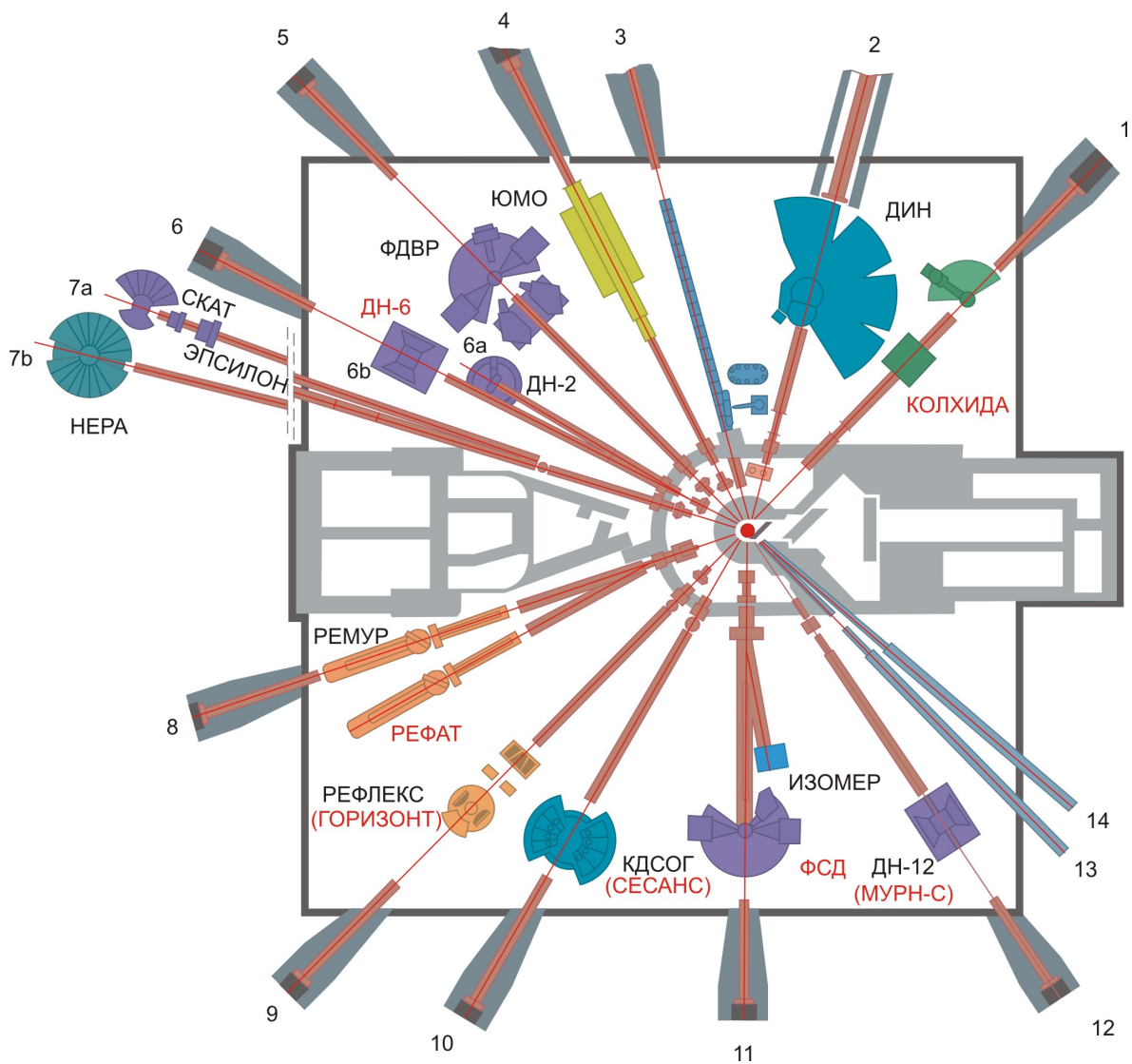


Предложения

в программу развития комплекса спектрометров на реакторе ИБР-2М



Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка

**Научно-экспериментальный отдел
нейтронных исследований конденсированных сред**

**Предложения
в программу развития комплекса
спектрометров на реакторе ИБР-2М**

Дубна 2006

ББК 22.344.1
31.46.6
УДК 621.384.8 + 621.039.55

Составитель: А.М.Балагуров

Под редакцией В.Л.Аксенова

Контактный адрес: 141980, Дубна, обл. Московская,
Объединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка,
E-mail: bala@nf.jinr.ru

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	4
2. Список проектов	9
3. Сводная таблица проектов	10
4. Аннотации проектов спектрометров	
Фурье-дифрактометр высокого разрешения	20
Фурье-стресс дифрактометр	24
Дифрактометр ДН-2.....	28
Комплекс дифрактометров ЭПСИЛОН-МДС и СКАТ.....	32
ЮМО – спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов	37
Спектрометр неупругого рассеяния НЕРА	41
Спектрометр неупругого рассеяния ДИН-2ПИ	45
Спектрометр поляризованных нейтронов РЕМУР	49
КОЛХИДА – спектрометр с поляризованной мишенью	53
Нейтронный спектрометр для анализа процессов в реальном времени.....	56
Спектрометр ДН-6 для исследования микрообразцов	60
МУРН-С – высокопоточный спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов.....	64
РЕФАТ – рефлектометр поляризованных нейтронов с атомным разрешением	68
Рефлектометр с поляризованными нейтронами и с вертикальной плоскостью рассеяния	71
SESANS – спин-эхо спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов.....	75
5. Аннотации проектов общего назначения	
Комплекс замедлителей нейтронов.....	79
Оборудование спектрометров.....	83
Газовые детекторы.....	85
Сцинтилляционные детекторы	90
Криогенное оборудование.....	94
Система сбора данных.....	98

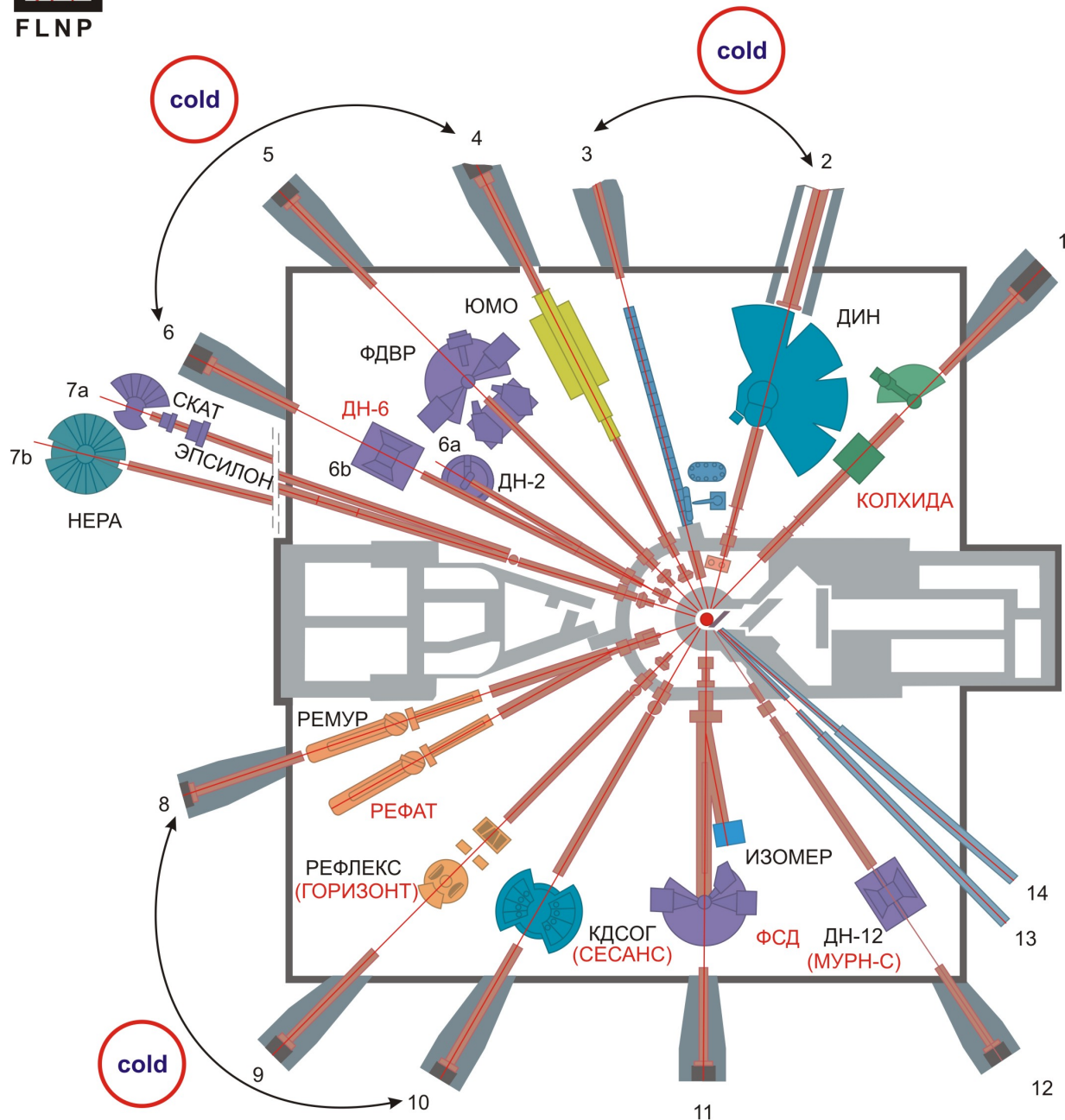
1. ВВЕДЕНИЕ

Реактор ИБР-2 был принят в эксплуатацию в феврале 1984 г. Ресурс работы ИБР-2 заканчивается в 2006 г. и в 2007 г. начнется II этап его модернизации (табл. 1), в результате которого фактически будет создан новый реактор ИБР-2М. Основные параметры реактора – полный поток тепловых нейтронов (10^{16} н/см²с) и длительность импульса тепловых нейтронов (~400 мкс) – после модернизации останутся практически неизменными. Существенным новым моментом станет наличие нескольких холодных замедлителей вокруг активной зоны ИБР-2М. Это обстоятельство учитывается в планах модернизации комплекса спектрометров, которая будет происходить в период длительной остановки (2007 – 2010 гг.) реактора на реконструкцию (таблица 1).

За 20 лет работы реактора ИБР-2 на его выведенных пучках нейтронов был создан уникальный комплекс спектрометров и накоплен большой опыт проведения экспериментов, в которых рассеяние нейтронов используется для исследования конденсированных сред. В настоящее время на ИБР-2 работают 6 дифрактометров, 3 спектрометра неупругого рассеяния, 2 рефлектометра с поляризованными нейтронами и одна установка для малоуглового рассеяния нейтронов (рис. 1). Имеющееся преобладание дифрактометров отражает исключительно успешное развитие этой методики на ИБР-2, что связано с несколькими причинами. Во-первых, именно с дифрактометрии начала развиваться экспериментальная техника исследований твердого тела на импульсных источниках. В Дубне в 1962 г. был создан первый в мире дифрактометр по времени пролета на импульсном источнике нейтронов, в ЛНФ были предложены многие идеи нейтронной дифрактометрии, нашедшие затем применение и получившие дальнейшее развитие в других нейтронных центрах. Новый этап развития дифрактометрии по времени пролета связан с созданием фурье-дифрактометров, сначала в 1984 г. на реакторе ВВР-М в ПИЯФ РАН (г. Гатчина), а затем в 1992 г. на реакторе ИБР-2. Создание фурье-дифрактометра высокого разрешения (ФДВР) показало, что на импульсных источниках с длинным импульсом (каким является ИБР-2) могут быть получены структурные результаты такого же или даже более высокого качества, как и на современных источниках нейтронов с узким импульсом. Успешное создание ФДВР позволило приступить к строительству на реакторе ИБР-2 еще одного фурье-дифрактометра (ФСД), оптимизированного для изучения внутренних напряжений, на котором в 2003 г. проведены макетные испытания и первые эксперименты. На дифрактометрах, действующих на реакторе ИБР-2, возможно решение весьма разнообразных задач (структурные исследования моно- и поликристаллов, определение магнитных структур, изучение влияния высокого давления на атомную и магнитную структуру, текстурный анализ, проведения экспериментов в реальном времени и др.) и, соответственно, их широкие возможности привлекают ученых из других организаций России и стран-участниц ОИЯИ. При этом надо отметить, что в последние годы возрастает число предложений на эксперимент, подаваемых химиками, биологами, материаловедцами, геофизиками. Так, комплекс из дифрактометров СКАТ и ЭПСИЛОН в значительной степени ориентирован на науки о Земле. Растущий запрос на применение нейтронных методов в материаловедении и инженерных науках обусловило появление дифрактометра ФСД.

Единственная на ИБР-2 установка малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) ЮМО явно перегружена - число предлагаемых экспериментов на одну эту установку составляет примерно 2/3 от предложений на 6 дифрактометров. С перегрузкой работает и рефлектометр РЕМУР. Надо к тому же иметь в виду, что эксперименты с поляризованными нейтронами занимают, как правило, длительное время, поэтому реальная потребность в экспериментальном времени на РЕМУР в два-три раза больше, чем это достижимо сейчас. Необходимость увеличения числа установок МУРН и рефлектометров диктуется и общей картиной распределения приборов на реакторах нейтронных центров в России (таблица 2).

Предварительная схема
экспериментального зала ИБР-2 после 2010 года



Спектрометры ИБР-2:

- Дифракция:** КОЛХИДА, ФДВР, ДН-2, ДН-12 (ДН-6), СКАТ – ЭПСИЛОН, ФСД
- Малоугловое рассеяние:** ЮМО, МУРН-С
- Рефлектометрия:** РЕМУР, РЕФАТ, РЕФЛЕКС (ГОРИЗОНТ)
- Неупругое рассеяние:** ДИН, НЕРА, КДСОГ (СЕСАНС)
- Ядерная физика:** ИЗОМЕР, КОЛХИДА

Таблица 1. График работ по модернизации ИБР-2 (этап II)

№ п/п	Виды работ	2007	2008	2009	2010
1.	Выгрузка активной зоны	■			
2.*	Демонтаж отработавшего оборудования	■			
2.1	Корпус реактора		■		
2.2	ПО-3	■			
2.3	Системы управления и защиты (СУЗ)	■			
3.	Монтаж нового оборудования:				
3.1	Корпус		■		
3.2	ПО-3	■		■	
3.3	СУЗ		■	■	
4.	Физический пуск			■	
5.	Энергопуск				■
6.	Работа на физический эксперимент				■

Таблица 2. Количественные данные о нейтронных спектрометрах на высокопоточных реакторах России

Типы спектрометров	ИБР-2 Дубна, ЛНФ ОИЯИ	ВВР-М Гатчина, ПИЯФ	ИР-8 Москва, РНЦ “КИ”	ИВВ-2М Заречный, НИКИЭТ, ИФМ УрО РАН
всего спектрометров	12	8	4	5
дифрактометры	6	3	2	4
спектрометры малоуглового рассеяния	1	2	1	1
спектрометры неупругого рассеяния	3	1	1	-
рефлектометры	1	-	-	-
спектрометры с поляризованными нейтронами	1	2	-	-
количество выполняемых в год экспериментов	~150	~50	~35	~50
в том числе внешними пользователями	~110	~15	~10	-

Как видно из таблицы 2, реакторы в России оснащены в основном дифрактометрами и спектрометрами неупругого рассеяния. В то же время, современные исследования конденсированных сред все больше связываются с химией и физикой полимеров, коллоидных дисперсий, биологических объектов, для которых характерны длиннопериодные и неупорядоченные структуры. Соответственно, увеличивается потребность в использовании холодных нейтронов и таких методов, как малоугловое рассеяние и рефлектометрия.

