

## НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР НА БАЗЕ ПРОТОННОГО ТЕЛЕСКОПА С ЭЛЕКТРОННОЙ КОЛЛИМАЦИЕЙ ПРОТОНОВ ОТДАЧИ

*В. М. Милков<sup>а,б</sup>, Ц. Ц. Пантелеев<sup>а</sup>, А. А. Богдзель<sup>а</sup>, В. Н. Швецов<sup>а</sup>,  
С. А. Кутузов<sup>а</sup>, С. Б. Борзаков<sup>а</sup>, П. В. Седышев<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Софийский университет им. Св. Климента Охридского, София

В Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований был создан нейтронный спектрометр на основе газовых пропорциональных счетчиков с регистрацией протонов отдачи. Принцип действия спектрометра основан на измерении кинетической энергии упруго рассеянных на малые углы протонов из реакции  $(n, p)$  в водородосодержащей среде. Спектрометр состоит из двух цилиндрических пропорциональных счетчиков, размещенных в общем газовом объеме с общей центрально расположенной анодной нитью. С использованием радиоизотопных источников нейтронов  $^{252}\text{Cf}$  и  $^{239}\text{Pu}$ –Be исследована характеристика нейтронного спектрометра. Также были проведены измерения с моноэнергетическими нейтронами от реакции  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ , получаемые из тонкой литиевой мишени (с точно неизвестной толщиной), которая размещалась в потоке ускоренных на электростатическом ускорителе ЭГ-5 ЛНФ протонов, а также нейтронами от реакции  $\text{D}(d, n)^3\text{He}$  с использованием газовой дейтериевой мишени.

A prototype of neutron spectrometer based on a gas proportional counter with recoil protons registration is created in the Frank Laboratory of Neutron Physics at the Dubna Joint Institute for Nuclear Research. The spectrometer is developed to measure the kinetic energy of protons scattered elastically at small angles that are produced by  $(n, p)$  reaction in an environment containing hydrogen. The elaborated prototype consists of two cylindrical proportional counters used as cathodes. They are placed in gas environment with a common central-situated anode wire. Studies on the characteristics of the neutron spectrometer were conducted using  $^{252}\text{Cf}$  and  $^{239}\text{Pu}$ –Be radioisotope neutron sources. Also, measurements were made with monoenergetic neutrons produced by the  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$  reaction when a thin lithium target was bombarded with proton beam from an electrostatic accelerator EG-5, and also neutrons from the reaction  $\text{D}(d, n)^3\text{He}$  with gas deuterium target.

PACS: 29.40.Cs

### ВВЕДЕНИЕ

Необходимость измерения кинетической энергии быстрых нейтронов появилась одновременно с их открытием и продолжает оставаться актуальной по настоящее время. Вся сложность данной проблемы состоит в отсутствии электрического заряда, что приводит к требованию трансформации энергии нейтрона в кинетическую энергию какой-либо заряженной частицы. Сам факт регистрации разделяется на две существенно различающиеся задачи:

— первая — для регистрации медленных тепловых нейтронов используются ядерные реакции, имеющие гигантские сечения взаимодействия по сравнению с типично ядерными взаимодействиями;

— вторая, как правило, связана с измерениями энергетических распределений быстрых нейтронов: используются результаты нейтрон-ядерных взаимодействий, для которых характерны сечения не более десятка барн.

В области резонансных энергий (от 0 до  $\sim 100$  кэВ) применяется метод времени пролета, требующий импульсного характера работы нейтронного источника. Другой метод — измерение энергии протонов отдачи в водородосодержащих сцинтилляционных материалах с последующей процедурой восстановления спектров. Частным случаем применения этой методики являются протонные телескопы, в которых измеряется энергия протонов отдачи в газовой среде. В качестве примеров можно указать ранние разработки спектрометров, приведенные в работах [2–4], и одну из последних работ в 2006 г. [1]. Этому способу спектрометрии быстрых нейтронов и посвящена данная работа.

## 1. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

В ЛНФ ОИЯИ был разработан и изготовлен нейтронный спектрометр на базе телескопа протонов отдачи, в котором применен метод их электронной коллимации. На рис. 1 представлен общий вид прибора. Корпус 1 изготовлен из тонкостенной нержавеющей трубы с внутренним диаметром 96 мм и длиной 625 мм. По длине всей рабочей части детектора протянута анодная нить 2 (W + Au) диаметром 50 мкм. В самом начале рабочего объема расположен первый катод (катод А) 3 в виде трубки длиной 175 мм, на расстоянии 152,5 мм от его края смонтирован второй катод (катод Б) 4 длиной 125 мм. Оба электрода изготовлены из тонкостенной трубки из нержавеющей стали с внутренним диаметром 54 мм, они поддерживаются и центрируются с помощью тефлоновых колец 5. Сами кольца расположены на шести стойках 6. Три сигнальных вывода 7 и вакуумный кран 8 расположены на заднем фланце.

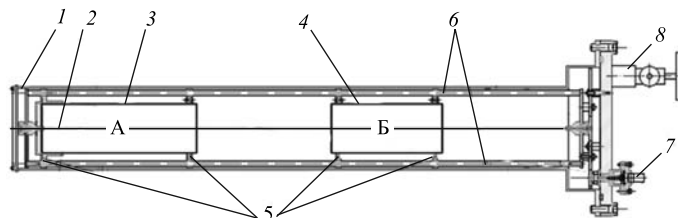


Рис. 1. Общий вид прибора

На рис. 2 представлена блок-схема спектрометра. Анодная нить 2 в корпусе 1 подключена к источнику положительного высокого напряжения 5, катод А 3 и катод Б 4 подключены к выравнивающему источнику напряжения 6. Сигналы с катодов и анода подаются на входы зарядочувствительных предусилителей 7. Выходы предусилителей подключены ко входам соответствующих спектрометрических усилителей 8, а их выходы подключены ко входам аналого-цифровых преобразователей (АЦП) 9, которые через контроллер КАМАК 10 по интерфейсу USB подключены к персональному компьютеру (ПК) 11.

