

## Двухкоординатный мониторный позиционно-чувствительный детектор тепловых нейтронов

© А.В. Белушкин, А.А. Богдзель, В.В. Журавлев, Ц.Ц. Пантелеев, Ли Ен Че,  
А.Н. Черников, А.В. Чураков, В.Н. Швецов

Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка  
Объединенный институт ядерных исследований,  
141980 Дубна, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 21 сентября 2006 г. В окончательной редакции 19 марта 2007 г.)

Создание новых высокопоточных источников нейтронов и оснащение их высокоэффективными спектрометрами вызывает необходимость разработки и создания специализированных „мониторных детекторов прямого пучка“. Отличительными особенностями этих детекторов являются крайне низкая эффективность и наименьшее ослабление падающего пучка нейтронов. Разработан и двухкоординатный позиционно-чувствительный мониторный детектор, предназначенный для измерения профиля нейтронных пучков в режиме реального времени как на стационарных, так и на импульсных источниках нейтронов. Основные параметры данного прибора: координатное разрешение  $4 \times 4 \text{ mm}^2$ ; чувствительная область  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ; эффективность регистрации  $10^{-2} - 10^{-6}$ .

Использование азота в качестве конвертора позволило получить рекордно низкую эффективность монитора, сохранив при этом требуемые параметры. В результате разработанный прибор может использоваться не только на высокопоточных нейтронных источниках, уже эксплуатирующихся в мире, но и на источниках следующего поколения, создаваемых в США (SNS) и Японии (JPARC).

PACS: 29.40.Cs

### Введение

Создание в мире новых высокопоточных источников нейтронов, как стационарных, так и импульсных, для исследований на выведенных нейтронных пучках и оснащение этих источников высокоэффективными спектрометрами вызывает необходимость разработки и создания специализированных детекторов нейтронов, удовлетворяющих целому ряду критериев. В частности, во многих экспериментах необходим непрерывный контроль пространственного распределения и интенсивности нейтронного потока с течением времени. В таких случаях детектор называют монитором. При этом вносимое монитором возмущение нейтронного потока должно быть минимальным, а измеряемые интенсивности достаточно высокими. Кроме того, к механической конструкции монитора также предъявляются особые требования, обусловленные особенностями систем транспортировки нейтронного пучка или геометрическими особенностями нейтронного спектрометра.

В данной работе описывается нейтронный позиционно-чувствительный монитор нейтронного пучка, разработанный в соответствии с техническими требованиями, подготовленными авторами совместно со специалистами Технического университета Мюнхена для работ на новом исследовательском реакторе FRM-II (Германия) [1].

### Описание конструкции монитора

Внешний вид монитора показан на рис. 1. Монитор представляет собой пропорциональную многопроволочную камеру низкого давления. Корпус изготовлен из

алюминиевого сплава Д16Т, его внешние габариты —  $320 \times 320 \times 23 \text{ mm}$ , толщина входного и выходного окон для нейтронного пучка  $1 \text{ mm}$ , размер чувствительной к нейтронам области  $100 \times 100 \text{ mm}$ . Тот факт, что габариты детектора существенно превышают размер чувствительной области, вызван требованиями к размеру детектора по направлению нейтронного пучка, а именно толщиной  $23 \text{ mm}$ , которая не позволяет в небольших габаритах разместить все необходимые внутренние элементы детектора. Толщина окон, с одной стороны, обеспечивает достаточную механическую прочность конструкции, а с другой, не приводит к значительным потерям проходящих через монитор нейтронов за счет рассеяния и захвата на окнах.



Рис. 1. 2D-монитор тепловых нейтронов.

В объеме камеры расположены две катодные и одна анодная плоскости. Расстояние между катодными плоскостями составляет 12 mm, анод расположен посередине между ними. Катоды и аноды представляют собой текстолитовые рамки с натянутыми тонкими позолоченными проволоками. Толщина анодных проволочек 10, катодных — 50  $\mu\text{m}$ . Анодные проволоки намотаны с шагом 2 mm и соединены общей шиной, катодные проволоки намотаны с шагом в 1 mm, объединены по две и выведены на линию задержки. Проволоки на верхней катодной плоскости расположены перпендикулярно проволокам нижней катодной плоскости. Линия задержки состоит из дискретных элементов с постоянными  $L = 145 \text{ nH}$  и  $C = 56 \text{ pF}$ , одно звено задерживает сигнал на 2.9 ns.

