

УДК 539.1.074.8

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В НЭОКС ИБР-2 (обзор)

© 2022 г. А. В. Белушкин^{a,e,f}, А. А. Богдзель^a, В. И. Боднарчук^{a,b,e}, О. Даулбаев^{a,d}, В. В. Журавлев^a, А. К. Курилкин^a, С. А. Куликов^a, Е. И. Литвиненко^a, В. М. Милков^a, М. О. Петрова^{a,b,*}, В. И. Приходько^a, М. М. Подлесный^{a,c,**}, А. В. Чураков^a, В. В. Швецов^{a,b}

^a Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^b Государственный университет “Дубна”
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Университетская, 19

^c Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 141701, Долгопрудный Московской обл., Институтский переулок, 9

^d Институт ядерной физики
Казахстан, 050032, Алматы, ул. Ибрагимова, 1

^e Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

^f Казанский федеральный университет Институт физики
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18

*e-mail: mbelova@jinr.ru

**e-mail: podlesny@phystech.edu

Поступила в редакцию 03.03.2022 г.

После доработки 21.03.2022 г.

Принята к публикации 01.04.2022 г.

Одним из важнейших направлений деятельности НЭОКС ИБР-2 является развитие и создание детекторных технологий, на основе которых создаются детекторы для экспериментальных установок. В данной работе представлены детекторные системы, разработанные в НЭОКС ИБР-2 и успешно применяемые на исследовательских установках или готовящиеся к применению в обозримом будущем.

DOI: 10.31857/S0032816222050020

ВВЕДЕНИЕ

В 1977 г. в Объединенном институте ядерных исследований был произведен физический пуск пульсирующего реактора ИБР-2. С тех пор ИБР-2 является основной исследовательской установкой Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка и базовой установкой ОИЯИ. Номинальная мощность реактора составляет 2 МВт, а длительность импульса 320 мкс. Плотность потока тепловых нейтронов с поверхности теплового замедлителя составляет 10^{13} нейтронов/(см²·с). Реактор ИБР-2 имеет 14 исследовательских каналов для вывода нейтронных пучков, предназначенных для проведения исследований конденсированных сред и биологических систем методами рассеяния нейтронов. В каналах вывода формируются пучки нейтронов, которые направляются на специализированные установки, каждая из которых оборудо-

вана системой детектирования нейтронного излучения, адаптированной к методике измерений, применяемой на установке.

Поскольку нейтроны не имеют электрического заряда, то они не являются прямо ионизирующим излучением, в связи с чем для их регистрации применяются конвертерные материалы и регистрируются вторичные заряженные частицы, образованные в результате взаимодействия нейтронов и атомных ядер материала конвертера. Для повышения эффективности регистрации применяются материалы с большими сечениями захвата тепловых нейтронов, такие как ⁶Li, ¹⁰B, ³He, ¹⁵⁵Gd и ¹⁵⁷Gd.

Наиболее распространенными реакциями, используемыми в детекторах тепловых нейтронов, являются:

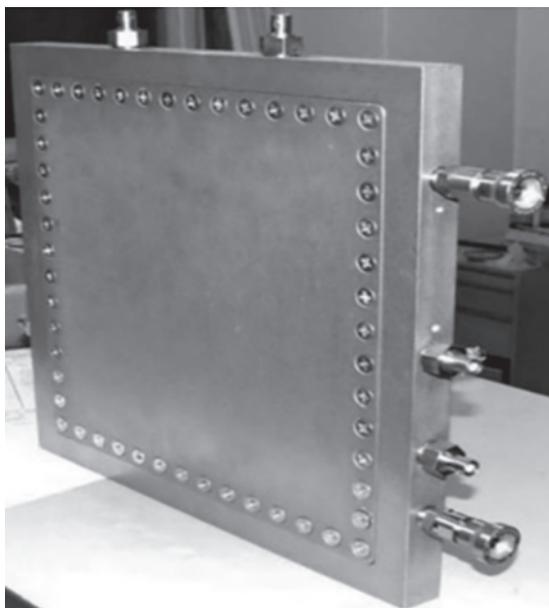
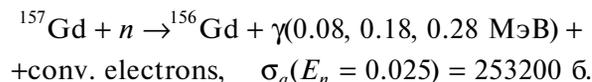
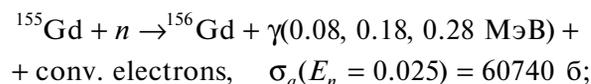
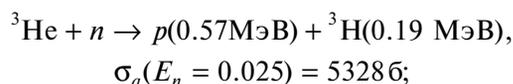
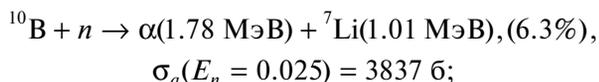
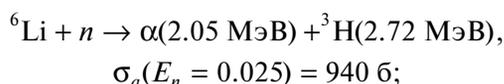


Рис. 1. Внешний вид двухкоординатного монитора тепловых нейтронов типа МПК с конвертером ^3He .



В настоящее время в Научно-экспериментальном отделе комплекса спектрометров (НЭОКС) ИБР-2 ОИЯИ освоены технологии изготовления детекторов двух типов: газовых на основе ^3He и твердотельных на основе ^6Li в составе сцинтилляционного (neutron detection – ND) экрана ($^6\text{LiF/ZnS(Ag)}$).

ДВУХКООРДИНАТНЫЙ МОНИТОРНЫЙ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

В НЭОКС ИБР-2 разработан и создан гелиевый двухкоординатный позиционно-чувствительный мониторный детектор типа многопроволочная пропорциональная камера (МПК) [1]. Основной задачей этого детектора является измерение профиля прямого пучка тепловых и холодных нейтронов для оценки качества работы формирующих устройств – коллиматоров. Так как плотность потока нейтронов в прямом пучке может достигать 10^{10} нейтронов/см²/с, то профилометры, как правило, обладают низкой эффективностью регистрации. В данном случае она составляет $\sim 5 \cdot 10^{-5}$, и эта цифра может изменяться в зависимости от состава газовой смеси. МПК может применяться как на стационарных, так и на импульсных источниках нейтронов. На рис. 1 показан внешний вид монитора.