Развитие методов малоуглового рассеяния и рефлектометрии вполне адекватно характеристикам реактора ИБР-2, имеющему высокий полный поток нейтронов и при этом длинный импульс. Поэтому для повышения эффективности использования ИБР-2 было бы естественным иметь эквивалентное число каналов, занятых установками МУРН, рефлектометрами и дифрактометрами. С конца 1999 г. на ИБР-2 испытывался криогенный замедлитель, расположенный со стороны 4, 5, 6 каналов. Эксперименты на установках ЮМО, ФДВР и ДН-2 показали, что работа с криогенным замедлителем значительно повысила эффективность всех трех спектрометров. Выяснилось, однако, что для установки малоуглового рассеяния нейтронов ЮМО наиболее благоприятным является режим работы замедлителя при температуре ~ 30 К. В то же время, для дифрактометров ФДВР и ДН-2 более оптимален режим работы при температурах 60 - 80 К. Таким образом, возникла задача создания комбинированного замедлителя, обеспечивающего высокий поток нейтронов как в тепловой, так и в холодной частях спектра. В процессе модернизации реактора предполагается создание принципиально нового комплекса замедлителей, параметры которого будут подбираться исходя из предложений по конкретным спектрометрам.

При формировании предложений по развитию комплекса спектрометров на реакторе ИБР-2М учитывалось и происходящее в последние годы бурное развитие источников синхротронного излучения, что заставляет нейтронное сообщество обратить внимание на реализацию наиболее ярких возможностей нейтронных методов. В этой связи очевидно возрастание роли методов, использующих поляризованные нейтроны, и, соответственно, необходимо создание установок с поляризованными пучками, как рефлектометров, так и дифрактометров.

В данном сборнике представлены предложения по развитию и модернизации существующих и созданию новых спектрометров на реакторе ИБР-2М. Предложения подготовлены в основном сотрудниками Научно-экспериментального отдела нейтронных исследований конденсированных сред. Две установки на 1-ом и 11Б каналах, а также комплекс для нейтронного активационного анализа создаются и развиваются физиками научно-экспериментального отдела физики ядра. 3-й канал реактора используется для облучательных программ сектором ядерной безопасности и радиационных исследований.

Научный руководитель Лаборатории нейтронной физики
имени И.М.Франка

В.Л.Аксенов

Список проектов

I. Существующие спектрометры

1. Фурье-дифрактометр высокого разрешения.
2. Фурье-стресс-дифрактометр.
3. Дифрактометр ДН-2.
4. Комплекс дифрактометров ЭПСИЛОН-МДС и СКАТ.
5. ЮМО – спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов.
6. Спектрометр неупругого рассеяния НЕРА.
7. Спектрометр неупругого рассеяния ДИН-2ПИ.
8. Спектрометр поляризованных нейтронов РЕМУР.
9. КОЛХИДА – спектрометр с поляризованной мишенью.

II. Новые спектрометры

10. Нейтронный спектрометр для анализа процессов в реальном времени.
11. Спектрометр ДН-6 для исследования микрообразцов.
12. МУРН-С – высокопоточный спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов.
13. РЕФАТ – рефлектометр поляризованных нейтронов с атомным разрешением.
14. Рефлектометр с поляризованными нейтронами и с вертикальной плоскостью рассеяния (14).
15. SESANS – спин-эхо спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов.

III. Проекты общего назначения

16. Комплекс замедлителей реактора ИБР-2М.
17. Оборудование спектрометров.
18. Газовые позиционно-чувствительные детекторы нейтронов.
19. Позиционно-чувствительные сцинтилляционные детекторы на основе ZnS(Ag) сцинтиллятора.
20. Мобильные криогенные системы.
21. Развитие систем сбора данных комплекса спектрометров ИБР-2 и информационно-вычислительной инфраструктуры ЛНФ.

Сводная таблица проектов по созданию комплекса спектрометров на реакторе ИБР-2М

Проекты спектрометров разделены по двум категориям: А – развитие и модернизация, В – новый проект. В категории С представлены проекты общего назначения.

А. Развитие существующих спектрометров

1. Фурье-дифрактометр высокого разрешения.

Руководитель проекта: А.М.Балагуров.

Детектор обратного рассеяния	190	2010	Полный комплект
ПЧД, $\Delta x=0.3$ см, $l=30$ см	25	2005	Изготовлен в ЛНФ
Рефрижератор, $T_{\min}=3$ К	45	2006	Покупка
Электроника корреляционного анализа	40	2008	Изготовление в ЛНФ
Итого:	300 тыс. дол. США		

2. Фурье-стресс-дифрактометр.

Руководитель проекта: Г.Д.Бокучава.

Детекторы ASTRA	100	2007	Полный комплект
Радиальные коллиматоры для детекторов	50	2006-07	Заказ
Электроника корреляционного анализа	30	2008	Изготовление в ЛНФ
Монитор нейтронного пучка	2	2007	Изготовление в ЛНФ
Разработка ПО управления экспериментом	18	2007	Заказ
Итого:	200 тыс. дол. США		

3. Дифрактометр ДН-2.

Руководитель проекта: А.И. Бескровный.

Кольцевой детектор с электроникой	150	2010	Покупка
Электроника прерывателя	4	2007	Покупка
Прерыватель нейтронного пучка	3	2007	Покупка
Зеркальный нейтроновод	20	2009	Покупка
Модернизация нейтроновода	50	2009	Покупка
Рефрижератор, $T_{\min}=3$ К	45	2009	Покупка
Термостат	8	2009	Покупка
Высокотемпературная печь	10	2009	Покупка
Модернизация электроники и программного обеспечения	30	2009	Заказ
Итого:	320 тыс. дол. США		

4. Комплекс дифрактометров ЭПСИЛОН-МДС и СКАТ.

Руководители проекта: А. Фришбуттер (Потсдам, Германия), К. Уллемайер (Фрайбург, Германия)

Нагрузочная машина с системой изменения температуры	150	2010	Покупка и изготовление
Генератор ультразвуковых импульсов	10	2008	Покупка
Препроцессор акустических сигналов	16	2008	Покупка
Электроника прерывателя	4	2008	Покупка

Итого: 180 тыс. дол. США

5. ЮМО – спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов.

Руководитель проекта: В.И.Горделий.

ПЧД (второй)	280	2010	Полный комплект
Прерыватель	45	2009	Покупка
Детекторы и коллимационная система	80	2007	Покупка и изготовление
Электроника и вычислительная техника	35	2010	Покупка
Окружение образца	155	2010	Покупка

Итого: 595 тыс. дол. США

6. Спектрометр неупругого рассеяния НЕРА.

Руководитель проекта: И.Натканец.

Модернизация нейтронного пучка 7б: 1 – полная замена нейтронного пучка, 2 – замена головной секции нейтронного пучка с аргоном (12 м) и суперзеркальный концентратор пучка перед образцом (10 м)	450	до 2010	Покупка полного комплекта
	150	до 2010	Покупка секции нейтронного пучка
Обновление вакуумного оборудования на спектрометре и экспериментального оборудования узла образца	50	до 2010	Покупка оборудования
Обновление детекторной системы	50	до 2010	Покупка и изготовление в ЛНФ
Новый блок электроники для юстировки кристаллических анализаторов энергии нейтронов	30	до 2010	Изготовление в ЛНФ

Итого: 580 (280) тыс. дол. США

7. Спектрометр неупругого рассеяния ДИН-2ПИ.

Руководитель проекта: А.В. Пучков (ГНЦ РФ-ФЭИ).

Зеркальный нейтроновод	120	2010	Покупка, частично изготовление в ЛНФ
Установка дополнительных секций второй пролетной базы, оснащение детекторами и электроникой	250	2010	Изготовление и установка ГНЦ РФ-ФЭИ
Расширение области малых углов рассеяния	50	2008	Изготовление и установка ГНЦ РФ-ФЭИ
Рефрижератор, $T_{\min}=70$ К	25	2008	Покупка

Итого: 445 тыс. дол. США

8. Спектрометр поляризованных нейтронов РЕМУР.

Руководитель проекта: А.В.Петренко.

Коллиматоры	3	2007	Изготовление в ЛНФ
Блок защиты детекторов рефлектометрической моды	15 000 н./часов	2007	Изготовление в ЛНФ или ООЭП ОИЯИ
Позиционно-чувствительный детектор	6	2007	Доводка в ЛНФ
Анализатор поляризации	90	2010	Покупка
Материалы	35	2010	Покупка
Приборы, оборудование	25	2010	Покупка
Прерыватель	10	2010	изготовление в ЛНФ
Система управления и накопления	10	2007	Разработка в ЛНФ
Немагнитный гониометр для криостата	11	2007	Покупка
Блок питания криомагнита	15	2007	Покупка
Вставка в криостат для работы при $T=0.3$ К	20	2007	изготовление в ЛНФ
Вставка в криостат для работы при $T=600$ К	10	2010	изготовление в ЛНФ
Криогенератор для магнитных измерений при $T=10\div 400$ К	40	2007	Покупка
Система насыщения образцов водородом	5	2007	изготовление в ЛНФ
Доработка поворотной платформы	10	2007	изготовление в ЛНФ
Доработка площадок обслуживания криостата и экспериментального домика	5	2007	изготовление в ЛНФ
Фокусирующий нейтроновод	80	2010	Покупка

Итого: 375 тыс. дол. США + 15 000 н./часов

9. КОЛХИДА – спектрометр с поляризованной мишенью.

Руководитель проекта: М.И.Цулая.

Вакуумные насосы	75	2007	полный комплект
Измеритель сверхнизких температур с температурным датчиком	10	2006	полный комплект
Источник питания сверхпроводящего соленоида	10	2006	полный комплект
Многощелевой поляризатор	20	2006	покупка
ПЧД, $L \approx 50$ см, $\Delta x \approx 0.5$ см	30	2006	покупка или изготовление в ЛНФ
Гониометрическое устройство с дистанционным управлением	10	2010	изготовление
Рефрижератор, $T_{\min}=3$ К	45	2009	покупка
Монохроматор Cu_2MnAl_3	10	2010	покупка

Итого: 210 тыс. дол. США

В. Проекты новых спектрометров

10. Нейтронный спектрометр для анализа процессов в реальном времени.

Руководитель проекта: Г.М.Миронова.

Прерыватель барабанного типа	15	2010	Изготовление
Суперзеркальный нейтроновод	125	2008	Покупка
Детекторная система	100	2008	Изготовление
Системы окружения образца	60	2010	Покупка

Итого: 300 тыс. дол. США

11. Спектрометр ДН-6 для исследования микрообразцов.

Руководитель проекта: Б.Н. Савенко.

Детекторный блок (32 шт.)	160	2010	
Прерыватель нейтронного пучка	3	2008	
Электронная система управления и контроля прерывателя	3	2008	
Модернизация кожуха и головной части нейтроновода	50	2009	
Измерительно-вычислительный модуль	20	2009	

Итого: 236 тыс. дол. США

12. Установка малоуглового рассеяния нейтронов МУРН-С.

Научный руководитель: В.И.Горделий.

Нейтронновод	120	2009	Полный комплект
Прерыватель	55	2010	Покупка
Детекторы	560	2010	Покупка
Электроника	55	2010	Покупка
Окружение образца	95	2010	Покупка, изготовление

Итого: 885 тыс. дол. США

13. РЕФАТ – рефлектометр поляризованных нейтронов с атомным разрешением.

Руководитель проекта: Ю.В. Никитенко.

Доработка прерывателя	2	ЛНФ
Вакуумный нейтроновод	8	ЛНФ
Нейтроновод	100	ПИЯФ
Поляризатор нейтронов	15	ПИЯФ
Диафрагма (2шт)	10	ЛНФ
3-х осевой гониометр	30	Покупка
Электромагнит с питанием	20	Покупка
Анализатор поляризации 10 см×70 см	100	ПИЯФ
Линейный ПЧД 10 см×70 см с разрешением 3 мм	100	Покупка
Спин-флипперы (градиентный и типа токовая фольга)	2+20=22	ЛНФ
Электроника и программное обеспечение	25	ЛНФ
Технический проект	10	ЛНФ
Защита, коллиматоры	30	ЛНФ
Конструкторские работы	8	ЛНФ

Итого: 480 тыс. дол. США

14. Многофункциональный рефлектометр с горизонтальной плоскостью образца

Руководитель проекта: В.В. Лаутер-Пасюк.

Система формирования пучка (прерыватель, коллиматоры, вакуумная система)	70	2010	Изготовление в ЛНФ
Оптика (поляризатор, отклоняющие зеркала, анализатор)	100	2010	Изготовление в ПИЯФ
2D-ПЧД	100	2010	Покупка и изготовление
Окружение образца	250	2011	Покупка и изготовление
Электроника и программное обеспечение	150		Изготовление в ЛНФ
Вспомогательное оборудование	200	2010	Покупка и изготовление

Итого: 870 тыс. дол. США

15. SESANS – спин-эхо спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов.*Руководитель проекта:* Ю.В. Никитенко.

Фазочувствительная система:		
Электромагнит EL (4шт)	80	Изготов. ЛНФ
Электромагнит E (2шт)	20	Изготов. ЛНФ
Ротатор поляризации (3шт)	10	Изготов. ЛНФ
Источники питания электромагнитов (2шт)	15	Покупка
Генератор 1-3 МГц	25	Покупка
Поляризатор	15	Изготов. ПИЯФ
Анализатор поляризации	70	Изготов. ПИЯФ
Позиционно-чувствительный детектор	70	Покупка
Нейтронород	80	Изготов. ПИЯФ
Платформа (2шт)	15	Изготов. ЛНФ
Электроника и программное обеспечение	20	Изготов. ЛНФ
Защита	20	Покупка

Итого: 440 тыс. дол. США

С. Проекты общего назначения**16. Комплекс замедлителей реактора ИБР-2М***Руководители проекта:* Е.П. Шабалин, В.Д. Ананьев

Проект комплекса замедлителей и технологических линий	400	2007	Полный комплект (НИКИЭТ, ГСПИ)
Исследования криогенных замедлителей и технологических линий	100	2007	в ЛНФ совместно с ГСПИ и НИКИЭТ
Приобретение газодувок и вспомогательного технологического оборудования	200	2007	Покупка
Изготовление криогенных замедлителей	500	2009	Заказ
Гелиевый трубопровод: проект, изготовление и монтаж	150	2009	Заказ, монтаж в ЛНФ

Итого 1350 тыс. долл. США

17. Совершенствование оборудования спектрометров на реакторе ИБР-2М

Руководитель проекта: В.Г.Симкин.

