конвертера применяется также кристалл ZnS(Ag) [3], имеющий высокую конверсионную эффективность (20-25)%, которая практически не зависит от энергии частиц. Чувствительность к  $\gamma$ -излучению низка. В публикации также описана возможность измерения параметров поля нейтронов с использованием покрытия из делящихся нуклидов ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  и др.). Диапазон измерений плотности потока нейтронов от  $10^9$  до  $10^{15}$  н/см $^2$  с.

Оптимальная толщина конвертера сравнима с максимальной длиной пробега в нем заряженной частицы или осколка. В [17] создан прототип детектора ТН на основе сцинтиллятора ZnS(Ar)/LiF толщиной 0,4 мм, шириной

10 мм и световода из оргстекла  $3 \times 10 \times 200$  мм<sup>3</sup>. Чувствительность к  $\gamma$ -квантам  $\sim 10^{-6}$ , световой выход 160000 фотонов на нейтрон. Вещество ZnS(Ar)/LiF малопрозрачно, что затрудняет съем светового сигнала. Поэтому в детекторе применен новый способ считывания света с помощью пластикового световода и лавинных фотодиодов (ЛФД) (производство КЕТЕК Со, чувствительная площадь  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>). При регистрации событий использована схема совпадений сигналов с двух ЛФД, позволяющая исключить даже слабые шумы.  $\varepsilon^{\max} \sim 70\%$  достигается увеличением содержания LiF до 42%.

Еще одна возможность регистрации ТН связана с кристаллом-детектором  $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}$  и реакцией  $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$  [18]. Естественный Cd содержит 12,26% изотопа  $^{113}\text{Cd}$ , сечение поглощения ТН которого  $\sim 20000$  барн. Взаимодействие сопровождается  $\gamma$ -излучением. Основная  $\gamma$ - линия 558,6 кэВ регистрируется этим же детектором. Эксперимент, проведенный с кристаллом  $3 \times 10 \times 10$  мм<sup>3</sup> в течение 9,5 часов, показал, что эффективность прибора равна  $(3,7 \pm 1,9)\%$ .

В спектрометрии нейтронов хорошо зарекомендовали себя кремниевые ППД [19]. Энергетическое разрешение для ДТ нейтронов  $\sim 1\%$ . Эффективность регистрации ТН  $\sim 10\%$ , а БН  $\sim 1\%$ . В толщине чувствительной области  $\sim 1,5$  мм под действием БН идут реакции  $^{28}\text{Si}(n,\alpha)^{25}\text{Mg}$  и  $^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$ . Детектор регистрирует продукты реакций, образующиеся в его объеме.

Работы [20-21] посвящены разработке, созданию и тестированию перспективных типов приборов на основе Si ППД и Gd конверторов, как для практических ядерных исследований, так и персональной нейтронной дозиметрии. В [22] разработаны позиционно-чувствительные детекторы для нейтронной физики. В работе [23] рассмотрены особенности регистрации нейтронов с помощью ППД для регистрации гамма-излучения на основе Ge высокой чистоты и конвертора нейтронов в  $\gamma$ - кванты на основе Cd.

#### МЕТОД ЯДЕР ОТДАЧИ

Спектрометрия нейтронов, использующая упругое n-p- рассеяние, базируется на простой однозначной зависимости энергии протона отдачи  $E_p$  от энергии падающего нейтрона и угла  $\theta_{np}$ . В нерелятивистском приближении (энергия  $\leq 20$  МэВ)  $E_n = E_p / \cos^2 \theta_{np}$ . При этом достигается высокое энергетическое разрешение, составляющее доли % [10]. Для  $E_n > 20$  МэВ сечение процесса падает. Открывается канал неупругого взаимодействия с ядрами углерода  $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$  с порогом реакции 20,4 МэВ. Метод применим в диапазоне энергии  $\sim 100$  кэВ - нескольких сотен МэВ. При энергии десятки-сотни МэВ с высокой вероятностью происходит расщепление ядер с образованием заряженных частиц и фрагментов. Счетчики работают в  $\gamma$ -полях до 1 Р/час. Они чувствительны к e- и  $\gamma$ -излучению. Однако имеется возможность n- $\gamma$  разделения по форме импульса.