МПК включает в себя систему из трех плоскостей: двух катодных, расположенных на расстоянии 12 мм друг от друга, и анодной плоскости,

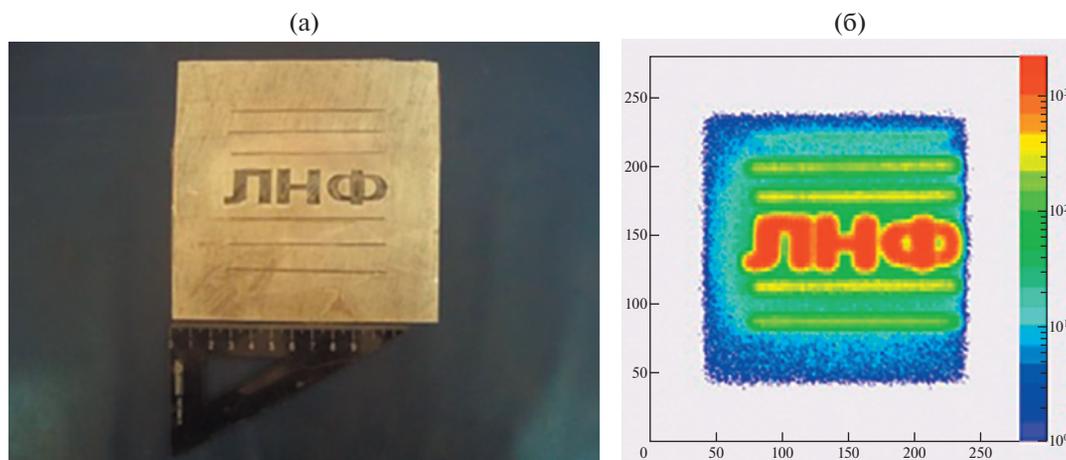


Рис. 2. а – кадмиевая маска с аббревиатурой Лаборатории нейтронной физики (ЛНФ); б – результат засветки детектора МПК в течение 15 мин на канале № 10 ИБР-2 с использованием этой маски.

расположенной между ними. Плоскости представляют собой текстолитовые рамки с натянутыми на них тонкими позолоченными проволоками. Проволоки на катодных плоскостях расположены перпендикулярно друг другу. Для определения координаты реализован метод линии задержки [2].

Для регистрации нейтронов используется рабочая газовая смесь, состоящая из конвертера нейтронов ^3He и гасящего газа CF_4 . Для использования монитора при высоких нагрузках ($>10^5$ нейтронов/см 2 /с) в качестве конвертера нейтронов может использоваться чистый азот N_2 .

На рис. 2 представлена кадмиевая маска (слева) и результат засветки детектора в течение 15 мин на канале № 10 ИБР-2 с использованием этой маски (справа). Состав газовой смеси 50 мбар ^3He + 950 мбар CF_4 . Напряжение на аноде 3.3 кВ. Время экспозиции составило 15 мин.

Пространственное разрешение детектора МПК составляет 2 мм вдоль оси X и 2.4 мм вдоль оси Y . Пространственная неоднородность при равномерной засветке детектора составила 15% по оси Y и 5% по оси X [2].

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ АСТРА

В НЭОКС ИБР-2 создан сцинтиляционный детектор АСТРА для фурье-стресс-дифрактометра (ФСД) на канале № 11а реактора ИБР-2 [3]. Детектор применяется для измерения остаточных напряжений в объемных образцах. Точность измерений таким детектором повышена благодаря квадратной форме сечения рассеивающего объема. Такая форма обеспечивается рассеянным и коллимированным падающим пучками, пересекающимися под углом 90° . Поэтому два плеча детектора размещены при углах рассеяния $2\theta = \pm 90^\circ$ (рис. 3).

Форма детектирующей поверхности обусловлена использованием метода временной фокуси-

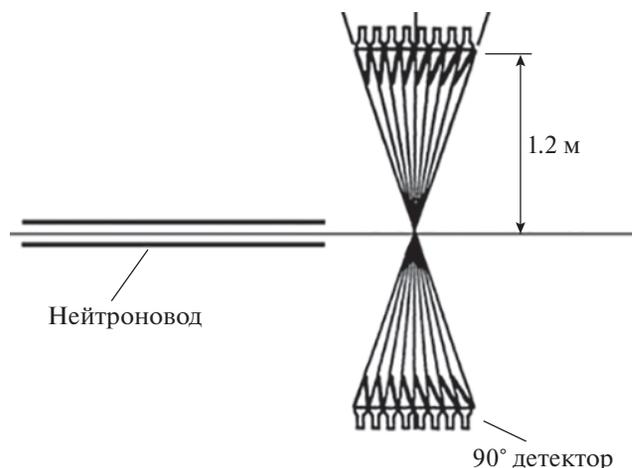


Рис. 3. Расположение плеч детекторной системы АСТРА относительно пучка на ФСД.

ровки. В данном случае нейтроны разных энергий, стартующие одновременно от фурье-прерывателя, после дифракции на одном и том же рассеивающем центре достигают детектирующей поверхности одновременно. Это позволяет определять структуру материала по времени регистрации нейтронов.

Каждое плечо детектора имеет 4 сектора. Каждому сектору соответствуют 4 отдельных нейтронных счетчика (рис. 4). Каждый счетчик включает в себя сцинтиляционный экран, спектросмещающие оптические волокна, покрывающие поверхность сцинтиллятора, ФЭУ, а также светоизолирующий корпус, защиту от нейтронного фона и узел крепления модуля к юстировочному устройству. Внутреннее устройство одного счетчика показано на рис. 5.

В качестве детектирующего материала был выбран сцинтиляционный ND-экран фирмы Applied Scintillation Technologies Ltd. [4] толщиной 0.42 мм. По данным производителя, эффектив-



Рис. 4. Форма и расположение детектирующих поверхностей (слева) и вид плеча регистрации (справа) детекторной системы АСТРА.

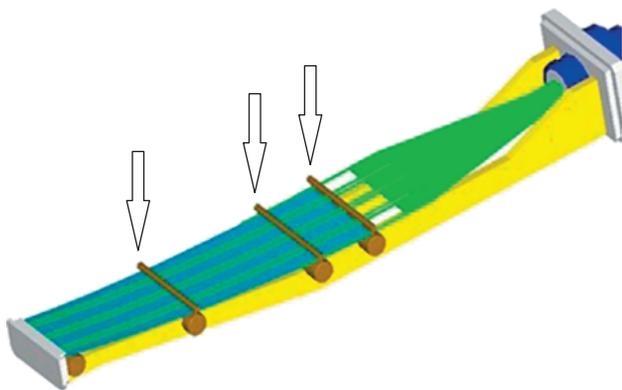


Рис. 5. Внутреннее устройство модуля детектора. Профиль поверхности экрана может быть изменен с помощью четырех цилиндрических опор (показаны стрелками), положение которых регулируется при сборке модуля.

ность поглощения тепловых нейтронов ND-экраном при нормальном падении составляет 32% для длины волны нейтрона 1.8 \AA , а чувствительность к γ -квантам – 10^{-6} . В детекторе АСТРА поверхность регистрации расположена под углом к рассеянному пучку нейтронов, что увеличивает эффективную толщину ND-экрана и, соответственно, эффективность поглощения до 72%. Прозрачность ND-экрана к собственному излучению невысока, поэтому повышение эффективности регистрации было достигнуто с помощью двухстороннего светосбора.

При изготовлении счетчика использовались спектросмещающие волокна марки VCF91A про-

изводства фирмы VICRON с диаметром 1 мм. В качестве фотоумножителя был выбран ФЭУ фирмы PHOTONIS марки XP2262B. Светоизолирующий корпус объединен с защитой от нейтронного фона, в качестве материала защиты используется карбид бора. Полностью собранный счетчик показан на рис. 6.

