Приложение 4.

Форма отчета по Проекту

УТВЕРЖДАЮ

Директор Лаборатории

_____ / Лычагин Е.В. /

“ 08 “ 04

2026 г.

ОТЧЕТ ПО ИНФРАСТРУКТУРНОМУ ПРОЕКТУ /
ПРОЕКТУ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ

1. Общие сведения по проекту

1.1. Научное направление:
Физика конденсированных сред, радиационные и радиобиологические исследования (04)

1.2. Наименование проекта / подпроекта КИП:
Создание широкоапертурного детектора обратного рассеяния (ДОР-А) для дифрактометра ФДВР

1.3. Шифр проекта:
04-4-1149-3-1-2021/2028 Создание широкоапертурного детектора обратного рассеяния (ДОР-А) для дифрактометра ФДВР

1.4. Шифр темы:
04-4-1149-2024/2028 Импульсный источник нейтронов и комплекс спектрометров

1.5. Фактический срок реализации проекта:
2023/2026

1.6. Руководитель(ли) проекта
Милков В.М.

2. Научный отчет

2.1. Аннотация

Созданный коллаборацией ЛНФ ОИЯИ (Дубна), ПИЯФ (Гатчина) и VTT (Espoo, Finland) Фурье-дифрактометр высокого разрешения (ФДВР) стационарно действует на ИБР-2 с 1994 года. Его исходная конструкция, принцип действия и номинальные параметры подробно описаны в работе [**1**] (здесь и далее номера статей соответствуют полному списку публикаций, **раздел 2.2.3**). В работах [**2,3**] приведены примеры проведенных многочисленных исследований на ФДВР и сформулированы идеи по возможному развитию дифрактометра. В последних годи на ФДВР проходила замена некоторых основных узлов, устаревших морально или выработавших свой ресурс. В частности, в 2016 году введены в эксплуатацию новые зеркальный нейтроновод и быстрый Фурье-прерыватель; ранее произошла полная смена электроники накопления дифракционных спектров и управления экспериментом [**4**].

В 2017 г. было предложено заменить существующие детекторы обратного рассеяния (ДОР), на новый широкоапертурный сцинтилляционный детектор (ДОР-А) на основе сцинтиллятора ZnS(Ag)/^{6}LiF с использованием комбинированной электронно-геометрической фокусировки. Это должно было привести к кардинальному улучшению параметров дифрактометра ФДВР и вывести его на лидирующие позиции в мире.

К настоящему времени завершено создание детектора ДОР-А, он установлен на ФДВР и в весенних циклах реактора ИБР-2 2025 года выполнены исследования его характеристик.

2.2. Развернутый научный отчет

Любой современный нейтронный дифрактометр высокого разрешения является сложной и дорогостоящей установкой, поэтому прецизионные нейтронографические эксперименты с очень высоким (на уровне $\Delta d/d \approx 0.002$ и лучше) разрешением ведутся в настоящее время только в нескольких, наиболее развитых нейтронных лабораториях мира. В настоящее время в России это возможно только в ЛНФ ОИЯИ. Более того, дифрактометр 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. Основным назначением ФДВР является **прецизионный структурный анализ поликристаллических веществ** со средним (до ~500 Å^3) объемом элементарной ячейки. Типичными примерами являются исследования соединений высокотемпературных сверхпроводников на основе ртути с различным содержанием кислорода или фтора в базисной плоскости [**5,6**] и легированных манганитов с эффектом колоссального магнетосопротивления [**7,8**], современных функциональных сплавов и электродных материалов [**9,10**]. ФДВР используется и **для анализа монокристаллов**, если требуется его уникально высокое разрешение по d_{hkl}, например, при изучении разделения фаз в кристаллах $La_2CuO_{4+\delta}$, возникающего в результате низкотемпературной диффузии сверхстехиометрического кислорода [**11**]. Актуальная схема ФДВР на реакторе ИБР-2 представлена на рисунке 1.

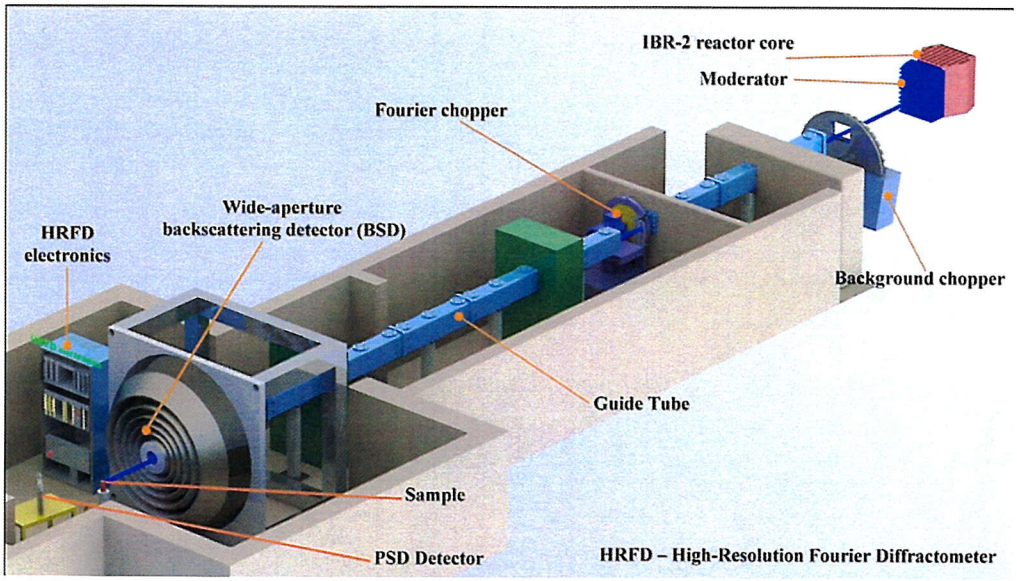
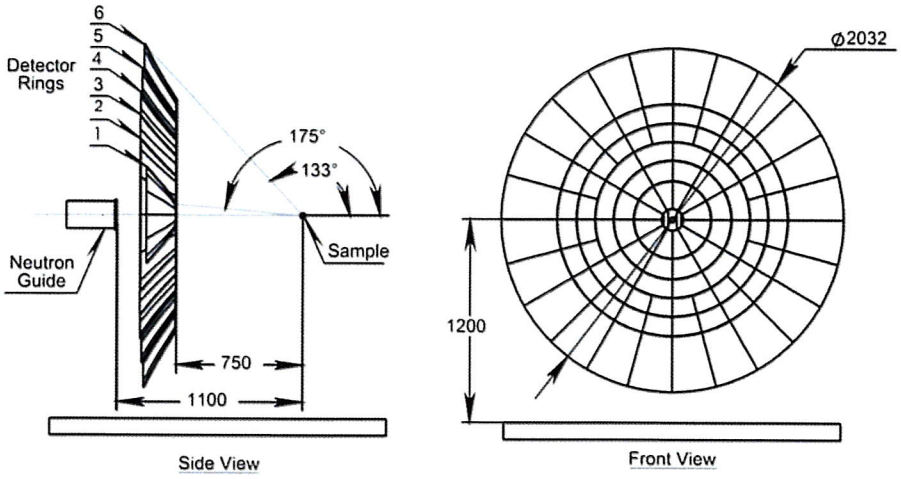


Рисунок 1. Схема ФДВР на реакторе ИБР-2.

2.2.1. Описание широкоапертурного детектора обратного рассеяния ДОР-А.

Схема детектора ДОР-А показана на рисунке 2, а на рисунке 3 приведена его фотография вместе с детекторной электроникой и системами сбора данных на основе блоков MPD-32 и MPD-240 после их установки на дифрактометре ФДВР.



а) б)

Рисунок 2. Схема детектора обратного рассеяния с большой апертурой (а – вид сбоку, б – вид спереди).

Детектор имеет кольцевую структуру, отражающую осевую симметрию рассеяния нейтронов на образце, и содержит 6 кольцевых сборок (колец) из сцинтилляционных экранов (рисунок 2б). Три внешних кольца разделены на секторы по 15°, а три внутренних – на секторы по 30°. Шесть кольцевых сборок полностью перекрывают область углов рассеяния 2Θ=(133-175)°. Полный телесный угол детектора составляет $\Omega_D \approx 2$ **ср**.

Для обеспечения высокого и сверхвысокого разрешения детектор выполняется на основе тонкого, толщиной 0.42 мм, ZnS(Ag)/^{6}LiF-сцинтилляционного экрана. Сбор и проводка света от сцинтилляционных экранов на фотоумножители осуществляется при помощи оптических спектросмещающих волокон. Детальное описание особенностей применения ZnS(Ag)/^{6}LiF-сцинтилляционного экрана приводится в работе [**12**].

