

УДК 539.1.074.823

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДВУХКООРДИНАТНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ СЛОЯ $^{10}\text{B}$ И ПРОВОЛОЧНОЙ КАМЕРЫ

© 2022 г. С. И. Поташев<sup>1, 2, \*</sup>, А. А. Каспаров<sup>1</sup>, И. В. Мешков<sup>2</sup>, А. А. Афонин<sup>1</sup>,  
Ю. М. Бурмистров<sup>1</sup>, А. И. Драчев<sup>1</sup>, С. Х. Караевский<sup>1</sup>, В. Н. Пономарев<sup>1</sup>, В. И. Разин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Институт ядерных исследований Российской академии наук”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук”, Москва, Россия

\*E-mail: potashev@inr.ru

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 08.04.2022 г.

Принята к публикации 22.04.2022 г.

Исследована направленная чувствительность двухкоординатного детектора нейтронов на основе 3 мкм слоя  $^{10}\text{B}$  и проволочной камеры. Наблюдается подавление регистрации детектором рассеянных нейтронов по сравнению с данными от  $^3\text{He}$ -счетчика. Это можно объяснить сильным поглощением потока нейтронов в слое  $^{10}\text{B}$ , падающим под большим углом к плоскости детектора, и тем, что энергия вторичного ядра  $^4\text{He}$  или  $^7\text{Li}$  недостаточна, чтобы превысить порог, если ядро образовалось сразу после входа в слой  $^{10}\text{B}$ .

DOI: 10.31857/S0367676522080142

### ВВЕДЕНИЕ

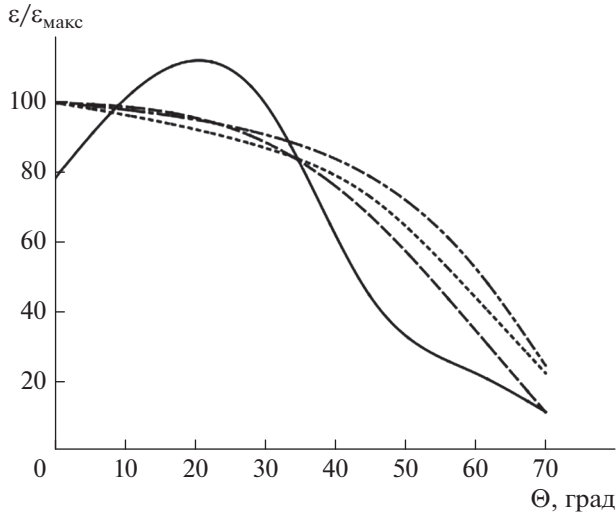
Большинство существующих детекторов медленных нейтронов: активационных, сцинтилляционных и газовых не обладают избирательной чувствительностью к направлению движения нейтронов. В то же время на источниках нейтронов поток, как правило, сопровождается большим фоном рассеянных нейтронов. В связи с этим измерение пространственного распределения потока нейтронов вызывает значительные трудности. Именно поэтому необходим детектор нейтронов, имеющий направленную чувствительность к потоку нейтронов. Такой детектор на основе газонаполненной сеточной камеры с чувствительными газами  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ , останавливающим газом  $\text{CF}_4$ , сцинтиллирующими добавками и ПЗС-камерой был предложен ранее в США [1]. Однако, газы  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  обладают высокой диффузией через уплотнения и тонкие стенки и требуют высокой степени герметичности. К тому же газ  $^3\text{He}$  является дорогим и редким, который распределяется по квотам США и России. Хорошей им заменой в качестве конвертера нейтронов является изотоп  $^{10}\text{B}$ . Он используется или в виде твердого слоя или газа  $^{10}\text{BF}_3$ . Такие детекторы были созданы в ИЯИ РАН [2, 3]. Недавно [4, 5] было

показано, что детектор нейтронов на основе на основе 3-мкм слоя  $^{10}\text{B}$  и проволочной пропорциональной камеры в отличие от  $^3\text{He}$ -счетчика обладает слабой чувствительностью к фону рассеянных тепловых нейтронов, совершающих хаотическое броуновское движение в экспериментальном зале.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ

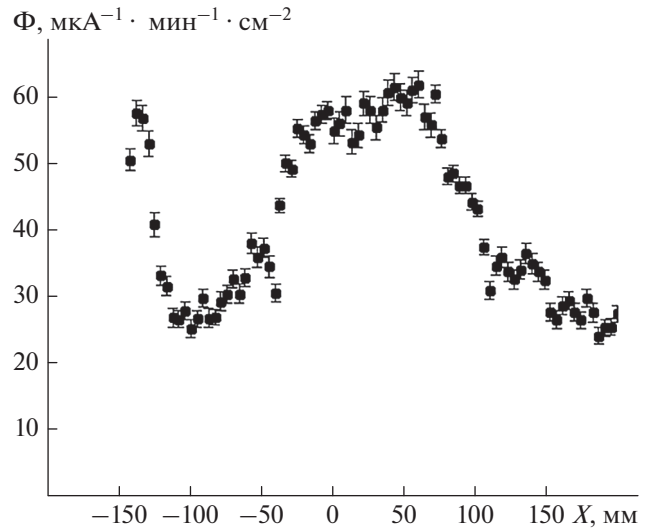
В позиционно-чувствительном детекторе нейтронов (ПЧДН) чувствительный 3-мкм слой  $^{10}\text{B}$  нанесен на внутреннюю сторону 1.8-мм стеклянной пластины. На этот слой нанесен 0.2–0.3 мкм слой алюминия, который служит первым катодом пропорциональной камеры. В последующих двух газовых зазорах пропорциональной камеры возникают ионизационные сигналы, пропорциональные потерям энергии вторичных ядер  $^4\text{He}$  и  $^7\text{Li}$ , образованных в реакциях  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Li}$  и  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Li} + \gamma$  [4, 5].

Рассмотрим варианты событий под действием нейтрона, падающего под различными углами  $\Theta$  к плоскости детектора. Если нейтрон падает перпендикулярно плоскости детектора, то ослабление потока нейтронов и потери энергии вторичного ядра в слоях бора и алюминия минимальны. Триггер события возникает с высокой вероятно-



**Рис. 1.** Расчетная эффективность позиционно-чувствительного детектора нейтронов в зависимости от угла падения нейтронного потока. Линии: сплошная — толщина слоя алюминия  $l = 0.3$  мкм, порог по энергии во втором газовом слое  $E_{thr} = 0.3$  МэВ; штриховая —  $l = 0.2$  мкм,  $E_{thr} = 0.3$  МэВ; пунктирная —  $l = 0.3$  мкм,  $E_{thr} = 0.2$  МэВ; штрих-пунктирная —  $l = 0.2$  мкм,  $E_{thr} = 0.2$  МэВ.