Оборудование	Модель	Фирма	Цена	Кол-во	Полная цена
Рефрижератор замкнутого цикла, 3 К	SHI-3	Janis, USA	55	1	55
Одноступенчатый рефрижератор замкнутого цикла на 77°К	AL200	Cryomech, USA	24	2	48
Регулятор температуры	900S	Evrotherm, UK	1.5	3	4.5
Силиконовый диод	ДТ470	Lake Shore, USA	0.5	5	2.5
Калибратор температуры	CZ125	Omega, UK	0.5	1	0.5
Нагревательный элемент	62M36A5X	Watlow, USA	0.05	10	0.5
Турбомолекулярный насос		Leybold	8	2	16
Форвакуумный насос	2НВР-9ОД	Россия	1.7	1	1.7
Форвакуумный насос	2НВР-9ДМ	Россия	0.7	1	0.7
Вакуумметр с лампами низкого и высокого вакуума	L8350301	Varian, USA	4	5	20
Вакуумная арматура (вакуумные линии, вентили, разъемы, смазка)		Leubold, Germany	10		10
Гониометр Huber с рефрижератором до 4°К	DISPLEX202N	Huber, Germany	62	1	62
Столики линейного перемещения		Micromech	3	4	12
Столики вращения		Micromech	3	1	3
Сапфировые и алмазные наковальни		Россия	10	1	10
Криомагнит 7 Т	7THL	Janis, USA	85	1	85
Азотный танк		Россия	45	1	45
Гелиевый дюар		Россия	4	3	12
Высокочистые газы	He, ³ He, CO, Ar	Россия			2
Многоцелевой поляризатор		Гатчина, Россия	15	1	15
Система управления дисковыми прерывателями	Vector	CTDL, Germany	10	5	50

Итого 455.4 тыс. долл. США

18. Газовые позиционно-чувствительные детекторы нейтронов

Руководитель проекта: А.В.Белушкин

№	Перечень работ	Стоимость (тыс. \$)	Сроки	Исполнитель
1.	Развитие “детекторной” инфраструктуры (чистое помещение, технологическое оборудование, газы, стенды)	40 (10тыс.\$/год)	2007-2010	Изготовление в ЛНФ, покупка
2.	Разработка, изготовление и тестирование 2D ПЧД системы (225x225 мм ² , 2,0 мм) для рассеянного пучка	70	2006-2007	Изготовление в ЛНФ, ОП ОИЯИ
3.	Разработка, изготовление и тестирование 2D ПЧД системы (130x70 мм, 2,0 мм) для падающего пучка	70	2006-2007	Изготовление в ЛНФ, ОП ОИЯИ
4.	Разработка новой DAQ-электроники и программного обеспечения для MWPC детекторов с линиями задержки	25	2006-2007	Изготовление в ЛНФ, покупка станд. электроники
5.	Разработка, изготовление и тестирование 2D ПЧД с индивидуальным съемом информации и DAQ электроники	80	2008-2009	Изготовление в ЛНФ и ОП ОИЯИ, покупка станд. электроники

Итого 285 тыс. долл. США

19. Позиционно-чувствительные сцинтилляционные детекторы на основе ZnS(Ag) сцинтиллятора

Руководитель проекта: Е.С. Кузьмин

Статьи расходов	Стоимость	Период
Оборудование и материалы	20	2006
Услуги сторонних организаций	25	2006 - 2007
Премияльный фонд	10	2006 - 2007

Итого 55 тыс. долл. США

Наименование	Фирма	Цена за ед.	Кол.	Сумма
Матрица фотоумножителей H9500	Hamamatsu	5350 USD	2	11000 USD
Электронные компоненты и узлы	-	-	-	7000 USD
Инженерные материалы	-	-	-	2000 USD

Услуги	Стоимость
Разработка механической конструкции	5000 USD
Изготовление механической конструкции	5000 USD
Разработка электроники	8000 USD
Изготовление электроники	7000 USD

20. Мобильные криогенные системы

Руководитель проекта: А.Н.Черников

№	Наименование	Изготовитель	Сумма (KUSD)	Срок	Примечание
1	<u>Криостенд:</u> - криокулер PT410 - измеритель температур (модель 370) - термометры - вакуумное оборудование - экспериментальный криостат с пультом управления - He3 - материалы	Cryomech Lake Shore Lake Shore Varian Россия Россия	40 10 6 10 30 13 5	2007 2006 2007 2006 2007 2007 2006	Разработка и изготовление
2	Ремонт помещения под криостенд		4	2006	
3	Криостат с циркуляцией ³ He на диапазон температур 0.4–3 К.	Россия	50	2009	Разработка и изготовление
4	Криостат для работы с сверхпроводящими магнитами	Россия	60	2010	Разработка и изготовление

Итого 228 тыс. долл. США

21. Развитие систем сбора данных комплекса спектрометров ИБР-2 и информационно-вычислительной инфраструктуры ЛНФ

Руководитель проекта: В.И.Приходько

№ п/п	Перечень работ	Стоимость	Сроки	Исполнитель
1.	Разработка и изготовление опытных образцов новых электронных блоков и стендов	60 (15 т./год)	2007-2010	Изготовление в ЛНФ, покупка комплектующих изделий
2.	Разработка, отладка и оптимизация программного обеспечения DAQ-систем	30 (7 т./год)	2007-2010	Разработка в ЛНФ, покупка и обновление вспомогат. прогр. продуктов
3.	Оборудование рабочих мест инженеров и программистов (приобретение и модернизация PC, CAD/CAE – систем, контрольно-измерительных приборов и др.)	40 (10 т./год)	2007-2010	Покупка
4.	Модернизация систем электропитания электроники и компьютеров на спектрометрах ИБР-2	15	2007-2010	Покупка

5.	Модернизация систем управления прерывателями, исполнительными механизмами и системами окружения образца	40 (10т./год)	2007-2010	Изготовление в ЛНФ, покупка
6.	Изготовление новых систем сбора данных (аппаратура и программное обеспечение) в соответствии с планами развития спектрометров	-	2009-2010	Изготовление в ЛНФ
7.	Замена выработавших ресурс специализированных серверов и рабочих станций, дисков. подсистем	50	2008-2010	Покупка
8.	Модернизация архитектуры ЛВС, обновление операционных систем	20	2007-2010	Покупка, изготов. в ЛНФ
9.	Прокладка дублирующих линий связи и модернизация коммуникационного оборудования	30	2009-2010	Покупка, изготов. в ЛНФ
10.	Замена выработавшего ресурс периферийного оборудования ЛВС (сетевые принтеры, копировальное и проекционное оборудование)	40 (10 т./год)	2007-2010	Покупка

Итого 295 тыс. долл. США

Фурье-дифрактометр высокого разрешения

Руководитель проекта: А.М.Балагуров.

Созданный в 1992 г. Фурье-дифрактометр высокого разрешения (ФДВР) является уникальной установкой для проведения нейтронных дифракционных экспериментов, требующих разрешающей способности по межплоскостному расстоянию на уровне 0.001. За время эксплуатации ФДВР на нем проведены многочисленные эксперименты по прецизионному анализу структуры поликристаллов, изучению фазовых переходов в поли- и монокристаллах, определению остаточных внутренних напряжений в объемных изделиях; сформировался широкий круг пользователей из России и других стран. Для расширения возможностей ФДВР, улучшения его параметров и подготовке к работе на новом реакторе ИБР-2М необходимо провести модернизацию некоторых его узлов и оснастить дополнительными устройствами задания внешних условий на образце.

1. Статус и научная программа.

Нейтронный дифрактометр высокого разрешения является сложной и дорогой 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 России это возможно только в ЛНФ ОИЯИ (Дубна) и в ПИЯФ (Гатчина). Более того, нейтронный фурье-дифрактометр высокого разрешения (ФДВР) на реакторе ИБР-2 является одной из трех-четырёх нейтронных дифракционных установок в мире, где можно осуществлять эксперименты, требующие разрешающей способности $\Delta d/d \approx 0.001$ и лучше. Технические характеристики исходной версии ФДВР приведены в работе [1]. За время эксплуатации с 1992 г. по 2004 г. на ФДВР проведена замена некоторых узлов, значительно изменена детекторная система и произошла радикальная замена электроники накопления дифракционных спектров и управления экспериментом. Схема ФДВР представлена на **рис.1**.

Основным назначением ФДВР в настоящее время является **прецизионный структурный анализ поликристаллических веществ** со средним (до $\sim 500 \text{ \AA}^3$) объемом элементарной ячейки. Типичными примерами являются исследование соединений высокотемпературных сверхпроводников на основе ртути с различным содержанием кислорода или фтора в базисной плоскости [2, 3] и легированных манганитов с эффектом колоссального магнетосопротивления [4, 5]. ФДВР используется и для **анализа монокристаллов**, если требуется его уникально высокое разрешение по d_{hkl} , например, при изучении разделения фаз в кристаллах $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$, возникающего в результате низкотемпературной диффузии сверхстехиометрического кислорода [6].

Помимо структурных экспериментов на ФДВР значительная часть времени (до 40%) отводится на прикладные работы, связанные с **определением остаточных напряжений в объемных изделиях**. Для выполнения этой части программы было создано и закуплено специальное оборудование. Методика определения на ФДВР остаточных напряжений в объемных изделиях изложена в работе [7]. Предполагается, что с вводом в действие специализированного дифрактометра ФСД, все или большая часть экспериментов по внутренним напряжениям будет перенесена на ФСД.

2. Работа ФДВР на холодном источнике нейтронов.

ФДВР в настоящее время располагается на 5-м канале ИБР-2, со стороны которого предполагается постройка холодного замедлителя. Распространенным является мнение, что дифрактометр высокого разрешения для поликристаллов должен работать на тепловом или даже на горячем пучке нейтронов. На самом деле, это утверждение справедливо для стационарных реакторов, т.е. для дифрактометров, работающих при постоянной длине волны, и в ограниченной степени для ТОФ дифрактометров, предназначенных для измерения интенсивности дифракционных пиков при очень малых d_{hkl} . ТОФ дифрактометры высокого разрешения, предназначенные для анализа сложных структур (с объемом элементарной ячейки более 200 \AA^3), выгодно располагать на источниках с температурой порядка **100 К**, как, например, HRPD (ISIS).

Тестовые эксперименты на макете холодного замедлителя, проведенные в 1994 г. и 1999 г. показали, что для относительно сложных структур, безусловно, лучший результат получается при использовании холодного замедлителя. В диапазоне длин волн $4 - 10 \text{ \AA}$ фактор выигрыша при работе с холодным замедлителем по сравнению с гребенчатым замедлителем составляет от 5 до 10 раз. Это дает возможность регистрировать на ФДВР дифракционные пики при больших d_{hkl} , что зачастую является принципиальным обстоятельством при изучении магнитных структур. Поскольку первичный пучок на ФДВР формируется зеркальным нейтронотодом, то **размеры холодного замедлителя могут быть небольшими, а именно, $150 \times 150 \text{ см}^2$.**

Специфическая особенность ФДВР - работа в режиме сканирования по частоте вращения прерывателя (частотный свип). Практика эксплуатации ФДВР показала, что оптимальными являются свипы продолжительностью 2 часа, число таких свипов, как правило, составляет от 3 до 10, т.е. эксперимент длится от 6 до 20 часов. Отсюда следует, что эксплуатация ФДВР на холодном источнике нейтронов будет возможна, если **время стабильной работы источника составит не менее суток.**

3. Предложения по модернизации ФДВР.

Модернизация ФДВР будет направлена на **увеличение светосилы** дифрактометра, **снижение уровня фона**, **улучшение параметров фурье-анализа** и оснащение дифрактометра дополнительными устройствами задания внешних условий на образце. Оценки показывают, что решение этих задач позволит примерно в два раза увеличить число проводимых экспериментов, заметно поднять прецизионность получаемой структурной информации, существенно расширить возможности дифрактометра по проведению экспериментов в широком диапазоне температур и давлений.

3.1. Увеличение светосилы дифрактометра и снижение уровня фона

В настоящее время детекторная система ФДВР состоит из трех детекторов, два из которых расположены при углах рассеяния $\pm 152^\circ$, третий при 90° . Первые два используются в основном для исследований структуры поликристаллов, третий - в основном для измерений внутренних напряжений. Детектирующим элементом являются сцинтилляторы на основе Li-стекло. С современной точки зрения детекторы ФДВР имеют два недостатка: повышенную чувствительность к γ -фону и недостаточно большой телесный угол. Эти недостатки могут быть преодолены путем применения сцинтилляторов на основе ZnS(Ag) и использования комбинированной электронно-геометрической фокусировки. Для расширения рабочего диапазона по d_{hkl} необходимо оснащение ФДВР хорошим позиционно-чувствительным детектором для работы на малых и средних углах рассеяния в режиме низкого разрешения. Наличие такого ПЧД позволило бы параллельно со спектрами высокого разрешения в диапазоне d_{hkl} до 3 \AA накапливать дифракционную информацию в диапазоне от 3 \AA до 20 \AA , что зачастую необходимо для расшифровки структуры.

3.2. Улучшение параметров фурье-анализа.

На качество проведения корреляционного фурье-анализа влияют несколько факторов. Одним из основных является степень выполнения фурье-прерывателем заданного закона распределения частот вращения, что связано с точностью и стабильностью работы системы управления. Важными факторами являются также глубина модуляции интенсивности прошедшего через прерыватель пучка нейтронов и стабильность работы системы формирования *pick-up* сигналов. За прошедшие 7 лет эксплуатации ФДВР некоторые из этих узлов (диск прерывателя, система управления) близки к выработке своего ресурса. Некоторые другие узлы могут быть заменены на более качественные.

3.3. Устройства для задания внешних условий на образце.

В настоящее время в эксплуатации на ФДВР имеются гелиевый рефрижератор ($T \geq 10$ К), печь ($T \leq 600^\circ\text{C}$), газовая камера высокого давления (до 6 кбар). Для расширения круга проводимых экспериментов необходимо приобрести гелиевый рефрижератор, позволяющий снижать температуру до 3 К и продолжить работу по внедрению в эксплуатацию камеры высокого давления до 10 – 12 кбар.

4. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки проведения модернизации ФДВР.

Для поддержания светосилы ФДВР на мировом уровне необходимо увеличить телесный угол детекторной системы в **~5 раз**, т.е. довести его до величины ~ 0.8 ср. Это можно сделать на основе принципов, разработанных при создании детектора ФСД на основе ZnS(Ag) сцинтиллятора. Стоимость комплектующих и изготовления ZnS-детектора площадью 600 см^2 (1 модуль) составляет 15,000\$. Полный комплект, обеспечивающий телесный угол 0.8 ср, должен состоять из 12 модулей. Итого, стоимость новой детекторной системы – 180,000\$. Детектор может быть изготовлен силами детекторной группы ЛНФ с привлечением (на контрактной основе) сотрудников ЛЯП.