Высокое напряжение положительной полярности подается на анод через разъем MHV, для вывода сигналов служат 5 разъемов BNC. Монитор имеет 2 газовых разъема типа „Swagelock“ [2], что позволяет при необходимости обеспечить его работу в режиме протока газовой смеси через рабочий объем. Для регистрации нейтронов монитор заполнен смесью, состоящей из газа-конвертера нейтронов  $^3\text{He}$  и гасящего газа  $\text{CF}_4$ . При больших ( $> 10^5 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ) потоках в качестве конвертера нейтронов может использоваться чистый газ  $\text{N}_2$ .

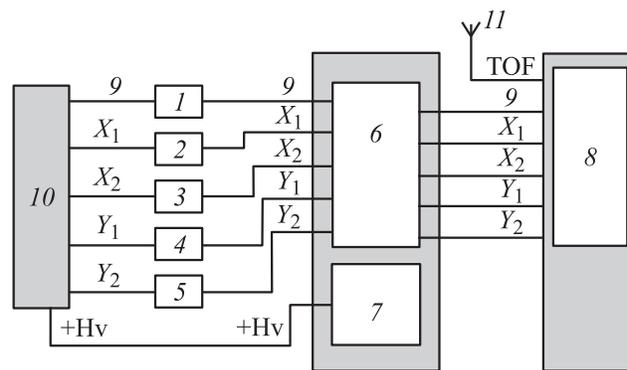
## Электроника

Принципиальная схема сбора сигналов с монитора показана на рис. 2. В состав электроники сбора данных входят следующие компоненты: крейт NIM с блоками дискриминатора со следящим порогом PS715 фирмы Philips Scientific и источником высокого напряжения NHQ 206L фирмы Iseg Spezialelektronik GmbH, персональный компьютер с платой обработки данных и 5 быстродействующих предусилителей, закрепленных на боковых стенках корпуса детектора.

Основные параметры предусилителей, адаптированных к сигналам с позиционно-чувствительного детектора:

- коэффициент усиления (сопротивление нагрузки 50  $\Omega$ )  $\sim 1250$ ;
- время нарастания выходного импульса  $\sim 20 \text{ ns}$ ;
- среднеквадратичный шум, приведенный к входу  $\sim 1.8\text{--}2.5 \mu\text{V}$ ;
- динамический диапазон выходного сигнала (сопротивление нагрузки 50  $\Omega$ )  $\sim +1.5\text{--} - 2.0 \text{ V}$ ;
- напряжение питания 12 V.

Сигналы с катодов ( $X_1, X_2, Y_1, Y_2$ ) и через разделительную емкость с анода поступают на соответствующие предусилители, затем на пятиканальный дискриминатор со следящим порогом PS715. От дискриминатора сигналы идут в персональный компьютер, на плату обработки данных с PCI-интерфейсом [3]. Также на PCI-плату поступает сигнал стартов от импульсного нейтронного



**Рис. 2.** Принципиальная схема электроники позиционно-чувствительного монитора: 1–5 — предусилители; 6 — дискриминатор со следящим порогом PS715; 7 — источник высокого напряжения NHQ 206L; крейт NIM; 8 — PCI-плата обработки данных персонального компьютера; 9 — анод; 10 — детектор; 11 — направление от реактора.

источника, по которому определяется энергия регистрируемых нейтронов при работе в режиме времени пролета.

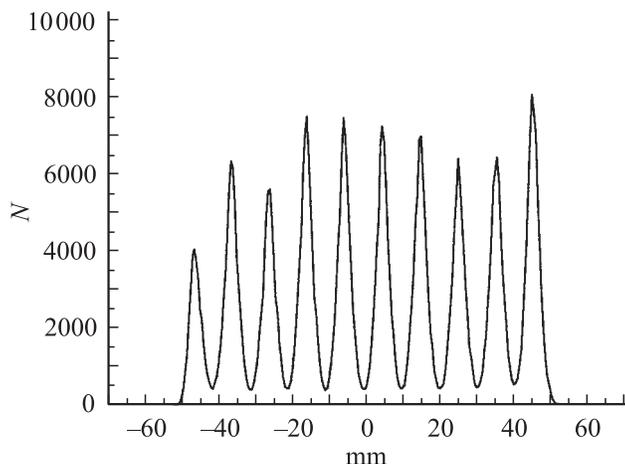
## Исследования параметров монитора на нейтронном пучке

Измерения характеристик детектора производились на реакторе ИБР-2 [4]. Были измерены координатное разрешение и однородность эффективности монитора по чувствительной области регистрации нейтронов.