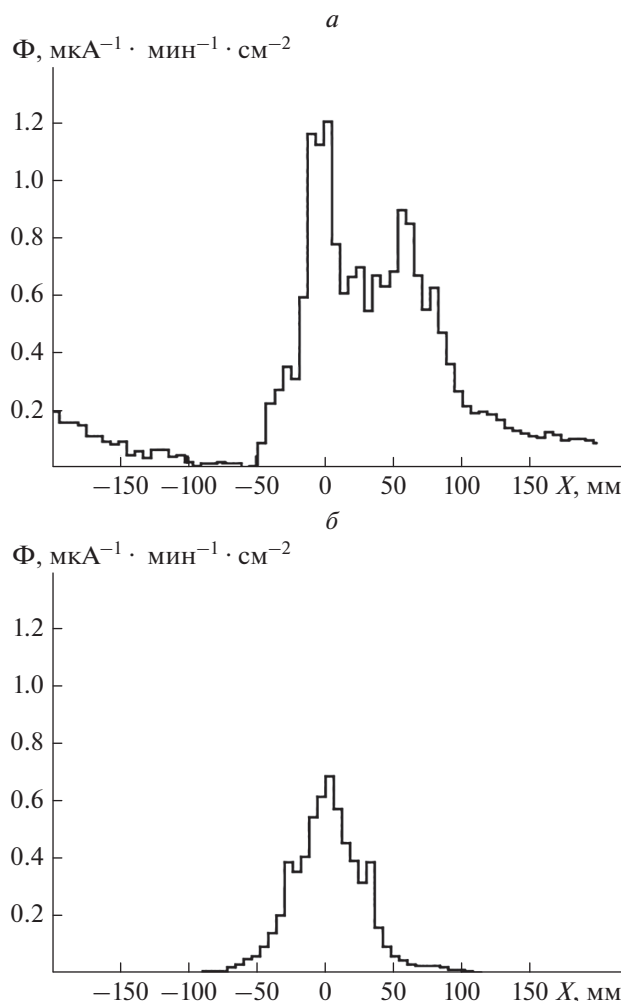
стью. Пусть нейтрон падает на плоскость слоя  $^{10}\text{B}$  под большим углом к ее нормали. Если взаимодействие нейтрона с  $^{10}\text{B}$  произойдет сразу после входа в слой, то энергии вторичного ядра  $^4\text{He}$  (или  $^7\text{Li}$ ) может быть недостаточно, чтобы вызвать сигнал во втором газовом зазоре детектора для получения триггера события. В то же время поток нейтронов в глубине слоя  $^{10}\text{B}$  будет ослаблен из-за увеличенной толщины слоя бора. Для проверки этих утверждений были выполнены расчеты. Для заданного числа падающих нейтронов определялось количество событий с вылетом ядра  $^4\text{He}$  с учетом кинематики двух реакций и ионизационных потерь, которые вызвали сигнал во втором газовом зазоре детектора. Моделирование зависимости эффективности детектора от угла падения показало, что ее отношение к максимальной эффективности падает с увеличением угла  $\Theta$  и степень падения зависит главным образом от толщины слоя алюминия и энергетического порога регистрации как показано на рис. 1. Повышение порога и увеличение толщины алюминиевого слоя приводит к усилению направленной чувствительности детектора, т.е. к большей величине отношения эффективности регистрации нейтронов, падающих к перпендикулярно плоскости детектора по сравнению с нейтронами, падающими под большими углами к нормали плоскости детектора. Однако, полная эффективность детектора при этом снижается.



**Рис. 2.** Распределение нейтронов, измеренное на расстоянии 204 см от  $^9\text{Be}$ -мишени перемещаемым  $^3\text{He}$ -счетчиком.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерения проводились на источнике нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8 и замедлителя из полиэтилена объемом  $1 \text{ м}^3$  [6]. В геометрическом центре замедлителя располагалась мишень из  $^9\text{Be}$ . Поток нейтронов из мишени под углом  $67^\circ$  на выходе из коллиматора диаметром 3 см регистрировался ПЧДН на основе твердого слоя  $^{10}\text{B}$  и проволочной камеры [7] и равномерно перемещаемым за ним стандартным счетчиком на основе  $^3\text{He}$ . Это было возможно, поскольку ПЧДН обладает малым рассеянием и поглощением нейтронов за счет конструктивных материалов детектора (стекло, алюминий, газ) и практически не искажает поток. Различие в распределении потока нейтронов, измеренном ПЧДН и  $^3\text{He}$ -счетчиком, наблюдалось в эксперименте. На рис. 2 показано экспериментальное распределение нейтронов вдоль горизонтальной оси, измеренное  $^3\text{He}$ -счетчиком, расположенном на расстоянии 204 см от центра мишени. Можно заметить, что широкий поток  $\sim 10$  см находится на высоком фоне рассеянных нейтронов. Фон слева значительно увеличен за счет присутствия большой массивной установки в левой части зала. На рис. 3а показано экспериментальное распределение нейтронов, измеренное ПЧДН. Можно заметить, что этот детектор с гораздо меньшей эффективностью регистрирует фон рассеянных нейтронов чем  $^3\text{He}$ -счетчик, даже от присутствующей вблизи массивной установки в несколько десятков тонн. В другом эксперименте перед детектором был установлен кадмиевый фильтр. Его гра-



**Рис. 3.** Распределение нейтронов, измеренное на расстоянии 204 см от  ${}^9\text{Be}$ -мишени позиционно-чувствительным детектором на основе слоя  ${}^{10}\text{B}$ : медленных и быстрых нейтронов (а); быстрых нейтронов с  $E_n > 0.55$  эВ (б).