Для работы на малых и средних углах рассеяния необходимо приобрести или изготовить ПЧД с разрешением ~ 0.3 см и длиной около 30 см. В обоих случаях ориентировочная стоимость – 25,000\$.

Стоимости детекторов, узлов ФДВР, подлежащих обновлению, и оборудования для задания условий на образце отражены в **таблице 1**.

Работы по проекту будут осуществляться силами сотрудников группы ФДВР сектора дифракции.

Литература

1. Aksenov V.L., Balagurov A.M., Simkin V.G., Bulkin A.P., Kudrjashev V.A., Trounov V.A., Antson O., Hiismaki P., Tiitta A. "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, P13-96-164, Дубна, 1996.
2. Aksenov V.L., Balagurov A.M., V.V.Sikolenko, V.G.Simkin, V.A.Aleshin, Antipov E.V., A.A.Gippius, D.A.Mikhajlova, S.N.Putilin, F.Bouree "Precision neutron diffraction study of the high- T_c superconductor $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ " *Phys. Rev. B*, 1997, v.55, pp.3966-3973.
3. 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.
4. A.M.Balagurov, V.Yu.Pomjakushin, D.V.Sheptyakov, V.L.Aksenov, N.A.Babushkina, L.M.Belova, A.H.Taldenkov, A.V.Inyushkin, P.Fischer, M.Gutmann, L.Keller, O.Yu.Gorbenko, A.R.Kaul "Effect of oxygen isotope substitution on magnetic structure of $(\text{La}_{0.25}\text{Pr}_{0.75})_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ " *Phys. Rev. B*, v.60(1), 1999, pp.383-387.
5. Balagurov A.M., Pomjakushin V.Yu., Sheptyakov D.V., Aksenov V.L., Babushkina N.A., Belova L.M., Gorbenko O.Yu., Kaul A.R. "A-cation size and oxygen isotope substitution effects on $(\text{La}_{1-y}\text{Pr}_y)_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ structure" *Eur. Physical J. B*, 2001, v. 19 (2), pp.215-223.
6. Balagurov A.M., Pomjakushin V.Yu., Simkin V.G., Zakharov A.A. "Neutron diffraction study of phase separation in $\text{La}_2\text{CuO}_{4+y}$ single crystals" *Physica C*, 1996, v.272, pp.277-284.

7. Balagurov A.M., Bokuchava G.B., Schreiber J., Taran Yu.V.: “Equipment for residual stress measurements with the high resolution Fourier diffractometer: present status and prospects” *Mat. Sci. Forum*, 228-231 (1996) pp.265-268.

Таблица 1. Стоимость (в USD) и желательные сроки изготовления (приобретения) некоторых узлов ФДВР в рамках проекта модернизации.

Детектор обратного рассеяния	190	2010	Полный комплект
ПЧД, $\Delta x=0.3$ см, $l=30$ см	25	2005	Изготовлен в ЛНФ
Рефрижератор, $T_{\min}=3$ К	45	2006	Покупка
Электроника корреляционного анализа	40	2008	Изготовление в ЛНФ

Итого: 300 тыс. дол. США

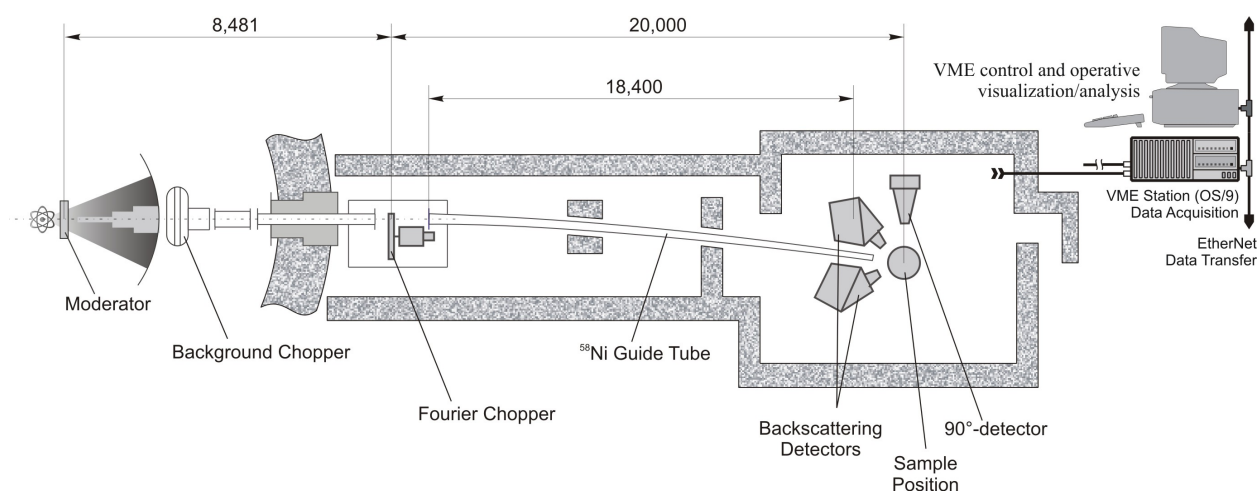


Рис.1. Схема ФДВР. Прерыватель для устранения нейтронов между основными импульсами мощности реактора (background chopper) располагается в кольцевом коридоре, быстрый фурье-прерыватель (Fourier chopper) – сразу за стеной кольцевого коридора. Нейтронный пучок на образце формируется изогнутым фокусирующим нейтроноводом (guide tube). Вокруг места образца располагаются главные широкоапертурные детекторы (main detectors) и детекторы, работающие в режиме низкого разрешения (low resolution detectors). Сигналы от детекторов подаются на корреляционную электронику.

Фурье-стресс-дифрактометр

Руководитель проекта: Г.Д. Бокучава.

В 1999 году в ЛНФ ОИЯИ на реакторе ИБР-2 началось создание специализированного фурье-дифрактометра ФСД для измерения внутренних напряжений. В 2002 г. были проведены первые физические эксперименты. Несмотря на то, что создание ФСД в настоящее время не завершено, на нем уже проводятся многочисленные эксперименты по определению внутренних остаточных напряжений в промышленных изделиях, по изучению упругих свойств современных композиционных материалов, методические исследования. Для завершения создания дифрактометра ФСД, расширения его возможностей, улучшения его технических параметров и подготовке к работе на новом реакторе ИБР-2М необходимо завершить создание детекторной системы, провести модернизацию некоторых его узлов и оснастить дополнительными устройствами задания внешних условий на образце.

1. Статус и научная программа.

Исследование внутренних механических напряжений в материалах имеет как фундаментальное научное, так и прикладное значение. Метод изучения напряжений при помощи дифракции нейтронов появился около 10 лет назад и получил широкое распространение из-за ряда его существенных преимуществ по сравнению с традиционными методиками. Наиболее важным является то, что нейтроны могут проникать в материал на глубину до 2-3 см для сталей и до 10 см для алюминия. Достоинства метода дифракции нейтронов настолько существенны, что в течение последних лет практически во всех современных нейтронных центрах созданы специализированные дифрактометры для изучения внутренних напряжений.

ФСД относится к классу **дифрактометров высокого разрешения**. Нейтронный дифрактометр высокого разрешения является сложной и дорогой 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 России это возможно только в ЛНФ ОИЯИ (Дубна) и в ПИЯФ (Гатчина). Технические характеристики и описание ФСД приведены в работах [1, 2]. За время эксплуатации ФСД определились реальные возможности дифрактометра в решении тех или иных задач и сформировались основные направления научных исследований. Они связаны с достигнутыми уровнями разрешающей способности и светосилы и доступным диапазоном межплоскостных расстояний d_{hkl} .

Основная часть задач связана с **определением тензора остаточных напряжений в готовых деталях и конструкциях**. Чаще всего источником возникновения напряжений являются различные технологические процессы. Такие задачи представляют интерес для промышленных производителей с точки зрения создания наиболее оптимальных свойств материала детали и оптимизации технологического процесса изготовления детали. Результаты подобных работ помогают создать оптимальное остаточное напряженное состояние в различных сечениях детали, и соответственно улучшить эксплуатационные свойства и срок работы детали. Типичными примерами являются исследования остаточно напряженного состояния в ударнике перфоратора [3] и переходнике трубы Zr/нержавеющая сталь [4], использующегося в атомной промышленности.

Второй наиболее важной задачей является **изучение остаточного напряженного состояния и упругих свойств современных материалов**, таких как композиционные и градиентные материалы, а также различные марки сталей. В этих задачах проводятся

исследования сосуществования нескольких различных фаз в одном материале и их совместное влияние на упругие свойства и остаточное напряженное состояние материала. Такие задачи очень важны для создания материалов с заранее заданными физико-химическими и упругими свойствами. Как результат этих работ появляется возможность создавать новые материалы с прогнозируемыми свойствами и поведением. Типичными примерами могут служить работы по изучению остаточного напряженного состояния и упругих свойств современных композитных материалов и градиентных композитных материалов, таких как W/Cu, WC/Co, Al₂O₃/Al. [5, 6, 7].

2. Работа ФСД на модернизированном реакторе ИБР-2М.

В настоящее время дифрактометр ФСД располагается на канале №11А реактора ИБР-2. Специфика исследуемых образцов и схема проведения эксперимента по исследованию внутренних механических напряжений приводит к тому, что основная наблюдаемая часть дифракционных пиков сосредоточена в области $d_{hkl} \approx 1.5 - 3,5 \text{ \AA}$. Таким образом, для проведения экспериментов наиболее оптимальным является использование **тепловых нейтронов и водяного гребенчатого замедлителя**.

Специфической особенностью ФСД является расположение канала №11А. В направлении канала присутствует часть кожуха подвижного отражателя. Кроме того, в новом реакторе ИБР-2М активная зона уменьшится по сравнению с ИБР-2, что приведет к тому, что нейтронный пучок будет проходить мимо активной зоны. Это обстоятельство требует создания ортогонального водяного гребенчатого замедлителя сложной формы.

Поскольку первичный пучок на ФСД формируется зеркальным нейтронным пучком, то размеры водяного гребенчатого замедлителя могут быть небольшими, а именно, 150x150 см².

3. Предложения по завершению создания и развитию ФСД.

Развитие ФСД направлено на дальнейшее **увеличение светосилы дифрактометра, снижение уровня фона, улучшение параметров фурье-анализа** и оснащение дифрактометра дополнительными устройствами для задания внешних условий на образце. Оценки показывают, что решение этих задач позволит примерно **в десять раз увеличить число проводимых экспериментов**, заметно поднять прецизионность получаемой информации, существенно расширить возможности дифрактометра по проведению экспериментов в широком диапазоне температур и внешних нагрузок.

3.1. Увеличение светосилы дифрактометра и снижение уровня фона

В настоящее время детекторная система ФСД состоит из трех детекторов, два из которых расположены при углах рассеяния $\pm 90^\circ$, третий при 141° . Первые два - ASTRA основные детекторы и используются в основном для измерений внутренних напряжений, третий - детектор обратного рассеяния в основном для исследований структуры поликристаллов.

Традиционно используемые детекторные системы имеют два недостатка: повышенную чувствительность к γ -фону и недостаточно большой телесный угол. С помощью сцинтилляторов на основе ZnS(Ag) в детекторах ASTRA удалось избавиться от чувствительности к γ -фону. Второй недостаток – маленький телесный угол планируется исправить в финальном варианте детекторной системы (**рис.1**), которая будет состоять из двух детекторов ASTRA, при этом каждый будет включать 7 независимых, т.е. с отдельным выводом электронного сигнала, элементов. Комбинированное использование электронной и временной фокусировок пучка нейтронов позволит **увеличить телесный угол до 0.29 ср для каждого детектора ASTRA**. К настоящему моменту изготовлено и установлено по одному элементу на каждом из детекторов ASTRA.

Кроме того, для проведения экспериментов по исследованию внутренних напряжений необходимо иметь возможность выделять внутри исследуемого образца измеряемый объем с характерными размерами несколько кубических миллиметров. Для этих целей на ФСД в настоящее время используется система щелей. **Использование радиальных коллиматоров** позволит не только выделить необходимый рассеивающий объем внутри образца, но и снизить уровень фона, а также увеличить используемый телесный угол детектора.

3.2. Улучшение параметров фурье-анализа

На качество проведения корреляционного фурье-анализа влияют несколько факторов. Одним из основных является степень выполнения фурье-прерывателем заданного закона распределения частот вращения, что связано с точностью и стабильностью работы системы управления. Важными факторами являются также глубина модуляции интенсивности прошедшего через прерыватель пучка нейтронов и стабильность работы системы формирования pick-up сигналов. За прошедшие годы эксплуатации ФСД некоторые из этих узлов (диск прерывателя, система управления) близки к выработке своего ресурса. Некоторые другие узлы могут быть заменены на более качественные.

3.3. Улучшение системы контроля и управления экспериментом

В настоящее время система управления экспериментом – NICS [8] включает серверную часть программного обеспечения разработанного для VME электроники с операционной системой реального времени OS-9 и интерфейсных программ запускаемых на рабочих станциях SUN. Серверная часть программного обеспечения на VME предоставляет пользователю возможность организовать дистанционное управление посредством системы команд интерфейсной программы запускаемой на рабочих станциях SUN домена ЛНФ. Пользователь может управлять системой с любого X терминала или компьютера подключенного к сети ЛНФ. К сожалению, возможности OS-9 достаточно ограничены, поэтому представляется необходимым **разработка программного обеспечения, работающего под OS Windows**. Это позволит упростить процедуру управления экспериментом, позволит сократить время на написание управляющих программ и на проведение юстировочных работ, а также позволит улучшить визуализацию измеренных данных.

Кроме этого, **создание системы слежения и видеонаблюдения за образцом** и его окружением позволит лучше контролировать проведение эксперимента и позволит сократить время на юстировку образцов.

4. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки завершения создания ФСД.

Для завершения создания детекторной системы на ФСД и увеличения ее светосилы до мирового уровня необходимо **изготовить и установить 10 модулей детекторов ASTRA**. Стоимость комплектующих и изготовления ZnS-детектора (ASTRA) площадью 600 см² (1 модуль) составляет 10,000\$. Итого, стоимость завершения создания детекторной системы – 100,000\$. Детектор может быть изготовлен силами детекторной группы ЛНФ с привлечением (на контрактной основе) сотрудников ЛЯП. Также для максимального использования детекторной системы необходимо **изготовить и установить радиальные коллиматоры**, ориентировочная стоимость которых составляет 50,000\$. Стоимости узлов ФСД, подлежащих изготовлению и обновлению, и оборудования для задания условий на образце отражены в следующей таблице:

Детекторы ASTRA	100,000	2007	Полный комплект
Изготовление радиальных коллиматоров на детекторы ASTRA	50,000	2006-07	Заказ

Новая версия электроники корреляционного анализа	30,000	2008	Изготовление в ЛНФ
Монитор нейтронного пучка	2,000	2007	Изготовление в ЛНФ
Разработка ПО управления экспериментом	18,000	2007	Заказ

ИТОГО 200,000 USD

Работы по проекту будут осуществляться силами сотрудников группы ФДВР сектора дифракции.

