

## МНОГОСЕКЦИОНЕН 2 $\pi$ -ДЕТЕКТОР НА ТОПЛИННИ НЕУТРОНИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИФРАКЦИЯТА НА МИКРООБРАЗЦИ В АКСИАЛНА ГЕОМЕТРИЯ

ВАСИЛ МИЛКОВ<sup>1,2</sup>, ЦВЕТАН ПАНТЕЛЕЕВ<sup>2</sup>, АНДРЕЙ БОГДЗЕЛ<sup>2</sup>,  
АЛЕКСАНДР БЕЛУШКИН<sup>2</sup>, СЕРГЕЙ КУЛИКОВ<sup>2</sup>, ВАЛЕРИЙ ЖУРАВЛЕВ<sup>2</sup>,  
ВАЛЕНТИН ПРИХОДЪКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Катедра „Ядрена техника и ядрена енергетика“  
Физически факултет, Софийски университет „Св. Климент Охридски“  
<sup>2</sup>ЛНФ „И. М. Франк“, ОИЯИ, Дубна, Русия

*Васил Милков, Цветан Пантелеев, Андрей Богдзел, Александр Белушкин, Сергей Куликов, Валерий Журавлев, Валентин Приходько.* МНОГОСЕКЦИОНЕН 2 $\pi$ -ДЕТЕКТОР НА ТОПЛИННИ НЕУТРОНИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИФРАКЦИЯТА НА МИКРООБРАЗЦИ В АКСИАЛНА ГЕОМЕТРИЯ

В Лабораторията по неутрона физика „И.М.Франк“ в ОИЯИ, Дубна, е създаден нов 2 $\pi$ -секционен детектор на топлинни неутрони за спектрометъра ДН-6 на реактора ИБР-2М. Принципът на действие на спектрометъра е основан на регистрация на разсеяни топлинни неутрони от микрообразци. Детекторът е разделен на 16 сектора, разположени в общ газов обем. Във всеки сектор е монтирана рамка с 6 анодни жици. Секциите и секторите са механично ограничени от стъклотекстолитови пластини с дебелина 1 mm, които изпълняват роля на катоди.

*Vasil Milkov, Tsvetan Pantelev, Andrey Bogdzel, Aleksandr Belushkin, Sergey Kulikov, Valery Zhuravlev, Valentin Prikhodko,* MULTISECTION 2 $\pi$ -DETECTOR OF THERMAL NEUTRONS FOR DIFFRACTION STUDIES ON MICROSAMPLES IN AXIAL GEOMETRY

A new 2 $\pi$ -sectional detector of thermal neutrons has been developed in the Frank Laboratory of Neutron Physics at the Dubna Joint Institute for Nuclear Research for DN-6 spectrometer at the IBR-2M nuclear reactor. The principle of operation of the spectrometer is based on registration of the scattered neutrons from microsamples. The detector is divided into 16 sectors, located in the

---

*За контакти:* Васил Милков, Катедра „Ядрена техника и ядрена енергетика“, Физически факултет, Софийски университет „Св. Климент Охридски“, бул. „Джеймс Баучър“ 5, София 1164, телефон: +359 2 8161 728; E-mail: milkov@phys.uni-sofia.bg

overall gas volume. A frame with six anode wires is placed in each sector. Sections and sectors are mechanically separated by laminated fabric plates with a thickness of 1 mm, which serve as cathodes.

**Keywords:** neutron spectrometer, proportional counter, neutron diffraction, microsamples  
**PACS numbers:** 29.40.Cs, 61.12.Ld