Для регистрации ядер отдачи используются пропорциональные счетчики, наполненные  $\text{H}_2$  или  $\text{CH}_4$ . Этим методом регистрируют нейтроны с энергией несколько десятков кэВ. Эффективность регистрации невелика  $\leq 1\%$ . Детектирование частиц  $E_n \sim (1-10)$  МэВ осуществляется, в основном, кристаллами стильбена  $\text{H}_{12}\text{C}_{14}$  ( $\lambda_{\max} = 410$  нм,  $\tau \sim 6 \cdot 10^{-9}$  сек) или жидким сцинтиллятором NE213 -  $\text{H}_{11}\text{C}_9$ . Эффективность регистрации нейтронов стильбеном толщиной 1 см  $\sim 60\%$  для  $E_n = 100$  кэВ и  $\sim 4\%$  при  $E_n = 10$  МэВ или (20% для RaBe источника). При этом обеспечивается скорость счета  $\leq 1,5 \cdot 10^5$  имп/с. Энергетическое разрешение  $\sim 150$  кэВ при регистрации d-d- и  $\sim 300$  кэВ для d-t нейтронов. Вычисление эффективности регистрации нейтронов в области энергий ниже 30 МэВ обычно проводят на основе кодов Монте-Карло. Есть и исключения. Так, на ускорителе SATURN эффективность в диапазоне (2-17) МэВ измерялась относительно стандартного детектора с использованием, в частности, реакций  $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ ,  $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ . Используются также твердые пластические сцинтилляторы на основе полистирола, полиметилметакрилата и др., время высвечивания которых несколько нс. Выход света пластических сцинтилляторов значительно меньше, чем у органических кристаллов. В [24] измерение характеристик поля БН провели на базе борсодержащего полистирольного сцинтиллятора. Вероятность регистрации БН источника PuBe  $\sim 1\%$ . В [25] исследован детектор нейтронов, содержащий кремниевый поверхностно-барьерный сенсор с толщиной обедненного слоя 420 мкм и использующий полиэтилен в качестве конвертера. Детектор работает по принципу регистрации непосредственно выбитых протонов отдачи. Испытан детектор на основе p-i-n фотодиода фирмы Hamamatsu и ПЭ конвертера, регистрирующий протоны отдачи [26]. Недостатком детекторов [25,26] является более низкая (на один-два порядка) радиационная стойкость по сравнению с материалами, имеющими большую ширину запрещенной зоны, а также ухудшение характеристик Si-детекторов при температуре выше комнатной.

#### РЕАКЦИЯ (n,n' $\gamma$ )

Конструкция высокоэффективного детектора нейтронов предложена в [27] для обнаружения несанкционированных радиоактивных веществ. Система в режиме on-line указывает на отсутствие или наличие нейтронов в исследуемом образце. Сравнительные измерения и анализ эффективности обнаружения проводились для БН изотопного источника  $^{239}\text{PuBe}$ . Исследовались оксидные сцинтилляторы, а также кристаллы NaI(Tl), CsI(Tl) и LiI(Eu). Блок-схема устройств показана на рис. 7 и 8. Обозначения следующие:

1 -  ${}^{239}\text{PuBe}$ ; 2 – исследуемый кристалл  $10\times 10\times 10$  мм<sup>3</sup>; 3 – ФЭУ R1306; 4 - и 5 - поглотитель ТН GdO в виде цилиндра  $\varnothing 40$  мм и крышки d=10 мм; 6- и 7- свинец d=40 мм и 4 мм; 8- ПЭ замедлитель  $\varnothing 150$  мм.