Литература

1. Bokuchava G.D, Aksenov V.L., Balagurov A.M., Kuzmin E.S., Zhuravlev V.V., Bulkin A.P., Kudryashev V.A., Trounov V.A., "Neutron Fourier diffractometer FSD for internal stress analysis: first results" *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2002, A74, S86-S88.
2. Balagurov A.M., Bokuchava G.D., Kuzmin E.S., Tamonov A.V., Zhuk V.V. "Neutron RTOF diffractometer FSD for residual stress investigation" *Zeitschrift fur Kristallographie* (accepted for publication).
3. Tamonov A.V. and Sumin V.V. "Investigation of Residual Stresses in a Bimetallic Stainless Steel-Zirconium Adapter by Neutron Diffraction" *Journal of Neutron Research*, 2004 Vol. 12, pp. 69-73.
4. Bokuchava G.D., Tamonov A.V. et al., "Reverse Time-of-Flight Neutron Diffraction Study of Residual Stresses in Perforator's Striker". *Journal of Neutron Research*, 2001, Vol.9, pp. 255-261.
5. J. Schreiber, V. Richter, K. Voigt, G. Bokuchava, A. Tamonov "Investigation of non-equilibrium effects on residual stress state of metallic composites" Proc. of European Conference on Hard Materials and Diamond Tooling (European Powder Metallurgy Association, ISBN 1899072 17 9) p.114, 2002.
6. G.Bokuchava, N.Shamsutdinov, J.Schreiber, M.Stalder, "Determination of residual stresses in WCu gradient materials", *Textures and Microstructures*, 1999, v.33, pp.207-217.
7. S.Skirl, G.Bokuchava, J.Schreiber, W.Pompe, M.Hoffman and J.Rodel, "Analysis of Residual Stresses in Al₂O₃/Al Composites with Interpenetrating Networks. Part I: Neutron Diffraction", *Acta Materialia* (1998).
8. Y.A.Astakhov, A.I.Ostrovnoi, T.B.Petukhova et al. "The unified software for the data acquisition and control system of the IBR-2 spectrometers" DANEF'97 proceeding, Dubna, Russia, 295.

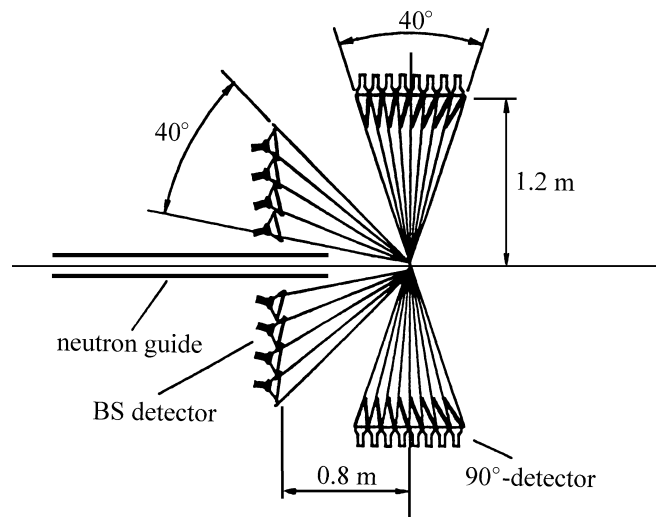


Рис. 1. Детекторная система фурье-дифрактометра ФСД. BS – детекторы обратного рассеяния (BackScattering) $\pm 141^\circ$. 90° детектор – детекторная система ASTRA (левое и правое крыло).

Дифрактометр ДН-2

Руководитель проекта: А.И.Бескровный

Дифрактометр ДН-2 – одна из экспериментальных установок, работающих с начала пуска ИБР-2. Основные направления применения дифрактометра определяются его разрешением по межплоскостному расстоянию (~ 0.01) и высоким потоком нейтронов на образце ($\sim 10^7$ н/см²/сек). За прошедший период на дифрактометре выполнены многочисленные эксперименты на поликристаллах, монокристаллах и биологических мембранах по определению атомной и магнитной структур, исследованию кинетики и особенностей фазовых превращений. С целью расширения экспериментальных возможностей ДН-2, улучшения его параметров и подготовке к работе на новом реакторе ИБР-2М необходимо провести модернизацию некоторых его узлов, оснастить дополнительным оборудованием и устройствами задания внешних условий на образце.

1. Статус и научная программа.

К достоинствам дифрактометра ДН-2 относятся его высокая светосила (порядка 10^7 н/см²/сек) и большой диапазон доступных длин волн (от 1 до 20 Å). На дифрактометре эксплуатируются три вида детекторных систем:

- восемь счетчиков нейтронов СНМ-17, расположенных при различных углах рассеяния от 30 до 174 градусов,
- линейный однокоординатный ПЧД с резистивной нитью длиной 50 см и пространственным разрешением 5 мм,
- двухкоординатный ПЧД на линиях задержки с чувствительной областью 260x140 мм² с координатным разрешением 2,0 мм, который может быть установлен в широком диапазоне углов рассеяния (от 2 до 160 градусов) на расстоянии от образца 0.2 – 1.5 м.

Интервал доступных длин волны в сочетании с возможностью регистрации нейтронов на углах рассеяния от 2° до 174° позволяют перекрыть интервал измеряемых межплоскостных расстояний от 0.7 до 60 Å.

Используемое на дифрактометре оборудование, включает трехосный гониометр, рефрижератор замкнутого цикла, высокотемпературную печь и тороидальную камеру высокого давления. Параметры дифрактометра и комплект оборудования позволяют изучать [1-20]:

1. кристаллическую структуру порошков и монокристаллов в широком интервале температур от 7 К до 1000 К,
2. магнитную структуру,
3. фазовые переходы,
4. процессы в реальном времени, такие как:
 - а) твердофазные химические реакции,
 - б) кристаллизацию,
 - в) гидратацию – дегидратацию,
 - г) фазовые переходы.
5. диффузное рассеяние в дефектных кристаллах,
6. доменные структуры,
7. сверхструктурные рефлексы малой интенсивности ($\sim 0.1-0.01\%$ от интенсивности основных пиков) в модулированных структурах,
8. низкоразмерные структуры с большой элементарной ячейкой,
9. несоразмерные модулированные магнитные структуры,
10. структуры при высоких давлениях.

2. Работа на холодном замедлителе нейтронов.

На 6-м канале ИБР-2М предполагается установить холодный замедлитель. Тестовые эксперименты на макете холодного замедлителя, проведенные в 1994 г. и 1999 г., показали, что в диапазоне длин волн 4 – 10 Å фактор выигрыша при работе с холодным замедлителем по сравнению с гребенчатым замедлителем составляет от 5 до 10 раз. Для относительно сложных структур с объемом элементарной ячейки $\sim 300 \text{ \AA}^3$ и более основная наблюдаемая часть дифракционных пиков сосредоточена в области $d_{hkl} \approx 2.5 - 10.0 \text{ \AA}$. Таким образом, работа на холодном замедлителе дает возможность регистрировать дифракционные пики с большими d_{hkl} с хорошей статистикой за приемлемое время. Особенно важна эта возможность при изучении магнитных структур. Очень важен холодный замедлитель и при исследовании длиннопериодных структур. Например, при изучении структуры и кинетики превращений в биологических мембранах с периодом от 20 до 100 Å.

Как правило, время измерения одного дифракционного спектра на ДН-2 длится от 2 до 20 часов. Следовательно, работа с холодным замедлителем будет возможна при его стабильной работе не менее суток. Наиболее оптимальная температура замедлителя – 100К.

3. Предложения по модернизации ДН-2.

Для успешной дальнейшей эксплуатации дифрактометра ДН-2, развития его экспериментальных возможностей (в том числе и улучшения его параметров), подготовки к работе на новом реакторе ИБР-2М, необходимо провести замену некоторых узлов дифрактометра и провести оснащение новыми устройствами окружения образца.

3.1. Увеличение светосилы дифрактометра и снижение уровня фона.

Детекторная система ДН-2 из шести счетчиков СМ-17 и однокоординатного ПЧД, установленных на различных углах рассеяния, обеспечивает при одной съемке измерение спектра в диапазоне межплоскостных расстояний от 1 до 60 Å. Однако телесный угол регистрации счетчиками СМ-17 очень мал. Для увеличения светосилы дифрактометра при исследованиях на поликристаллах с малыми и большими ячейками необходимо установить два многокольцевых детектора в аксиальной геометрии на малые и обратные углы рассеяния. Установка кольцевых детекторов увеличит телесный угол регистрации нейтронов в ~ 200 раз.

Повышение светосилы дифрактометра возможно за счет вакуумирования нейтропровода (в настоящее время нейтропровод заполняется аргоном). Светосила ДН-2 будет увеличена также за счет замены стеклянных элементов головной части зеркального нейтропровода и установки отдельной нейтропроводной секции ближе к замедлителю. Для снижения уровня фона предусматривается установка в кольцевом коридоре прерывателя пучка нейтронов с вертикальной осью вращения.

3.2. Устройства для задания условий на образце.

Оборудование, используемое на дифрактометре, включает в себя трехосный гониометр, рефрижератор замкнутого цикла на 7 – 300 К, высокотемпературную печь до 800 К и тороидальную камеру высокого давления до 70 кбар для работы при комнатной температуре. Для расширения экспериментальных возможностей планируется разработка и создание вакуумной печи для создания на образце высоких (до 1300 К) температур. Необходимо также приобрести рефрижератор с минимальной рабочей температурой 3 К и термостат для исследований биологических объектов в температурном интервале 0 - 100°C.

3.3. Развитие электроники и программного обеспечения ДН-2.

Электронное оборудование, системы накопления данных, программное управление дифрактометром реализованы в стандарте VME. Планируется внедрить основанные на интернет технологиях программы управления дифрактометром, которые позволят вести удаленный контроль и управление экспериментом и анализ экспериментальных данных.

4. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки проведения модернизации.

Предлагаемые в проекте кольцевые детекторы разработаны в ЛНФ (прототип успешно эксплуатируется на установке ЮМО). Детектор может быть изготовлен на машиностроительном предприятии, электроника – в отделе КС ЛНФ. Ожидаемая полная стоимость двух комплектов около 50,000\$. Электронное оборудование для управления прерывателем нейтронного пучка стоит 3,500\$. Проектирование и изготовление вакуумированного зеркального нейтронновода будет выполнено в ПИЯФ, Гатчина. Стоимость оборудования для реализации предлагаемого развития дифрактометра ДН-2 приведена в таблице 1.

Литература

1. L.Mestres, M.L.Martinez-Sarrion, M.Morales, A.I.Beskrovnyi, I.Natkaniec, I.G.Shelkova, L.S.Smirnov, L.A.Shuvalov "X-ray and neutron diffraction study of the $Rb_{2-x}(NH_4)_xSO_4$ system" J. Phys. Soc. Jpn. v.67 (1998) pp.1636-1642.
2. M.Baeva, A.Beskrovnyi, S.Danilkin, E.Jadrovskiy "X-Ray diffraction and neutron diffraction study of Fe-(15 to 29) Cr-H-Ni-0.5N" Journal of materials science letters, v.17 (1998) pp.1169-1171.
3. V.K.Fedotov, V.E.Antonov, A.I.Kolesnikov, A.I.Beskrovny, G.Grosse, F.E.Wagner "Neutron diffraction investigation of γ -manganese hidride" Sol. St. Commun., v.107(12), pp.787-790, 1998.
4. V.Yu. Pomjakushin, A. A. Zakharov, A. M. Balagurov, F. N. Gygax, A. Schenck, A.Amato, D. Herlach, A. I. Beskrovny, V. N. Duginov, Yu. V. Obukhov, A.N.Ponomarev, and S. N. Barilo "Microscopic phase separation in $LaCuO_{4+y}$ induced by the superconducting transition", Phys. Rev. B, v.58(18) 1998, pp.12350-12354.
5. A.I. Beskrovnyi, Z.Jirak, M.Nevriva, and I.G. Shelkova "Neutron diffraction study of the modulated structure of $Bi_2 Sr_{3-x}Cu_2O_{8+y}(x\sim 0.6)$ ", Physica C 206 (1993) pp.27-32.
6. M.Nevriva, Z.Jirak, V.Sima, A.I. Beskrovnyi, C.Martin, B.Raveau "Single crystal growth and the structure of $Bi_2Sr_2Ca_{1-x}Y_xCu_2O_{8+y}$ " Electrochemical Society Proceedings 1997, v.39, pp.480-486.
7. Gordeliy V. I. and N.I. Chernov (1997) "Accuracy of Determination of Position and Width of Molecular Groups in Biological and Lipid Membranes via Neutron Diffraction" J. Appl. Cryst. D53 (1997) pp. 377-384.
8. G. Klose, A. Islamov, B. Koenig, V. Cherezov, "Structure of Mixed Multilayers of Palmitoylcholine and Oligo(oxyethylene glycol) Monododecyl Ether Determined by X-ray and Neutron Diffraction" (1996), Langmuir, 12, pp.409-415;
9. A.M.Balagurov, A.I.Beskrovnyi, V.Yu.Pomjakushin, V.G.Simkin, B.Sh.Bagautdinov, V.Sh.Shekhtman, and A.A.Zakharov, "Twinned of La_2CuO_4 Structure" Kristallography Reports. v.44, 1999, pp.67-77.
10. G. Aldica, G.M. Mironova, N.P. Popa, A.D. Stoica, and M.G. Stoica "Time- Resolved Neutron Diffraction Study of the Superconducting Phase Formation Process in the Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O System" Journal of Superconductivity v.6(4), p.273, 1993.
11. A.Andrianov, D.Kosarev, A.Beskrovnyi "Helical magnetic structure in Tb affected by uniaxial tension" Phys. Rev. B, v62(21), p.13844 (2000).
12. L.M. Plyasova, V. F. Anufrienko, A.I. Beskrovnyi, I.Y. Molina et al. Influence reductive-oxidative processings on magnetic properties of chromite copper. "Journal of Structural Chemistry" 2002, v.43(2), p.274.
13. M.L.Martinez Sarrion, L.Mestres, M.Herraiz, A.V.Belushkin, A.M.Balagurov, A.I.Beskrovnyi, S.G.Vasilovskii, L.S.Smirnov, «Synthesis and characterisation of new semiconductor Aurivillius phase» Eur. J. Inorg. Chem., 2002, pp.1794-1800.
14. Z.Surowiec, M.Wiertel, A.I.Beskrovny, J.Sarzyński and J.J.Milczarek "Investigations of microscopic magnetic properties of the pseudo-binary system $(Zr_{1-x}Ti_x)Fe_2$ " J.Phys.:Condens.Matter v.15 (2003) pp.6403-6414.
15. A.I.Beskrovnyi, S.G.Vasilovskii, A.V.Belushkin, L.S.Smirnov, A.M.Balagurov, M.L. Martinez Sarrion, L.Mestres, M.Herraiz "Structural study of new compound $Bi_{2.53}Li_{0.29}Nb_2O_9$ by the powder diffraction method" Crystallography Reports v.48, 2003, p.396.
16. G. Trubach, A. I. Orlova, A. I. Beskrovny, A. K. Koryttseva, M. V. Zharinova, V. S. Kurazhkovskaya, and E. V. Lipatova "New phosphate $Fe_{0.5}Nb_{1.5}(PO_4)_3$ with an electrically neutral, framework. Synthesis and crystal structure" Crystallography Reports v.49, 2004, p.396.
17. G. Trubach, A. I. Beskrovny, A. I. Orlova, V. A. Orlova, and V. S. Kurazhkovskaya "Synthesis and Investigation of the new phosphates $K_2LnZr(PO_4)_3$ (Ln = Ce, Yb, Y) with langbeinite structure" Crystallography Reports v.49, 2004, p.614.
18. V. Likodimos, N. Guskos, S. Glenis, R. Szymczak, A. Bezkrvnyi, M. Wabia, J. Typek, G.Gasiorek, M. Kurzawa, I. Rychlowska-Himmel, and A. Blonska-Tabero "Magnetic properties of the antiferromagnetic site-disordered vanadate $Zn_2FeV_3O_{11}$ " Eur.Phys.J. B 38, pp.13-18 (2004).
19. Биккулова Н.Н., Данилкин С.А., Бескровный А.И., Асылгужина Г.Н., Скоморохов А.Н., Ядровский Е.Л. "Исследование структурных особенностей высокотемпературных фаз твердых растворов на основе

селенида меди” Известия РАН, серия физическая. 2004. Т.68, № 5, с. 604-606.