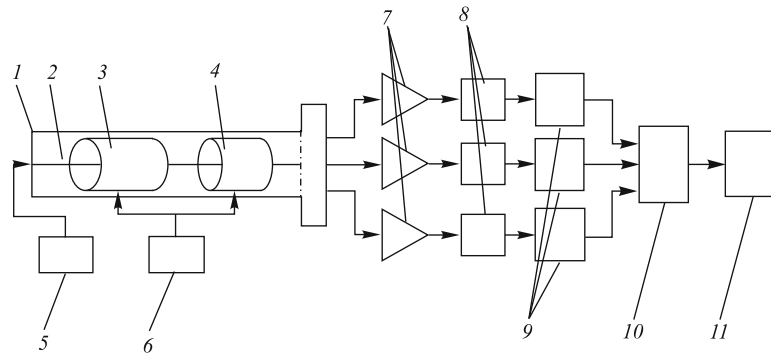


Рис. 2. Блок-схема спектрометра

АЦП, контроллер КАМАК и ПК образуют электронную систему, которая осуществляет функции дискриминации, совпадения сигналов анода и катодов и записи многомерной амплитудной информации.

Обработка полученной информации производится с помощью программы «Lada 2010», которая была разработана в ЛНФ.

При обработке многомерных экспериментальных данных программой «Lada 2010» получается энергетический спектр нейтронов в заданной области газовой мишени и заданном телесном угле рассеяния протонов отдачи в детекторе.

## 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Телескоп построен на базе пропорционального счетчика с общей анодной нитью в герметичном корпусе, наполненном водородосодержащим газом.

Применение двух дополнительных электродов позволяет решить две функциональные задачи:

- создание области мишени в первой трубке (катод А);
- коллимацию протонов отдачи в телесном угле, который определяется дальним торцом второй трубки (катод Б).

Оставшаяся область от торца второй трубки до конца корпуса детектора создает объем, в котором происходит остановка протонов отдачи. В объеме детектора выделяются три области с различными радиусами катодов (трубки А и Б и остальная часть счетчика), что влечет за собой различие в коэффициентах газового усиления. Выравнивание коэффициента газового усиления осуществляется с помощью подачи компенсационного потенциала на трубки.

В телескопе коллимация осуществляется путем совпадения импульсов от протонов отдачи в обеих трубках и в дальнейшем при программной сортировке экспериментальных данных в выбранных интервалах амплитудных распределений сигналов, снимаемых с катодов А и Б.

Изменяя порог дискриминации импульсов в первой трубке, можно выбрать толщину газового слоя, находящегося в начале трубки, в котором могут происходить акты рассеяния нейтронов на протонах. Таким образом, можно определять толщину и месторасположение газовой мишени, а также менять телесный угол, в пределах которого работает телескоп, тем самым оптимизировав как эффективность, так и энергетическое разрешение прибора.

Порог дискриминации импульсов во второй трубке устанавливается в районе максимума амплитуды, что соответствует факту полного прохождения протонов отдачи через трубку.

Так как потери энергии с высокой точностью пропорциональны длинам траекторий, устанавливая порог дискриминации, можно выбрать толщину газового слоя мишени.

Для вычисления пробегов протонов в детекторе использовалась программа SRIM [5].

Факт совпадения во времени отобранных импульсов с обеих трубок соответствует полному расположению треков в объеме телескопа.

Энергия протонов зависит от угла вылета протона относительно первоначального направления нейтрона следующим образом:

$$E_p = E_{n0} \cos^2 \theta_p. \quad (1)$$

Регистрируя протоны в малом телесном угле, можно получить хорошее энергетическое разрешение:

$$dE_p = E_{n0} \sin(2\theta_p) d\theta_p. \quad (2)$$

Интегрируя от 0 до  $\theta_{p_{\max}}$ , получаем

$$\Delta E_p = E_{n0}(1 - \cos \theta_{p_{\max}}). \quad (3)$$

Следует заметить, что величина  $\theta_{p_{\max}}$  зависит от точки рождения трека.

Для энергетической калибровки в области до 1,0 МэВ, а также для измерения собственного разрешения детектора в состав газового наполнения введено небольшое количество  $^3\text{He}$ .

Отличительными признаками заявленного спектрометра является то, что:

— в качестве протонной мишени используется слой газа в первой трубке, толщина и положение которого произвольно выбираются при обработке информации в электронной системе, что приводит к значительному снижению энергетического порога регистрируемых спектров и улучшению разрешения;

— вторая трубка служит в качестве коллиматора протонов отдачи (при условии совпадения сигналов с обеих трубок), а выбор минимального угла коллимации осуществляется после обработки информации в электронной схеме.

### 3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В представленной работе используется несколько программ, с помощью которых осуществляются расчеты, анализ и моделирование процессов в детекторе. Программа SRIM помогает определить ионизационные потери и длины пробегов в газах — пакет «Торможение и пробег ионов в мишенях». Также используется программа «Lada» для набора, визуализации и анализа экспериментальных данных. Рассмотрим ниже вкратце действия этих программ.

**3.1. Программа SRIM.** SRIM — это совокупность софтверных пакетов, которые вычисляют множество характеристик транспорта ионов в материалах. Наиболее характерные приложения следующие [5]:

— *торможение и пробеги ионов в мишенях.* Большинство аспектов энергетических потерь и торможение ионов в веществах можно вычислить с помощью SRIM, также

можно проводить быстрые расчеты и получить данные в виде таблиц о тормозящей способности, отклонении треков ионов от начального направления движения (straggling) и относительных потерях энергии для любых ионов и сред в широком энергетическом интервале;

- имплантация ионов;
- ионное распыление;
- ионная терапия.

В нашей работе используется пакет «Торможение и пробег ионов», с помощью которого определяются пробеги протонов для данной газовой смеси и геометрии детектора.