Результаты измерений времяпролетных спектров, измеренных на дифрактометре ФСД (канал № 11а реактора ИБР-2) представлены на рис. 7.

В конце 2024 года произойдет плановая замена детектора АСТРА на детектор АСТРА-М.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ АСТРА-М

Применение новых методик сборки позволило создать детектор, имеющий ряд преимуществ перед детектором АСТРА:

- значительное увеличение апертуры при углах рассеяния $2\theta = \pm 90^\circ$, а также значительное уменьшение мертвых зон детектора;
- новая система формирования поверхностей ND-экранов для временной фокусировки;
- унификация нейтронных счетчиков, упрощающая процесс создания и обслуживания детектора;
- новая система позиционирования счетчиков, упрощающая процесс юстировки детектора.

Конструкционные особенности детектора АСТРА-М позволяют значительно сократить требуемые для его изготовления материальные и трудовые ресурсы, а также упрощают его сборку и

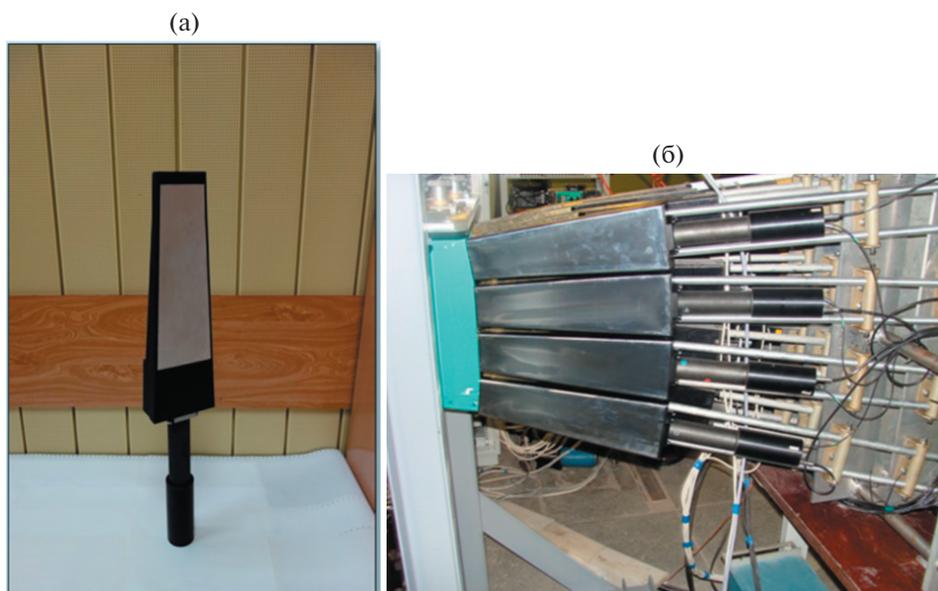


Рис. 6. а – собранный сцинтилляционный счетчик детектора АСТРА; б – вид счетчиков в составе дифрактометра ФСД.

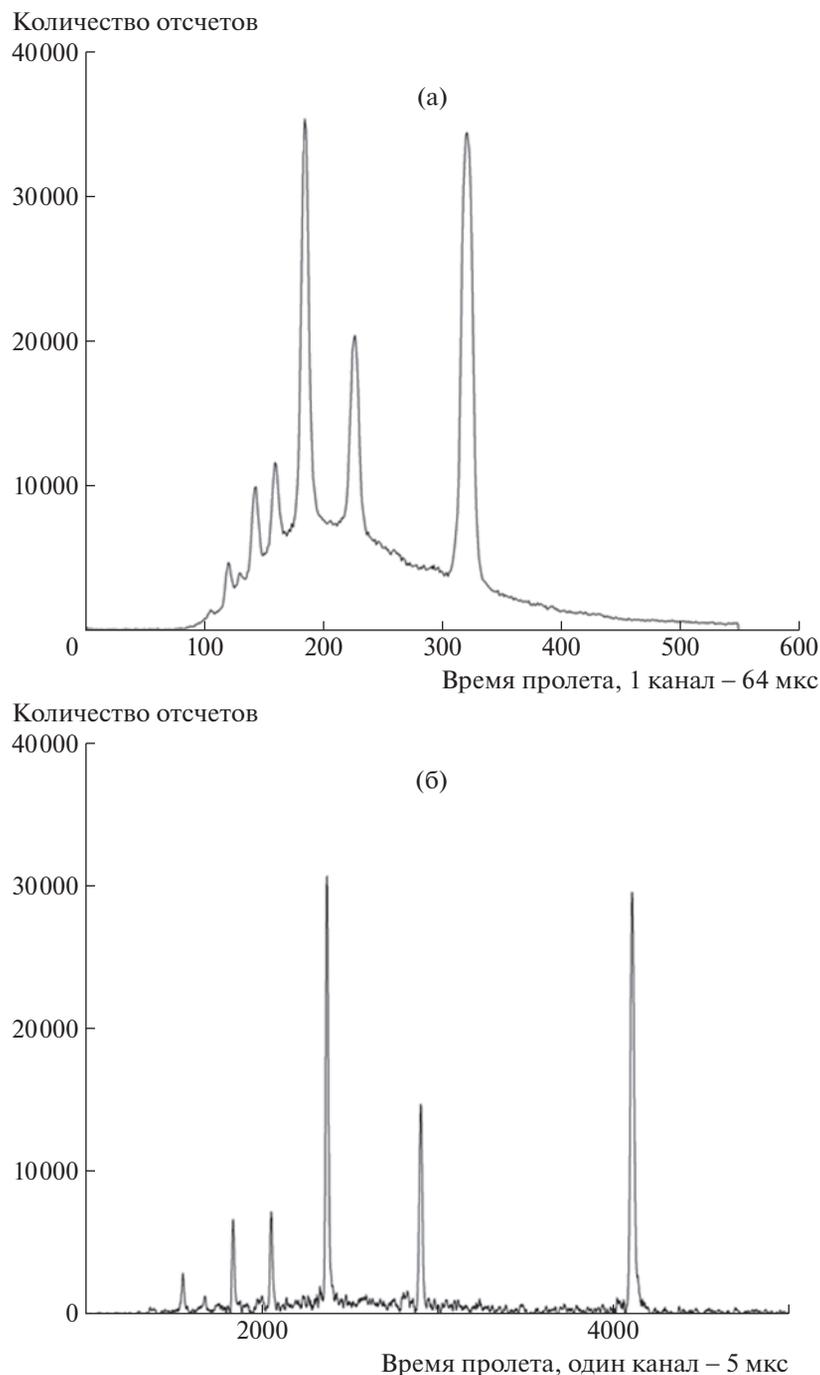


Рис. 7. Времяпролетные спектры: **а** – низкого (64 мкс) и **б** – высокого (5 мкс) временного разрешения электроники сцинтилляционных счетчиков.

эксплуатацию. АСТРА-М будет располагаться на месте своего предшественника АСТРА под углами $2\theta = \pm 90^\circ$ относительно образца. Схематично изображение детекторной системы представлено на рис. 8.