20. М.Е. Dokukin, N.S. Perov, A.I. Beskrovnyi, E.B. Dokukin, “Structural relaxation of amorphous metallic alloys” JMMM, v. 272-276S, 2004, p.1151.

Таблица 1.

Кольцевой детектор с электроникой	150	2010	Покупка
Электроника прерывателя	4	2007	Покупка
Прерыватель нейтронного пучка	3	2007	Покупка
Зеркальный нейтроновод	20	2009	Покупка
Модернизация нейтроновода	50	2009	Покупка
Рефрижератор, $T_{\min}=3$ К	45	2009	Покупка
Термостат	8	2009	Покупка
Высокотемпературная печь	10	2009	Покупка
Модернизация электроники и программного обеспечения	30	2009	Заказ

Итого: 320 тыс. дол. США

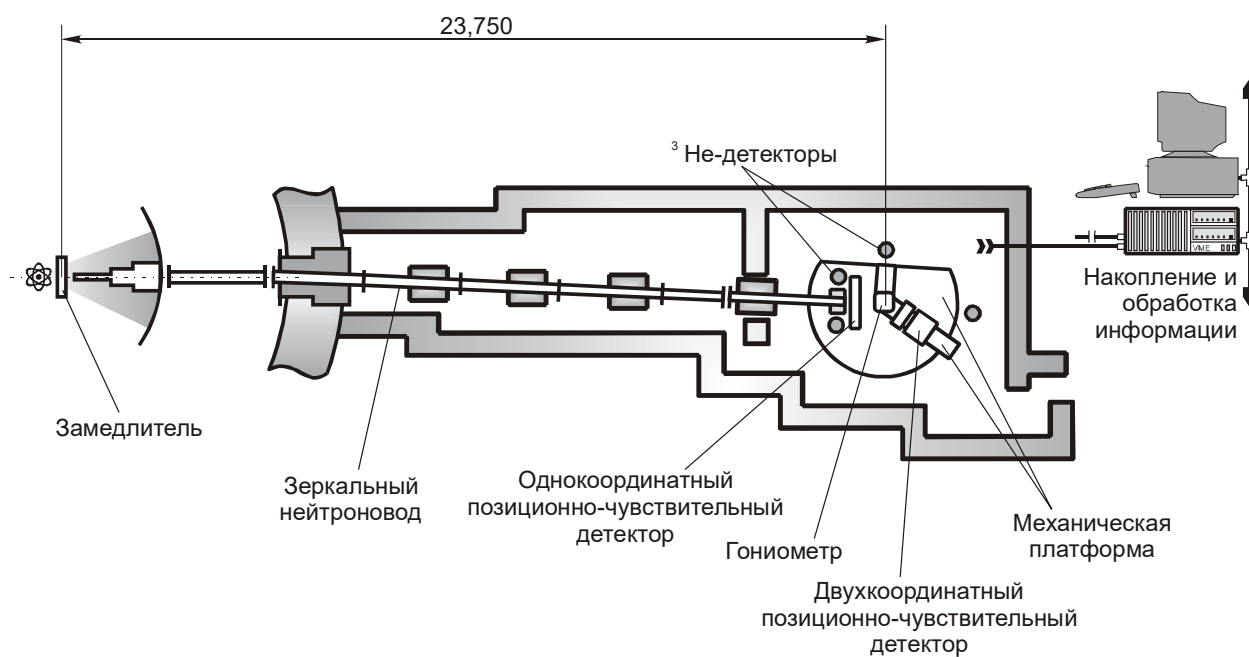


Рис. 1. Схема дифрактометра ДН-2.

Комплекс дифрактометров ЭПСИЛОН-МДС и СКАТ на канале 7А

Руководители проекта: А. Фришбуттер (Потсдам, Германия), К. Уллемайер (Фрайбург, Германия)

Канал 7А характеризуется большой пролетной базой (100 м) и, соответственно, хорошим разрешением по времени пролета. Прямой нейтронотвод длиной 92 метра (вакуумированная часть – 76 м, заполненная аргоном – 18 м), покрытый Ni, обеспечивает поток нейтронов около 10^6 н/см²/с. Большое сечение пучка 50x170 мм² позволяет одновременно использовать два инструмента. Дифрактометр ЭПСИЛОН-МДС предназначен для исследования внутренних напряжений и микродеформаций, на дифрактометре СКАТ проводятся эксперименты по исследованию преимущественных ориентировок кристаллитов, составляющих поликристалл (кристаллографических текстур). На обоих спектрометрах возможно исследование материалов, содержащих низкосимметричные фазы, что является важным преимуществом для экспериментов с геологическими материалами. Эксплуатация инструментов поддерживается Министерством науки и образования Германии. Темы, на которых сфокусирована научная программа на дифрактометрах ЭПСИЛОН-МДС и СКАТ, и предложения по их модернизации обсуждаются ниже.

1. Дифрактометр для исследования внутренних напряжений в геологических образцах ЭПСИЛОН-МДС: постановка задачи и научная программа.

Процесс подготовки и развития очагов землетрясений, расположенных в разных слоях литосферы Земли, не может быть до конца понят и описан без уточнения физических моделей геологической среды [1]. При этом надо принимать во внимание, что литосфера Земли состоит из блоков разного размера, образующих иерархическую систему. Блоки в разной степени энергонасыщены теплом, движением и энергией физико-химических связей [2]. Они подвергаются постоянной вибрации в огромном диапазоне геометрических масштабов и частот: от тепловых колебаний молекул до землетрясений и подвижек континентальных плит. Поступающая извне энергия может способствовать тому, что некоторые области иерархической системы достигнут неустойчивости и сбросят излишек энергии в виде упругих волн.

В связи с вышесказанным возникает задача исследования явлений неустойчивости горных пород, находящихся под воздействием высоких температур и давлений, в том числе, в процессе фазового (полиморфного перехода).

Физический механизм такого процесса может быть промоделирован и исследован в лабораторных экспериментах. Это позволяет вести многократные опыты при известных и контролируемых параметрах, что необходимо для получения воспроизводимых результатов и исследования закономерностей при целенаправленных вариациях параметров. В то же время в лабораторных опытах не учитывается все многообразие естественных процессов. Поэтому необходима проверка полученных в лаборатории закономерностей на материалах полевых наблюдений. Вопрос о том, на каком масштабном уровне и в результате какого процесса начинается механическая неустойчивость, приводящая к лавинообразному нарастанию разрывов и, как следствие, к землетрясению – остается открытым [3].

Вторая проблема, которая имеет исключительно важное практическое значение – связана с безопасным захоронением высокотоксичных радиоактивных и химических отходов. Одной из перспективных технологий является их погружение в залежи каменной соли, отличающейся высокой пластичностью, т.е. способностью залечивать трещины. Однако мало известна кинетика микропроцессов, протекающих при повышении температуры в таких горных породах под воздействием, например, радиоактивности.

Остается открытым вопрос, не возникнут ли в таком случае открытые трещины или какие-либо физические механизмы транспорта, способствующие фильтрации подземных растворов, в том числе, содержащих экологически опасные компоненты.

Для проведения исследований в рамках поставленных задач создана установка ЭПСИДОН-МДС [4,5], на которой возможна одновременная регистрация нейтронных дифракционных спектров, макроскопической деформации образца под нагрузкой и спектров акустической эмиссии. Дифракция нейтронов позволяет измерять деформацию кристаллической решетки и решеточные напряжения при меняющихся термодинамических параметрах [6-8], в то время как измерения акустической эмиссии дает информацию о возникновении разрывов межатомных связей в веществе в масштабе микротрещин и трещин. Таким образом, процесс подготовки макроразрушения в комплексном эксперименте может наблюдаться в широком масштабном интервале.

1.1. Техническое описание основных узлов.

Дифрактометр ЭПСИДОН-МДС, установленный на канале 7А реактора ИБР-2, имеет многодетекторную систему, представляющую собой в настоящее время комплекс из девяти радиальных коллиматоров и 78-и детекторов. Канал 7А характеризуется большой пролетной базой (100 м), что позволяет достигать хорошего спектрального разрешения. Прямой нейтронный пучок длиной 92 метра обеспечивает поток нейтронов в позиции образца 10^6 н/см²/с.

Дифрактометр снабжен системой одноосного сжатия EXSTRESS для проведения *in-situ* экспериментов с цилиндрическими образцами (диаметром 30 мм и высотой 60 мм); внешняя нагрузка до 150 МПа. Вокруг дифрактометра установлена специальная кабина, обеспечивающая стабильную температуру образца, что существенно повышает качество измеренных данных, особенно от долговременных экспериментов, а также позволяет сравнивать данные, полученные во время разных циклов реактора ИБР-2. Внутри кабины системой Eurotherm поддерживается температура (20 ± 0.15)°С. Кроме того, дифрактометр снабжен независимым устройством для измерения макроскопической деформации образца во время процесса деформирования – лазерным экстензиомером.

Планируется дополнительная модернизация ЭПСИДОН-МДС для измерения напряжений и деформаций в геоматериалах при повышенных температурах и механических нагрузках в комплексе с возможностями ультразвуковой аппаратуры, позволяющей в реальном времени определять как скорости упругих волн в образце, так и частотные, энергетические и пространственные характеристики акустоэмиссионных событий, происходящих в образце в ходе эксперимента [9,10].

2. Дифрактометр для исследования кристаллографических текстур горных пород СКАТ: Постановка задачи и научная программа.

Использование нейтронографического текстурного анализа с помощью дифрактометра СКАТ [11] в комплексе с другими физическими методами необходимо для решения фундаментальных и прикладных задач геологии и геофизики [12,13]. К наиболее актуальным проблемам и задачам относятся следующие:

- Изучение происхождения, эволюции, состава, структуры, свойств вещества литосферы при различных термодинамических параметрах [14].
- Исследование связи кристаллографических текстур и текстур формы с физическими (упругими, пьезоэлектрическими, магнитными, тепловыми и др.) свойствами горных пород при различных термодинамических параметрах [15-17].
- Изучение метаморфических, геодинамических и эволюционных процессов в литосфере по данным о текстурах глубинных и приповерхностных горных пород [18-20].
- Развитие теории и методики реконструкции палеотектонических деформаций и напряжений по данным о кристаллографических текстурах [13].

2.1. Техническое описание основных узлов.

Детекторная система дифрактометра СКАТ, содержащая девятнадцать детекторов, расположена на монтажном кольце диаметром 2 м, аксиально-симметрично нейтронному пучку. Угол рассеяния для всех детекторов одинаковый ($2\theta = 90^\circ$). Исследуемый образец помещается в центре кольца и вращается в гониометре, который выдерживает вес аппаратуры до 30 кг, вокруг горизонтальной оси Z, расположенной под углом 45° к падающему нейтронному пучку. Спектрометр СКАТ по сравнению с другими подобными приборами имеет ряд преимуществ:

- * дифракционные пики, соответствующие конкретному значению d_{hkl} , регистрируются всеми детекторами в одинаковом положении (временных каналах) на всех дифракционных спектрах полученных от измеряемого образца. Поэтому при расчетах нет необходимости вводить поправки, зависящие от угла рассеяния и длины волны;
- * поскольку угловой диапазон установки детекторов 180° , то для измерения полной полюсной фигуры достаточно произвести однократное вращение образца в гониометре, что вдвое сокращает время проведения эксперимента;
- * находящийся в центре детекторного кольца образец можно окружать различными системами воздействий, например, нагревателями, камерами высокого давления, устройствами, создающими электрические и магнитные поля, и т. д.

3. Предложения по модернизации.

3.1. Новый нейтронород

Установленный в настоящее время на пучке 7А нейтронород был построен в ЛНФ в середине восьмидесятых годов прошлого века, т.е. находится в эксплуатации более 20-и лет, и устарел морально и физически. В состав геологических образцов часто входят минералы с большой элементарной ячейкой. Характеристики реактора ИБР-2 позволяют для пролетной базы пучка 7А иметь диапазон по длинам волн до 8 Å, или до $d_{hkl} = 5.6$ Å при угле рассеяния $2\Theta = 90^\circ$. Однако на практике не удается регистрировать дифракционные пики при $\lambda > 5$ Å, что связано с низкой эффективностью нейтронорода в области больших длин волн. Для увеличения полного потока нейтронов и улучшения спектрального распределения первичного пучка необходима замена существующего нейтронорода на новый в период остановки реактора на модернизацию. Установка холодного источника на пучке 8 может быть выполнена таким образом, что он будет частично “виден” новым нейтронородом, что позволит оптимизировать спектральное распределение.

3.2. Усовершенствование систем окружения образца на ЭПСИЛОН-МДС.

В настоящее время для деформационных экспериментов в реальном времени на дифрактометре ЭПСИЛОН-МДС используется устройство для одноосного сжатия. В будущем его необходимо заменить на систему, позволяющую создавать более сложные усилия (негидростатические) на образце для моделирования реальных условий, имеющих место на различных глубинах Земли. Кроме того, предполагается совместное использование нагрузочной системы и ультразвуковой аппаратуры для регистрации акустической эмиссии и измерения скоростей упругих волн в образце, в том числе при высокой температуре.

3.3. Предложения по модернизации дифрактометра СКАТ.

СКАТ является сравнительно новой установкой, поэтому предложения по его модернизации сводятся к созданию устройства для вращения образца вокруг вертикальной оси.

4. Запрашиваемые ресурсы, стоимость, сроки реализации.