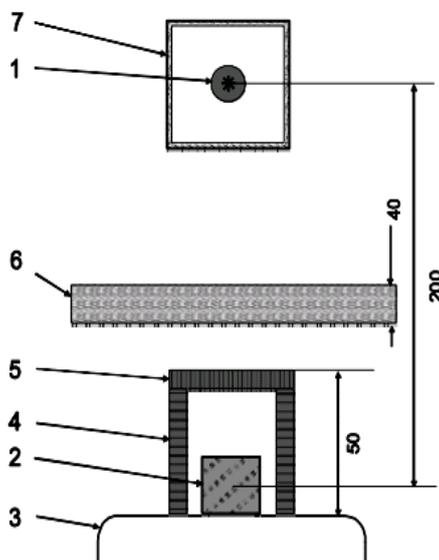


Рис. 7. Схема регистрации БН

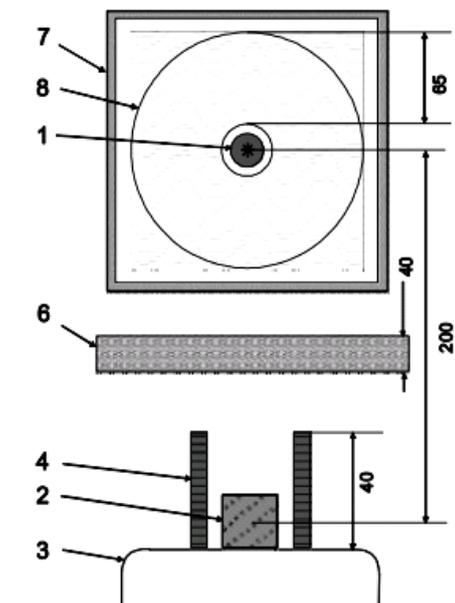


Рис. 8. Схема регистрации БН+ТН

Работа прибора основана на реакции неупругого рассеяния ( $n,n'\gamma$ ) на ядрах оксидных и полупроводниковых сцинтилляторов с регистрацией  $\gamma$ -квантов в определенном энергетическом окне. Экспериментально полученные эффективности регистрации БН оксидными сцинтилляторами с  $Z_{\text{эфф}} \geq 50$  достигают значений  $\sim (40-50)\%$ . Показана возможность детектирования ТН с эффективностью до 93%. Недостаток метода – чувствительность к  $\gamma$ -излучению.

### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На источнике ПИН облучение объектов планируется проводить БН. Для определения плотности потока разумно использовать метод протонов отдачи, который является традиционным и достаточно простым вариантом регистрации БН в диапазоне энергии  $< 20$  МэВ. Для измерений БН подойдет и комплект сфер Боннера.

В то же время, параметры нейтронного поля можно получить и относительным способом, замедля БН и используя высокоэффективные счетчики ТН. С этой точки зрения подходящими детекторами могли бы стать: ППД с конвертером из Gd ( $\epsilon^{\text{max}} \sim 60\%$ ); газоразрядные  ${}^{10}\text{B}$ - и  ${}^3\text{He}$ -трубки ( $\epsilon^{\text{max}} \sim 90\%$ ); устройства на базе кристаллов LiI(Eu) ( $\epsilon^{\text{max}} \sim 98\%$ ). Но, эффективность ППД с конвертером из Gd на фоне остальных счетчиков заметно меньше. В силу замечаний, изложенных выше, высокоэффективные, классические  ${}^{10}\text{B}$ - и  ${}^3\text{He}$ -трубки, по-видимому, не совсем подходят для создания компактных устройств.