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

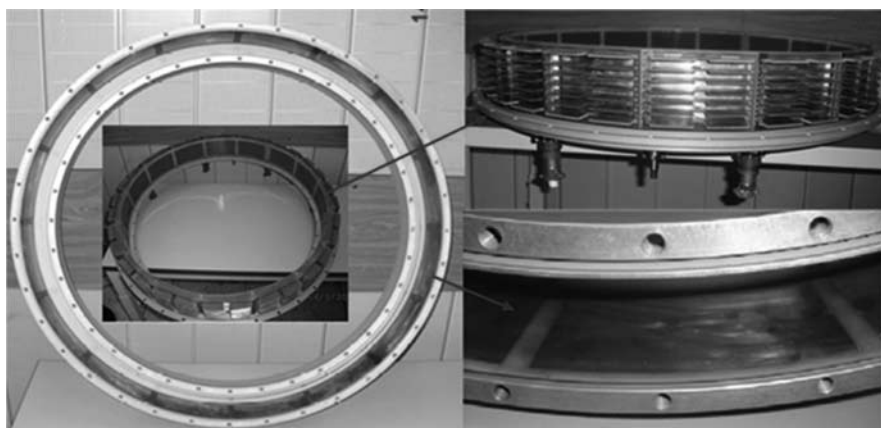
Един надежден експериментален метод за получаване на данни за структурата и динамиката на кристалната решетка на твърди вещества по отношение на външни влияния, като налягане и температура, е неутронната дифракция [1-3]. В сравнение с други методи, този метод има няколко важни предимства. Например неутронната дифракция ни дава възможност за изследване на структурата на кристали, съдържащи леки елементи (H, Li и др.), които в много случаи е трудно да се изследват с рентгеноструктурен анализ. Энергията на забавените неутрони е сравнима с тази на топлинното движение на атомите във веществото, което позволява непосредствено изучаване на динамиката на кристалната решетка. Други методи за изследване на твърди тела не са подходящи за тази цел. Също така неутроните имат магнитен момент, поради което те могат да бъдат използвани за изследване на магнитната структура на веществата и свързаните с нея динамични явления. Важен фактор по отношение на външните въздействия е високата проникваща способност на неутроните, което дава възможности за работа с камери под високо налягане и устройства за контролиране на температурата на образеца (криостати, печи).

Поради факта, че неутронните източници имат сравнително малка интензивност (неутронният поток върху образеца обикновено не надвишава  $F \sim 10^7$  n/cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>), за експериментите на неутронно разсейване се изискват сравнително големи количества от образеца ( $V \sim 1$  cm<sup>3</sup>). Изследванията на малки по обем образци за получаване на информация за структурата на нано-обекти, както и информация за техния размер, може да се извършат с помощта на описания тук  $2\pi$ -секционен детектор на топлинни неутрони, който е направен в ЛНФ на ОИЯИ, Дубна, и е предназначен за замяна на детекторната система ДН-6 на канал 6b на реактора ИБР-2М [5].

## 2. ОПИСАНИЕ НА ДЕТЕКТОРА

$2\pi$ -Секционният детектор е предназначен за изследване на взаимодействието на топлинни неутрони с твърдотелни образци в аксиална геометрия,

т.е. сноп забавени неутрони преминава през геометричния център на детектора, където е разположен образецът, и след взаимодействието си с образеца пада перпендикулярно върху детекторната равнина. Детекторът има пръстеновидна форма с вътрешен радиус 340 mm, външен радиус 380 mm и височина на цилиндъра 83 mm. Той е разделен на 16 еднакви сектора, всеки от които по образуващата на цилиндричния обем е разделен на шест отделни брояча, разположени в общ газов обем (работна газова смес: 80%  $^3\text{He}$  + 15% Ar + 5%  $\text{CO}_2$ ; работно газово налягане в интервала от 2–7 atm). Формата на броячите с доста добро приближение може да се счита за паралелепипед с дължина 123 mm, височина 40 mm и ширина 12 mm (фиг. 1).



**Фиг. 1.** 2π-Секционен детектор – вътрешен вид (16 сектора (рамки) с по 6 анодни жици на всяка рамка, разположени между две независими катодни повърхности)

Геометричните характеристики на 2π-детектора се определят от ъгловите данни, чрез които всеки брояч вижда центъра на пръстена. Връзката на пространствения ъгъл с азимуталната разделителна способност се определя от отношението на дължината на брояча към средната дължина на окръжността, на която той е разположен. Тъй като обиколката е много по-голяма от дължината на брояча, средният радиус  $R$  може да се разглежда като равен на половината от сумата от двата радиуса на пръстена:

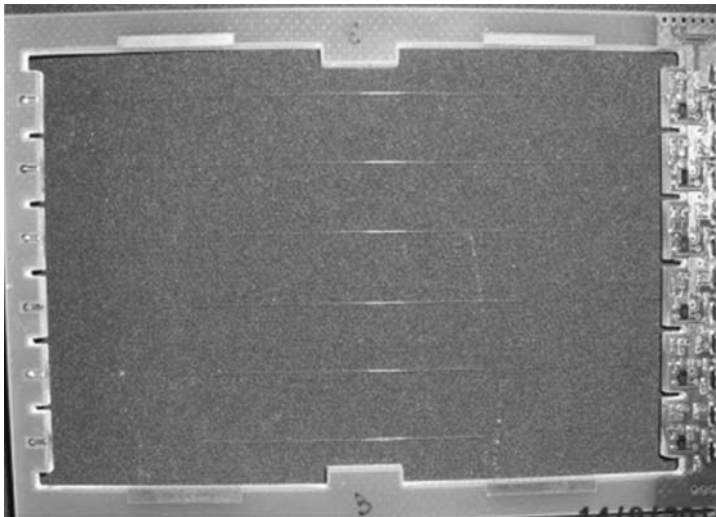
$$DW_f = 123 / (2\pi \cdot 360) = 0,054.$$

Освен ъгловата разделителна способност по азимутален ъгъл  $f$ , трябва също да се определи ъгловата разделителна способност по вертикално направление (ъгъл  $q$ ). Тъй като ширината на един брояч е много по-малка от радиуса на пръстена, то

$$DW_q = 12/(2\pi \cdot 360) = 0.0053.$$

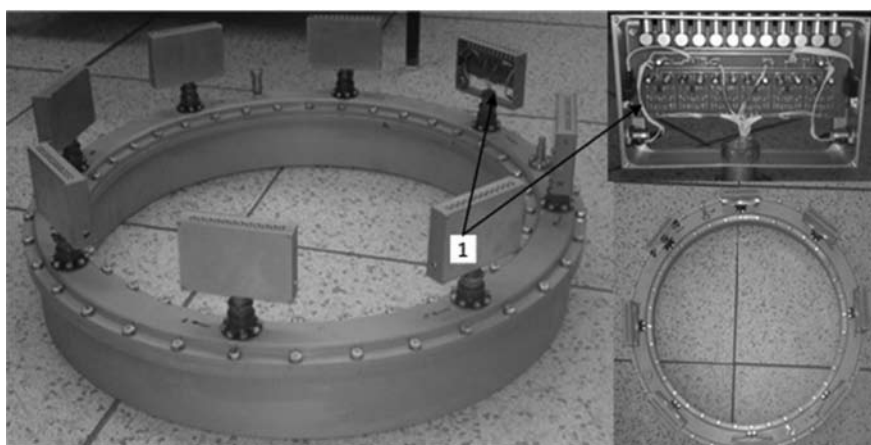
Във всеки сектор се намира рамка с 6 анодни електрода (жици от позлатен волфрам с диаметър 30  $\mu\text{m}$ ), показани на фиг. 2. Корпусът и капакът на детектора са направени от дуралуминий, марка АМГ, осигуряващ херметичност и механична здравина. Секциите и секторът са ограничени механично от стъклотекстолитови пластини (пръстени) с дебелина 5×1 mm (междинни) и 2×3 mm (крайни), играещи ролята на катода.

Сигналите от отделните секции (на брой общо 96 (16×6)) се свалят от анодните електроди, които са разположени централно във всяка отделна секция. Стъпката между анодните жици е 12 mm. Всеки анод е свързан със зарядочувствителен предусилвател (фиг. 2). Предусилвателите се намират вътре в газовия обем, в близост до анодните жици, което осигурява максимално разделяне по канали и намалява шума.