Таблица. Стоимость (в USD) и желательные сроки изготовления (приобретения) некоторых узлов ЭПСИЛОН и СКАТ в рамках проекта модернизации.

Нагрузочная машина с системой изменения температуры	150	2010	Покупка и изготовление
Генератор ультразвуковых импульсов	10	2008	Покупка
Препроцессор акустических сигналов	16	2008	Покупка
Электроника прерывателя	4	2008	Покупка

Итого: 180 тыс. дол. США

Литература

1. Sobolev G.A., Nikitin A.N., Savelova T.I., Yakovlev V.B. (2001). A theoretical and experimental approach to the study of microscopic and macroscopic properties and state of rocks: a possible direction in the development of the earthquake source models. *Physica Zemli.*, 1, 6-15.
2. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. (1987). Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 100 с.
3. Соболев Г.А., Пономарев А.В. (2003). Физика землетрясений и прогноз. М.: Наука, 200с.
4. Walther, K., Scheffzueck, C. & Frischbutter, A. (2000). Neutron time-of-flight diffractometer EPSILON for strain measurements: layout and first results. *Physica B, Condensed Matter* 276-278, 130-131.
5. Walther, K., Frischbutter, A., Scheffzueck, Ch., Korobchenko, M.L., Levchanovskii, F.V., Nikiforov, A.S., Kirilov, A.S., Astakhova, N.V., Petukhova, T.B. & Murachkevich, S.M. (2004) EPSILON-MDS: Status quo and future development. Conf. Proc. Condensed Matter Physics with Neutrons at the IBR-2 Pulsed Reactor, Germany-JINR User Meeting, JINR Dubna, 39-42.
6. Frischbutter, A., Neov, D., Scheffzueck, Ch., Vrana, M. & Walther, K. (2000). Lattice strain measurements on sandstones under load using neutron diffraction. *J. Struct. Geol.* **22** (11/12), 1587-1600.
7. Scheffzueck, Ch., Walther, K. & Frischbutter, A. (2001). Applied and residual strain/stress measurements on a dolomite rock sample using neutron time-of-flight diffraction. *J. Neutron Res.* **9** (2-4), 187-192.
8. Scheffzueck, C., Siegesmund, S. & Koch, A. (2004). Strain investigations on calcite marbles using neutron time-of-flight diffraction. *Environ. Geol.* **46** (3-4), 468-476.
9. Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Nikitin A.N., et al. (2004). Dynamics of the polymorphic α - β transition in quartzite from data on of neutron diffractometry and acoustic emission. *Physica Zemli*, 10, 5-15.
10. Никитин А.Н., Васин Р.Н., Балагуров А.М., Соболев Г.А., Пономарев А.В. (2006). Исследование тепловых и деформационных свойств кварцита в температурной области полиморфного α - β перехода методами нейтронной дифрактометрии и акустической эмиссии. *Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра»*, принято к печати.
11. Ullemeyer, K., Spalhoff, P., Heinitz, J., Isakov, N.N., Nikitin, A.N. & Weber, K. (1998). The SKAT texture diffractometer at the pulsed reactor IBR-2 at Dubna: experimental layout and first measurements. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **412/1**, 80-88.
12. Sobolev G.A., Nikitin A.N. (2001). Neutron diffraction in geophysics. *Particles&Nuclei. Scientific review journal*, **32**, 6, 1359-1404.
13. Nikitin A.N. and Ivankina T.I. (2004). Neutron Scattering in Geosciences. *Particles&Nuclei. Scientific review journal*, **35**, 2, 348-407.
14. Nikitin A.N., Ivankina T.I., Burilichev D.E., Klima K., Locajicek T., Pros Z. (2001). Anisotropy and texture of olivine-bearing mantle rocks at high pressures. *Physica Zemli*, 1, 64-78.
15. Ullemeyer, K., Siegesmund, S., Rasolofosaon, P.N.J. and Behrmann, J. H. (2005). Experimental and texture-derived P-wave anisotropy of principal rocks from the TRANSALP traverse: An aid for the interpretation of seismic field data. *Tectonophysics*, in press.
16. Siegesmund, S., Ullemeyer, K., Weiss, T. & Tschegg, E.K. (2000). Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. - *Int. J. Earth Sci.* **89**, 170-182.
17. DeWall, H., M. Bestmann & K. Ullemeyer (2000). Anisotropy of diamagnetic susceptibility in Thassos marble: a comparison between measured and modelled data. - *J. Struct. Geol.* **22** (11/12), 1761-1771.
18. Leiss, B., Gröger, H.R., Ullemeyer, K. & Lebit, H. (2002). Textures and microstructures of naturally deformed amphibolites from the northern Cascades, NW USA. - In: De Meer, S., Drury, M. R., De Bresser, J. H. P. & Pennock, G. M. (eds.): Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics: Current Status and Future Perspectives. *Geological Society, London, Special Publications* **200**, 219-238.
19. Ivankina T.I., Nikitin A.N., Zamyatina N.V., et al. (2004). Neutron diffraction texture analysis and anisotropy of Archean amphibolites and gneisses from the Kola superdeep borehole, *Physica Zemli*, 4, 74-87.

20. Ivankina T.I., Kern H.M. and Nikitin A.N. (2005). Directional dependence of P- and S-wave propagation and polarization in foliated rocks from the Kola superdeep well: Evidence from laboratory measurements and calculations based on TOF neutron diffraction. *Tectonophysics*, submitted.

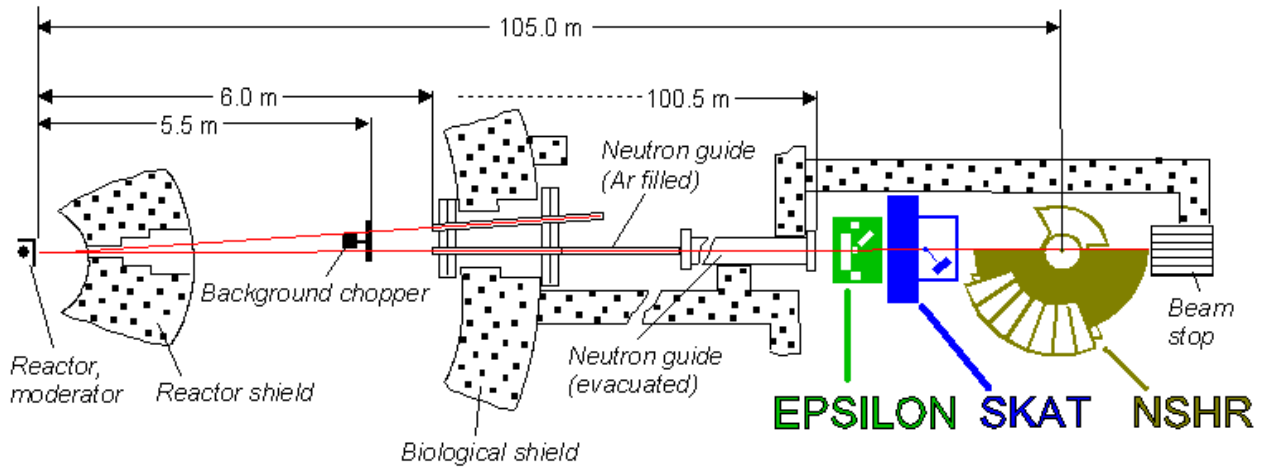


Рис. 1. Схема ЭПСИЛОН-МДС и SKAT. Прерыватель для устранения нейтронов между основными импульсами мощности реактора (background chopper) располагается в кольцевом коридоре.

ЮМО – спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов

Руководитель проекта: А.И.Куклин

Проект направлен на модернизацию и развитие спектрометра малоуглового рассеяния нейтронов, действующего на 4-м канале ИБР-2. Проект предусматривает продолжение использования основных существующих узлов установки, без снижения объема ее работы на эксперимент. Реализация проекта позволит качественно изменить характер получаемых данных (за счет смены типа детектора), будет расширен диапазон доступных векторов рассеяния и увеличена скорость накопления экспериментальных данных, улучшены разрешение и фоновые условия. Уже имеющийся широкий круг пользователей спектрометра благодаря модернизации будет значительно расширен.

1. Статус и научная программа.

Малоугловое рассеяние нейтронов широко применяется при исследованиях надатомной структуры вещества, являясь эффективным методом для изучения фундаментальных проблем и для решения важнейших технологических задач. На установке ЮМО проводятся исследования по физике конденсированного состояния, физико-химии дисперсных систем, агрегатов поверхностно-активных веществ, биофизике и биологии [1, 2], полимерных веществ [3, 4], металлургии [5], материаловедении [6] и т.д. Важнейшей особенностью малоуглового рассеяния является возможность анализа структуры неупорядоченных систем. Этот метод, например, часто является единственным способом получения структурной информации о системах с хаотическим и частично упорядоченным расположением неоднородностей плотности с размерами 10 - 10000 Å. Он дает возможность исследовать дисперсную структуру сплавов, порошков, стекол (механизмы разделения фаз, размер и степень полидисперсности частиц), особенности строения полимеров в различных агрегатных состояниях, весовые и геометрические характеристики биологических макромолекул и их комплексов, биологические надмолекулярные структуры, такие как биологические мембраны и вирусы. Существенное различие когерентных длин рассеяния нейтронов на водороде и дейтерии, а также возможность специфического дейтерирования макромолекул и надмолекулярных структур, делает малоугловое рассеяние нейтронов незаменимым инструментом исследования биологических, коллоидных объектов, а также полимеров и жидких кристаллов.

2. Работа ЮМО на холодном источнике нейтронов.

Практически все современные спектрометры малоуглового рассеяния работают с холодным источником нейтронов. Это связано, прежде всего, с необходимостью работы в максимально широком диапазоне переданных импульсов Q и минимально возможными Q . Особенностью геометрии спектрометра ЮМО является прямая видимость активной зоны реактора. Это позволяет (при отсутствии нейтронотода) обеспечить высокий поток нейтронов на образце при использовании гребенчатого замедлителя при комнатной температуре [11]. Однако, идеальным для ЮМО является замедлитель, который обеспечивает высокий поток, как в тепловой, так и в холодной областях спектра нейтронов. Оптимальными размерами замедлителя являются 200x200 мм.

3. Предложения по модернизации ЮМО.

Параметрами спектрометра, которые будут улучшены в результате модернизации, являются: диапазон доступных векторов рассеяния $Q_{\min} - Q_{\max}$, скорость накопления экспериментальных данных, тип детекторов рассеянных нейтронов, разрешающая способность, фоновые условия.

1) **Расширение диапазона Q** будет достигнуто за счёт смены детектора, исключения пролёта нейтронов в воздухе, улучшения коллимации пучка нейтронов. Будут установлены два позиционно-чувствительных детектора (ПЧД) рассеяния и один детектор прямого пучка. Первый ПЧД рассеянных нейтронов будет располагаться в ближней позиции (2 метра от образца), второй ПЧД будет иметь возможность смены позиции от 5 до 12 метров от образца. Реализация двухдетекторной системы потребует в свою очередь изменения коллимационной системы, электронного оборудования (системы накопления данных) и качественного изменения программного обеспечения. Кроме того, совместный анализ экспериментальных данных от разных детекторов потребует методических усовершенствований уже существующего подхода. Эти изменения будут базироваться на методических [7], научных достижениях [8] и уже разработанном программном обеспечении [9, 10], что позволит существенно снизить соответствующие расходы.

2) **Увеличение скорости накопления экспериментальных данных** будет достигнуто за счет одновременной регистрации рассеянных нейтронов несколькими детекторами, расположенными так, чтобы перекрывать весь необходимый (доступный) диапазон векторов рассеяния, увеличения эффективности и размеров детекторов, а также за счет улучшения фоновых условий.

3) Так как на установке YuMO ширина функции разрешения по переданному импульсу в основном определяется угловым вкладом (вклад от ширины импульса мал), то **ее уменьшение** будет достигнуто за счет улучшения позиционного разрешения детектора и соответствующего коллиматора.

4) **Возможность измерять образцы с малым сечением рассеяния** будет обеспечена существенным уменьшением фона с помощью новых прерывателя и коллимационной системы, а также благодаря современным детекторам и детекторной электронике.

5) Будет расширено **окружение образца** для проведения исследований с дополнительными условиями на образце. Это, прежде всего, касается возможности проведения реологических исследований, исследований с давлением, магнитным полем, с вращением образца и с расширенным диапазоном температур.

4. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки проведения модернизации ЮМО.

Таблица 1. Стоимость (в USD) и желательные сроки изготовления (приобретения) некоторых узлов ЮМО в рамках проекта модернизации.

ПЧД (второй)	280,000	2010	Полный комплект
Прерыватель	45,000	2009	Покупка и изготовление в ЛНФ
Детекторы и коллимационная система	80,000	2007	Покупка и изготовление
Электроника и вычислительная техника	35,000	2010	Покупка
Окружение образца	155,000	2010	Покупка и изготовление
Итого:		595,000	

Работы по проекту в основном будут осуществляться силами сотрудников группы ЮМО.

Литература

1. J.Gallova, D.Uhrikova, A.Islamov, A.Kuklin and P.Balgavy, Effect of Cholesterol on the Bilayer Thickness in Unilamellar Extruded DLPC and DOPC Liposomes: SANS Contrast Variation Study, Gen.Physiol.Biophys. (2004)23, 113-128.
2. D.V.Lebedev, D.M.Baitin, A.Kh.Islamov, A.I.Kuklin, V.Kh.Shalguyev, V.A.Lazov, V.V.Isaev-Ivanov. Analytic model for determination of parameters of helical structures in solution by small angle scattering: comparison of RecA structures by SANS. FEBS Letters 537 (2003) 182-186.
3. N. Ozerin, A. M. Muzafarov, A. I. Kuklin, A. Kh. Islamov, V. I. Gordelyi, G. M. Ignat'eva, V. D. Myakushev, L. A. Ozerina, and E. A. Tatarinova, Determination of the Shape of Dendrimer Macromolecules in Solutions from Small-Angle Neutron Scattering Data, Doklady Chemistry, Vol. 395, Part 2, 2004, pp. 59–62. Translated from Doklady Akademii Nauk, Vol. 395, No. 4, 2004, pp. 487–490.
4. 4.Андреева А.С., Фоменков А.И., Исламов А.Х., Куклин А.И., Филиппова О.Е., Хохлов А.Р. “Гидрофобная агрегация в микрофазно расслоенном геле гидрофобно модифицированной полиакриловой кислоты”, Высокомолек. соед., Сер. А. 2005, т.47, №2, с. 338-347.
5. 5.О.А.Баннх, В.М.Блинов, А.И.Куклин, В.А.Семенов, В.В.Сумин, А.В.Тамонов. Изучение распада азотистого аустенита сплава X24A методами рассеяния нейтронов. Металлы, №5, с.55-59, 2002.
6. Кнотько А.В., Гаршев А.В., Макарова М.В., Путляев В.И., Третьяков Ю.Д., Куклин А.И. Фазовый распад в Pr - содержащих твердых растворах на основе сверхпроводника Bi2Sr2CaCu2O8. Материаловедение, 2004, N 2, стр. 2 - 8.
7. Kuklin A.I., Islamov A.Kh., and V.I. Gordelyi. Two Detectors System for Small-Angle Neutron Scattering Instrument, Neutron News (2005), vol.16, 3,pp16-18.
8. Ozerin A.N., Svergun D.I., Volkov V.V., Kuklin A.I., Gordelyi V.I., Islamov A.Kh., Ozerina L.A. and Zavorotnyuk D.S., New insights into spatial structure of dendritic macromolecules. J. Appl.Cryst. (2005), in print.
9. A.G.Soloviev, A.V.Stadnik, A.H.Islamov and A.I.Kuklin, Fitter. The package for fitting experimental data of the YuMO spectrometer by theoretical form-factors. Version 1.0. Long Write-Up and User's Guide. Communication of JINR E10-2003-36, Dubna, 2003.
10. А.Г.Соловьев, Т.М.Соловьева, А.В.Стадник, А.Х.Исламов и А.И.Куклин. SAS. Программа для первичной обработки спектров малоуглового рассеяния. Версия 2.4. Описание и руководство пользователя. Сообщение ОИЯИ Р10-2003-86, Дубна: ОИЯИ, 2003.
11. Куклин А.И., Бобарыкина Г.Н., Богдзель А.А., Горделий В.И., Исламов А.Х., Коновалов В.Ю., Рогов А.Д. и Флорек М. Измерение и расчет методом Монте-Карло спектра пучка нейтронов. Параметры пучка малоугловой установки ЮМО на 4-м канале реактора ИБР-2. Препринт ОИЯИ Е13-2002-249, Дубна, 2003.