Координатное разрешение измерялось следующим способом. Монитор, заполненный смесью 50 mbar  $^3\text{He}$  + 950 mbar  $\text{CF}_4$  с кадмиевой маской перед входным окном, помещался в прямой нейтронный пучок от реактора. Маска представляла собой кадмиевую пластину толщиной 1 mm с прорезанными в ней щелями шириной 0.5 mm. Расстояние между щелями — 10 mm. Полученные спектры суммировались вдоль оси  $Y$  для получения интегрального спектра по оси  $X$ . Результат представлен на рис. 3.

Разница в площадях пиков от отдельных щелей обусловлена погрешностью ширины щелей маски ( $0.5 \pm 0.2 \text{ mm}$ ). Наблюдаемые пики описывались распределением Гаусса, и определялась их ширина на полувысоте. При напряжении 2900 V максимальная дисперсия распределения составила 2.9 канала анализатора. Расстояние между пиками, равное 10 mm, составляло около 19.3 канала. Таким образом, полученное разрешение в центре детектора было не хуже чем 3.7 mm. Аналогичным образом измерялось координатное разрешение по оси  $Y$ , которое в центре детектора также было не хуже чем 3.7 mm.

Также была оценена дифференциальная неоднородность эффективности детектора при разных рабочих напряжениях. В этом случае монитор был выведен из

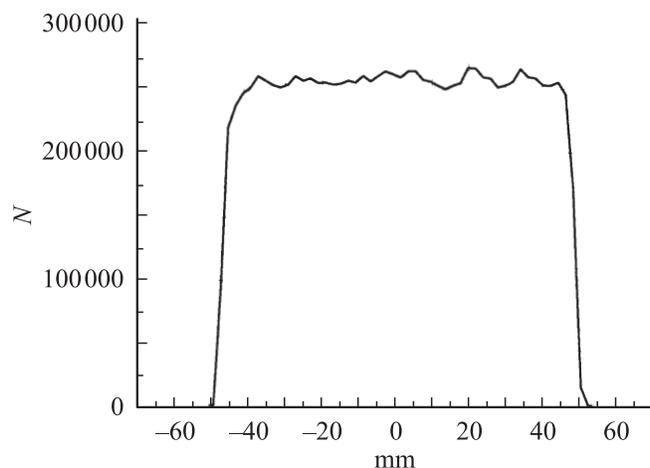
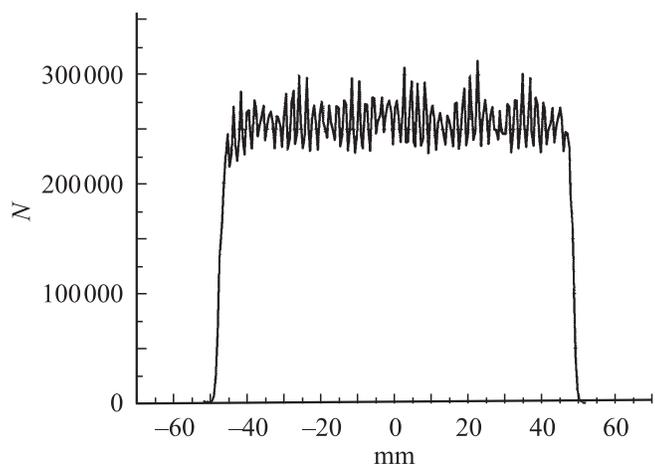
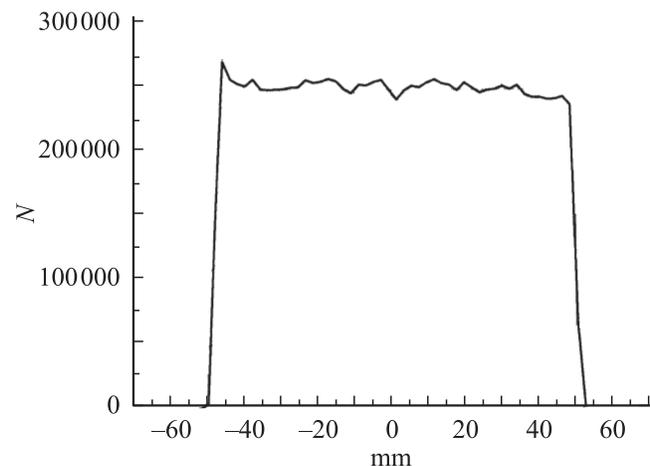
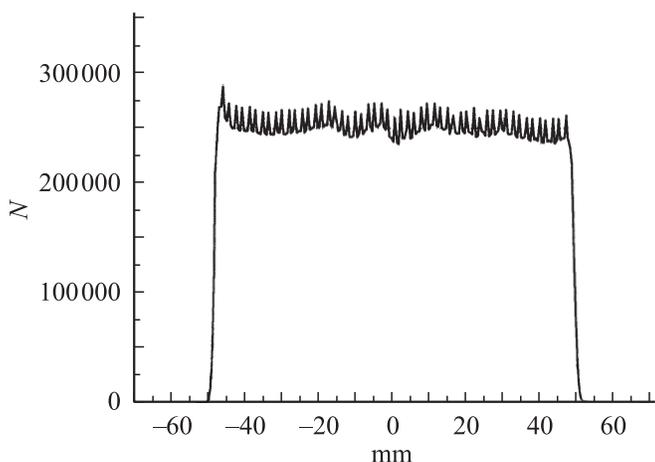