**Фиг. 2.** Рамка с 6 анодни електрода, всеки включен към предусилвател

Сигналите от предусилвателите от всеки две секции постъпват на изходните многоконтактни херметични конектори, към които са включени 12 канални (общо осем на брой) линейни усилватели, оформени в отделни дуралуминиеви кутии, които се прикрепват непосредствено към конекторите (фиг. 3). Сигналите от осемте групи усилватели се подават на 3 x 32 канални блок дискриминатори и впоследствие на събиращата електроника. Индивидуалното сваляне на информация от всяка секция осигурява необходимата гъвкавост при настройка на детектора.



**Фиг. 3.** 2π-Секционен детектор (16×6) на топлинни неутрони с монтирани 8 дванадесет- канални усилватели-формирователи (1), по един на всеки две рамки

Ефективността за регистрация на неутрон, падащ на  $1 \text{ cm}^2$  повърхност се определя от броя ядра  $^3\text{He}$  в обема на детектора, намиращи се непосредствено над тази площ.

Броят ядра  $^3\text{He}$  на  $1 \text{ cm}^2$  в детектора при налягане  $1 \text{ atm.}$  е  $N_n = 1.075 \cdot 10^{20}$  nuclei. За работно налягане  $3 \text{ atm.}$  на работен газ  $^3\text{He}$  броят ядра ще бъде  $N = 3,225 \cdot 10^{20}$  nuclei/  $\text{cm}^2$ .

Сечението за залавяне на топлинни неутрони е  $s = 5333 \text{ barn.}$

Вероятността за захващане на неутрон от ядро на  $^3\text{He}$  е равна на

$$W = 1 - \exp(-N \cdot s) = 1 - 0,176 = 0,824. \quad (1)$$

Основните характеристики на представения детектор са приведени в табл. 1.

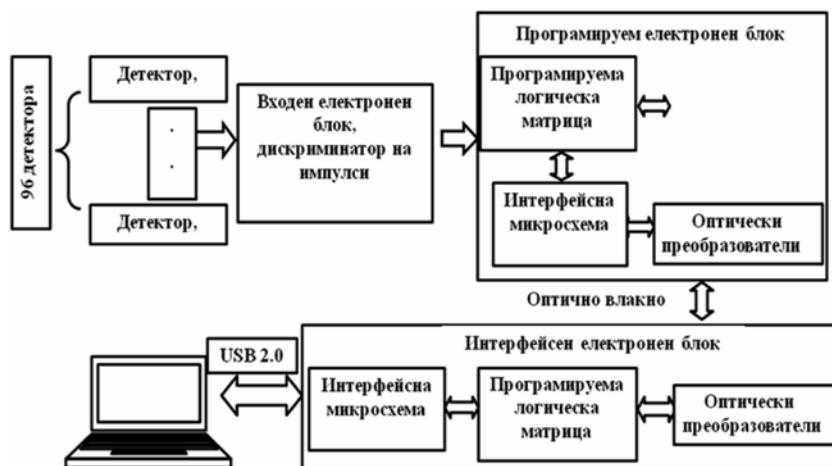
**Таблица 1.** Основни характеристики на 2π-секционния детектор на топлинни неутрони

Параметър	Стойност
Ширина на входния прозорец, mm	83
Количество анодни жици в секция	6
Ъгъл на припокриване, градуси	360°
Брой на секциите	16
Брой на измерителните канали	96
Ефективност, % ( $\lambda = 4 \text{ \AA}$ )	< 80%
Вътрешен радиус, mm	340
Външен радиус, mm	400
Дебелина на входния прозорец, mm	~7
Материал на корпуса	AMr7
Дебелина на чувствителния обем, mm	~40

### 3. ЕЛЕКТРОНИКА (СЪБИРАНЕ И СЪХРАНЕНИЕ НА ДАННИТЕ)

Разработената архитектура и електрическа схема на системата за събиране и съхраняване на данни от 2π-секционния детектор на топлинни неутрони е показана на фиг. 4 и има следните основни параметри:

- програмируема честотна временна модулация за сигналите (детекторни, старт на реактора и др.) – максимум 62,5 MHz;
- брой на детекторите – 96;
- максимална скорост на регистрация –  $5 \cdot 10^6$  n/s;
- интерфейс към PC – USB 2.0;
- вътрешна хистограмна памет на събирателния блок – 64 MB;
- максимално закъснение на регистрацията по отношение на реакторния старт – 0,268 s (програмируем, точността на временния канал е временен интервал – 16 ns); със същата точност се програмира ширината на канала в хистограмната памет и стойността на временния прозорец, при които се записват неутроните.