**3.2. Программа «Lada».** Программа «Lada» была написана для оперативного контроля набора физических данных с возможностью их записи на носители в ходе проведения экспериментов. Она позволяет визуализировать до четырех одномерных энергетических и временных спектров и осуществляет их детальный просмотр. Используется также для настройки аппаратуры.

При работе в режиме off-line есть возможность строить интегральные спектры по многопараметрическим критериям из сохраненной исходной (сырой) информации. В режиме on-line данные непрерывно поступают в память ПК в «list mode» и принимаются программой по одному из USB-каналов (рис. 3).

Для разравнивания пиковых нагрузок заводится массив последовательных буферов. Занесенная информация анализируется и обрабатывается отдельным программным потоком (threads), событие идентифицируется тремя старшими битами, устраняются служебные байты, корректируются ошибочные условия. Поток активируется и обновляет интегральные спектры либо при заполнении выходного буфера, либо по интервалам вре-

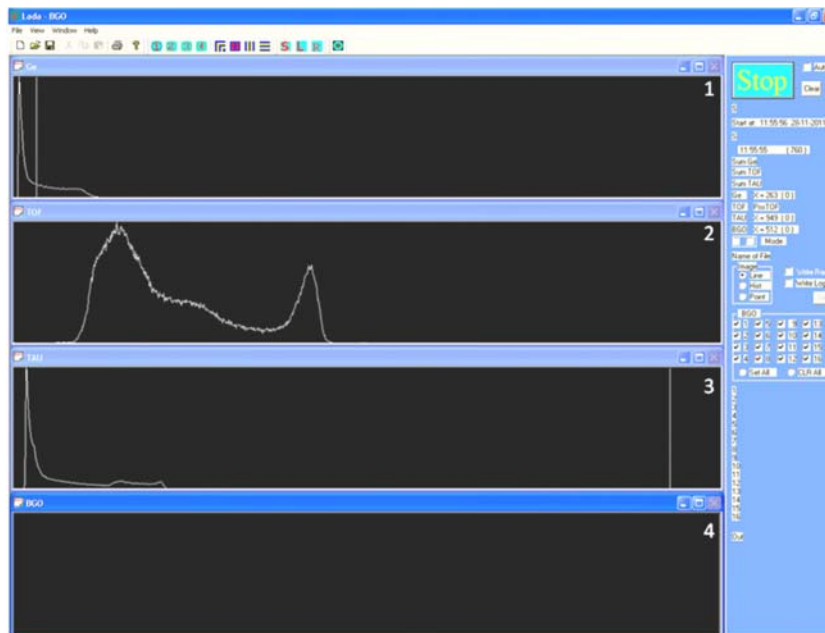


Рис. 3. Режим on-line

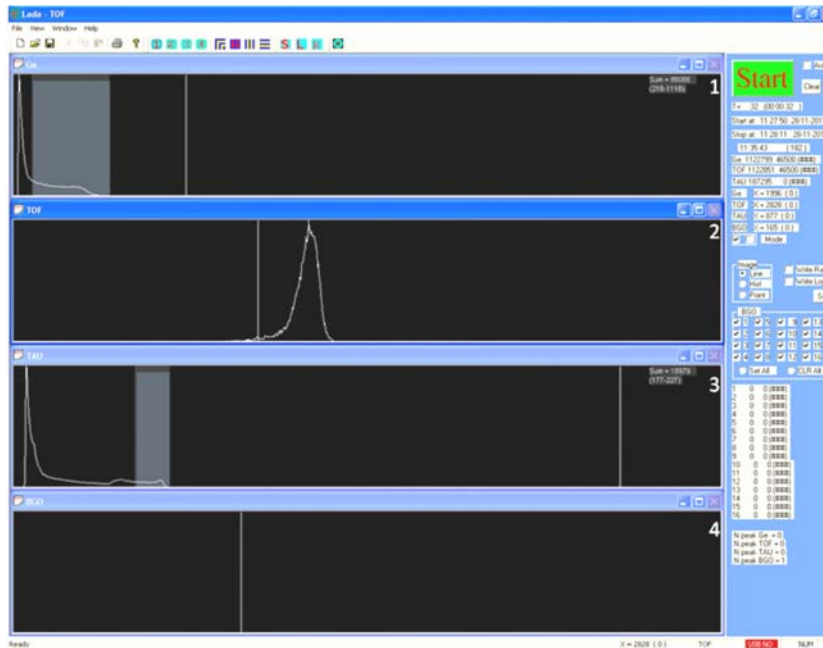


Рис. 4. Режим off-line

мени. Запись исходных данных в файлы реализована в режиме ring-rong в бинарном виде. Интегральные спектры сохраняются в ASCII-кодах. Есть возможность детального просмотра участков каждого из спектров, обработки пиков и выбранных областей. Для проверки работы алгоритмов программы и обучения основным действиям заложен встроенный генератор, имитирующий процесс накопления и позволяющий обходиться без реальной физической аппаратуры.

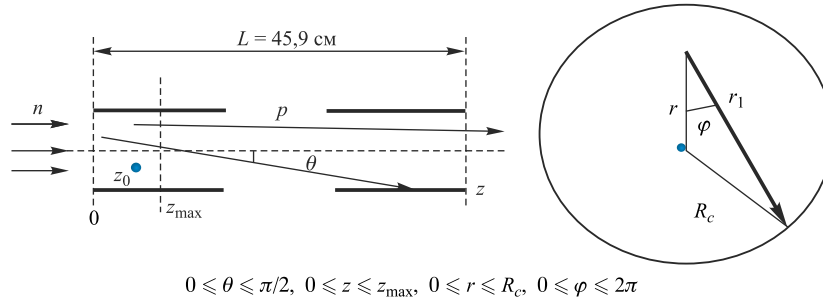
В режиме off-line можно готовить интегральные спектры из двоичных файлов с сохраненными исходными данными или просматривать записанные (рис. 4). При работе с бинарными файлами добавлена возможность сортировки событий, связанных между собой определенными критериями.

