

УДК 539.1.074.823

## ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕКТОРА С АКТИВНЫМ СЛОЕМ $^{10}\text{B}$ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

© 2021 г. С. И. Поташев<sup>a, b, \*</sup>, Ю. М. Бурмистров<sup>a</sup>, Е. С. Конобеевский<sup>a</sup>,  
И. В. Мешков<sup>b</sup>, С. В. Зуев<sup>a</sup>, В. Н. Марин<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт ядерных исследований Российской академии наук,  
Москва, 117312 Россия

<sup>b</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
Москва, 119991 Россия

\*e-mail: potashev@inr.ru

Поступила в редакцию 22.12.2020 г.

После доработки 20.02.2021 г.

Принята к публикации 27.02.2021 г.

Представлены результаты изучения возможности использования позиционно-чувствительного детектора с активным слоем  $^{10}\text{B}$  и размерами чувствительной области  $100 \times 100$  мм для регистрации тепловых и быстрых нейтронов. Работа детектора исследовалась на вольфрам-бериллиевом фото-нейтронном источнике в Институте ядерных исследований РАН. Малая эффективность детектора позволяет использовать его при высоких потоках нейтронов. Проведены измерения с различным соотношением тепловых и быстрых нейтронов на выходе источника. Показана возможность выделения событий от тепловых и быстрых нейтронов.

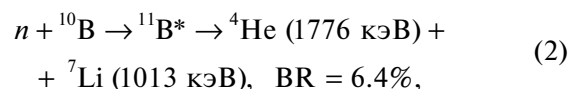
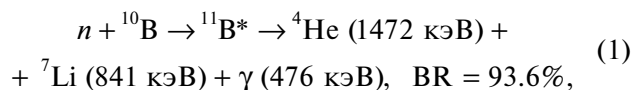
**Ключевые слова:** регистрация нейтронов, слой  $^{10}\text{B}$ , двухкоординатный детектор, пропорциональная камера.

DOI: 10.31857/S1028096021100162

### ВВЕДЕНИЕ

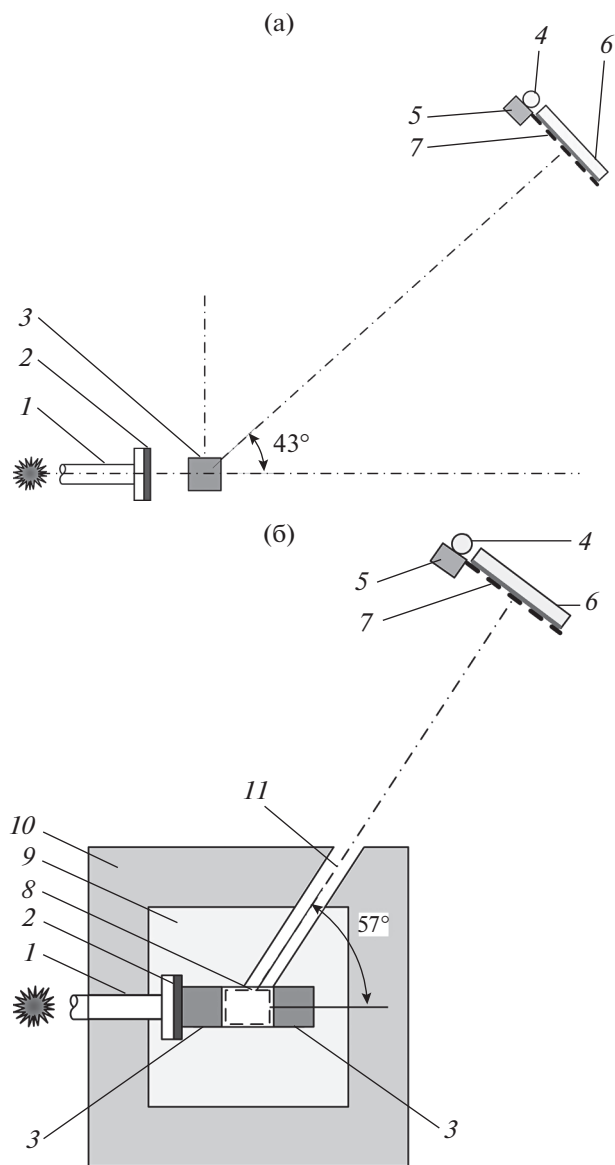
Рассеяние медленных нейтронов является важным инструментом для исследования структуры новых материалов. Малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) применяется при исследованиях субатомной структуры вещества. Наличие магнитного момента нейтрона позволяет исследовать магнитные структуры веществ [1]. Метод дейтериевого контраста, основанный на различии магнитного момента нейтрона и протона, используется при исследовании биологических объектов и полимеров в различных агрегатных состояниях [2]. Малоугловые нейтронные дифрактометры и рефлектометры используются для исследования наноструктур различной природы в сплавах, порошках, стеклах, композиционных материалах и т.д. [3]. Анализ данных МУРН позволяет определять характерные размеры, форму и концентрацию элементов наноструктуры. Основным элементом установок МУРН и нейтронных рефлектометров является позиционно чувствительный детектор нейтронов (ПЧДН), позволяющий определять интенсивность рассеянных нейтронов в зависимости от переданного импульса. В последнее время разрабатываются новые перспективные детекторы с твердым слоем, содержа-