Фиг. 4. Принципна блок-схема на системата за събиране на данни от детектора

Събирането и натрупването на данни се осъществява с програмируем електронен блок, който приема сигнали от детекторите и осигурява тяхното преобразуване и предварителна обработка. Всички тези операции се извършват от подпрограми, „привързани“ в програмируемата логика на блока. Комплексът от подпрограми трябва да осигури работата на блока в два основни режима:

- а) натрупване на първични данни (записват се всички входящи събития от детекторите, извършва се междинно съхраняване в паметта на блока и се

прехвърлят към компютър за съхраняване на диск и последваща „off-line“ обработка);

б) натрупване на хистограми по метода на време на прелитане с програмируем брой временни канали и ширина на канала.

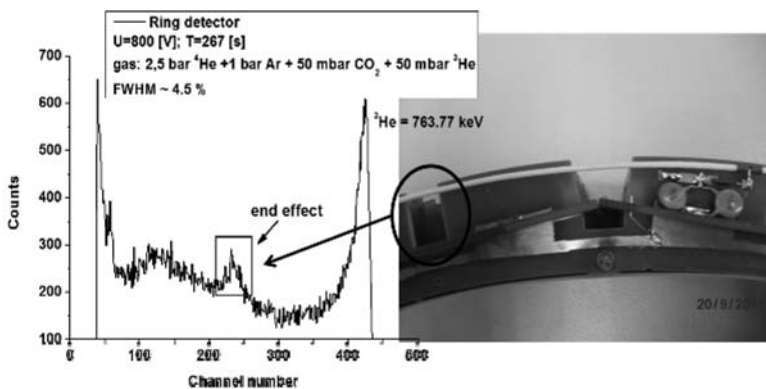
Могат да се използват и двата режима едновременно.

В електрониката има вграден тестов генератор, който имитира работата на системата за съхранение на данни, без да е необходимо включване на детекторните елементи. Това позволява да се проведе бърза проверка на работоспособността на регистриращата апаратура преди работната сесия, както и самостоятелно отстраняване на евентуални грешки.

Преносът на данни между събирателната електроника и USB интерфейса се осъществява чрез серийна оптична линия със скорост от 1,25 GB/s.

#### 4. ИЗПИТАНИЯ

За проверка на работоспособността на детектора и настройка на работните параметри са проведени изпитания с помощта на неутронен източник  $^{252}\text{Cf}$ . Записани са амплитудни спектри поотделно от всеки един от 96-те анода. На фиг. 5 е представен амплитуден спектър, записан с един от тези аноди от 2 $\pi$ -детектора.



**Фиг. 5.** Амплитуден спектър, записан с един от всичките 96 анода от 2 $\pi$ -детектора и краев ефект от централно разположения прорез на всички дискове от стъклотекстолит

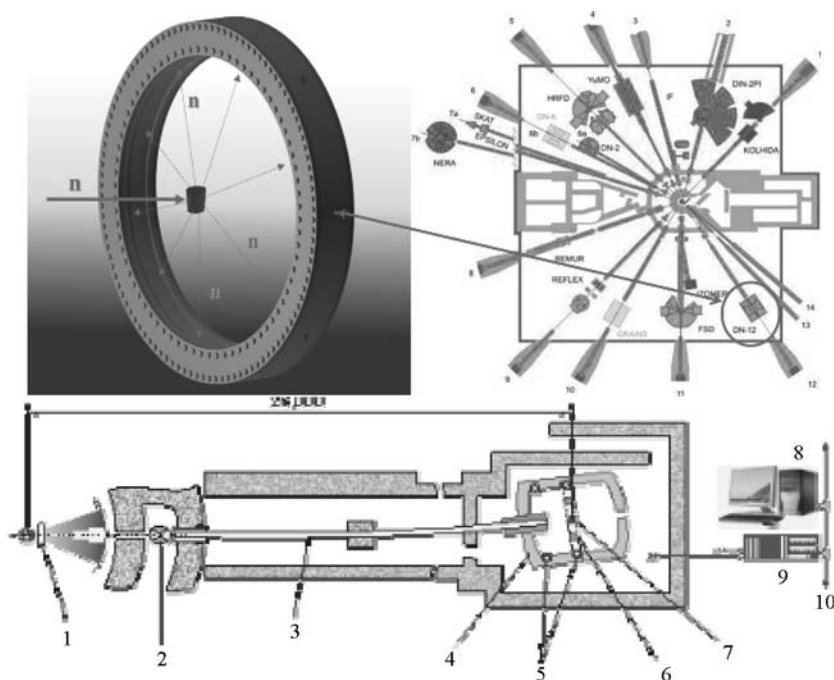
За пика на пълно поглъщане  $^3\text{He} = 763,77 \text{ keV}$  е получена разделителна способност по енергии около 5%. На спектъра се наблюдава краев ефект, дължащ се на централно разположения прорез (15×24 mm) на всичките дискове от стъклотекстолит (фиг. 5).