К этому относится регистрация события в спектр окна 2 только при условии попадания связанных с ним данных в выделенные области спектров окон 1 и 3. И наоборот, при выделении участка спектра окна 2 в окнах 1 и 3 обрабатываются и отображаются данные для селектированной области.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ МОНТЕ-КАРЛО

Для исследования характеристик протонного телескопа было выполнено моделирование с использованием метода Монте-Карло.

Быстрые нейтроны рассеиваются на водородосодержащей газовой мишени, и протоны отдачи попадают в цилиндрический счетчик с радиусом  $R_c$  и длиной  $L$ . Нейтроны, регистрируемые счетчиком, летят параллельно оси  $z$ . Допустим, протон отдачи появился в точке с координатой  $z_0$  и на расстоянии  $r$  от оси цилиндра и движется в направлении, определяемом углом  $\theta$  относительно оси цилиндра и углом  $\varphi$ , отсчитываемым от вертикального направления (рис. 5).



$$0 \leq \theta \leq \pi/2, 0 \leq z \leq z_{\max}, 0 \leq r \leq R_c, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$$

Рис. 5. Расчет спектра протонов отдачи в цилиндрическом счетчике

Тогда протон пересекает границу цилиндра на расстоянии

$$r_1 = -r \cos \varphi + \sqrt{r^2 \cos^2 \varphi + R_c^2 - r^2}. \quad (4)$$

Расстояние, которое проходит протон в цилиндре, равно

$$l_p = \frac{r_1}{\sin \theta}. \quad (5)$$

Если протон появился в точке с координатой  $z_0$ , то он пересечет границу цилиндра в точке с координатой

$$z_1 = z_0 + l_p \cos \theta. \quad (6)$$

Координата  $z_1$  не должна превышать максимальной длины счетчика.

Программа моделирует треки протонов в зависимости от углов вылета  $\theta$  и  $\varphi$ . Разыгрываются начало трека координаты  $z$  и расстояние  $r$  от оси симметрии счетчика. Далее разыгрываются углы  $\theta$  и  $\varphi$  и рассчитывается длина трека до точки пересечения с трубкой. Значения углов и начальной координаты варьировались в следующих пределах:

$$0 \leq r \leq R_c, \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad 0 \leq z \leq z_{\max}.$$

Для оценки телесного угла отбираются только те события, в которых протоны прошли полностью через вторую трубку. Таким образом, учитываются события, соответствующие трекам протонов в малом телесном угле вдоль оси симметрии детектора, что позволяет определить энергию налетающего нейтрона с хорошим разрешением.

Расчеты проводились для моноэнергетических нейтронов с энергией 1 МэВ, длина трека 70 см, максимальное расстояние от начала первой трубки до конца второй  $L = 45,9$  см. Радиус трубки  $R_c = 2,25$  см.

Были проделаны три варианта расчетов: 1)  $0 < z < 2,5$  см; 2)  $0 < z < 5,0$  см; 3)  $0 < z < 7,5$  см.

Каждый раз разыгрывалось по  $10^7$  событий. Результат: по мере увеличения области рождения протонов увеличивается ширина пиков (рис. 6, а). Для сравнения на рис. 6, б показана часть измеренного спектра. Условия измерения описаны ниже.

Оценка эффективности проводилась по формуле

$$\varepsilon = n_H \sigma_{np} \frac{\Delta \Omega}{2\pi}, \quad (7)$$

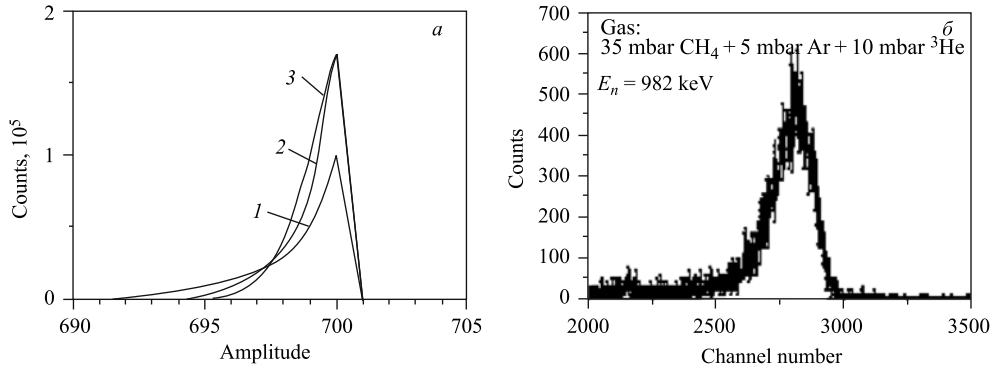


Рис. 6. а) Расчетные формы спектров протонов для различных областей рождения треков: 1)  $0 < z < 2,5$  см; 2)  $0 < z < 5,0$  см; 3)  $0 < z < 7,5$  см. б) Экспериментальные результаты моноэнергетических потоков нейтронов  $E_n = 982$  кэВ, полученные с помощью электростатического генератора ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ

которая верна для малой концентрации газа и учитывает, что протоны летят вперед.  $n_H$  — число ядер водорода на  $1 \text{ см}^2$  в детекторе;  $\sigma_{np}$  — сечение рассеяния. Использовался газ  $\text{CH}_4$  под давлением 35 мбар:

$$n_H = \frac{N_H}{S} = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}. \quad (8)$$

Используя результат моделирования  $\Delta\Omega/2\pi \approx 0,02$ , получаем, что эффективность телескопа при давлении 35 мбар составляет величину  $\varepsilon(1 \text{ МэВ}) \approx 1,6 \cdot 10^{-6}$ . Величина эффективности телескопа линейно зависит от давления рабочего газа.