Детектор АСТРА-М имеет новую унифицированную конструкцию счетчиков с современными ФЭУ (R3998-100-02 [5]) и более точную систему юстировки.

В данной модификации 8 элементов, плотно примыкающих друг к другу и образующих одну поверхность временной фокусировки, объединены в один счетчик. Спектрсмещающие оптические волокна со всех восьми экранов собираются на один фотоэлектронный умножитель. Все сцинтилляционные экраны размещены на подложке из карбида бора и эпоксидной смолы и окружены светоизолирующим корпусом.

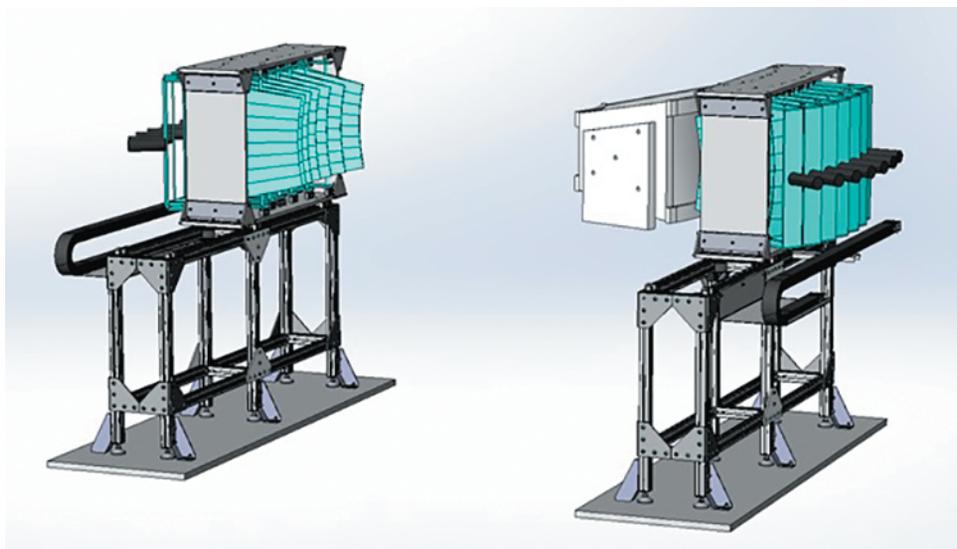


Рис. 8. Схема детектора АСТРА-М.

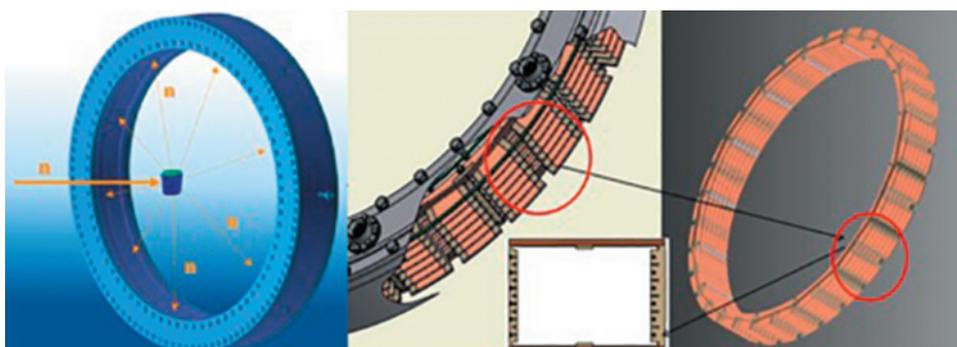


Рис. 9. Схема многосекционного кольцевого газового детектора.

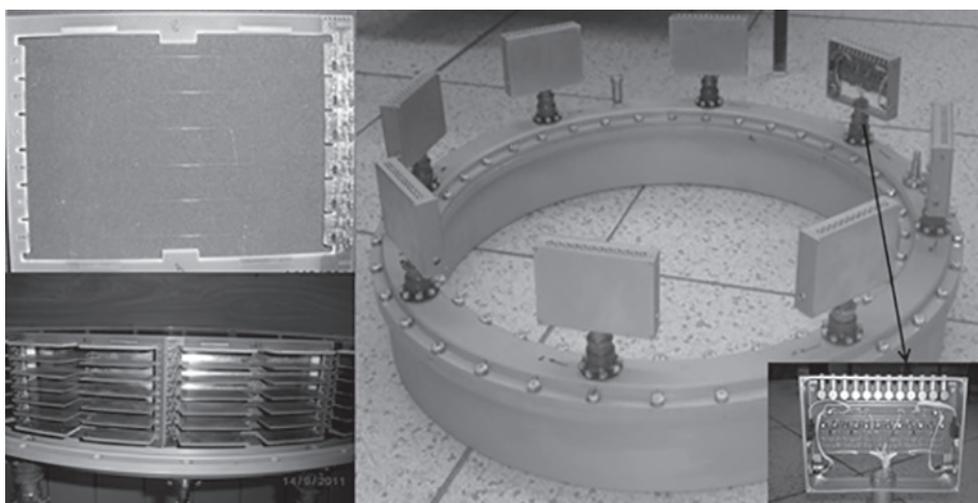


Рис. 10. Фотографии корпуса (справа), внутренней части детектора (слева внизу), рамки с анодными проволочками (слева сверху) и усилителя-формирователя (вставка справа).

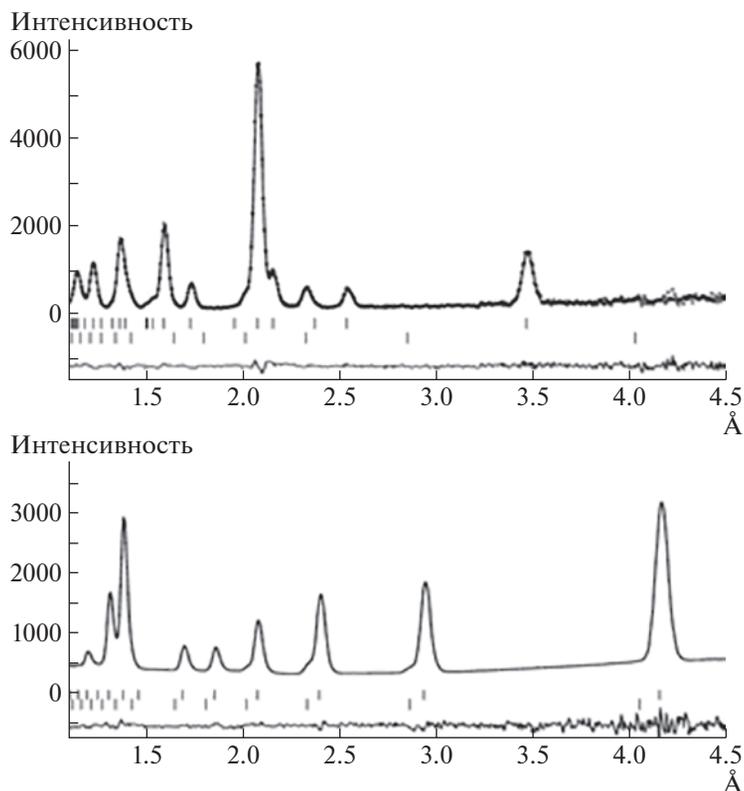


Рис. 11. Измеренные многосекционным кольцевым детектором времяпролетные спектры Al_2O_3 (вверху) и LaB_6 (внизу).