Предназначенията на тези прорези са две:

1. Евентуална замяна на 16-те сектора с 32 с по-малки размери.
2. За фиксиране на анодните рамки.

Важно е да се отбележи, че тези предназначения в дадения случай представляват конструкторска грешка, която, разбира се, е поправима (запояване на стъклотекстолитови двойнометализирани пластинки с размер на прорезите 15 mm x 15 mm, което ще доведе до изравняване на полето).

На канал № 12 на реактор ИБР-2М бяха проведени тестови измервания с два от 16-те сектора (сектори № 11 и № 12) и бяха получени 12 спектъра по метода на време на прелитане от цилиндричен образец  $Al_2O_3$  (диаметър 10 mm и височина 10 mm). На фиг. 6 е показана работната схема на канали на ИБР-2М и разположението на детектора на канал № 12.

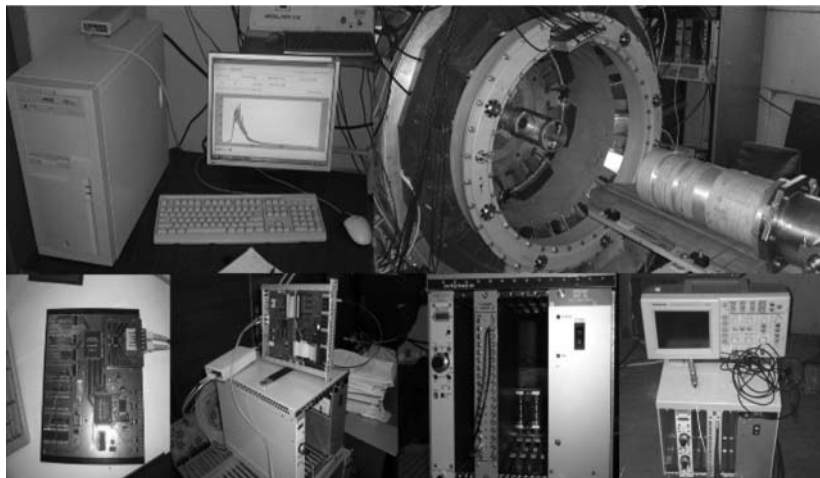


**Фиг. 6.** Работна позиция, схема на работните канали на ИБР-2М и разположение на детектора на канал №12 (1 – забавител, 2 – прекъсвач на неутронния сноп (чопер), 3 – неутроновод с огледално покритие, 4 – защита (отсъства), 5 – 2π-секционен детектор, 6 – филтър, 7 – образец, 8–10 – събиране и обработка информацията [5])

Измерванията бяха проведено при следните характеристики на измервателния тракт: ширина на временния канал 64  $\mu s$ , брой на каналите 1024 и временна задръжка по отношение старта на реактора – 0.625  $\mu s$ . Разстояние-