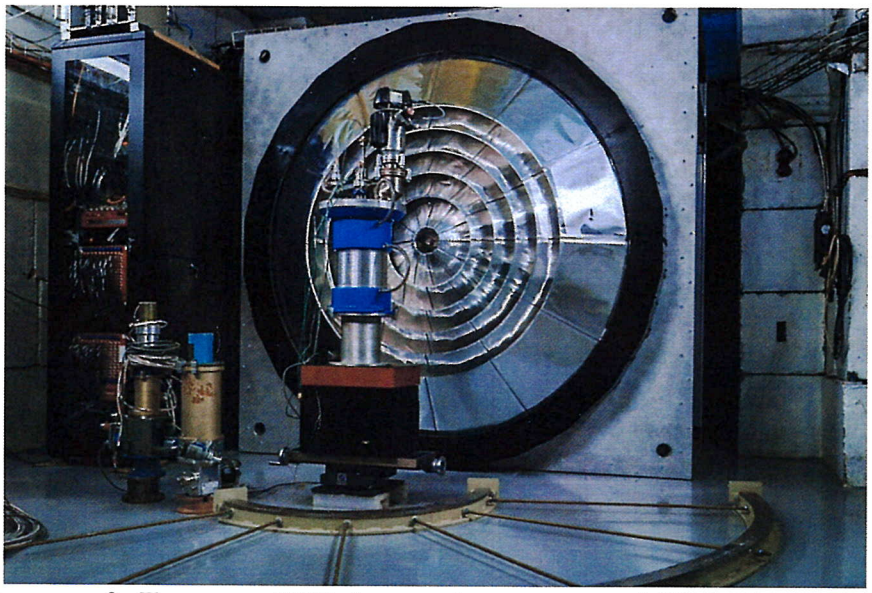


Рисунок 3. Детектор ДОР-А на дифрактометре ФДВР. Перед детектором расположена высокотемпературная печь с образцом.

Каждый сектор на схеме представляет собой независимый детекторный элемент, состоящий из сцинтилляционного экрана, спектросмещающих волокон 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 [**13**].

Форма детекторных элементов всех 6 колец детектора, удовлетворяющих условию пространственно-временной фокусировки, показана на рисунке 4.

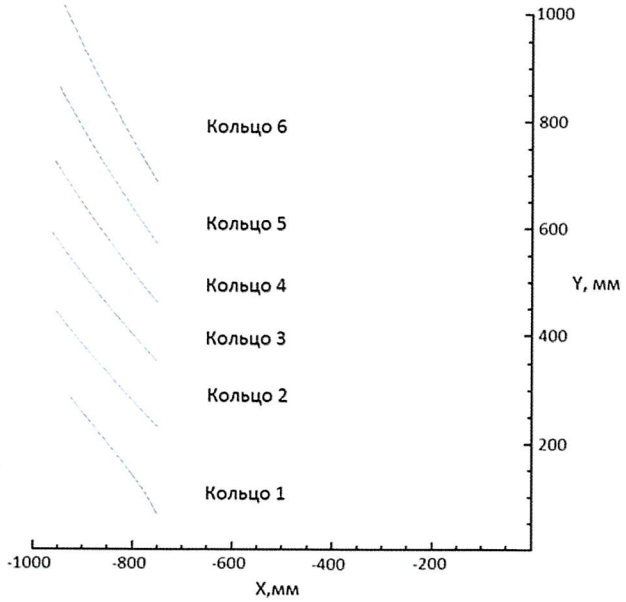


Рисунок 4. Форма детекторных элементов колец детектора

Основные геометрические характеристики колец детектора, дающие представление о его размещении на дифрактометре ФДВР **[14,15]**, приведены в таблице 1, где: $\theta_{max}, \theta_{min}$ –максимальный и минимальный углы рассеяния, которые перекрывается кольцом; l – длина детекторных элементов на рисунке 3; X_{max}, X_{min}, Y_{max}, Y_{min} – координаты концевых точек сцинтилляционного экрана каждого кольца; $\Delta\Omega$ – телесный угол, перекрываемый одним сектором кольца; Ω – полный телесный угол, перекрываемый

кольцом.

Таблица 1. Основные геометрические характеристики колец детектора.

Величина	Кольцо №1	Кольцо №2	Кольцо №3	Кольцо №4	Кольцо №5	Кольцо №6
θ_{max}, °	175.047	162.913	154.917	148.417	142.721	137.547
θ_{min}, °	162.913	154.917	148.417	142.721	137.547	132.745
l, мм	280	300	320	340	360	380
X_{max}, мм	-750.00	-750.00	-750.00	-750.00	-750.00	-750.00
Y_{max}, мм	65.00	230.55	351.05	461.10	570.91	686.12
X_{min}, мм	-923.44	-956.79	-961.40	-958.44	-950.62	-938.82
Y_{min}, мм	283.86	447.84	591.07	729.58	869.65	1015.77
$\Delta\Omega$, страд	0.02117	0.02627	0.02818	0.01471	0.01515	0.01547
Ω, страд	0.25388	0.31518	0.33814	0.35300	0.36360	0.37127

Зависимость эффективной толщины детектора ($d_{эфф}$) от угла рассеяния, то есть толщины, которую встречает на своём пути рассеянный на образце нейтрон, представлена на рисунке 5. Эта толщина определяет как эффективность детектора, так и вклад в геометрическую компоненту разрешения дифрактометра. Расчёты эффективной толщины выполнены, исходя из реальной толщины сцинтилляционного экрана 0.42 мм, которая является оптимальной, с точки зрения баланса между эффективностью и прозрачностью.

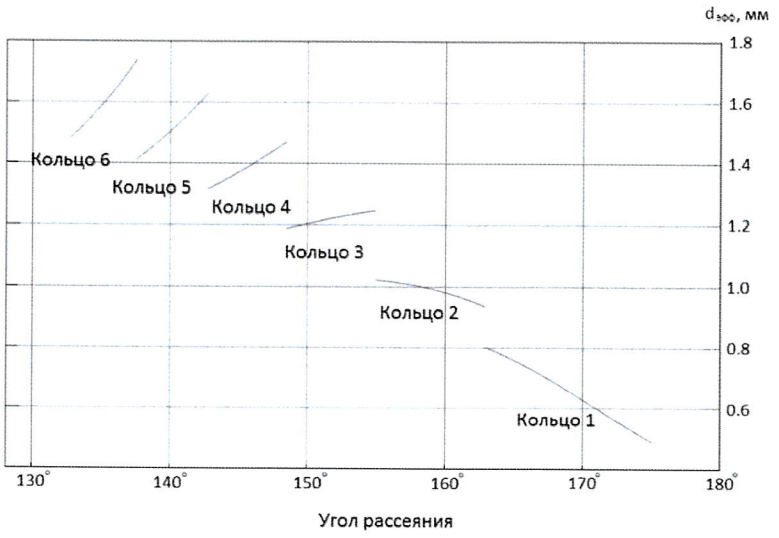


Рисунок 5. Зависимость эффективной толщины детектора ($d_{эфф}$) от угла рассеяния (толщина сцинтилляционного экрана 0.42 мм).

Оценка геометрического вклада в величину полного разрешения была выполнена с учётом эффективной толщины детектора и различных размеров исследуемого на дифрактометре образца $\emptyset_{обр}$ от 1 до 8 мм. Предполагалось, что форма сцинтилляционного экрана точно соответствует форме поверхности временной фокусировки и исходная расходимость нейтронного пучка равна нулю. Результаты этой оценки приведены в

таблице 2, где: $\emptyset_{обр}$ – размер образца; $< \Delta_i >= 2.36\sigma_i$ – величина ошибки для i-ого кольца детектора.

Таблица 2. Результаты оценки.

$\emptyset_{обр}$, мм	1	2	3	4	5	6	7	8
$< \Delta_1 >$	4.0×10^{-5}	6.9×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.7×10^{-4}	2.0×10^{-4}	2.3×10^{-4}	2.6×10^{-4}
$< \Delta_2 >$	4.6×10^{-5}	7.3×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.7×10^{-4}	2.0×10^{-4}	2.3×10^{-4}	2.6×10^{-4}
$< \Delta_3 >$	5.1×10^{-5}	7.6×10^{-5}	1.1×10^{-4}	1.4×10^{-4}	1.7×10^{-4}	2.0×10^{-4}	2.3×10^{-4}	2.6×10^{-4}
$< \Delta_4 >$	5.5×10^{-5}	7.9×10^{-5}	1.1×10^{-4}	1.4×10^{-4}	1.7×10^{-4}	2.0×10^{-4}	2.3×10^{-4}	2.6×10^{-4}
$< \Delta_5 >$	5.8×10^{-5}	8.1×10^{-5}	1.1×10^{-4}	1.4×10^{-4}	1.7×10^{-4}	2.0×10^{-4}	2.3×10^{-4}	2.6×10^{-4}
$< \Delta_6 >$	6.1×10^{-5}	8.2×10^{-5}	1.1×10^{-4}	1.4×10^{-4}	1.7×10^{-4}	2.0×10^{-4}	2.3×10^{-4}	2.6×10^{-4}

Приведённые в таблице цифры показывают, что для выбранной геометрии детектора вклад от толщины сцинтилляционного экрана и размера образца в величину полного разрешения дифрактометра существенно ниже допустимого (0.001). Технологические и технические решения, применяемые в настоящее время в ЛНФ, позволяют обеспечить следование формы экрана поверхности временной фокусировки с необходимой точностью.