## 5. ИЗМЕРЕНИЯ

Для проверки работоспособности детектора были проведены следующие эксперименты: к начальному торцу первой трубки был прикреплен  $\alpha$ -источник  $^{241}\text{Am}$ , давление в объеме детектора составляло 1,2 атм, что исключало возможность попадания  $\alpha$ -частицы из объема первой трубки (катод А) в объем второй трубки (катод Б). Детектор облучался

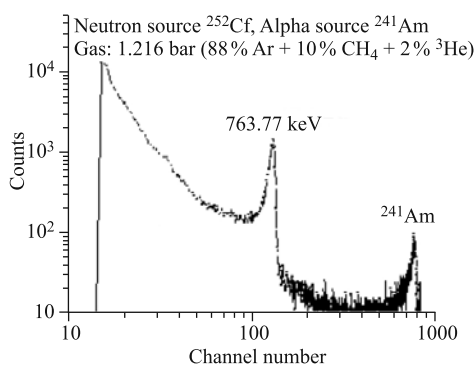


Рис. 7. Спектр с катода А

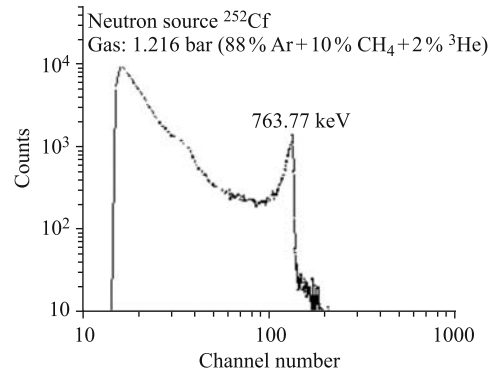


Рис. 8. Спектр с катода Б



также тепловыми нейтронами после замедлителя от  $^{252}\text{Cf}$ . На рис. 7 и 8 представлены результаты измерений. Как видно, полностью отсутствует какое-либо влияние  $\alpha$ -источника на спектр второй катодной трубки, положение пика от  $^3\text{He}$  в обеих трубках в точности совпадает, асимметрия формы во втором катоде — результат расположения источника тепловых нейтронов.

На рис. 9 представлены результаты измерения анодных спектров от реакции  $^3\text{He}(n,p)\text{T} + 763,77\text{ кэВ}$ . Совмещение двух пиков, т.е. выравнивание коэффициентов газового усиления во всем объеме детектора, достигается с помощью подачи положи-

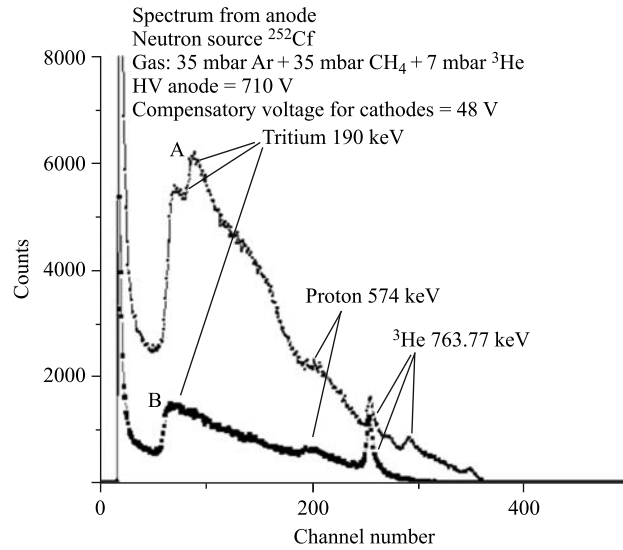


Рис. 9. Спектры от реакции  $^3\text{He}(n,p)\text{T} + 763,77\text{ кэВ}$ , спектр А соответствует измерению без компенсационного потенциала, спектр В — с компенсацией электрического поля

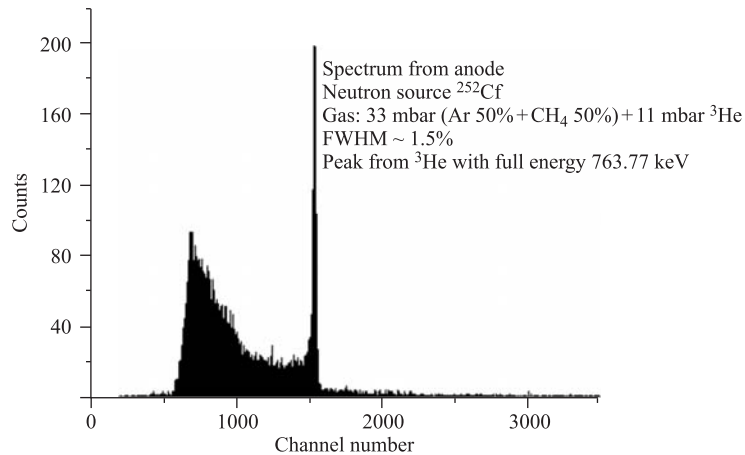


Рис. 10. Собственное энергетическое разрешение при условии совпадения импульсов от обеих трубок. Спектр от реакции  $^3\text{He}(n,p)\text{T} + 763,77\text{ кэВ}$  от  $^{252}\text{Cf}$ -источника, замедлитель — блок полиэтилена

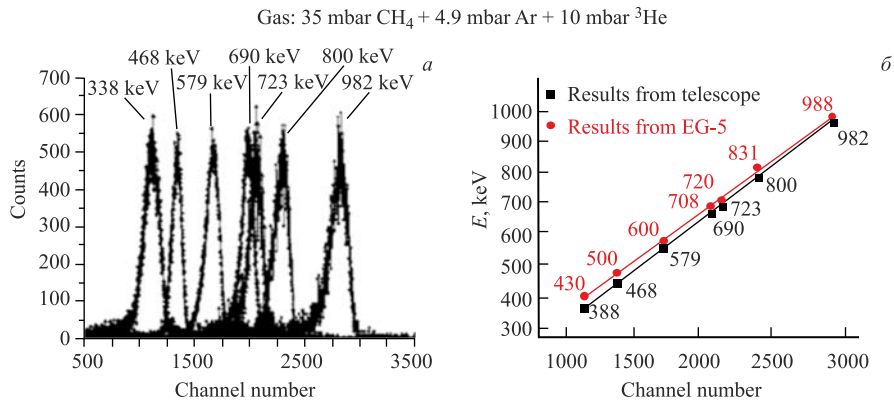


Рис. 11. *а)* Спектры от моноэнергетических нейтронов с энергиями от 388 до 982 кэВ, полученные от тонкой <sup>7</sup>Li-мишени после программной обработки. *б)* Результат сравнения экспериментальных данных о спектрах нейтронов в соответствии с калибровкой детектора (черные точки) с данными об энергиях протонного пучка от ускорителя ЭГ-5 (серые точки)