**Рис. 3.** Интегральный спектр по оси X, снятый с вертикальной щелевой маской (N — число событий). Газовая смесь 50 mbar <sup>3</sup>He + 950 mbar CF<sub>4</sub>. Напряжение +2800 V. Время измерения 1 h 16 min.

прямого пучка нейтронов и измерял спектр рассеянных нейтронов от парафинового блока, помещенного на пути прямого пучка. Для определения дифференциальной неоднородности использовалась следующая методика. Сначала выделялась чувствительная область детектора и вычислялось максимальное ( $N_{max}$ ), минимальное ( $N_{min}$ ) и среднее ( $N_{av}$ ) число отсчетов в каждом счетном канале по этой области. Значение дифференциальной неоднородности  $D_1$  определялось как отношение максимального отклонения от среднего во всей чувствительной области детектора

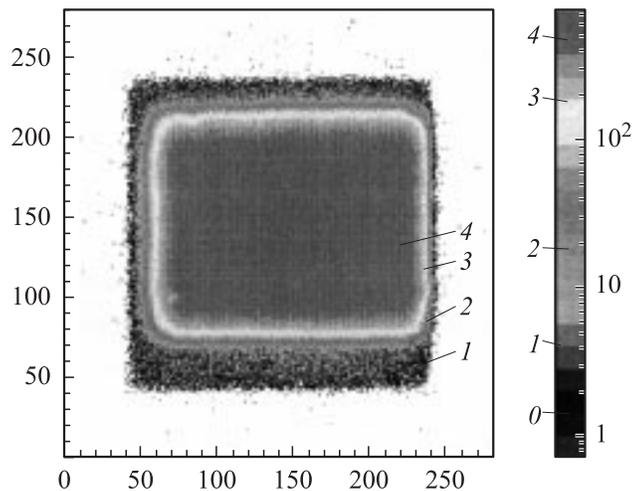
$$D_1 = \max((N_{max} - N_{av}), (N_{av} - N_{min}))/N_{av}.$$

На рис. 4 показаны интегральные спектры, измеренные по двум осям координат при равномерной засветке нейтронами входного окна. Видна значительная модуляция эффективности, особенно по оси Y, причины которой описаны в [5]. Эта модуляция является главной причиной пространственной неоднородности эффективности монитора.



**Рис. 4.** Равномерная засветка детектора в рассеянном нейтронном пучке. Интегральный спектр по оси X — слева, интегральный спектр по оси Y — справа. Напряжение +2850 V. Время измерения 1 h 35 min.

**Рис. 5.** Равномерная засветка детектора в рассеянном нейтронном пучке. Интегральный спектр по оси X — слева, интегральный спектр по оси Y — справа. Напряжение +2850 V. Цена деления канала увеличена в 4 раза. Время измерения 1 h 35 min.