щим  $^{10}\text{B}$  в качестве конвертера нейтронов [4–7], и газоразрядной камерой для регистрации вторичных ядер. В  $^{10}\text{B}$ -детекторе для регистрации нейтронов используются следующие реакции:



с регистрацией в детекторе заряженных частиц  $^7\text{Li}$  и  $^4\text{He}$ , где BR – вероятность реакции. Энергии заряженных частиц в реакциях (1) и (2) указаны для взаимодействия с  $^{10}\text{B}$  тепловых нейтронов. Для быстрых нейтронов энергии альфа-частиц и  $^7\text{Li}$  будут соответственно увеличены, что может позволить выделять события, вызванные нейтронами различных энергий.

Ранее нами был представлен гибридный ПЧДН на основе слоя  $^{10}\text{B}$ , совмещенного с пропорциональной камерой [8, 9]. Характеристики этого детектора были исследованы при регистрации нейтронов фотонейтронного источника ИЯИ РАН [10]. В качестве монитора нейтронов использовался  $^3\text{He}$ -счетчик с измерением ос-



**Рис. 1.** Конфигурация экспериментов на ускорителе: 1 – электроны с энергией от 4 до 9 МэВ, 2 – вольфрамовая мишень, 3 – бериллиевые мишени, 4 – гелий-3 счетчик, 5 – аттенюатор, 6 – ПЧДН, 7 – экран-маска из кадмия со щелями, 8 – центральная полость, 9 – замедлитель из чистого полиэтилена, 10 – поглотитель из борированного полиэтилена, 11 – открытый канал замедлителя для вывода нейтронов.

циллограммы сигналов, вызванных медленными нейтронами, относительно синхроимпульса ускорителя.

### КОНФИГУРАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСКОРИТЕЛЕ

Эксперименты выполнялись на фотонейтронном источнике нейтронов на базе промышленного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН.

Схема эксперимента представлена на рис. 1 в двух конфигурациях: геометрия I (рис. 1а) и II (рис. 1б).

В геометрии I пучок электронов 1, падает на вольфрамовую тормозную мишень 2. Поток тормозных гамма-квантов из мишени 2 генерирует поток нейтронов в бериллиевой фотонейтронной мишени 3. Монитором нейтронов служит счетчик 4, наполненный гелием-3. Чтобы снизить загрузку счетчика, перед ним может быть установлен аттенюатор 5 из борированного полиэтилена. На расстоянии ~3 м под углом 43° по отношению к пучку электронов расположен ПЧДН 6, перед которым может быть установлена маска 7 из кадмия с прорезями для исследования позиционного разрешения детектора. Кроме того, поскольку эффективность ПЧДН для тепловых нейтронов на 3–4 порядка выше, чем эффективность для МэВ-ных нейтронов, установка маски позволяет также сбалансировать загрузку нейтронами различных энергий.

В геометрии II (рис. 1б) вольфрамовая 2, две бериллиевые фотонейтронные мишени 3 и центральная полость 8 окружены полиэтиленовым замедлителем нейтронов 9 и поглотителем нейтронов 10 из борированного полиэтилена в качестве защиты. Использование двух фотонейтронных мишеней увеличивает плотность потока тепловых нейтронов в центральной полости и на выходе источника. Детекторы ПЧДН 6 без маски 7 и <sup>3</sup>He-счетчик 4 установлены на выходе открытого канала 11 замедлителя. В этом случае на детекторы падает обогащенный тепловыми нейтронами поток, так как быстрые нейтроны из фотонейтронной мишени термализуются в замедлителе. Поэтому использование геометрии I позволяет работать с быстрыми нейтронами, а геометрия II – с нейтронами, энергетический спектр которых обогащен тепловыми нейтронами.

### ПОЛУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Схема формирования триггера события ПЧДН изображена на рис. 2. Сигналы с выходов двух усилителей 1 и 2, подключенных к двум концам распределенного сопротивления координаты X, присоединенного к проволочным электродам детектора, и сигналы с двух усилителей 3 и 4, подключенных к двум концам распределенного сопротивления координаты Y, присоединенного к плоским электродам, подаются на аналоговые входы АЦП 6. Сигналы с двух дополнительных выходов усилителей 3 и 4 поступают на дискриминатор 5, на выходе которого по логической схеме “ИЛИ” формируется триггер события. Превышение порога дискриминатора 5 любым из импульсов с выхода усилителей 3 или 4 запускает АЦП 6 с кодированием всех четырех импульсов.

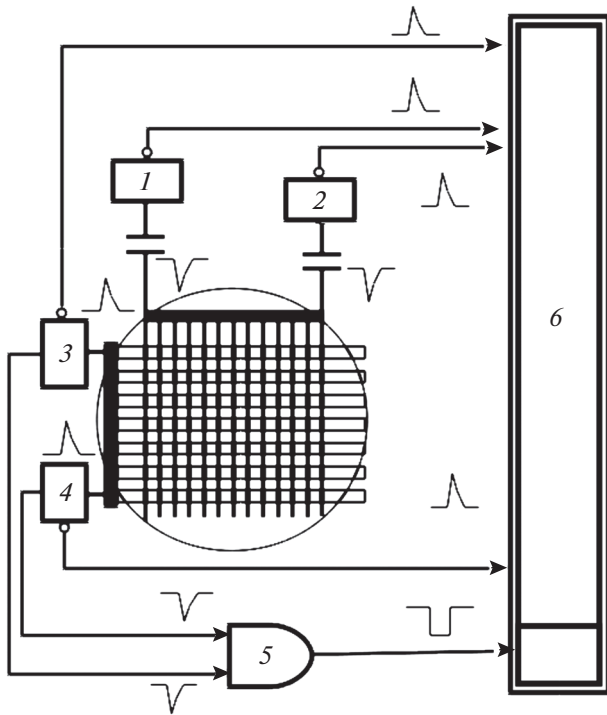


Рис. 2. Схема формирования триггера ПЧДН: 1–4 – усилители; 5 – дискриминатор; 6 – амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП).

На рис. 3 и 4 представлены спектры суммы амплитуд сигналов  $Y_1$  и  $Y_2$  в газовом зазоре  $Y$  и суммы амплитуд сигналов  $X_1$  и  $X_2$  в газовом зазоре  $X$ , соответственно в геометрии II с обогащением падающего на детектор потока тепловыми нейтронами. Различие в форме спектра для зазоров  $Y$  и  $X$ , в частности, расширение спектра в зазоре  $X$  в сторону больших амплитуд можно объяснить событиями с суммарными потерями от  $^4\text{He}$  и  $^7\text{Li}$ . Хотя в основном угол разлета частиц составляет  $180^\circ$ , в реакции (1) из-за наличия в выходном канале третьей частицы ( $\gamma$ -кванта) существует вероятность вылета обеих частиц в переднюю полусферу, что, соответственно, приводит к большим ионизационным потерям в первом зазоре. В тоже время, вклад в ионизационные потери в зазоре  $Y$  дают только ядра  $^4\text{He}$ , а ядра  $^7\text{Li}$ , потеряв большую часть своей энергии в зазоре  $X$ , в зазор  $Y$  не попадают.

Спектр суммы амплитуд  $Y_1$  и  $Y_2$  для тепловых нейтронов в геометрии II представлен на рис. 5а. Он в основном обусловлен ионизационными потерями альфа-частиц с энергией 1.47 МэВ. Спектры сумм амплитуд  $Y_1$  и  $Y_2$  для быстрых нейтронов в геометрии I представлены на рис. 5б и 5в. Нейтроны с МэВ-ной энергией передают дополнительную энергию вылетающим ядрам  $^4\text{He}$  или  $^7\text{Li}$ . Ядро  $^4\text{He}$  при этом оставляет меньшую энергию в

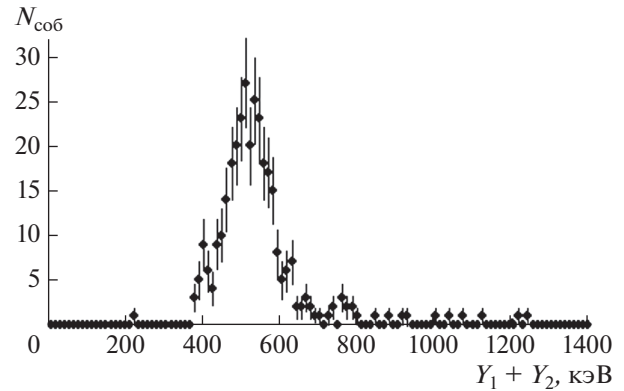


Рис. 3. Спектр суммы амплитуд сигналов  $Y_1$  и  $Y_2$  для тепловых нейтронов. По оси ординат отложено число событий ( $N_{\text{собр}}$ ).