На рисунке 6 приведена зависимость эффективности детектора от угла рассеяния для одного и двух слоёв 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 последнем рисунке 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 к каждому кольцу добавлен второй слой сцинтиллятора. Механическая конструкция детектора при этом остаётся практически без изменений. Как видно из верхнего набора кривых на рисунке 6, соответствующих двум слоям сцинтиллятора, диапазон эффективности становится равным 59% - 96% и в среднем возрастает до уровня 85%. Такое увеличение эффективности в совокупности с возросшей до двух стерадиан апертурой выводит детектор обратного рассеяния на совершенно новый уровень.

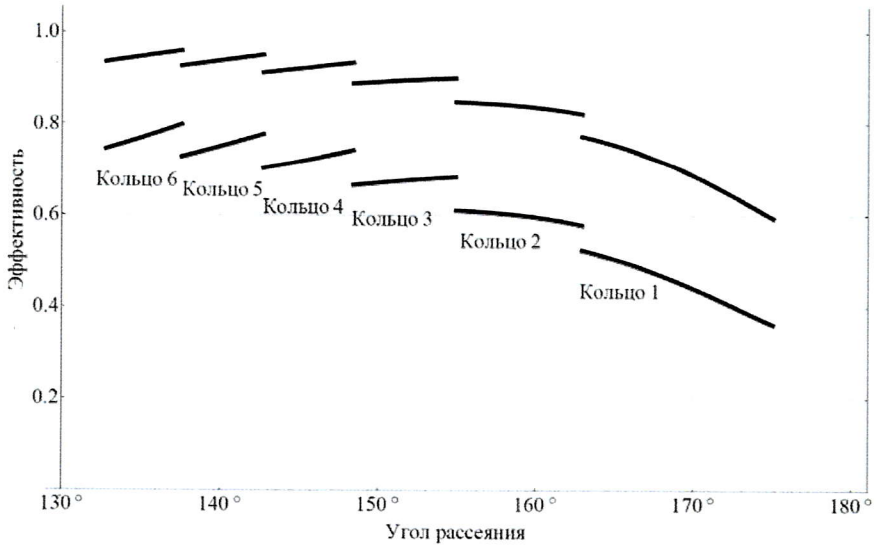


Рисунок 6. Зависимость эффективности детектора от угла рассеяния [**13**].

Выход каждого ФЭУ подключается к системе сбора и накопления информации на основе блоков MPD32, разработанных в ЛНФ. Детали системы подробно описаны в работах [**16,17,18**]. Система позволяет принимать и обрабатывать информацию от 240 независимых детекторных элементов, подавляя события, вызванные фоновыми γ-квантами. Система выполнена в конструктиве NIM (Рисунок 7).

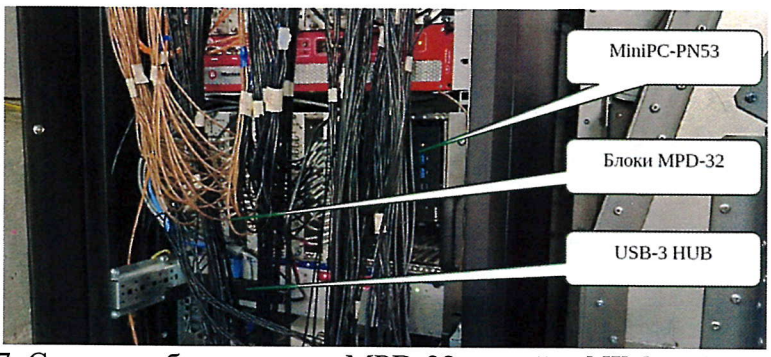


Рисунок 7. Система сбора данных MPD-32 в крейте NIM на ФДВР ДОР-А.

В полной конфигурации она состоит из 8 блоков MPD32 с USB3 интерфейсами связи, подключенных к компьютеру системы сбора данных. Каждый блок MPD32 позволяет подключить 32 детекторных аналоговых сигнала, поступающих от предусилителей ФЭУ, и обеспечивает оцифровку детекторных сигналов вместе с данными pick-up сигналов от Фурье прерывателя и датчика стартов реактора.

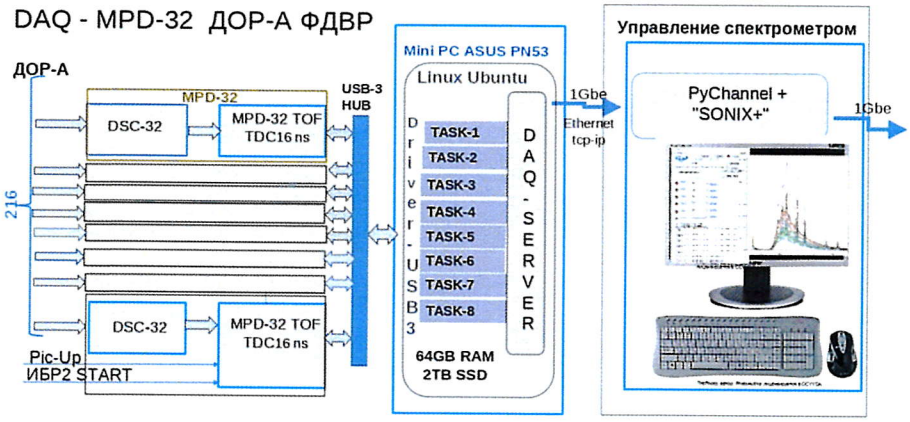


Рисунок 8. Архитектура системы сбора и накопления информации ДОР-А DAQ MPD-32.

Отбор полезных сигналов обеспечивается программной установкой порогов встроенных дискриминаторов, цифровой фильтрацией дискретизируемых сигналов по длительности импульсов и введением мертвого времени. Данные, содержащие адреса блоков и идентификационные номера сигналов, вместе со временем их регистрации передаются в компьютер в on-line режиме в виде пакетов данных. На Фурье дифрактометре “сырые” данные, записываемые в процессе измерений, в дальнейшем обрабатываются в off-line режиме с использованием алгоритмов RTOF метода.

Архитектура системы сбора и накопления информации ДОР-А DAQ MPD-32 представлена на рисунке 8. Здесь роль компьютера системы сбора данных выполняет MiniPC PN53 ASUS, подключенный в качестве DAQ сервера к компьютеру управления спектрометром. Для эффективного решения задач сервера сбора данных, на компьютере MiniPC PN53 ASUS оперативная память увеличена до 64 ГБ и добавлен SSD диск ёмкостью 2 ТВ для записи и хранения данных в ходе экспериментов, а также установлена операционная система Ubuntu GNU/Linux.

Сервер выполняет функции приёма команд для установки параметров измерений, запуск измерений, остановку и сохранение данных по командам от управляющего компьютера.

ПО сервера обеспечивает подключение блоков MPD-32 по USB-3 интерфейсу и работу с ними согласно протоколу приёма и передачи адресных сообщений.

С учётом специфики набора данных на ФДВР, система сбора данных обеспечивает кодировку и накопление данных в списочном режиме в реальном времени эксперимента. Для обеспечения максимальной пропускной способности, большая оперативная память 64GB сервера используется как буферная память для принимаемого на сервере потока данных от всех подключенных блоков MPD-32. Во время измерения по команде 'Start' оцифрованные данные накапливаются в буферной оперативной памяти. По команде 'Stop' данные, полученные от каждого блока, переписываются из оперативной памяти в файлы на SSD диск 2 TB на сервере.

Сервер подключен к компьютеру управления спектрометром по локальной сети 1 Gb Ethernet. На управляющем компьютере установлена система управления спектрометрами SONIX+ с программой клиента на основе PyChannel, обеспечивающей передачу команд серверу системы сбора данных. Данные измерений записываются в файлах на диске компьютера-сервера системы сбора данных и доступны для компьютеров в сети ЛНФ, как при работе с сетевым диском.