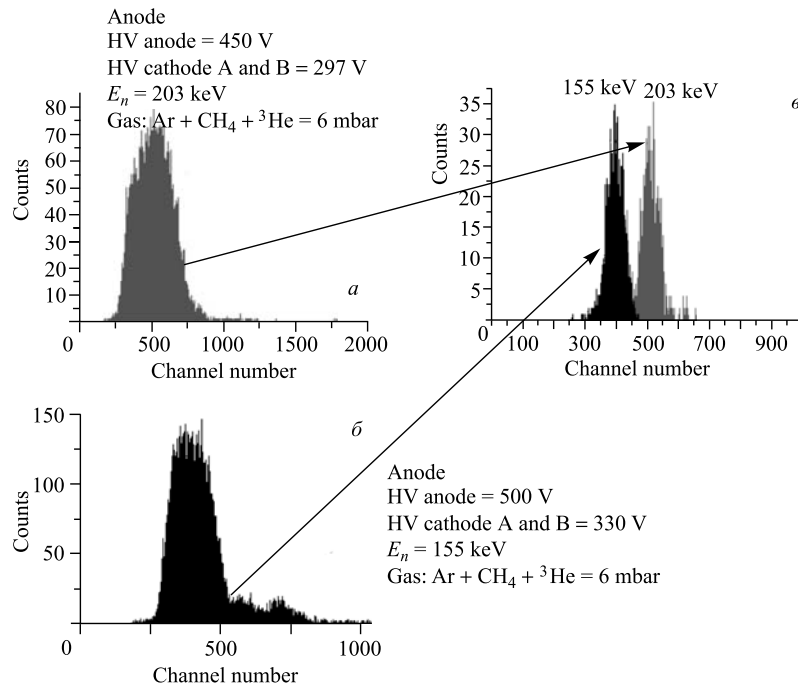


Рис. 12. Результаты измерений без программной обработки для энергий: *а)* 155 кэВ; *б)* 203 кэВ. *в)* Результаты после обработки для энергий 155 и 203 кэВ

тельного потенциала на катодные трубки  $U_{k0}$ , величина которого определяется путем подбора.

Добавление небольшого количества <sup>3</sup>He в газовую смесь позволяет экспериментально измерить два исключительно важных параметра протонного телескопа.

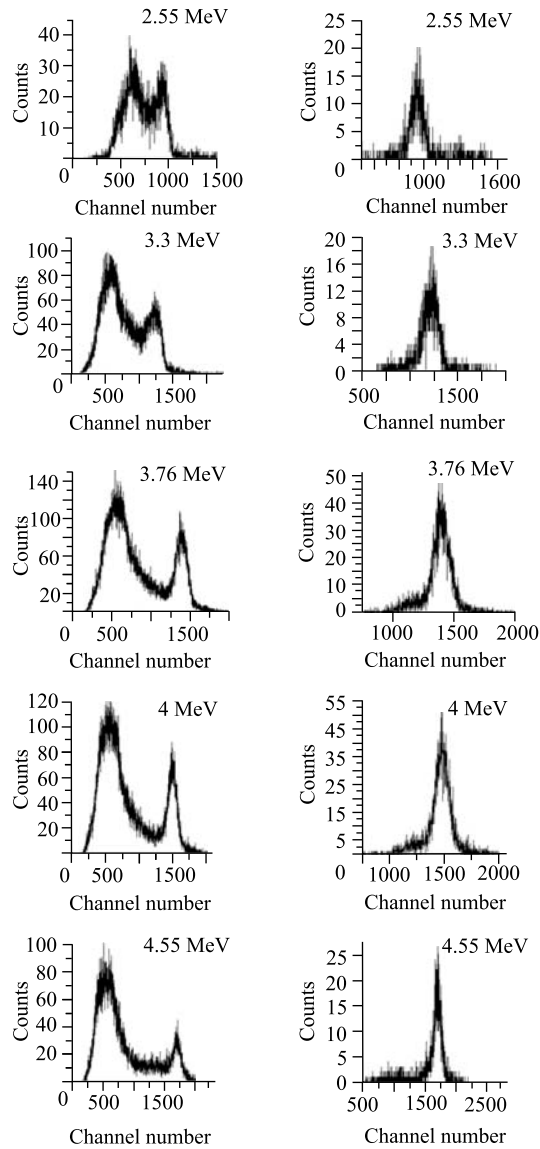


Рис. 13. Часть спектров до и после сортировки в интервале от 2,55 до 4,55 МэВ (реакция  $D(d, n) {}^3\text{He}$ ). Газовая смесь 900 мбар  $\text{CH}_4$  + 5 мбар  ${}^3\text{He}$

1. С помощью стандартного  ${}^{252}\text{Cf}$ -источника нейтронов и полиэтиленового блока-замедлителя было измерено собственное энергетическое разрешение детектора, которое составило  $\sim 1,5\%$  (FWHM). Полученные результаты представлены на рис. 10.

2. Пик полного поглощения энергии протонов и тритонов в объеме детектора позволяет проводить энергетическую калибровку с высокой точностью вплоть до 1 МэВ энергии протонов отдачи. Возможно также использовать пики вылета протона (574 кэВ) и тритона (190 кэВ) для калибровки телескопа, при низких энергиях нейтронного потока.