газовом чувствительном зазоре и обуславливает левый пик в спектре на рис. 5б. Ядро  $^7\text{Li}$  при этом приобретает достаточную энергию, чтобы вылететь в зазор и оставить в нем большую энергию. Для замедления быстрых нейтронов в геометрии I перед окном ПЧДН устанавливался блок замедлителя из полиэтилена толщиной 8 см. Спектр суммы амплитуд  $Y_1$  и  $Y_2$  для этого случая представлен на рис. 5в. Видно, что особенности спектра, характерные быстрым нейтронам (рис. 5б), в спектре, показанном на рис. 5в, не наблюдаются.

Мониторингирование нейтронов осуществлялось с помощью счетчиков тепловых нейтронов на основе гелия-3. Сигнал синхроимпульса ускорителя запускал регистрацию осциллограммы от  $^3\text{He}$ -счетчика сигнальным процессором L-783 фирмы “ЛКард”.

В геометрии I без полиэтиленового замедлителя была выполнена оценка потока нейтронов от Ве-мишени. Предполагая, что события с ано-

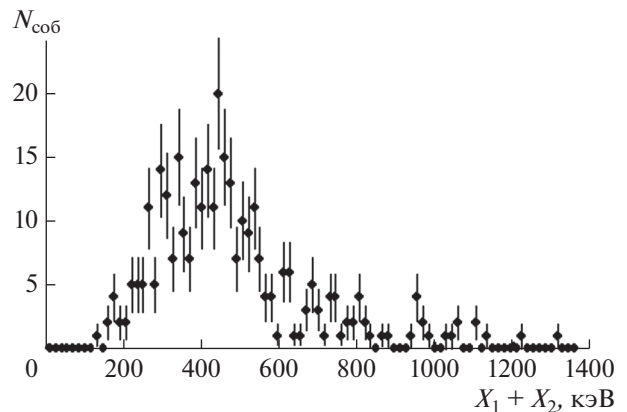
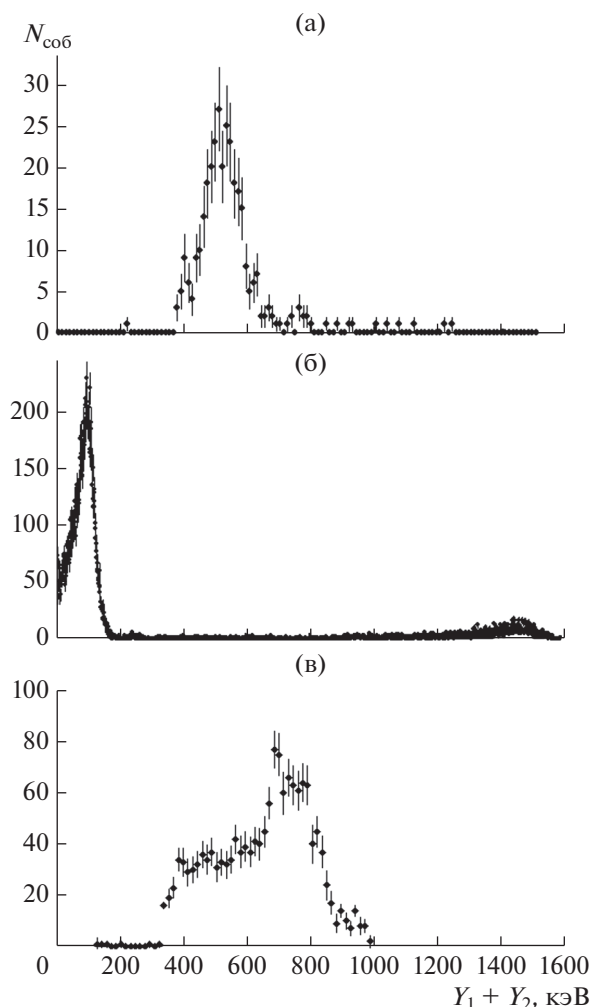


Рис. 4. Спектр суммы амплитуд сигналов для тепловых нейтронов  $X_1$  и  $X_2$ .