2.2.2. Описание проведенных экспериментов и полученных результатов

Монтаж ДОР-А на 5 канале был выполнен в период остановки реактора ИБР-2. Работы по испытанию нового детектора начались с его юстировки. Были измерены параметры нейтронного пучка на 5 канале, его расположение и пролетные базы. Исходя из полученных данных, новый детектор был точно смонтирован в соответствии с расчетными параметрами на расстоянии 750 мм от позиции образца и перпендикулярно падающему пучку. Юстировка детектора позволила соблюсти временную фокусировку, заложенную в конструкцию каждого элемента детектора. Измеренные спектры подтвердили правильность расположения детектора и точность его изготовления. На рисунке 9 показаны дифрактограммы от стандартного образца LaB_6, полученные отдельно на каждом элементе первого кольца. Идеальное наложение пиков от всех элементов исключает необходимость введения поправочных коэффициентов при суммировании и подтверждает высокую точность в изготовлении детектора.

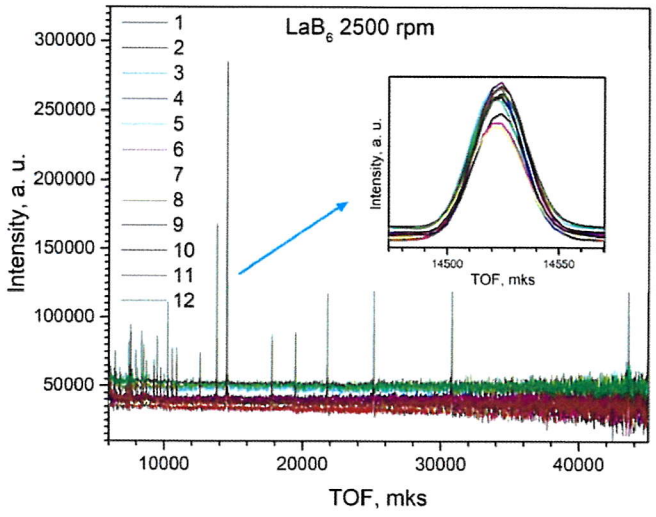


Рисунок 9. Измеренные отдельными элементами первого кольца дифрактограммы от стандартного образца LaB_6.

Новый детектор за счет большой площади и расположения покрывает угол рассеяния от 135° до 175°. Этот диапазон разделен на 6 участков по кольцам, вследствие чего каждое кольцо детектора вносит различный геометрический вклад в функцию разрешения. Наилучшее разрешение достигается на внутренних кольцах и превосходит разрешение старого детектора в два раза (рисунок 10).

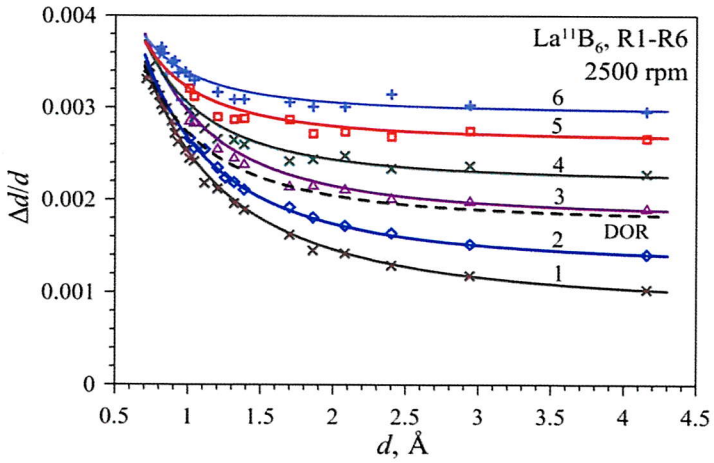


Рисунок 10. Функции разрешения ДОР-А для шести колец, измеренные при скорости вращения прерывателя 2500 об/мин. Показаны экспериментальные точки и рассчитанные зависимости. Функция разрешения старого детектора показана пунктирной линией.

Временная компонента функции разрешения зависит от скорости вращения Фурье-прерывателя. Проведенные эксперименты с разной скоростью вращения прерывателя позволили разделить временной и геометрический вклады в функцию разрешения. На рисунке 11 показаны функции разрешения при разных скоростях вращения Фурье-прерывателя. При скорости в 6000 об./мин на новом детекторе достигается разрешение менее 10^{-3} в широком диапазоне межплоскостных расстояний.

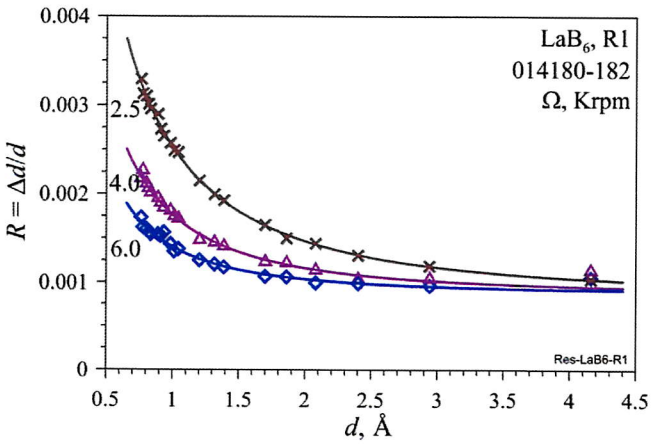


Рисунок 11. Функции разрешения ДОР-А для первого кольца при различных скоростях вращения Фурье-прерывателя.

Сцинтиллятор ZnS(Ag)/^{6}LiF, используемый на ДОР-А, имеет более продолжительное время высвечивания, вследствие этого для регистрации нейтрона и фиксации времени прилета необходимо использовать более сложные фильтры обработки сигналов, включающие большое количество параметров. Предварительно эти параметры были подобраны с учетом уменьшения фона от гамма-излучения, фона от перерассеянных

нейтронов, а также улучшения соотношения сигнал/шум. Повышенный фон от перерассеянных нейтронов сильнее сказывается на внешнем кольце вследствие того, что его поверхность открыта во всем диапазоне углов; поверхность внутренних колец по большей части прикрыта соседним внешним кольцом. Для уменьшения фона на всём новом детекторе изготовлена специальная защита, представленная на рисунке 12. Это позволило улучшить соотношения сигнал/шум и эффективность детектора. На рисунке 13 а) и б) представлены времяпролетные спектры до установки защиты и после установки защиты на ДОР.

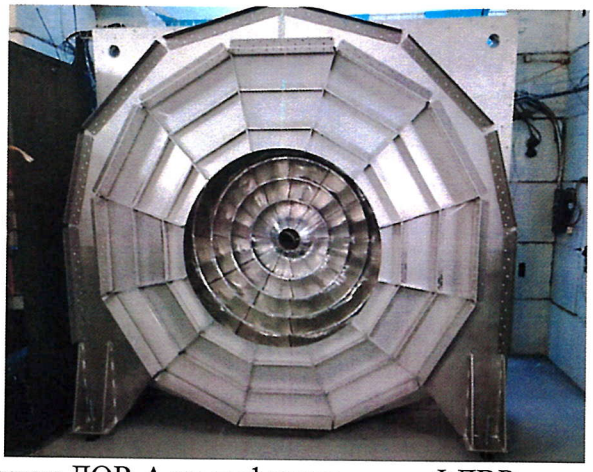
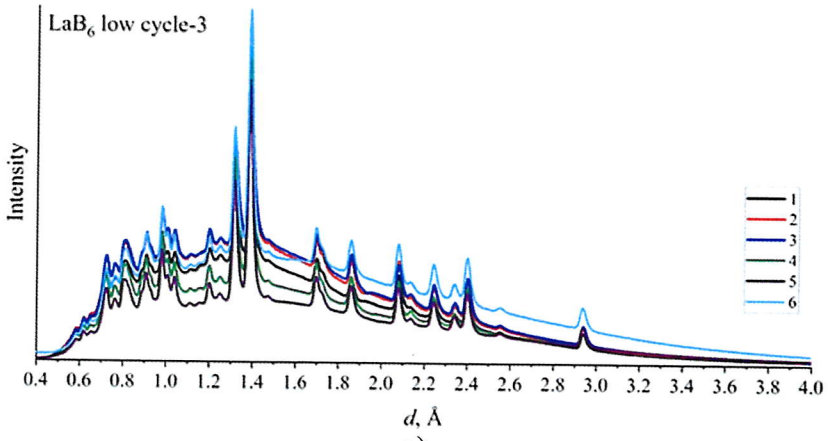
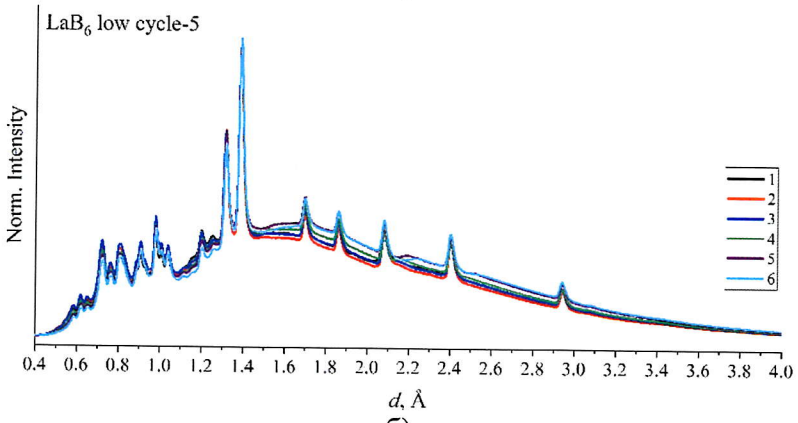


Рисунок 12. Детектор ДОР-А на дифрактометре ФДВР с установленной защитой.