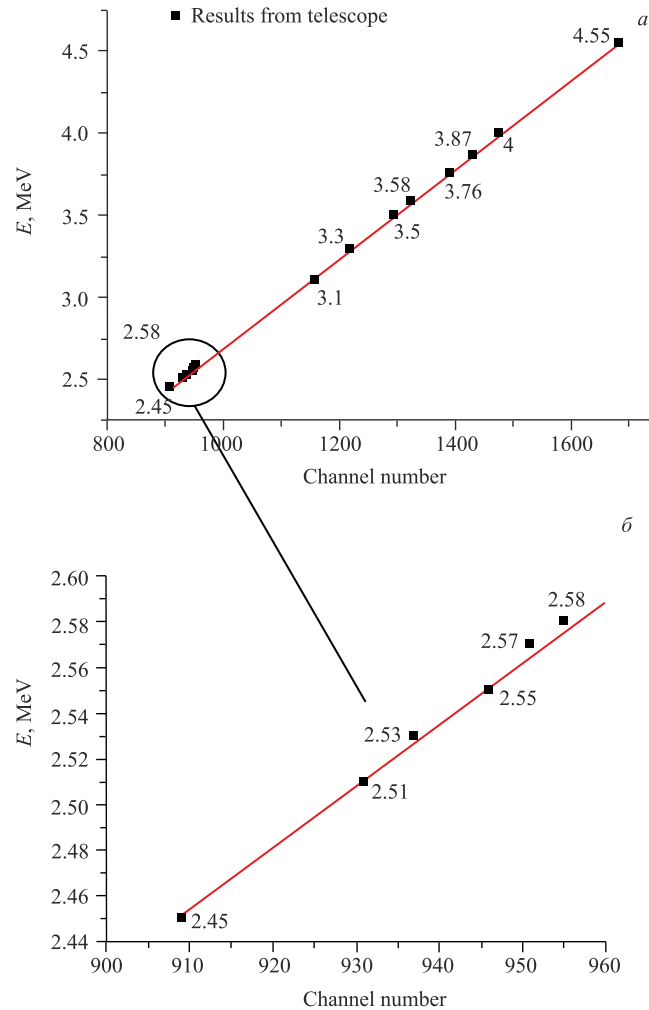


Рис. 14. Зависимость канал–энергия для измеренных 14 точек (энергий) из реакции  $D(d, n)^3\text{He}$  в интервале от 2,45 до 4,55 МэВ. Газовая смесь 900 мбар  $\text{CH}_4$  + 5 мбар  $^3\text{He}$

На электростатическом генераторе ЭГ-5 ЛНФ была проведена серия измерений моноэнергетических потоков нейтронов, которые были получены в результате реакций  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$  и  $D(d, n)^3\text{He}$ .

На рис. 11, *a* представлены спектры от моноэнергетических нейтронов с энергиями от 388 до 982 кэВ, полученные от тонкой  $^7\text{Li}$ -мишени после программной обработки. Исходя из этих результатов была оценена толщина мишени — около 30 кэВ. В измерениях использовалась газовая смесь 35 мбар  $\text{CH}_4$  + 4,9 мбар  $\text{Ar}$  + 10 мбар  $^3\text{He}$ . На рис. 11, *b* приведен результат сравнения экспериментальных данных о спектрах нейтронов в соответствии с калибровкой детектора (черные точки) с данными об энергиях протонного пучка от ускорителя ЭГ-5 (серые точки). Расхождения в области низких энергий в основ-

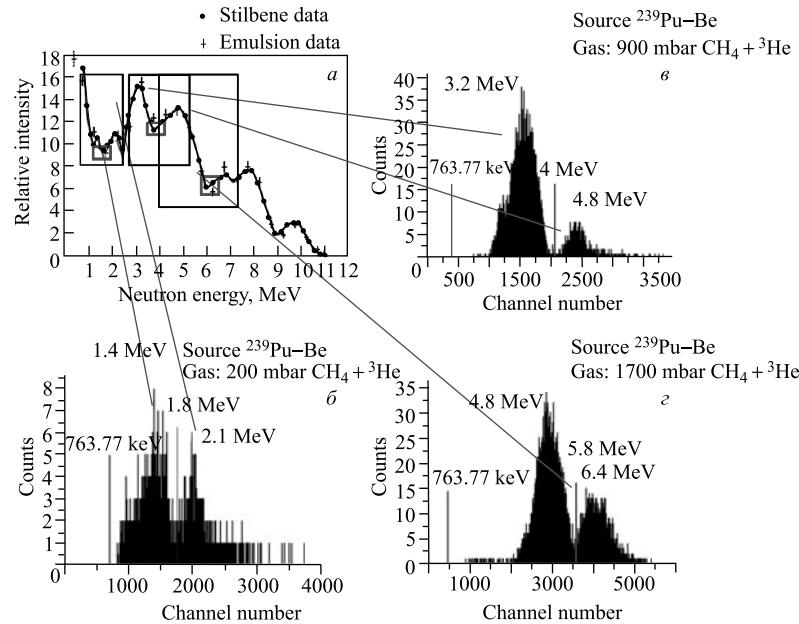


Рис. 15. а) Результаты энергетического распределения нейтронного потока, которые были получены сцинтилляционными стильбеновыми детекторами и методом фотоэмульсий [6]. б–г) Данные, полученные с помощью протонного телескопа: б) интервалов энергий 1,4–2,1 МэВ; в) интервалов энергий 3,2–4,8 МэВ; г) интервалов энергий 4,8–6,4 МэВ

ном обусловлены заметно более нелинейными энергетическими потерями протонов в толщине литиевой мишени. Эти расхождения также включают разброс энергий пучка протонов после поворотного магнита, стабильность поля которого определялась измеряемой частотой парамагнитного резонанса водородного датчика. Стандартное отклонение точек от прямой не превышает 4 %.

С помощью  ${}^7\text{Li}$ -мишени были проведены измерения в низкоэнергетической области спектра нейтронов и была оценена нижняя граница спектрометра. Результаты измерений без программной обработки для энергий 155 и 203 кэВ показаны на рис. 12, а, б. На рис. 12, в представлены эти результаты после обработки.