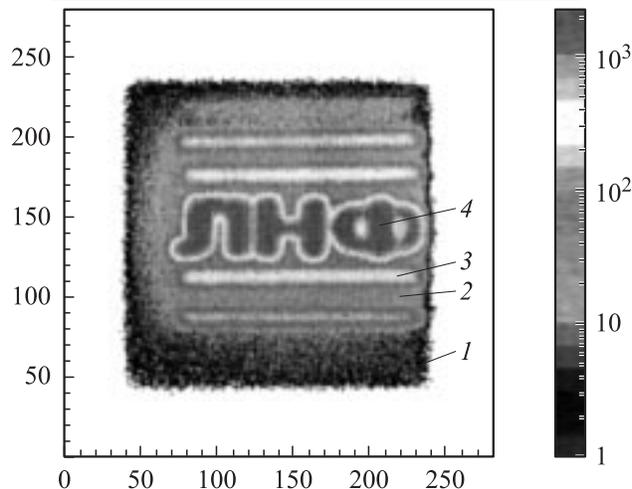
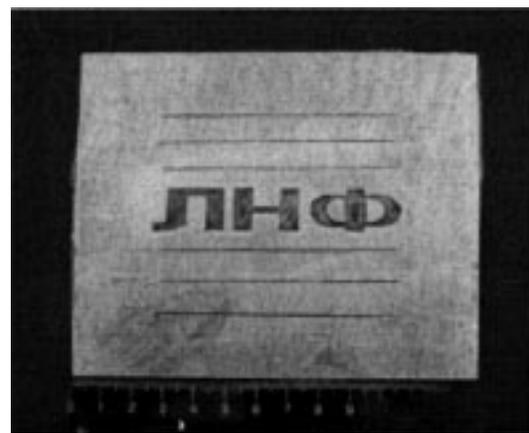
**Рис. 6.** Измерение профиля пучка N10 реактора ИБР-2. Газовая смесь 50 mbar  $^3\text{He}$  + 950 mbar  $\text{CF}_4$ . Напряжение на аноде +3300 V. Время измерения 15 min. Цена деления канала  $\sim 0.5$  min. 0 — область фиолетового свечения, 1 — синего, 2 — зеленого, 3 — желтого, 4 — красного.

Подбирая параметры электроники, цену деления канала и меняя напряжение на аноде, неоднородность по оси  $Y$  можно понизить до уровня менее 5%. Модуляции по оси  $X$  обусловлены стробоскопическими эффектами при переходе от аналогового сигнала к цифровому и могут быть практически убраны с помощью увеличения цены деления канала (рис. 5).

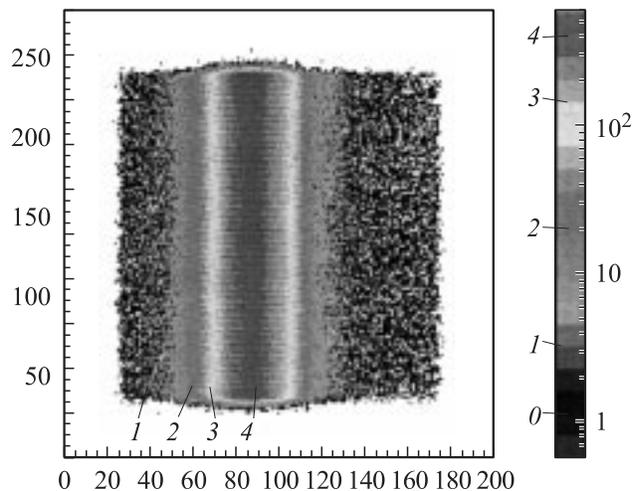
Типичный двухкоординатный спектр, полученный на 10-м пучке реактора ИБР-2, приведен на рис. 6. Средняя нагрузка детектора во время измерения составляла  $2 \cdot 10^5$  нейтронов в секунду. Нейтронный поток от реактора имел импульсный характер, однако нижнюю границу пиковой загрузки можно оценить следующим образом. Измеренная полуширина теплового пика времяпролетного спектра нейтронов составляет 12 ms. Частота импульсов реактора — 5 Hz, полная нагрузка детектора составляет  $2 \cdot 10^5$  n/s. Таким образом, пиковая нагрузка составляет не менее чем  $2 \cdot 10^5 / (5 \cdot 2 \cdot 12 \cdot 10^{-3}) \approx 1.7 \cdot 10^6$  n/s. При этом эффективность монитора составляла  $3 \cdot 10^{-2}$ .

Для визуальной оценки работы детектора на рис. 7 показана кадмиевая маска с аббревиатурой Лаборатории нейтронной физики и ее образ, полученный с помощью детектора.

Современные источники нейтронов предъявляют требования контроля нейтронных потоков с интенсивностью до  $10^8$  n/(cm $^2$ ·s). Такая высокая интенсивность вызывает перегрузку детектора с гелиевым конвертером, помещенного в прямой пучок. В таких случаях в качестве конвертера может использоваться  $\text{N}_2$ , сечение взаимодействия которого с тепловыми (1.8 Å) нейтронами составляет 1.9 b.