а)



б)

Рисунок 13: Времяпролетные спектры а) до установки защиты и б) после установки защиты.

В настоящее время соотношение эффективности нового детектора с подключенным только внешним слоем по сравнению со старым детектором составляет 1.5–2.5 раза (рисунок 14).

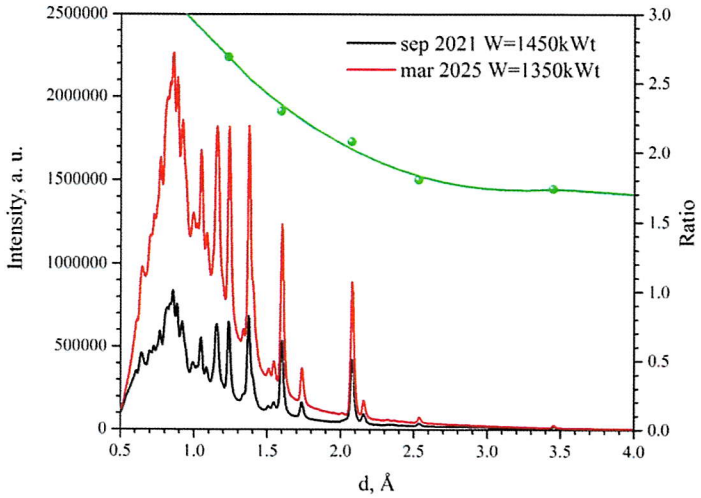


Рисунок 14 - Красной линией показан спектр от Al_2O_3, измеренный на новом детекторе (подключен только внешний слой), а черной линией – тот же спектр, измеренный на старом детекторе. Зелеными точками и линией показано отношение площадей пиков.

2.2.3. Полный список публикаций (приложение в электронном виде, для журнальных публикаций с указанием импакт-фактора журнала).

1. Aksenov V.L., Balagurov A.M., Simkin V.G., Bulkin A.P. et al., "Performance of the high resolution Fourier diffractometer at the IBR-2 pulsed reactor" J. of Neutron Research, 1997, v.5, pp. 181-200. Препринт ОИЯИ, Р13-96-164, Дубна, 1996.
2. Balagurov A.M., "High resolution Fourier diffraction at the IBR-2 reactor" Neutron News, 16 (2005) 8-12.
3. Balagurov A.M., Kudrjashev V.A., "Correlation Fourier diffractometry for long-pulse neutron sources: a new concept" ICANS-XIX conference, 08-12.04.2010, Grindenwald, Switzerland.
4. Balagurov A.M., Balagurov D.A., Bobrikov I.A., Bogdzel A.A. et al., High-resolution neutron Fourier diffractometer at the IBR-2 pulsed reactor: a new concept. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B 436 (2018), pp.263-271
5. Aksenov V.L., Balagurov A.M., Sikolenko V.V., Simkin V.G. et al., "Precision neutron diffraction study of the high-T_c superconductor $HgBa_2CuO_{4+\delta}$" *Phys. Rev. B*, 1997, v.55, pp.3966-3973.
6. Abakumov A.M., Aksenov V.L., Antipov E.V., Balagurov A.M. et al., "Effect of fluorination on the structure and superconducting properties of the Hg-1201 phase" *Phys. Rev. Lett.*, 1998, v.80(2), pp.385-388.
7. Balagurov A.M., Pomjakushin V.Yu., Sheptyakov D.V., Aksenov V.L. et al., "Effect of oxygen isotope substitution on magnetic structure of $(La_{0.25}Pr_{0.75})_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$" *Phys. Rev. B*, v.60(1), 1999, pp.383-387.
8. Balagurov A.M., Pomjakushin V.Yu., Sheptyakov D.V., Aksenov V.L. et al., "A-cation size and oxygen isotope substitution effects on $(La_{1-y}Pr_y)_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ structure" *Eur. Physical J. B*, 2001, v. 19 (2), pp.215-223.
9. Golovin I.S., Balagurov A.M., Palacheva V.V., Bobrikov I.A. et al., In situ neutron diffraction study of bulk phase transitions in Fe-27Ga alloys, Materials and Design 98 (2016) 113-119

10. Bobrikov I.A., Balagurov A.M., Chih-Wei Hu, Chih-Hao Lee et al., Structural evolution in LiFePO4-based battery materials: in-situ and ex-situ time-of-flight neutron diffraction study, Journal of Power Sources 258, 356-364 (2014)

11. Balagurov A.M., Pomjakushin V.Yu., Simkin V.G., Zakharov A.A. "Neutron diffraction study of phase separation in La_2CuO_{4+y} single crystals" *Physica C*, 1996, v.272, pp.277-284.

12. E.S. Kuzmin, A.M. Balagurov, G.D. Bokuchava, V.V. Zhuk, V.A. Kudryashev, A.P. Buklin and V.A. Trounov, Detector for the FSD Fourier Diffractometer based on ZnS(Ag)/^{6}LiF Scintillation Screen and Wavelength shifting Fibers Readout, Journal of Neutron Research (2002), 31–41. doi:10.1080/10238160290027748.

13. 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. and Shvetsov V.V. "Wide-aperture back-scattering detector (BSD) for the High-Resolution Fourier Diffractometer (HRFD) at the IBR-2 reactor", Journal of Neutron Research 23 (2021) 243–250.

14. Hai C.V., A Balagurov.M., Bogdzel A.A., Bodnarchuk V.I., Daulbaev O., Drozdov V.A., Zhuravlev V.V., Kirilov A.S., Kulikov S.A., Kurilkin A.K., Kazliakouskaya A.A., Milkov V.M., Murashkevich S.M., Podlesnyy M.M., Prikhodko V.I., Petrova M.O., Sumnikov S.V., Churakov A.V., Shvetsov V.V., "Wide-Aperture Backscattering Detector (BSD-A) for The High-Resolution Fourier Diffractometer", Nuclear Science and Technology, ISSN:1810-5408, Vietnam Atomic Energy Institute, Vol. 13 No. 2 (2023), pp 47-55.

15. 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. and Shvetsov V.V. "Wide-aperture back-scattering detector (BSD) for the High-Resolution Fourier Diffractometer (HRFD) at the IBR-2 reactor", Journal of Neutron Research 23 (2021) 243–250.

16. Shvetsov V.V., Drozdov V.A., "Increasing Bandwidth of Data Acquisition Systems on IBR-2 Reactor Spectrometers in FLNP". Proceedings of the XXVI International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2017) Becici, Budva, Montenegro, September 25 - 29, 2017, European repository of the CEUR Workshop Proceedings Vol-2023, pp. 293-298.

17. Bogdzel A., Drozdov V., Kruglov V., Murashkevich S., Prikhodko V. Shvetsov V., «The new data acquisition system MPD-32 for the high-resolution Fourier diffractometer at the IBR-2 pulsed reactor». Proceedings of the 27th International Symposium Nuclear Electronics and Computing (NEC'2019) Budva, Becici, Montenegro, September 30–October 4, 2019, CEUR-WS Vol-2507 (ISSN 1613-0073), pp.142-146 (https://indico.jinr.ru/event/738/contributions/6365/).

18. Levchanovskiy F.V., Murashkevich S.M. "The Data Acquisition System for Neutron Spectrometry – a New Approach and Implementation", NEC'2013, pp.176-179.

19. Сумников С.В., Ержанов Б., Васин Р.Н., Балагуров Д.А. В.М., Милков, Подлесный М.М., Богдзель А.А., Журавлев В.В., Зернин Н.Д., Куликов С.А., Боднарчук В.И., Балагуров А.М., / НЕЙТРОННЫЙ ФУРЬЕ-ДИФРАКТОМЕТР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ШИРОКОАПЕРТУРНЫМ ДЕТЕКТОРОМ /, Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований – Препринт, Р3-2025-37, 2025.

20. Sumnikov S.V., Yerzhanov B, Vasin R.N, Balagurov D.A., Milkov V.M, Podlesnyy M.M., Bogdzel A.A., Zhuravlev V.V., Zernin N.D., Kulikov S.A., Bodnarchuk V.I. and Balagurov A.M., "High-resolution neutron Fourier diffractometer with wide-aperture detector", Journal of applied crystallography, ISSN 1600-5767, Volume 59, 426-439 (2026), https://doi.org/10.5281/zenodo.18498130

21. Подлесный М.М., Круглов В.В., Боднарчук В.И., Милков В.М., Богдзель

А.А. / Метод увеличения эффективности регистрации тепловых нейтронов сцинтилляционным детектором на основе экрана ^{6}Li/ZnS(Ag) и спектросмещающих оптических волокон с использованием цифровой обработки сигнала // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 2(253). С. 164–174.