Энергетическое разрешение спектрометра, по данным эксперимента, находится в пределах 7–12 %. Этот широкий интервал определяется прежде всего эффектом «страглинга» — отклонения треков протонов отдачи от начального направления, особенно в конце пробегов. Это приводит к значительным потерям энергий на так называемом стеночном эффекте (попадание протонов отдачи на стенки и конструкционные материалы). Страглинг в сочетании с нелинейностью величины  $dE/dx$  для протонов в процессе их замедления сильно затрудняет выбор интервала интегрирования спектров во второй трубке. Этот факт требует применения матричного способа набора и обработки информации. С другой стороны, электронная коллимация позволяет приблизить (особо для моноэнергетических потоков) разрешающую способность спектрометра к его собственной.

Проведена серия экспериментов с помощью газовой дейтериевой мишени, целью которых было расширение энергетического диапазона измерений — измерены 14 точек в

интервале от 2,45 до 4,55 МэВ. В измерениях использовалась газовая смесь 900 мбар  $\text{CH}_4$  + 5 мбар  $^3\text{He}$ . Часть спектров до и после сортировки показана на рис. 13. Энергетическое разрешение находится в границах 8–12 %. На рис. 14 показана зависимость канал–энергия для измеренных 14 точек, наблюдается хорошая линейная зависимость энергии от номера канала амплитудного анализатора. Стандартное отклонение точек от прямой не превышает 3 %.

Было проведено измерение источника нейтронов  $^{239}\text{Pu}\text{--Be}$  с известным спектром. Восстановлена часть этого спектра. На рис. 15, *a* представлены данные энергетического распределения нейтронного потока, которые были получены сцинтилляционными стильбеновыми детекторами и методом фотоэмульсий [6]. На рис. 15, *б–г* представлены результаты для трех интервалов энергий (1,4–2,1 МэВ; 3,2–4,8 МэВ и 4,8–6,4 МэВ), которые были получены с помощью описываемого протонного телескопа.

В начале каждого спектра отмечена линией энергия полного поглощения от реакции  $^3\text{He}(n, p)\text{T} + 762,77$  кэВ, с помощью которой спектры калиброваны. Эти измерения показывают существенный недостаток прибора — маленький динамический диапазон по энергии ( $E_{\text{max}}/E_{\text{min}} = 2$ ).

## 6. ВЫВОДЫ

В представленной работе описаны конструкция спектрометра и используемая электроника. Рассмотрены принцип действия и применение метода электронной коллимации.

Для исследования характеристик детектора (эффективный телесный угол и зависимость разрешающей способности от толщины газовой мишени) проведено моделирование процессов в детекторе, результаты представлены на рис. 6, *a*, сравнение с экспериментальными данными показано на рис. 6, *б*. Наблюдается ухудшение разрешения с увеличением толщины газового слоя мишени.

Эффективность детектора, вычисленная для рабочего газа  $\text{CH}_4$  при давлении 35 мбар и энергии нейтронов 1 МэВ,  $4 \cdot 10^{-6}$ . Следует иметь в виду, что эта величина является функцией от давления газа, от выбранной степени электронной коллимации, от геометрических параметров телескопа. Формула (7) до известной степени дает возможность оценить этот параметр.

Для проверки работоспособности прибора зарегистрированы спектры с первого и второго катодов (электродов), выполнено измерение с использованием альфа-источника, подтвердившее линейную энергетическую зависимость амплитуды импульсов от выделенной энергии в рабочем газе и абсолютную независимость работы каждого из катодов. Полученные результаты являются полностью удовлетворительными.

Проведена настройка прибора, и с помощью компенсационного потенциала, подаваемого на катоды, показано, что энергетическое разрешение не изменяется. Подходяще выбранный потенциал при условии наличия совпадения импульсов от протонов и тритонов от реакции  $^3\text{He}(n, p)\text{T}$  в обеих катодных трубках показал, что разрешение приблизительно равно 1,5 %.

Из проведенных измерений с моноэнергетическими нейтронами, источником которых являлась мишень  $^7\text{Li}$  на электростатическом генераторе ЭГ-5 ЛНФ, сделана калибровка в интервале 388–982 кэВ. Нижняя граница работы телескопа — 155 кэВ. Были сделаны измерения с использованием газовой дейтериевой мишени, область калибровки работы

ЭГ-5 была расширена до 4,55 МэВ. Энергетическое разрешение по быстрым нейтронам от мишени  ${}^7\text{Li}$  и газовой дейтериевой мишени находится в границах 7–12 %.

Верхняя граница измерений была дополнена до 6,4 МэВ за счет измерения с  ${}^{239}\text{Pu}$ –Be-источником.

Следует отметить, что перенаполнение детектора метаном было вызвано малым энергетическим интервалом работы и приходилось вести пересчеты пробегов протонов отдачи. Несмотря на это, можно сделать однозначный вывод, что разработанный спектрометр можно с успехом применять для измерений параметров квазимоноэнергетических нейтронных потоков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Keisuke Asai et al.* Neutron Spectrometer for DD/DT Burning Ratio Measurement in Fusion Experimental Reactor // Nucl. Sci. Tech. 2006. V. 43, No. 4. P. 320–324.
2. *Borst H.* Proportional Counter Telescopes for Fast Neutron Spectrometry // Nucl. Instr. Meth. 1980. V. 169. P. 69–75.
3. *Mizuho M.* A Gas Recoil Fast Neutron Spectrometer // Nucl. Instr. Meth. 1969. V. 75. P. 85–92.
4. *Mizuho M., Yamanaka T.* A Fast Neutron Spectrometer with Fast Coincidence Technique in Proportional Counters // Nucl. Instr. Meth. 1971. V. 91. P. 57–60.
5. <http://www.srim.org/#SRIM>
6. *Anderson M. E., Neff R. A.* Neutron Energy Spectra of Different Size  ${}^{239}\text{Pu}$ –Be( $\alpha, n$ ) Sources // Nucl. Instr. Meth. 1972. V. 99. P. 231–235.

Получено 1 декабря 2011 г.