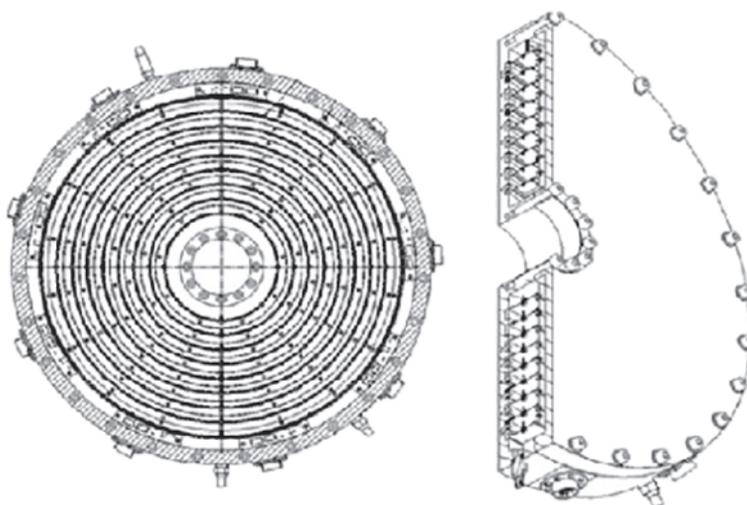


Рис. 12. Схема кольцевого двухкоординатного газового детектора для регистрации малоуглового рассеяния тепловых нейтронов.

Каждое из двух плеч детектора АСТРА-М содержит 7 независимых счетчиков с отдельным выводом электронного сигнала.

Аналоговая электроника детектора включает в себя многоканальный усилитель-формирователь и амплитудный дискриминатор, сигналы с кото-

рого подаются на систему сбора и накопления данных МРД-32 [6]. Система накопления регистрирует для 14-ти счетчиков детектора независимые времяпролетные спектры, которые впоследствии обрабатываются в единый времяпролетный спектр для данного образца.

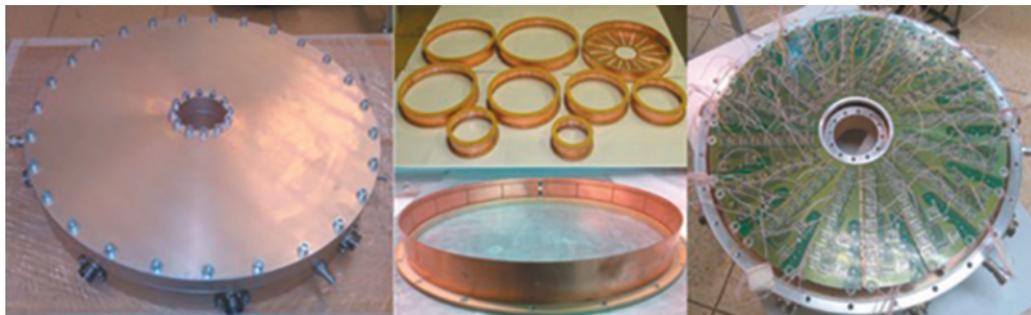


Рис. 13. Фотографии кольцевого двухкоординатного газового детектора для измерения малоуглового рассеяния тепловых нейтронов (слева), его электродной системы (в центре) и предусилителей (справа).

МНОГОСЕКЦИОННЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ ДЕТЕКТОР ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИФРАКЦИИ В АКСИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Многосекционный кольцевой детектор тепловых нейтронов работает на дифрактометре ДРВ (дифракция в реальном времени, канал ба реактора ИБР-2) для регистрации обратно рассеянных нейтронов [7]. Телесный угол, охватываемый детектором, составляет $\Delta\Omega_f = 5.184$ ср.

Формула Вульфа–Брегга связывает межплоскостное расстояние с длиной волны падающего излучения и углом рассеяния. Длина волны определяется по времени пролета нейтрона, поэтому для определения размеров фракции или межплоскостного расстояния достаточно измерить только угол рассеяния нейтрона. Схема кольцевого газового детектора представлена на рис. 9. Детекторное кольцо разделено на 16 секторов, расположенных в общем газовом объеме.

Каждый сектор детектора состоит из рамки с шестью анодными проволочками, которые разграничены миллиметровыми текстолитовыми пластинами, служащими катодами. Общее количество независимых детектирующих элементов в газовом кольце 96. Форма одного детекторного элемента представляет собой параллелепипед с размерами $123 \times 40 \times 12$ мм. Телесный угол детекторного элемента составляет $\Delta\Omega_f = 0.054$ ср в положении образца, представленном на рис. 9, а угловое соотношение ширины отдельного элемента к расстоянию его до центра кольца составляет $\Delta\Omega_q = 0.005$ ср.

Для оптимизации измерений и снижения уровня электронных шумов предусилители детекторных элементов расположены внутри газового объема на рамке с анодными нитями. На рис. 10 представлены фотографии корпуса, внутренней части детектора и рамки с анодными проволочками и предусилителями. Сигналы с предусилителей от двух парных секций поступают на многоконтактные выходные разъемы, к которым

подключаются 12-канальные усилители-формирователи, закрепленные непосредственно на корпусе детектора. Для улучшения фоновых условий был спроектирован и изготовлен защитный кожух из борированного полиэтилена.

На рис. 11 показаны времяпролетные спектры, измеренные на кольцевом детекторе с использованием газовой смеси 4 бар ^3He + 500 мбар Ar + 30 мбар CO_2 . В качестве образцов взяты оксид алюминия Al_2O_3 и борид лантана LaB_6 . Время экспозиции составило 12 мин.

ДУХКООРДИНАТНЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ ДЕТЕКТОР МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

Для проведения экспериментов по малоугловому рассеянию нейтронов в НЭОКС ЛНФ был разработан и собран двухкоординатный кольцевой детектор (рис. 12, 13) [8]. В его основе лежит схема одномерного позиционно-чувствительного кольцевого детектора тепловых нейтронов, описанная в [9].

Данный детектор подходит для исследований структурных параметров кристаллических решеток, биологических объектов и кинематики различных физико-химических процессов. Также он может применяться для измерения осевой и угловой анизотропии пучка тепловых нейтронов, рассеянных после дифракции на образце. Основная идея заключается в том, что детектор измеряет рассеянный пучок под несколькими дискретными углами, определяемыми положениями колец. Детектор разделен на 9 колец с общей осью, расположенных друг относительно друга на одинаковом расстоянии с шагом 12 мм.