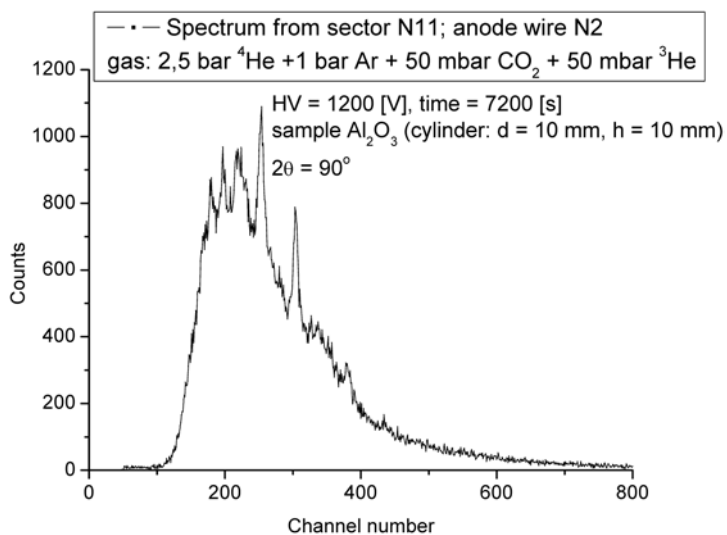


то между импулсите на реактора е фиксирана и е точно 200  $\mu$ s. На фигура 7 е показана експерименталната установка на канал №12 на реактор ИБР-2М с прилежащата към него система за събиране на данни от детектора.

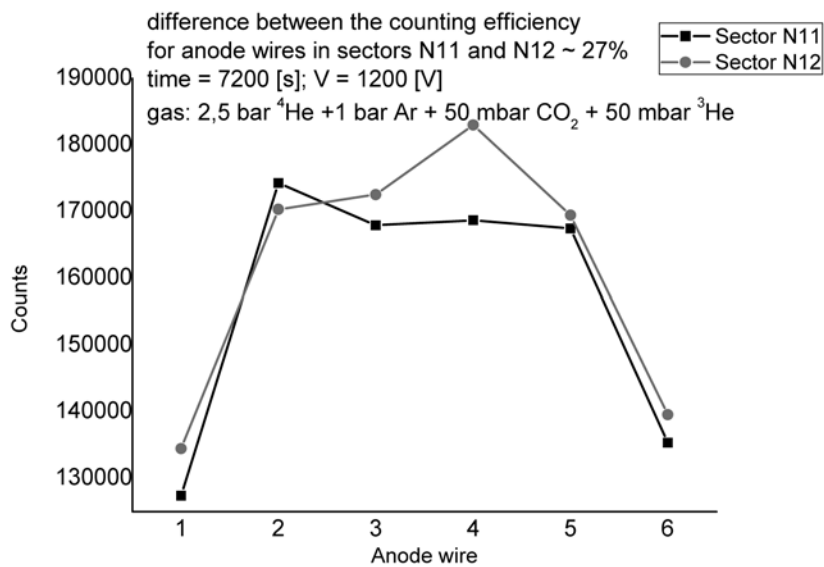


**Фиг. 7.** Експериментална установка на канал №12 на реактор ИБР-2М (работната позиция е показана на Фиг. 6); монтиран детектор с прилежащата към него част от системата (един 32 канален блок дискриминатор) за събиране на данни

Част от получените резултати са представени на фиг. 8 и 9. На фиг. 8 е показан спектър, получен със сектор №11, детектор №2 (анодна жица №2). Както беше споменато по-горе, изследваният образец е  $Al_2O_3$ . Важно е да се отбележи, че не е ползвана защита на детектора, което съответно води до висока подложка (фон). Също така количеството на  $^3He$  е 50 mbar, което е 1/60-та от реалното работно запълване (3 atm.  $^3He$ ) и съответно броячната ефективност е 60 пъти по-малка от реално необходимата (формула (1)). Що се отнася до броячната ефективност, на фиг. 9 са показани резултатите от сектори №11 и №12. Вижда се, че крайните детектори в двата сектора броят значително по-малко, като разликата в броячната ефективност достига до 27%. Най-простото решение на този проблем е въвеждането на нормировъчни коефициенти за всеки брояч. Пред-полагаемата причина за тези различия е същата довела до краевия ефект, споменат по-горе. Тъй като на катодите се подава отрицателен потенциал, а корпусът е на земя, възможно е при събирането на заряда част от него да отива към корпуса през прорезите, които се намират на стъклотексто-литовите рамки (фиг. 5). Възможно решение на този недостатък бе споменато по-горе.