**Рис. 5.** Спектры сумм амплитуд сигналов  $Y_1$  и  $Y_2$  в случае нейтронов различных энергий: тепловые (а), быстрые (б) и с полиэтиленовым замедлителем перед ПЧДН (в).

мально высокой и низкой амплитудой в ПЧДН связаны с быстрыми нейтронами, оценка плотности потока быстрых нейтронов на расстоянии от мишени  $\sim 3$  м составила  $\sim 10^4 \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Оценка плотности потока тепловых нейтронов ПЧДН (с полиэтиленовым блоком перед ним) составила  $\sim 2 \times 10^2 \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Оценка плотности потока тепловых нейтронов измеренного с помощью  $^3\text{He}$ -счетчика СНМ-18 на том же расстоянии составила  $\sim 2 \times 10^2 \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ .

Для повышения эффективности детектора предполагается структуру детектора выполнить многослойной с увеличением числа активных слоев до 10. Это позволит увеличить эффективность детектора до  $\sim 40\%$  для тепловых нейтронов и до  $\sim 70\%$  для холодных нейтронов. Оборудование для производства рам ПЧДН предоставляет возможность изготовить многослойные детекто-

ры с размерами до  $400 \times 400$  мм, что позволит на порядок увеличить телесный угол детектора. Компактные размеры источника, способность оперативного изменения спектра падающих на образец нейтронов позволит проводить исследования ядерных свойств и наноструктуры материалов с выделением вкладов тепловых и быстрых нейтронов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерены спектры потерь заряженных частиц, вызванных нейтронами различных энергий в позиционно-чувствительном детекторе с активным слоем 10 В и размерами чувствительной области  $100 \times 100$  мм. Различия в спектрах указывают на возможность разделения событий, соответствующих тепловым и быстрым нейтронам (с энергией  $> 2$  МэВ). Это различие позволило измерить относительную плотность потока тепловых и быстрых нейтронов в W–Be-фотонейтронном источнике при максимальной энергии фотонов 7 МэВ (максимальная энергия нейтронов  $\sim 5$  МэВ). Относительно низкая эффективность детектора позволяет использовать его при высоких потоках нейтронов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Осинская Ю.В., Петров С.С., Покоев А.В. и др.* // ФТТ. 2010. Т. 52. Вып. 3. С. 486.
2. *Gallova J., Uhrikova D., Islamov A. et al.* // Gen. Physiol. Biophys. 2004. V. 23. P. 113.
3. *Lebedev V.T., Kul'velis Yu.V., Orlova D.N. et al.* // Polymer Science Series A. 2016. V. 58. № 5. P. 697. <https://doi.org/10.1134/S0965545X16050114>
4. *Klein M., Schmidt Ch.J.* // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2011. V. 628. P. 9. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.278>
5. *Uno S., Uchida T., Sekimoto M. et al.* // Physics Procedia. 2012. V. 26. P. 142. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.019>
6. *Kohli M., Allmendinger F., Haussler W. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2016. V. 828. P. 242. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.014>
7. *Piscitelli F., Messi F., Anastasopoulos M. et al.* // IOP Science: J. Instrum. 2017. V. 12. P. 03013. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/03/P03013>
8. *Караевский С.Х., Поташев С.И., Бурмистров Ю.М. и др.* // Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 1. С. 10.
9. *Potashov S.I., Burmistrov Yu.M., Drachev A.I. et al.* // J. Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2018. V. 12. P. 627. <https://doi.org/10.1134/S102745101802012X>
10. *Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В. и др.* // Известия РАН Сер. физ. 2017. Т. 81. № 6. С. 824. <https://doi.org/10.7868/S0367676517060047>

## The Use of the Detector with $^{10}\text{B}$ Active Layer for Detection of Thermal and Fast Neutrons

S. I. Potashev<sup>1,2, \*</sup>, Yu. M. Burmistrov<sup>1</sup>, E. S. Konobeevski<sup>1</sup>, I. V. Meshkov<sup>2</sup>, S. V. Zuyev<sup>1</sup>, V. N. Marin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

<sup>2</sup>*The P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

*\*e-mail: potashev@inr.ru*

The results of studying the possibility of using of  $100 \times 100$  mm position sensitive detector with an active layer of  $^{10}\text{B}$  for detection thermal and fast neutrons are presented. Detector operation is studied using tungsten-beryllium photoneutron source of INR RAS. Because of its low efficiency this detector may be used in high neutron flux. Measurements were made with different ratios of thermal and fast neutrons at the source output. The possibility of separate thermal and fast neutrons detected is demonstrated.

**Keywords:** neutron detector, Boron-10 layer, two-dimension chamber, gas discharge chamber.