Каждое кольцо изготовлено из изоляционного материала – стеклотекстолита, фольгированного медью, что позволяет определять угол рассеяния нейтронов. Медь, выступающая в роли проводника, на поверхности стеклотекстолита разделена на 16 электрически изолированных друг от

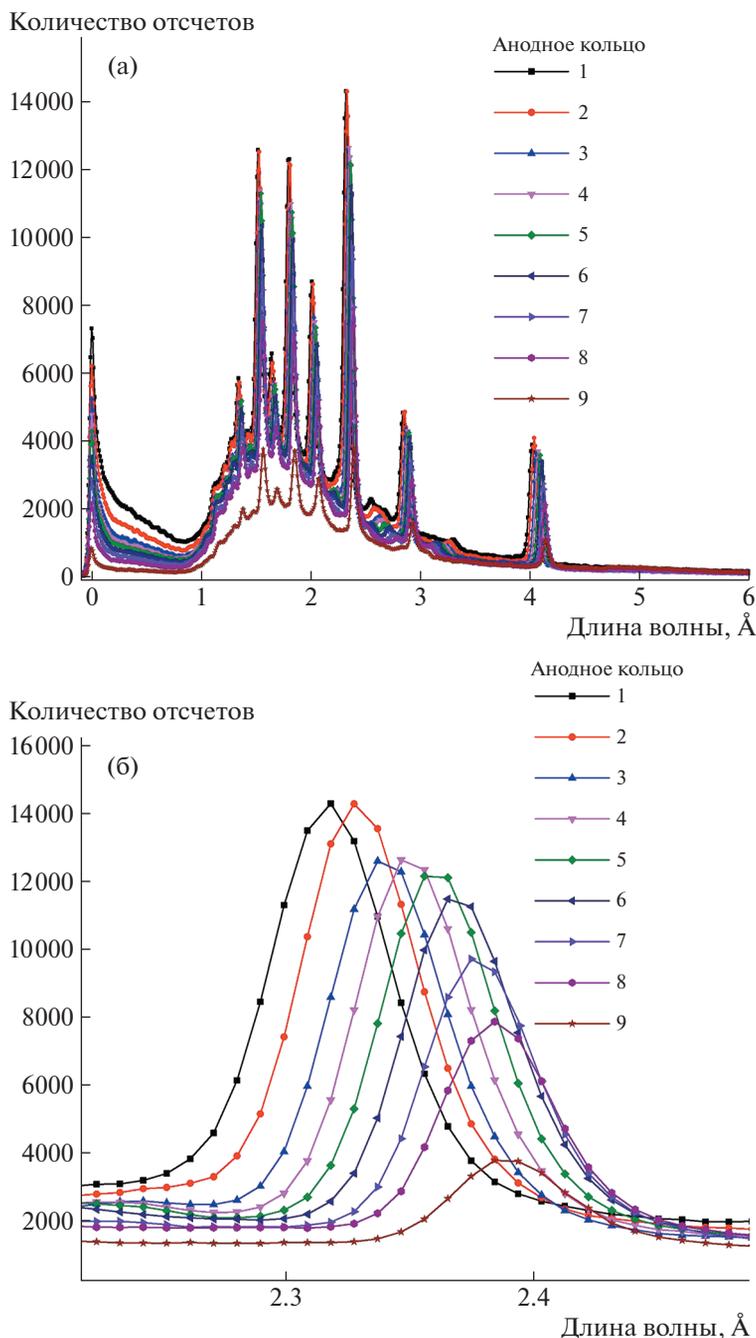


Рис. 14. **а** – времяпролетные спектры по кольцам (сумме 16-ти катодов), полученные с анодов кольцевого детектора; **б** – увеличенный вид части спектра.

друга катодов, с поверхности которых снимается заряд, индуцированный движением электронно-ионной лавины.

Катоды располагаются на внутренней поверхности каждого кольца и имеют форму четырехугольника. Таким образом, каждый отдельный катодный сегмент занимает $\sim 22.5^\circ$. В детекторе реализован метод индивидуального съема сигнала, он осуществляется с анодных нитей (общие

для каждого отдельного кольца) и с каждого из 16-ти катодов – всего 144 независимых детектора. Электроника сбора включает в себя 153 канала регистрации.

Явным преимуществом данного детектора по сравнению с системами, состоящими из нескольких счетчиков, является общий газовый объем и компактное размещение электроники, что позво-

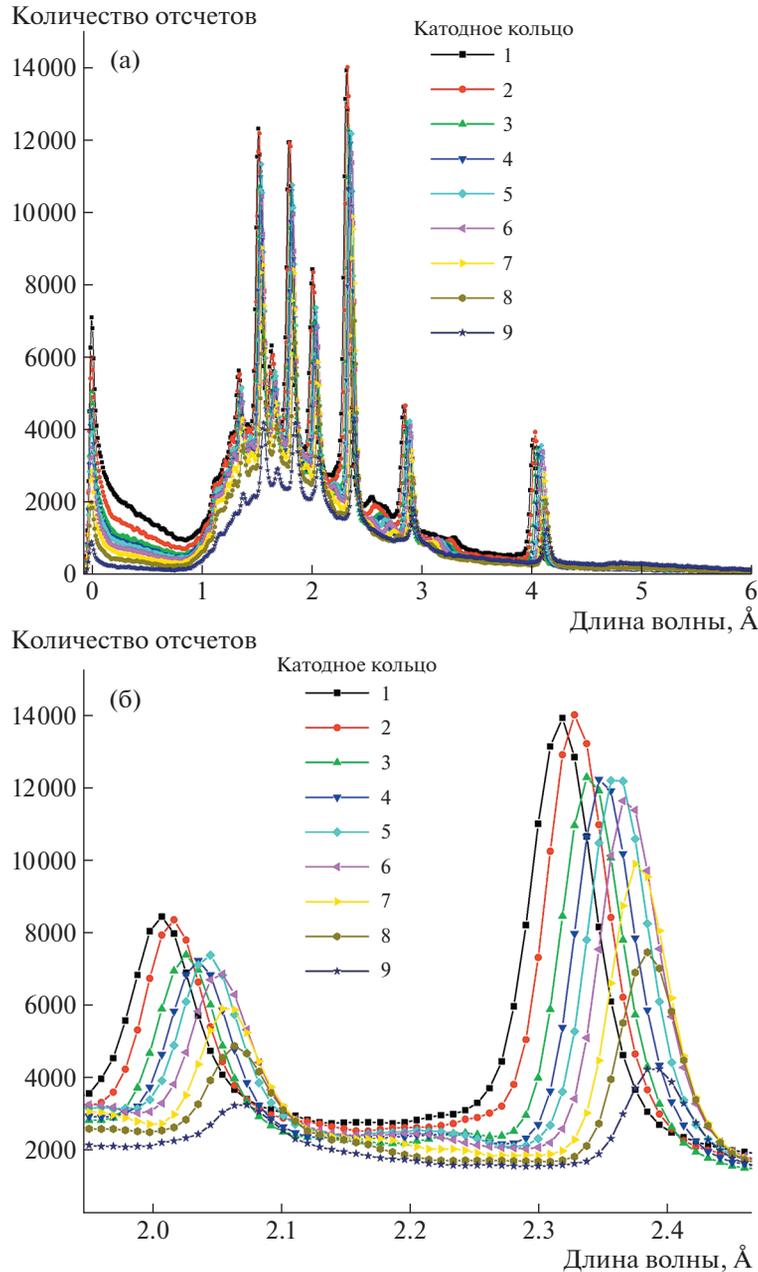


Рис. 15. а – времяпролетные спектры по кольцам (сумме 16-ти катодов), полученные с катодов кольцевого детектора; б – увеличенный вид части спектров.