ничная энергия составляет около 0.55 эВ.  ${}^3\text{He}$ -счетчик регистрировал лишь редкие события нейтронов. Распределение потока с энергиями  $E_n > 0.55$  эВ, измеренное с помощью ПЧДН и представленное на рис. 3б, оказалось симметричным и соответствующим размеру и форме коллиматора на данной дистанции 204 см. При этом фон рассеянных нейтронов был подавлен.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены расчеты, показавшие, что детектор на основе твердого слоя  ${}^{10}\text{B}$  и пропорциональной камеры должен проявлять направленную чувствительность к нейтронам, падающим нормально к плоскости детектора. В эксперименте было подтверждено свойство направленной чувствительности и низкой чувствительности  ${}^{10}\text{B}$ -детектора к фону рассеянных нейтронов. Свойство

направленной чувствительности этого детектора еще более ярко проявляется при детектировании быстрых нейтронов.

Работа частично выполнена в рамках темы государственного задания ФИАН № 4 “Физика конденсированного состояния: новых материалов, молекулярных и твердотельных структур нанопотоники, наноэлектроники и спинтроники”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roccaro A., Tomita H., Ahlen S. et al. // NIM A. 2009. V. 608. P. 305.
2. Литвин В.С., Поташев С.И., Разин В.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 2. С. 247; Litvin V.S., Potashev S.I., Razin V.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. V. 75. No. 2. P. 229.
3. Potashev S., Drachev A., Burmistrov Yu. et al. // EPJ Web Conf. 2020. V. 231. Art. No. 05010.

4. *Мешков И.В., Поташев С.И., Афонин А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 4. № 4. С. 497; Meshkov I.V., Potashev S.I., Afonin A.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 4. P. 382.*
5. *Potashev S., Burmistrov Yu., Drachev A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. Art. No. 012160.*
6. *Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 6. С. 824; Andreev A.V., Burmistrov Yu.M., Zuyev S.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 6. P. 748.*
7. *Поташев С.И., Бурмистров Ю.М., Драчев А.И. и др. // Поверхн. Рент., синхр., нейтр. исслед. 2018. № 10. С. 108; Potashev S.I., Burmistrov Yu.M., Drachev A.I. et al. // J. Surf. Invest. X-ray, Synch. Neutr. Tech. 2018. V. 12. P. 627.*

## Directional sensitivity investigation of two coordinate neutron detector based on $^{10}\text{B}$ layer and wire chamber

**S. I. Potashev<sup>a, b, \*</sup>, A. A. Kasparov<sup>a</sup>, I. V. Meshkov<sup>b</sup>, A. A. Afonin<sup>a</sup>, Yu. M. Burmistrov<sup>a</sup>,  
A. I. Drachev<sup>a</sup>, S. Kh. Karaevsky<sup>a</sup>, V. N. Ponomarev<sup>a</sup>, V. I. Razin<sup>a</sup>**

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

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

<sup>\*</sup>*e-mail: potashev@inr.ru*

Directional sensitivity of two coordinate neutron detector based on  $3\ \mu\text{m}$   $^{10}\text{B}$  layer and wire chamber was studied. The suppression of scattered neutron detection by the detector is observed in comparison with the data from the  $^3\text{He}$ -counter. It can be explained by strong absorption of the neutron flux in the  $^{10}\text{B}$  layer which falling at a large angle to the detector plane and the fact that secondary nucleus energy of  $^4\text{He}$  or  $^7\text{Li}$  is not enough to exceed the threshold if the nucleus was produced just immediately after entering the  $^{10}\text{B}$  layer.