2.3. Статус и стадия реализации проекта

Сетевой график работ по данному проекту приведен в таблице 3.

Таблица 3. Сетевой график работ по проекту.

N		2024		2025		2026
		I	II	I	II	I
1	Изготовление запасных блоков системы сбора и накопления данных MPD32-USB3.	■	■	■		
2	Закупка запасных комплектов фотоэлектронных умножителей.	■	■	■	■	
3	Настройка блоков усилителей фирмы CAEN в соответствии с требованиями проекта.	■	■			
4	Изготовление комплекта (432 шт.) в/в и измерительных кабелей.	■	■			
5	Демонтаж детектора ДОР и монтаж детектора ДОР-А на ФДВР.	■	■			
6	Наладка аналоговой электроники, системы сбора и накопления данных на основе блоков MPD32-USB3, а также соответствующего программного обеспечения.		■	■	■	■
7	Проверка выполнения условий временной фокусировки и корректировка положения детектора (при необходимости).			■	■	
8	Разработка, наладка и внедрение системы сбора и накопления данных на основе промышленных диджитайзеров фирмы CAEN (R5560SE), а также соответствующего программного обеспечения.				■	■

В настоящее время данный проект успешно завершается по всем пунктам в полном соответствии с планом-графиком:

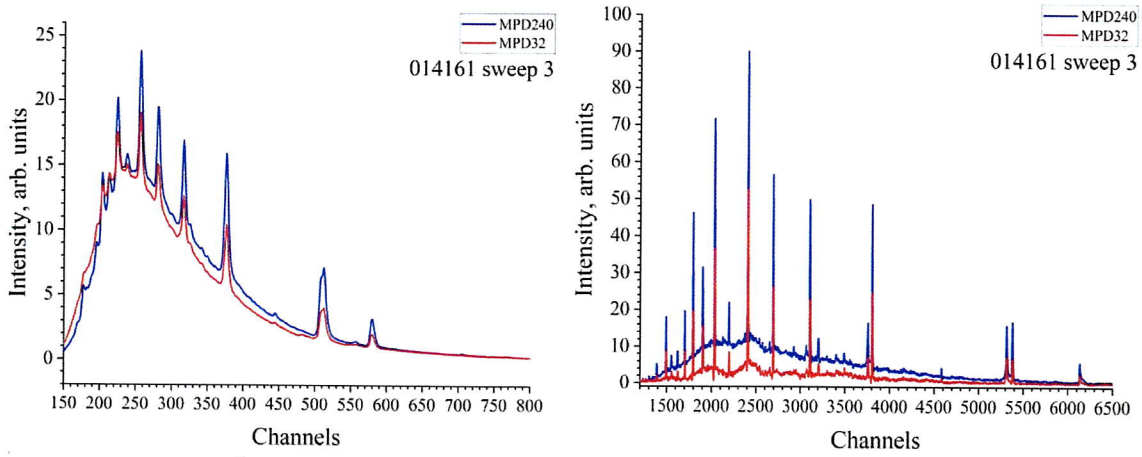
1. Изготовлены запасные блоки для системы сбора и накопления данных MPD32-USB3 в количестве 4 шт. с целью обеспечения бесперебойной работы детектора;
2. Закуплены запасные комплекты фотоэлектронных умножителей в количестве 10 шт.;
3. Настроены все блоки усилителей фирмы CAEN в соответствии с требованиями проекта.
4. Изготовлены в/в и измерительные кабели в количестве 432 шт.;
5. Демонтирован детектор ДОР и смонтирован детектор ДОР-А на ФДВР.
6. Выполнена проверка условий временной фокусировки детектора ДОР и проведена корректировка.
7. В течение 2025 года на реакторе ИБР-2 проводились настройка и тестирование детектора ДОР-А. На первом этапе ввода в эксплуатацию ДОР для

регистрации всех экспериментальных данных (запуск реактора, сигналы от всех элементов детекторной системы, сигналы приемника прерывателя) в режиме списка использовалась та же система сбора данных MPD240, что и в предыдущем детекторе [14]. Однако было обнаружено, что увеличение объема данных требует значительного повышения производительности системы сбора данных.

Для решения этой задачи в ЛНФ были разработана новая система сбора и накопления данных на базе шести блоков MPD-32 [**16**]. Были выполнены установка, подключение и настройка новой системы сбора данных с 6 блоками MPD-32 и компьютером - сервером системы и старой системы сбора данных с системой SONIX+ на 6 блоках MPD-240. Это позволило получить набор данных с каналов детектора при параллельной работе двух систем.

В результате проведённых сравнительных измерений с новой системой сбора данных MPD-32 были получены оценки реальных загрузок системы в различных режимах работы дифрактометра. Поток регистрируемых данных и их качество в значительной степени определяется соответствующим подбором параметров порогов дискриминации и параметров цифровых фильтров, позволяющих уменьшить регистрацию гамма-фона и регистрацию вторичных сигналов. Оптимальные настройки этих параметров соответствовали аналогичным настройкам на MPD-240. Но при этом, по сравнению со старой системой, благодаря более высокой пропускной способности, на MPD-32 отсутствовали потери данных и сбои в процессе набора потока сырых данных на компьютере. На рисунке 15 показаны спектры с тестовых образцов, измеренные для сравнительного анализа систем.

Сравнение спектров высокого и низкого разрешения, полученных при параллельной работе двух систем сбора данных на MPD-240 и MPD-32, показало, что при хорошем временном совпадении, имеется различие в амплитуде пиков, вызванное неоптимальным подбором параметров отбора событий из-за дефицита времени работы на пучке во время первых после остановки циклов реактора.



а) б)

Рисунок 15. Сравнение спектров низкого (а) и высокого (б) разрешения, полученных на MPD-240 и MPD-32.

В 2025 году в ЛНФ была также внедрена третья система сбора и накопления данных на основе 128-канального диджитайзера R5560SE от CAEN, которая в настоящее время подключена к передней плоскости ДОР-А, состоящей из 108 детекторных элементов. Все три системы представлены на рисунке 16.