По сравнению с ППД и газонаполненными приборами сенсоры LiI(Eu) имеют большую эффективность регистрации ТН при меньших размерах [3], т.е. эти датчики, по-видимому, наиболее подходят для применения, в частности, в спектрометрах Боннера. Для оценки эффективности спектрометра (отношение количества зарегистрированных замедленных нейтронов к числу попавших на него быстрых частиц) и оценки потока БН необходима калибровка. С этой целью требуется поочередно замедлять БН  ${}^9\text{Be}(d,n)$  излучателя и эталонного  ${}^{239}\text{PuBe}$  источника шаровым ПЭ замедлителем и сравнивать результаты измерений на исследуемом и образцовом источниках в одних и тех же экспериментальных условиях. Максимальное, наиболее достоверное значение ЭЗЧ для изотопного источника  ${}^{239}\text{PuBe}$  и  ${}^{252}\text{Cf}$  равно  $(0,197 \pm 0,014)$  и  $(0,210 \pm 0,013)$  имп. нейтрон<sup>-1</sup>·см<sup>2</sup> наблюдается для ПЭ шара диаметром 20 см [28]. Для 25 см шара величина ЭЗЧ практически та же самая для источника  ${}^{239}\text{PuBe}$   $(0,190 \pm 0,010)$  и заметно меньше для  ${}^{252}\text{Cf}$   $(0,169 \pm 0,010)$  имп.нейтрон<sup>-1</sup>·см<sup>2</sup>. Видно, что в обоих случаях диаметр 20 см наиболее предпочтителен. Поэтому для замедления БН и измерения потока нейтронов предлагается использовать ПЭ сферу диаметром 20 см. В узком канале, проходящем через центр сферы, разместить ПЭ вкладыш с сенсором LiI(Eu), световодом, ФЭУ или ЛФД и выносным блоком электронных узлов или сферический  ${}^3\text{He}$  счетчик GSF SP90.

Что касается КИН, то авторы [1] заранее рассчитали параметры замедлителя БН, включая местоположение и размер пространства с максимальной плотностью потока замедленных нейтронов для размещения

облучаемого образца, а при необходимости и чувствительного детектора замедленных нейтронов. Здесь сенсором может также служить кристалл LiI(Eu).