ляет минимизировать мертвые зоны детектора и сократить время экспозиции.

Тестирование работы кольцевого детектора было проведено на установке ДРВ на шестом канале реактора ИБР-2. Были проведены калибровочные измерения с образцами, имеющими равномерное рассеяние нейтронов. Измерения проводились с тестовой газовой смесью 1.5 бар Ag + + 25 мбар ^3He + 20 мбар CO_2 . Полученные результаты представлены на рис. 14, 15.

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ ДЕТЕКТОР ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Фурье-дифрактометр высокого разрешения (ФДВР) на реакторе ИБР-2 является одной из трех-четырех нейтронных дифракционных установок в мире, где можно осуществлять эксперименты, требующие разрешающей способности $\Delta d/d \approx 0.001$ и лучше [10]. В целях модернизации дифрактометра разработан широкоапертурный сцинтилляционный детектор обратного рассеяния (ДОР) [11] на основе сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})/^6\text{LiF}$

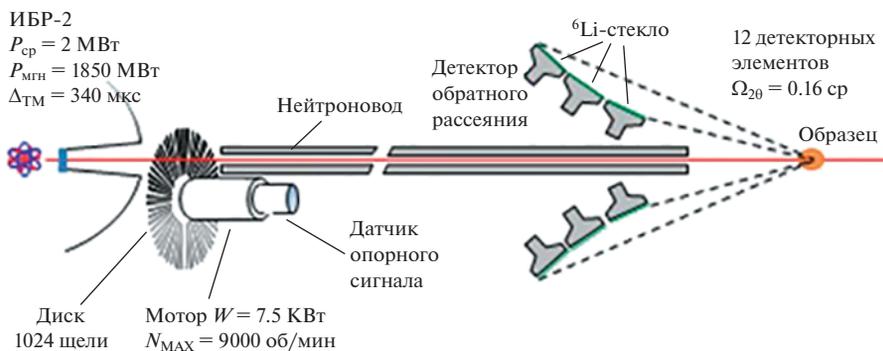


Рис. 16. Схема ФДВР на реакторе ИБР-2.

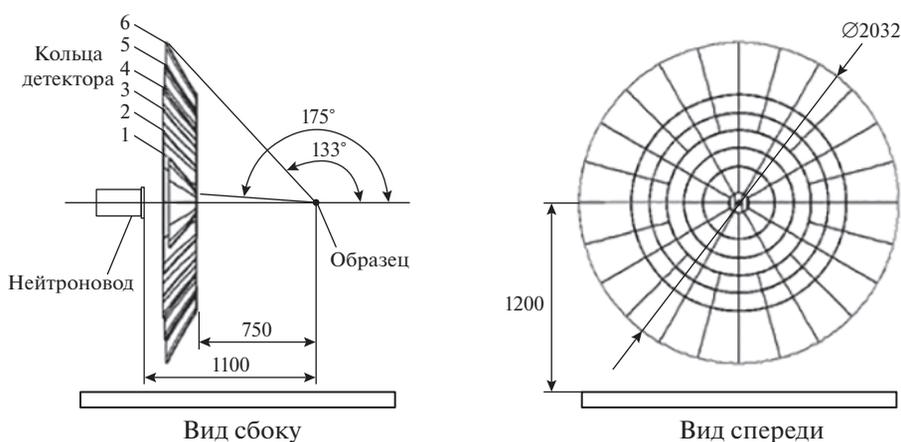


Рис. 17. Схема детектора обратного рассеяния с большой апертурой.

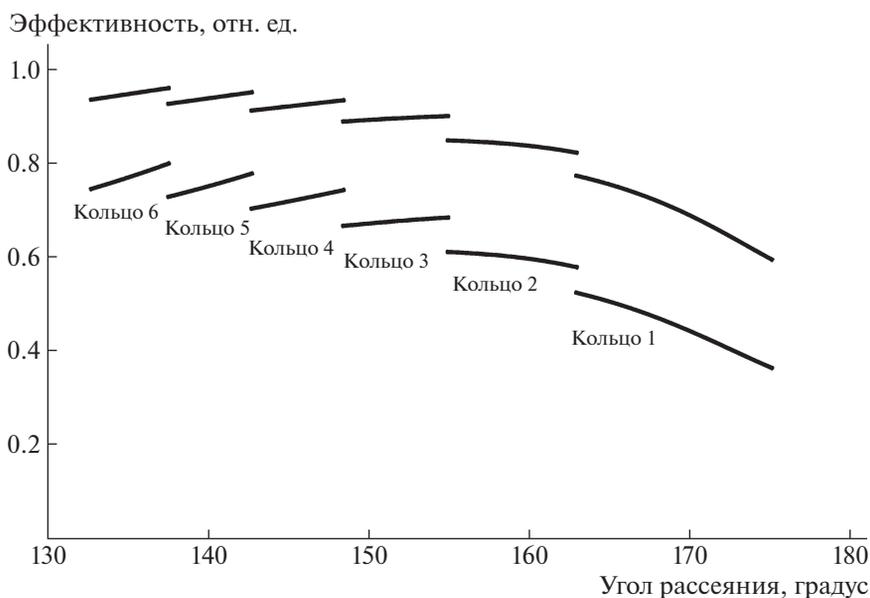


Рис. 18. Зависимость эффективности конвертации тепловых нейтронов от угла рассеяния.

на замену представленных на рис. 16 детекторов на основе Li-стекло.

В детекторе ДОР реализована комбинированная электронно-геометрическая фокусировка. ДОР будет перекрывать углы рассеяния $2\theta = 133^\circ - 175^\circ$ в цилиндрической геометрии. Телесный угол, соответствующий таким значениям углов рассеяния, составит примерно $\Omega_{2\theta} \approx 2.0$ ср, что, по сравнению с существующим детектором ФДВР ($\Omega_{2\theta} \approx 0.16$ ср), больше в ~ 12.5 раз.

Детектирующая поверхность выполнена из сцинтилляционного ND-экрана фирмы Applied Scintillation Technologies Ltd. [4] толщиной 0.42 мм для обеспечения высокого и сверхвысокого разрешения. Данный сцинтиллятор имеет низкую чувствительность к γ -квантам (10^{-6}) по сравнению с Li-стеклами. Свет от сцинтилляционных экранов поступает на фотоумножители R3998-100-02 [6] с помощью оптических спектросмещающих волокон толщиной 1 мм фирмы Vicron.