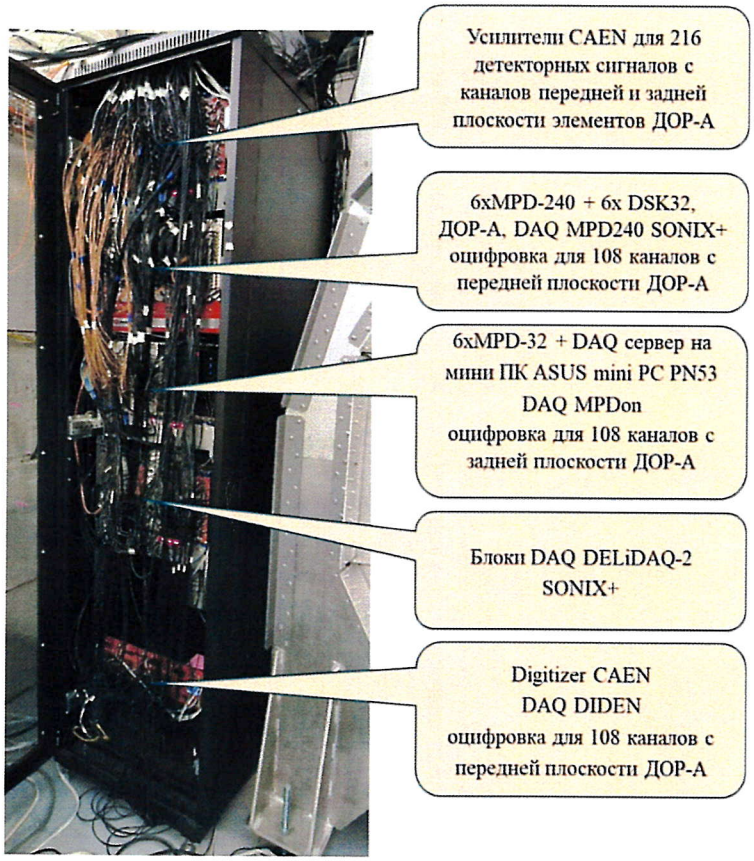
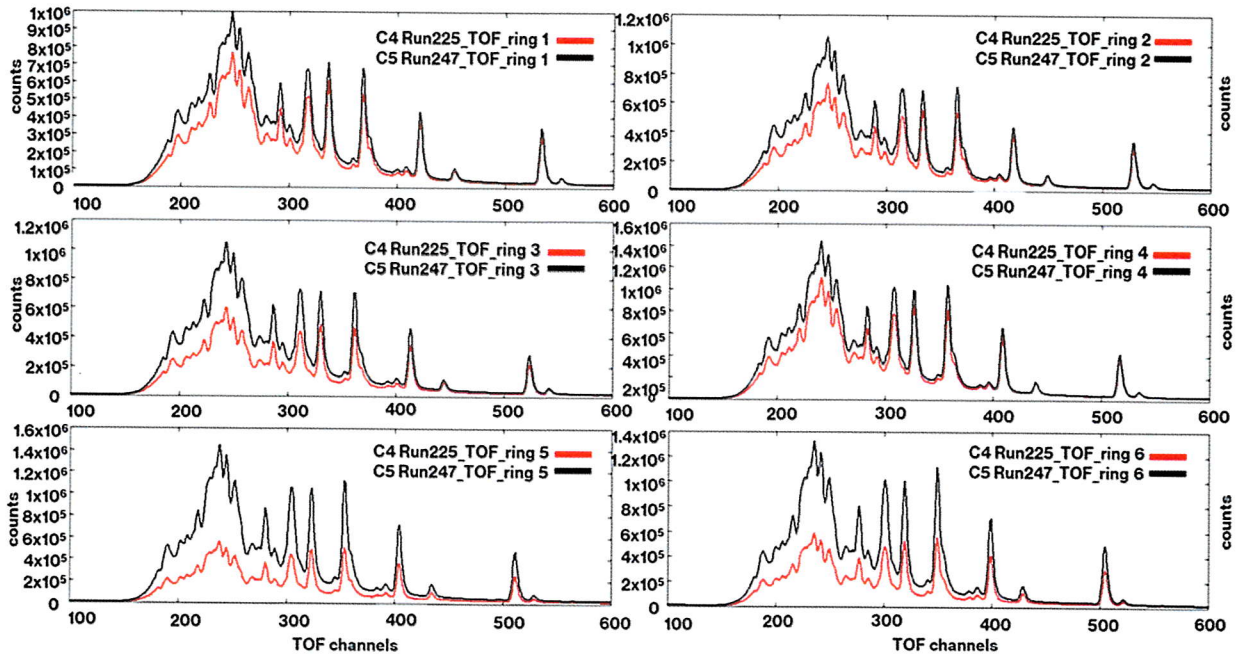
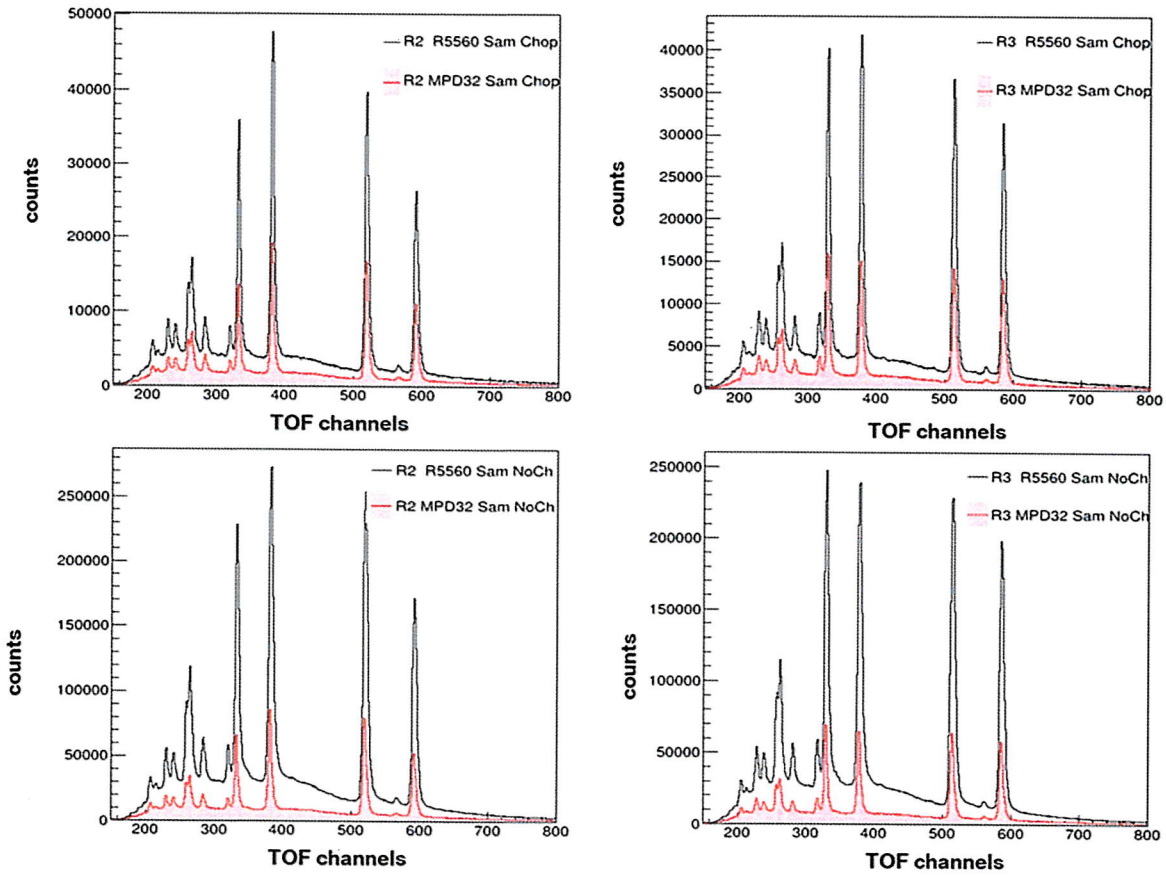


Рисунок 16. Размещение трёх систем сбора данных детектора ДОР-А, работающих параллельно, для сравнительных испытаний и отладки на сеансах реактора ИБР-2.

В процессе тестирования и настройки на реакторе новой системы сбора на базе диджитайзера R5560SE (на 108 детекторных элементах), начавшемся в октябре 2025 года, удалось улучшить рабочие характеристики системы. На рисунке 17 а) показано, как в результате проведенной работы по настройке параметров системы диджитайзера поднялся счет при улучшении соотношения сигнал/шум при измерениях с образцом Al_2O_3.



а)



б)

Рисунок 17. Сравнение спектров низкого разрешения Al_2O_3:
(а) – измеренных до (красный) и после (черный) настройки параметров R5560SE для 6 колец ДОР-А;
(б) – измеренных при параллельном подключении систем на базе MPD-32 и на диджитайзере R5560SE для 2-го (слева) и 3-го (справа) колец детектора (сверху – измерения с вращением прерывателя, снизу – измерения с выведенным из пучка прерывателем).

На рисунке 17 б) представлено сравнение спектров низкого разрешения от Al_2O_3, измеренных одновременно двумя системами сбора данных (R5560 и MPD32) с вращающимся прерывателем и без прерывателя. Видно, что система на базе диджитайзера (черный) продемонстрировала более высокий счет при лучшем соотношении сигнал/шум.

Полученные результаты показали, что при одних и тех же условиях система на основе диджитайзера (R5560SE) имеет более высокую пропускную способность по сравнению с системой на базе MPD240 и имеет ряд преимуществ по сравнению с системой на базе MPD32 за счет лучшей обработки сигнала. Нужно отметить, что верхний предел, при котором системы накопления данных с детектора работают без заметных потерь, составляет $2x10^5$ соб./сек. на один детекторный канал.

Система на базе диджитайзера R5560SE интегрирована в программный комплекс управления экспериментом SONIX и с декабря 2025 года используется как основная система сбора данных для верхней плоскости детектора ДОР-А. С ее помощью уже проведен ряд физических измерений, послуживших основой научных публикаций. Намечено расширение этой системы для подключения также нижней плоскости детектора.

Работы по сравнению и оптимизации систем накопления данных на основе MPD32 и диджитайзера R5560SE продолжаются в 2026 году.

2.4. Результаты сопутствующей деятельности

2.4.1. Научно-образовательная деятельность. Список защищенных диссертаций.

1. Подлесный Максим Михайлович «Разработка и создание широкоапертурных детекторов нейтронов на основе сцинтиллятора ^{6}LiF/ZnS(Ag) для спектрометров по времени пролёта». Специализация: 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики, физико-математические науки. Дата защиты: 20.11.2023. – кандидатская диссертация.
2. Иванов А.А. «Моделирование детектора обратного рассеяния Фурье-дифрактометра высокого разрешения с использованием программы Wolfram Mathematica», студент 3 курса ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 01-14.07.2024. - летняя практика.

2.4.2. Полученные гранты (стипендии) ОИЯИ.