**Рис. 7.** Измерение засветки с кадмиевой маской „ЛНФ“. Газовая смесь 50 mbar  $^3\text{He}$  + 950 mbar  $\text{CF}_4$ . Напряжение на аноде +3300 V. Время измерения 15 min. Цена деления канала  $\sim 0.5$  mm. Обозначения, как на рис. 6.



**Рис. 8.** Измерение профиля пучка N6 реактора ИБР-2 (центральная часть). Газовая смесь 50 mbar  $^3\text{N}_2$  + 950 mbar  $\text{CF}_4$ . Напряжение на аноде +3400 V. Время измерения 14 h 28 min 48 s. Цена деления канала  $\sim 0.64$  mm. Обозначения, как на рис. 6.

## Параметры 2D ПЧД-монитора тепловых нейтронов

Тип детектора	Двумерный позиционно-чувствительный детектор низкой эффективности
Чувствительная область	$100 \times 100$ mm
Эффективность	$10^{-2} - 10^{-6}$ (для нейтронов с длиной волны $1 \text{ \AA}$ в зависимости от газовой смеси)
Координатное разрешение	$4 \times 4$ mm
Загрузка	До 100 kHz (максимальная скорость счета, выше которой просчеты из-за нарушения адресации, мертвого времени и насыщения электроники превышают 10% от истинной скорости счета)
Однородность каналов	Не хуже 20% (без суммирования) и 5% (с суммированием)
Ослабление падающего пучка	Меньше 5%
Материал корпуса	Алюминий Д16Т
Входное окно	Алюминий 1 mm
Рабочий газ	$^3\text{He}$ или $\text{N}_2 + \text{CF}_4$
Суммарное давление	1 atm
Предусилители:	
■ питание	12 V, 90 mA
■ полярность входного сигнала	Положительная или отрицательная, $Z_{\text{in}} = 50 \Omega$
■ полярность выходного сигнала	Отрицательная, $Z_{\text{out}} = 50 \Omega$
■ разъем	BNC
Высокое напряжение	До +3.5 kV
Разъемы	MNV, BNC
Анод	Диаметр $d = 10 \mu\text{m}$ , шаг 2 mm
Катод	Диаметр $d = 50 \mu\text{m}$ , шаг 1 mm

Характеристики детектора при заполнении 50 mbar  $^3\text{N}_2 + 950$  mbar  $\text{CF}_4$  были измерены на пучке реактора ИБР-2. При данном заполнении рабочее напряжение составляло +3400 V, координатное разрешение осталось практически неизменным. Эффективность монитора оценивается на уровне  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ . На рис. 8 приведен координатный спектр центральной части пучка.

## Результаты

Разработан и создан двухкоординатный позиционно-чувствительный монитор, предназначенный для измерения профиля нейтронных пучков в режиме реального времени как на стационарных, так и на импульсных источниках нейтронов. Конструктивные особенности монитора позволяют использовать его в самых разнообразных конфигурациях нейтронных спектрометров. Основные характеристики данного прибора приведены в таблице.

Использование азота в качестве конвертора позволило получить рекордно низкую эффективность монитора, сохранив при этом требуемые параметры по однородности эффективности и разрешающей способности. В результате разработанный прибор может использоваться не только на самых высокопоточных нейтронных источниках, уже эксплуатирующихся в мире, но и источниках следующего поколения, создаваемых в США (SNS) [6] и Японии (JPARC) [7].

Работа осуществлена при поддержке гранта РФФИ № 04-02-17-391, ВМВФ (Germany) и госконтракта Министерства образования и науки 02.452.12.7025.

В заключение авторский коллектив выражает благодарность докторам Ю. Нойхаусу и К. Зейтельхаку (ТУ, Мюнхен) за формулировку технических требований к монитору.

## Список литературы

- [1] <http://wwwnew.frm2.tum.de/>
- [2] <http://www.swagelok.com/>
- [3] *Levchanovski F.V., Gebauer B., Litvinenko E.I., Nikiforov A.S., Prikhodko V.I., Schulz Ch., Wilpert Th.* A PCI DAQ board for MWPC detectors with high-rate 2D-delay line position readout. NIM Section A. 2004. Vol. 529. P. 413–416.
- [4] <http://hfdn.jinr.ru/ibr-2/>
- [5] *Marmotti M., Burmester J., Haese-Seiller M., Kampmann R.* Two-dimensional position-sensitive detectors for high resolution diffraction with neutrons and high energy synchrotron radiation. NIM Section A. 2002. Vol. 477. P. 347–352.
- [6] <http://www.sns.gov/>
- [7] <http://j-parc.jp/index-e.html>