### ВЫВОДЫ

Проанализирована возможность использования современных технологий для измерения параметров нейтронного излучения с целью создания на  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$  нейтронных генераторах относительно простого, компактного детектора нейтронов. Показано, что для измерения БН можно использовать упругое (n,p) рассеяние, либо комплект сфер Боннера. Для детектирования ТН перспективными устройствами являются одиночные ПЭ шары-замедлители с чувствительным датчиком ТН в центре. Одним из вариантов эффективного датчика может быть монокристалл LiI(Eu).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tsymbal V.A., Mosalitin N.D., Pismenetskiy S.A. et al. Optimization of the target arrangement for the neutron source for the best producing  ${}^{99}\text{Mo}$  // The Journal of Kharkiv National University, physical series "Nuclei, Particles, Fields". – 2009. - No.880. - P.45-50. (in Russian)
2. Dovbnya A.N., Tsymbal V.A., Stoyanov A.F. et al. Portable neutron generator for treatment of oncological illnesses // Problems of atomic science and technology. - Seriya «Yadernо-fizicheskie issledovaniya». - 2016. – No.3(103). - P. 84-86.
3. Kramer-Ageev E.A. Experimental methods of neutron investigations. - Moskva: Energoatomizdat, 1990. – 301p. (in Russian)
4. Aleinikov V.E., Archipov V.A., Beskrovnaya L.G. Comparative studies of the characteristics of neutron detectors when working with a high level of  $\gamma$ -radiation // P16-97-158. - Dubna. - 1997. - 10 p.
5. Baranochnikov M.L. Receivers and detectors of radiations. – Moskva: DMK Press, 2012. - 634 p.
6. Bekurtz K., Vitz K. Neutron Physics. - Moskva: Atomizdat, 1968. - 456 s.
7. Buki A.Yu., Kalenik S.A. Calculation of simple cylindrical moderator for the detector of neutrons // The Journal of Kharkiv National University, physical series "Nuclei, Particles, Fields". – 2012. - No.1001. – P. 35-42.
8. Detectors of nuclear radiations on the basis of diamonds without nitrogen // www.uralalmazinvest.ru/index.php?option=com\_content&view=article&id=56%
9. Almagiva S., Marinelli M, Scoccia M. et al. Thermal and fast neutron detection in CVD single-crystal diamond detectors // J. Appl. Phys. - 2008. - Vol. 103. - 054501. - P. 1-7.
10. Aleinikov V.E., Gerd V.P., Komochkov M.M. Neutron spectra behind protection of proton accelerators // IAEA-SM-167/27. - Vol. 1.
11. Aleinikov V.E., Beskrovnaya L.G., Mokrov Y.V. Study of the possibility of measuring  ${}^{10}\text{B}$  neutron counter in a combine moderator neutron dose // INR P16-2008-46. - Dubna. - 20 p.
12. Timoshenko G.N. Methods of experimental nuclear physics. - Dubna 2. - 178 p.
13. Belogorlov E.A., Britvich G.I., Krupniy G.I. et al. Metodological issues of application of Bonner spectrometers in a radiation research // IFVE 85-3. – Serpuhov, 1985. - 22 p.
14. Aleksandrov B.M., Blinov M.V., Boikov G.S. et al. Determination of the spectral shape spontaneous fission neutrons  ${}^{252}\text{Cf}$  in the range 1-3000 keV // Otchet IAEA №2048. – Leningrad, 1981. - 50 p. (in Russian)
15. Sannikov A.V. Development of neutron spectrometers methods for large proton accelerators // IFVE. - 2006-21. - Protvino. - 2006. - 23 p. (in Russian)
16. Illin D. Modern position sensitive neutron detectors. - «ФКС», 2011. - 36 p.
17. Marin V.N., Cadikov R.A., Nedorezov V.G. et al. New type of scintillation detectors of thermal neutrons on the base ZnS(Ar)/LiF and avalanche photodiodes // INR RAS 1401/2015. – Moskva, 2015. - 12 p.
18. McGregoretal D.S. Thermal neutron detection with Cadmium Zink Telluride Semiconductor detectors // NIM. - 1996. - A 381. - P. 498-501.
19. Kovalchuk V.D., Trotsik V.I. Diamond detector as a fast neutron spectrometer // PTE. - 1995. – No.1. - P. 29-34.
20. Takahiko A., Yasushi O., Kiyonari H., Chizuo M. A neutron detector using PIN photodiodes for personal neutron dosimetry // NIM. – 1992. - A314. - P. 590-594.
21. Bochek G.L., Deiev O.S., Kiprich S.K. et al. Registration of the thermal neutrons using uncooled planar detector // Problems of atomic science and technology. - Series "Nuclear Physics Investigations" - 2016. – No.4. - P. 107-112.
22. Bruckner G., Rauch H. A Position sensitive Gd detector for thermal neutrons // J. Neutron Research. - 1996. - Vol.4. - P. 141-147.
23. Kutniy D.V., Kutniy V.E., Odeychuk N.P. et al. Use of the active well coincidence counter for the semiconductor neutron detector development // The Journal of Kharkiv National University, physical series "Nuclei, Particles, Fields". – 2008. - No.823. – P. 71-77.
24. Britvich G.I., Vasilchenko V.G., Galitskiy Y.V. et al. Prototype of a neutron detector based on a boron-counting plastic scintillator // PTI. - 2004. – No.5. - P. 5-19.
25. Filhoetal T.M. Development of neutron detector using the surface barrier sensor with polyethylene (n,p) converter // NIM. - 2001. – A 485. - P. 441-447.
26. Mesquita C.H. Development of neutron detector using the PIN photodiode with polyethylene (n,p) converter // IEEE. - 2002. - Vol. 50. – No.4. - P. 1170-1174.
27. Ryzhikov V. New method of effective registration of fast neutrons by scintillation detectors // www.2012.ismart.kharkov.ua/presentations/20/23\_11-00\_Ryzhikov.pdf
28. Aleinikov V.E., Archipov V.A., Beskrovnaya L.G. et al. Sensitivity of thermal neutron detectors with moderators // INR P16-81-393. - Dubna. - 1981. (in Russian)