На рис. 17 схематично показан предлагаемый вариант детектора с большой апертурой. Детектор имеет кольцевую структуру, отражающую осевую симметрию рассеяния нейтронов на образце. Он содержит 6 кольцевых сборок (колец) из сцинтилляционных экранов. Три внешних кольца разделены на секторы по 15° , а три внутренних – на секторы по 30° , всего 108 секторов. Шесть кольцевыхборок полностью перекрывают область углов рассеяния $2\theta = 133^\circ - 175^\circ$. Полный телесный угол детектора составляет $\Omega_{2\theta} \approx 2$ ср, суммарная чувствительная площадь $S \approx 6.92$ м². Мертвая зона детектора составляет 0.015% от покрываемого телесного угла, что является пренебрежимо малой величиной.

Каждый сектор на схеме представляет собой независимый детекторный элемент, состоящий из сцинтилляционного экрана, спектросмещающих волокон для сбора света и ФЭУ. Сцинтилляционный экран в каждом секторе не сплошной, а состоит из более мелких, плотно подогнанных друг к другу фрагментов, которые с требуемой точностью следуют форме поверхности пространственно-временной фокусировки.

На рис. 18 приведена зависимость эффективности конвертации детектора от угла рассеяния для одного и двух слоев сцинтиллятора, рассчитанная для длины волны нейтрона 1.8 Å по эффективной толщине сцинтиллятора, обусловленной расположением детектирующих поверхностей под углом к падающему нейтронному пучку. Нижний набор кривых на рис. 18 соответствует одному слою сцинтиллятора. Эффективность детектора в этом случае изменяется в диапазоне от 36 до 80% и в среднем оказывается на уровне 65%. Для повышения эффективности каждому кольцу добавлен второй слой сцинтиллятора. Механическая конструкция детектора при этом остается

практически без изменений. Как видно из верхнего набора кривых на рис. 18, соответствующих двум слоям сцинтиллятора, диапазон эффективности становится равным 59–96% и в среднем возрастает до уровня 85%.

Для детектора обратного рассеяния разработана новая система накопления и сбора данных DAQ. Система сбора данных для широкоапертурного детектора может быть построена на основе восьми модулей MPD-32 [5] для регистрации сигналов с 216-ти ФЭУ.

Запланирован ввод в эксплуатацию детектора ФДВР (канал № 11 реактора ИБР-2) в конце 2024 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были представлены детекторы, разработанные в НЭОКС ИБР-2 ЛНФ. Большая часть представленных детекторов используется на таких экспериментальных установках, как ФДВР, ФСД, ДН-6, ДРВ реактора ИБР-2, а детекторы АСТРА-М и ДОР находятся на финальных этапах изготовления. Кроме газовых и сцинтилляционных детекторов, в отделе проводятся исследования возможности применения и разработки детекторов на основе карбида бора и полупроводника LiInSe₂ [12]. Большая часть электроники, применяемой в работе описанных детекторов, также разработана в НЭОКС. В будущих проектах по созданию детекторных систем планируется использовать современную унифицированную систему накопления данных с открытой архитектурой, способную работать при высоких нагрузках, обладающую большим числом каналов и возможностью программирования системы с учетом особенностей проведения эксперимента.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белушкин А.В., Богдзель А.А., Журавлев В.В. Пантелеев Ц.Ц., Ли Ен Че, Черников А.Н., Чураков А.В., Швецов В.Н. // Журнал технической физики. 2008. Т. 78. Вып. 1. С. 121.
2. Xian-Li, Zhang Yun-Long, Qian Hao, Xu Zi-Zong, Wang Xiao-Lian // Chinese Physics C. 2012. V. 36. № 6. P. 519. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/36/6/007>
3. Litvinenko E.I., Ryukhtin V., Bogdzel A.A., Churakov A.V., Farkas G., Hervoches Ch., Lukas P., Pilch J., Saroun J., Strunz P., Zhuravlev V.V. // Nucl. Instrum. and Meth-

- ods Section A. 2017. V. 841. P. 5.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.10.024>
4. *Kuzmin E.S., Balagurov A.M., Bokuchava G.D., Kudryashev V.A., Zhuk V.V., Kudryashev V.A., Bulkin A.P., Trounov V.A.* Preprint of JINR of E13-2001-204. Dubna, 2001.
 5. *Kreyszig A., Irmer K., Hartung U.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research A. 1994. V. 349. P. 292.
<https://doi.org/10.1080/10238160290027748>
 6. Hamamatsu catalog Photomultiplier tubes and related products. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_TPMZ0002E.pdf
 7. *Bogdzel A., Drozdov V., Kruglov V., Murashkevich S., Prikhodko V., Shvetsov V.* // Proc. of the 27th International Symposium Nuclear Electronics and Computing (NEC'2019). Budva, Becici, Montenegro, September 30–October 4, 2019. CEUR-WS. V. 2507. P. 142.
<https://doi.org/10.3233/JNR-210001>
 8. *Белушкин А.В., Богдзель А.А., Буздавин А.П., Велешки Ст.И., Журавлев А.И., Журавлев В.В., Кичанов Е.С., Козленко Д.П., Куликов С.А., Левчановский Ф.В., Лукин Е.В., Милков В.М., Мурашкевич С.М., Пантелеев Ц.Ц., Приходько В.И., Савенко Б.Н., Цанков Л.Т.* // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10. № 5 (182). С. 713.
 9. *Богдзель А.А., Милков В.М., Пантелеев Ц.Ц.* Патент на изобретение № 2715898 РФ. // Опубл. 04.03.2020. Бюл. № 7.
 10. *Ананьев Б.Н., Останевич Ю.М., Пикельнер Е.Я.* Патент на изобретение № 690959 СССР // Опубликовано 30.11.80. Бюл. № 44.
 11. *Балагуров А.Н., Бобриков И.А., Бокучава Г.Д., Журавлев В.В., Симкин Г.В.* // ФЭЧАЯ. 2015. Т. 46. № 3. С. 453.
 12. *Kruglov V.V., Balagurov A.M., Belova M.O., Bobrikov I.A., Bogdzel A.A., Bodnarchuk V.I., Bulavina V.V., Daulbaev O., Drozdov V.A., Zhuravlev V.V., Kirilov A.S., Kulikov S.A., Kurilkin A.K., Milkov V.M., Murashkevich S.M., Podlesnyy M.M., Prikhodko V.I., Churakov A.V., Shvetsov V.V.* // Journal of Neutron Research. 2021. V. 1 P. 1.
<https://doi.org/10.3233/JNR-210001>
 13. *Belushkin A.V., Bogdzel A.A., Goloshumova A.A., Isaenko L.I., Lobanov S.I., Milkov V.M., Tarasova A.Yu., Yelisseyev A.P.* // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020. V. 14. Suppl. 1. P. S15–S18.
<https://doi.org/10.1134/s102745102007006x>