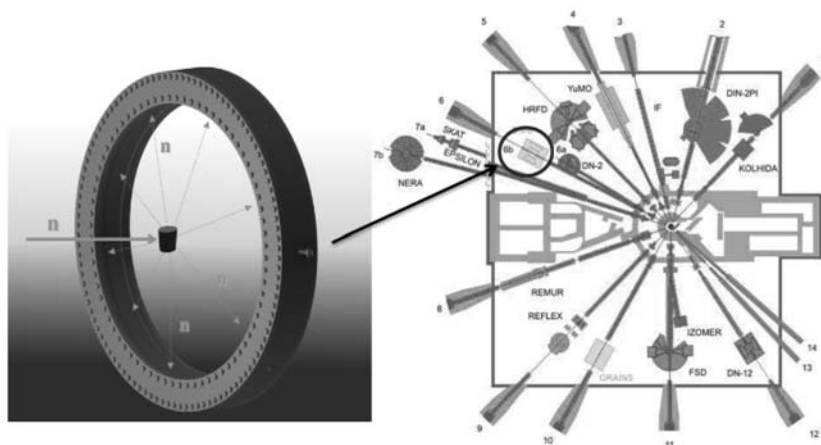
Фиг. 8. Спектър от сектор № 11 от образец  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (диаметър 10 mm и височина 10 mm)



Фиг. 9. Броячна ефективност за сектори №11 и №12

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представената работа е направено описание на конструкцията 2 $\pi$ -секционен детектор на топлинни неутрони за ДН-6 спектрометъра на реактор ИБР-2М. Принципът на действие на спектрометъра е основан на регистрацията на разсеяни топлинни неутрони от микрообразци. Представени са резултати, получени с помощта на източник  $^{252}\text{Cf}$ . Също така са показани тестови резултати, получени на канал №12 на реактор ИБР-2М. Благодарение на получените резултати са открити някои недостатъци в конструкцията на детектора, които са лесно преодолими и не представляват съществен проблем. Също така е важно да се отбележи, че получените резултати изцяло удовлетворяват нашите очаквания. В бъдеще предстои тестов пуск на детектора с всичките 16 секции на канал №12 на реактор ИБР-2М и следващ монтаж на канал № 6b (фиг. 10).



**Фиг. 10.** Работна позиция, схема на работните канали на ИБР-2М и разположение на детектора на канал №6b

Детекторът е направен в рамките на Протокол за сътрудничество № 3912-4-09/11 от 27.02.2009 и научна тема (№ 04-4-1075-2009/2011 «Перспективни разработки и създаване на оборудване за ИБР-2М спектрометри») между Института по ядрена физика (г. Ржеж, Чехия) и Лабораторията по неутронна физика на ОИЯИ, г. Дубна, Русия [43].

**Благодарности.** Искрени благодарности изказвам на доц. д-р Людмил Цанков, от катедра „Ядрена техника и ядрена енергетика“ на Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“, за оказаното съдействие при написването на тази статия и постоянния му интерес към провежданите изследвания.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Нозик, Ю. З., Р. П. Озеров, К. Хенниг Нейтроны и твердое тело (под ред. Р. П. Озерова), Т. 1. Структурная нейтронография. М., Атомиздат, 1978.
- [2] Уиндзор, К. Рассеяние нейтронов от импульсных источников. М., Энергоатомиздат, 1985.
- [3] Аксенов, В. Л., А. М. Балагуров. Времяпролетная нейтронная дифрактометрия. *УФН*, 1996, **166**, 9, 955.
- [4] <http://wwwinfo.jinr.ru/plan/ptp-2011/r141075.htm>
- [5] [http://flnp.jinr.ru/img/107/90\\_DN-6.pdf](http://flnp.jinr.ru/img/107/90_DN-6.pdf)