1. Подлесный М.М., Стипендия имени Ф.Л. Шапиро 2025 по разделу "Методическое обеспечение экспериментов по нейтронной физике";
2. Подлесный М.М., Стипендия имени И.М. Франка 2024 по разделу "Научно-методические разработки для нейтронных исследований";
3. Петрова М.О., Грант ОМУС для специалистов на 2024 г.;
4. Козляковская А. А., Грант ОМУС для специалистов на 2024 г.;
5. Петрова М.О., Стипендия имени И.М. Франка 2023 по разделу "Научно-методические разработки для нейтронных исследований";
6. Подлесный М.М., Стипендия имени Ф.Л. Шапиро 2023 по разделу "Методическое обеспечение экспериментов по нейтронной физике"

2.4.3. Список основных публикаций авторов ОИЯИ, по результатам работы по проекту.

1. Sumnikov S.V., Yerzhanov B, Vasin R.N, Balagurov D.A., Milkov V.M, Podlesnyy M.M., Bogdzel A.A., Zhuravlev V.V., Zernin N.D., Kulikov S.A., Bodnarchuk V.I. and Balagurov A.M., “High-resolution neutron Fourier diffractometer with wide-aperture detector”, Journal of applied crystallography, ISSN 1600-5767, Volume 59 (2026), https://doi.org/10.5281/zenodo.18498130
2. Сумников С.В., Ержанов Б., Васин Р.Н., Балагуров Д.А. В.М., Милков, Подлесный М.М., Богдзель А.А., Журавлев В.В., Зернин Н.Д., Куликов С.А., Боднарчук В.И., Балагуров А.М., / НЕЙТРОННЫЙ ФУРЬЕ-ДИФРАКТОМЕТР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ШИРОКОАПЕРТУРНЫМ ДЕТЕКТОРОМ /, Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований – Препринт, Р3-2025-37, 2025.
3. Подлесный М.М., Круглов В.В., Боднарчук В.И., Милков В.М., Богдзель А.А. / Метод увеличения эффективности регистрации тепловых нейтронов сцинтилляционным детектором на основе экрана ^{6}Li/ZnS(Ag) и спектросмещающих оптических волокон с использованием цифровой обработки сигнала // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 2(253). С. 164–174.
4. Hai C.V., Balagurov A.M., Bogdzel A.A., Bodnarchuk V.I., Daulbaev O., Drozdov V.A., Zhuravlev V.V., Kirilov A.S, Kulikov. S.A., Kurilkin A.K., Kazliakouskaya A.A., Milkov V.M., Murashkevich S.M., Podlesnyy M.M., Prikhodko V.I., Petrova M.O., Sumnikov S.V., Churakov A.V., Shvetsov V.V., “Wide-Aperture Backscattering Detector (BSD-A) for The High-Resolution Fourier Diffractometer”, Nuclear Science and Technology, ISSN:1810-5408, Vietnam Atomic Energy Institute, Vol. 13 No. 2 (2023), pp 47-55.

2.4.4. Список докладов на международных конференциях и совещаниях.

1. Подлесный М.М., Милков В.М., Боднарчук В.И., Богдзель А.А., Швецов В.В., Булавина В.В., Даулбаев О., Курилкин А.К., «Детектор АСТРА-2М для фурье-стресс дифрактометра FSS реактора ИБР-2М», IV Всероссийской научно-практической конференции «ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД», 11-15 ноября 2024 года г. Дубна, Московская область - oral presentation.

2. Швецов В.В., Дроздов В.А., Горбунов Н.В., «РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ MPD-32 ДЛЯ МНОГОТОЧЕЧНЫХ ДЕТЕКТОРОВ РЕАКТОРА ИБР-2», IV Всероссийской научно-практической конференции «ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД», 11-15 ноября 2024 года г. Дубна, Московская область-)-oral presentation.

3. Cao V.H., «Wide aperture back scattering detector (BSD-A) for the high resolution fourier diffractometer», IV Всероссийской научно-практической конференции «ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД», 11-15 ноября 2024 года г. Дубна, Московская область – poster report.

4. Milkov V.V., «Development and application of He-3 and scintillation neutron detectors at instruments at the IBR-2 reactor», FLNP JINR – CSNS IHEP (China) Workshop on the neutron scattering technology and multi-disciplinary research (13-15 May 2024)-oral presentation.

5. Shvetsov V.V., «Data acquisition system at instruments at the IBR-2 reactor 1», FLNP JINR – CSNS IHEP (China) Workshop on the neutron scattering technology and multi-disciplinary research (13-15 May 2024)-oral presentation.

6. Podlesny M.M., «Existing developments and directions for further development of thermal-neutron detectors at the IBR-2 Department of spectrometers complex», International seminar ISINN-30, Sharm El-Sheikh, Egypt, April 14 – 18, 2024 - oral presentation.

2.4.5. Патентная деятельность.

1. Петрова М.О., Подлесный М.М., Милков В.М., “Устройство мониторинга переизлучающей способности спектросмещающего оптического волокна”. Патент № 2800058 от 17.07.2023 г.

3. Международное научно-техническое сотрудничество

Таблица 4. Фактически участвующие страны, институты и организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
НПО «АТОМ»	Россия	Дубна	НПО «АТОМ»	Договор

4. План/факт анализ использованных ресурсов: кадровых (в т.ч. ассоциированный персонал), финансовых, информационно-вычислительных, инфраструктурных

4.1. Кадровые ресурсы (фактически на время подачи отчета) (общее количество участников) Таблица 5.

№ пп/п	**Категория работника**	**Основной персонал Сумма FTE**	**Ассоциированный персонал Сумма FTE**
1.	научные работники	4,4	
2.	инженеры	6.3	
3.	специалисты	3.05	
4.	рабочие	0.5	
	Итого:	**14,25**	

4.2. Фактическая сметная стоимость проекта

Расходы по теме за 2024-2026 гг. на выполнение проекта по статьям материалы и оборудование составили 80 kUSD (Таблица 6).

Таблица 6 - Расходы по теме за 2024-2026 гг. на выполнение проекта

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования			**Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах**	**Стоимость, распределение по годам**		
				2024 год	2025 год	2026 год
		ФЗП (включая страховые взносы и соцбытфонд)	371	184	187	-
		Международное сотрудничество (МНТС)	10	5	5	-
		Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	50	25	25	-
		Материалы	20	10	10	-
		Проектирование/строительство	-	-	-	-
Необходимые ресурсы	**Нормо-час**	Ресурсы				
		– FTE,				
		– ускорителя/установки,				
		– реактора, …….	400	200	200	-
Источники финансирования	**Бюджетные средства**	Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета),* Тема 1143 (4,5,6)	**80**	**40**	**40**	**-**
	Внебюджетные (доп. смета)	Вклады соисполнителей. Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования	-	-	-	-

5. Заключение

В настоящее время детектор ДОР-А в составе дифрактометра ФДВР успешно испытан на пучке реактора ИБР-2. Выполнение исследований по данному проекту, создание детектора ДОР-А и включение его в состав оборудования дифрактометра позволяют вывести ФДВР на лидирующие позиции в мире.

Модернизация детекторной системы ФДВР с помощью установки ДОР вывела оба ее основных режима работы – высокое разрешение и высокую интенсивность – на новый уровень: разрешение $\Delta d/d$ улучшилось примерно в 2 раза, а интенсивность – примерно в 5 раз, что уже открывает новые возможности для исследований [**19,20**].

Полученные результаты показали, что при одних и тех же условиях система сбора данных на основе диджитайзера (R5560SE) имеет более высокую пропускную способность, чем другие системы за счет более детальной обработки сигнала.

Детектор покрывает телесный угол 2 ср, имеет среднюю эффективность конвертации нейтронов 85% при использовании 2-х слоёв сцинтиллятора. Площадь сцинтиллятора равна 13.7 м^2, соответствует 216 каналам регистрации. Рассчитанный геометрический вклад детектора в функцию разрешения для всех колец не превышает величину $R\theta$=2.62×10^{-4}. Детектор обладает временем отклика ~10 нс и максимальной загрузочной способностью порядка 10^5 н/сек на один канал регистрации.

Несмотря на большие габариты детектора и вес конструкции в 1.5 тонны, проведённые измерения с использованием нового детектора подтвердили правильность его расположения и точность фокусировки.

В заключение исполнители проекта хотели бы отметить огромный вклад первого руководителя проекта **КРУГЛОВА ВЛАДИМИРА ВАСИЛЬЕВИЧА**, безвременно ушедшего в 2020 году, в подготовку научно-технического обоснования, проведение расчетов, разработку конструкции и технологию изготовления элементов широкоапертурного детектора обратного рассеяния для дифрактометра ФДВР.

Руководитель темы

_____ / Бодиарчук /

“06“ 04 **2026г.**

Руководитель проекта

_____ / Милков В. М. /

“06“ 04 **2026г.**

Экономист Лаборатории

_____ / Сорокина М.В /

“08“ 04 **2026 г.**