Таблица 2. Основные параметры существующей и модернизированной установок ЮМО 4-го канала ИБР-2.

Параметры	До модернизации	После модернизации
Поток на образце	$10^7 - 4 \times 10^7$ n/(s cm ²)	$10^7 - 4 \times 10^7$ n/(s cm ²)
Диапазон длин волн	0.5 Å до 8 Å	0.5 Å до 14 Å
Q-диапазон	$8 \times 10^{-3} - 0.5$ Å ⁻¹ *	$4 \times 10^{-3} - 1$ Å ⁻¹ @
Диапазон масштабов исследуемых объектов	10 - 500 Å	8 - 1500 Å
Измеряемое сечение рассеяния	0.01 cm ⁻¹	0.002 cm ⁻¹
Система калибровки (нормировка)	V стандарт во время эксперимента	V, H ₂ O, графит
Тип коллимации	Аксиальный	Аксиальный
Детекторная система	2 детектора рассеянных нейтронов, детектор прямого пучка	2 ПЧД рассеянных нейтронов, детектор прямого пучка, монитор
Автоматический контроль за образцами	14 образцов в специальном боксе	24 образца в термостатируемом боксе
Температурный диапазон	От -20°C до +130°C	от -270°C до +1000°C
Разрешение по переданному импульсу	5 - 20%	2 - 8%
Контролируемые параметры	Старты, температура, V-стандарт, позиция образца	Старты, температура, вакуум, V-стандарт, позиция образца, позиция детектора, монитор, прерыватель, мощность реактора

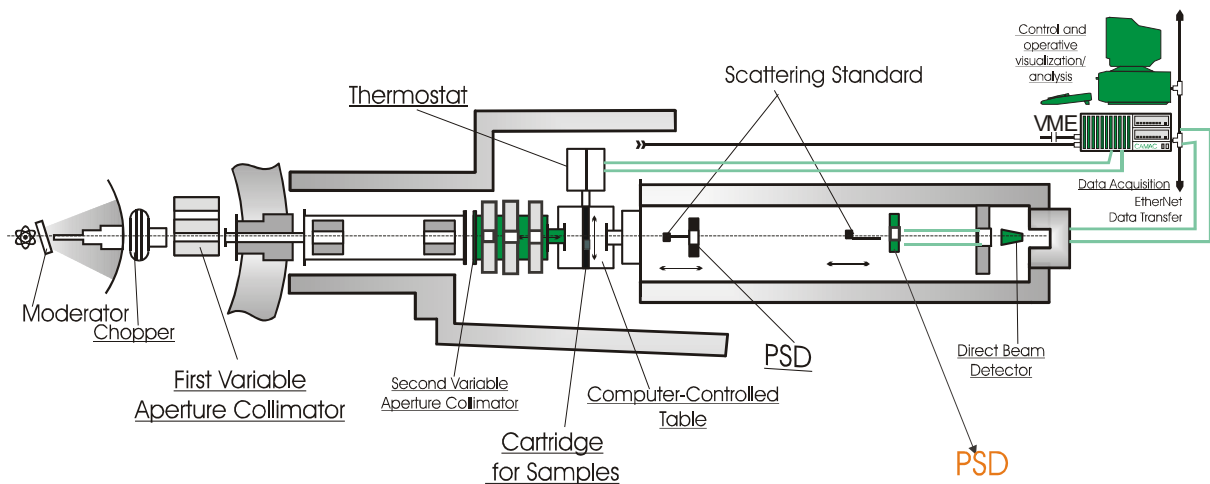


Рис. 1. Схема модернизированного спектрометра ЮМО, подчеркнуты названия узлов модернизации.

Спектрометр обратной геометрии НЕРА для одновременного исследования структуры и динамики образцов

Руководитель проекта: И. Натканец

Метод обратной геометрии, в котором исследуемый образец облучается “белым” пучком нейтронов от импульсного источника, дает уникальную возможность одновременных исследований спектров дифракции и неупругого рассеяния нейтронов. Таким образом, имеется возможность одновременного исследования структуры и динамики в зависимости от внешних условий на образце. Экспериментальные работы, проведенные в ЛНФ в 1970-х годах, показали, что этот метод особенно удобен для исследования полиморфизма и фазовых переходов жидко-кристаллических материалов в зависимости от температуры и давления.

1. Статус и научная программа.

Спектрометр НЕРА [1] спроектирован и сооружен на ИБР-2 в 1986-92 г. в сотрудничестве Института ядерной физики им. Г. Неводничаньского в Кракове и Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, ОИЯИ в Дубне. С начала эксплуатации в 1993 г., спектрометр НЕРА используется в режиме пользователей, для исследования молекулярной динамики и фазовых переходов методами неупругого рассеяния и дифракции нейтронов. Ежегодно реализуется около 15 заявок на эксперимент, результатом которых является примерно 10 публикации и около 20 сообщения на международных конференциях, за год.

Актуальная тематика исследований на спектрометре НЕРА отражена в списке публикации за 2003-4 г. [2-21]. Основной тематикой за последние 5 лет были исследования биологически активных материалов [2,11,12,18,19,20,22]. Нейтронная спектроскопия является очень точной проверкой достоверности квантово-химических расчетов структуры, динамики и электронных свойств молекул этих материалов. С этой целью исследованы также мочевины [4] и метанол [23], как примеры соединений с водородными связями. Следует также отметить работы по исследованию фазовых переходов и динамики метиловых групп в соединениях метилбензола [14,15], которые привели к выбору растворов на основе мезитилена, как замедлителя нейтронов для холодного источника на реакторе ИБР-2.

3. Предложения по модернизации

Спектрометры НЕРА на реакторе ИБР-2 и TOSCA на импульсном источнике ISIS являются пока лучшими установками мирового уровня для нейтронной спектроскопии водород-содержащих материалов. Конкурентно способные установки создаются на новых высокопоточных источниках нейтронов в США и в Японии. За время работы спектрометра НЕРА на реакторе ИБР-2 расходы по его эксплуатации, обновление детекторов и модернизация электроники, осуществлялись за счет ежегодных грантов Польши в размере 10-15 тыс. USD. Во время останковки реактора ИБР-2, до запуска ИБР-2М, нужно провести более основательную и требующую значительных финансовых затрат модернизацию нейтронного пучка 7б, являющегося основным узлом спектрометра НЕРА, определяющим поток нейтронов на образце. Оптимальным решением является полная замена существующего зеркального нейтронного пучка, который построен по технологии 1970-х годов и уже выработал свой ресурс. Современные технологии зеркальных вакуумных нейтронных пучков позволяют получить в ~10 раз больший поток нейтронов на выходе. В случае спектрометра НЕРА оптимальным является “баллистический” нейтронный пучок, идея которого заключается в

захвате нейтронов с максимально доступной поверхности источника, транспортировке потока нейтронов на большое расстояние зеркальным нейтронородом большого сечения и концентрации пучка на образце с помощью конусной суперзеркальной секции. При ограниченном финансировании поток нейтронов на спектрометре НЕРА можно увеличить путем замены головной секции продуваемой аргоном и применением суперзеркального концентратора после вакуумной секции существующего нейтронорода (рис. 1).

4. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки проведения модернизации

Таблица 1. Стоимость (в USD) и желательные сроки изготовления (приобретения) некоторых узлов спектрометра НЕРА в рамках проекта модернизации.

Модернизация нейтронорода пучка 7б: 1 – полная замена нейтронорода, 2 – замена головной секции нейтронорода с аргоном (12 м) и суперзеркальный концентратор пучка перед образцом (10 м)	450,000	до 2010	Покупка полного комплекта
	150,000	до 2010	Покупка секции нейтронорода
Обновление вакуумного оборудования на спектрометре и экспериментального оборудования узла образца	50,000	до 2010	Покупка оборудования
Обновление детекторной системы	50,000	до 2010	Покупка и изготовление в ЛНФ
Новый блок электроники для юстировки кристаллических анализаторов энергии нейтронов	30,000	до 2010	Изготовление в ЛНФ

Итого: 1 – замена нейтронорода 580,000 USD
2 – модернизация нейтронорода 280,000 USD

Литература

1. I.Natkaniec, S.I.Bragin, J.Brankowski and J.Mayer, in Proc. ICANS XII Meeting, Abington 1993, RAL Report 94-025, vol.I., p.89- (1994)
2. T. Dziembowska, M. Szafran, E. Jagodzinska, I.Natkaniec, A. Pawlukoje, J.S. Kwiatkowski, J. Baran, „DFT studies of the structure and vibrational spectra of 8-hydroxyquinone N-oxide”, Spectrochimica Acta Part A, 59 (2003) 2175-2189.
3. K. Holderna-Natkaniec, I. Natkaniec, V.D. Khavryutchenko, “Neutron spectroscopy of norbornane, Phase Transitions”, Vol. 76, No.3, 2003, 275-279.
4. M.R. Johnson, K. Parlinski, I. Natkaniec, S. Hudson, „Ab initio calculations and INS measurements of phonons and molecular vibrations in a model peptide compound – urea”, Chemical Physics, Vol. 291, No. 1, 2003, 53-60.
5. V.Yu. Kazimirov, I. Natkaniec, “Programme for calculation of the resolution function of NERA-PR and KDSOG-M inelastic neutron scattering inverse geometry spectrometers”, Comm. JINR, P14-2003-48, Dubna 2003.
6. S. Lewicki, J. Wasicki, L. Bobrowicz-Sarga, A. Pawlukoje, I. Natkaniec and A. Kozak, “Pressure Effect on Molecular and Lattice Dynamics in Pyridinium nitrate”, Phase Transitions, Vol. 76, No.3, 2003, 261-270.
7. A. Migdal-Mikuli, E. Mikuli, Ł. Hetmańczyk, I. Natkaniec, K. Hołderna-Natkaniec, W. Łasocha, „Phase Transitions, Structural Changes and Molecular Motions in $[Zn(NH_3)_4](BF_4)_2$ Studied by Neutron Scattering, X-Ray Powder Diffraction and Nuclear Magnetic Resonance”, Journal of Solid State Chemistry, 174 (2003) 357-364.
8. I. Natkaniec, L.S. Smirnov, “Ammonium dynamics in the disorder α -phase of $K(1-x)(NH_4)_xY$ (Y-Cl, Br, I). A Neutron Scattering Study”, Phase Transitions Vol. 76, Nos. 9-10 (2003) 873-882.
9. A. Pawlukoje, I. Natkaniec, J. Nowica-Scheibe, E. Grech, L. Sobczyk, “Inelastic neutron scattering studies on 2,5-dihydroxy-1,4-benzoquinone”. Spectrochimica Acta Part A: Mol. and Biomol. Spectroscopy, 59 (2003) 537-542.
10. A. Pawlukoje, I. Natkaniec, G. Bator, L. Sobczyk, E. Grech, „Inelastic neutron scattering (INS) spectrum of tetracyanoquinodimethane (TCNQ)”, Chemical physics Letters, 378 (2003) 665-672.

11. A. Szyzewski, K. Holderna-Natkaniec, I. Natkaniec, „The IINS/quantum chemical studies of 17 α - and 21-hydroxy-derivatives of progesterone”, *Journal of Molecular Structure*, Vol. 650, Nos. 1-3, 2003, 69-84.
12. K. Holderna-Natkaniec, W. Kasperkowiak, I. Natkaniec, A. Szyzewski, IINS spectroscopy and QC studies of N⁶-benzyl-and furfuryl-derivatives of aminopurins. *Physica B* 350 (2004) 443-445.
13. I. Majerz, I. Natkaniec, INS an abintio studies of triphenylmethane analogues. *Physica B* 350 (2004) 439-442.
14. I. Natkaniec, K. Holderna-Natkaniec, J. Kalus, Neutron scattering studies of methyl derivatives of benzene selected as potential materials for cold neutron moderators. *Physica B* 350 (2004) 651-653.
15. I. Natkaniec, K. Holderna-Natkaniec, Structural phase transitions and dynamics of solid mesitylene investigated by diffraction and inelastic incoherent neutron scattering methods. In *Proceedings of 6th International Workshop on Advanced cold moderators*. Ed. H. Conrad, Matter and Materials. Vol. 20, p.103-111, Forschungszentrum Julich, 2004.
16. A. Pawlukojuć, I. Natkaniec, G. Bator, E. Grech, L. Sobczyk, “Inelastic neutron scattering (INS) studies on dichloro-1,4-benzoquinones”, *Spectrochimica Acta, Part A* 60 (2004) 2875-2882.
17. M. Rachwalska, I. Natkaniec, Low-frequency vibrations and molecular motions of H₂O molecules in [Ni(H₂O)₆](ClO₄)₂ and in [Ni(D₂O)₆](ClO₄)₂ studied with neutron scattering methods. *Physica B*, 348 (2004) 371-381.
18. A. Szyzewski, K. Holderna-Natkaniec, I. Natkaniec, NMR and inelastic incoherent neutron scattering (IINS) studies of monohydroxy-17 and -21-substituted derivatives of progesterone. *Solid State NMR* 25, (1-3) 21-27 (2004).
19. A. Szyzewski, K. Holderna-Natkaniec, I. Natkaniec, Progesterone and testosterone studies by neutron scattering methods and quantum chemistry calculations. *Journal of Molecular Structure* 693 (1-3) 49-71 (2004).
20. A. Szyzewski, K. Holderna-Natkaniec, I. Natkaniec, Neutron scattering, solid state NMR and quantum chemistry studies of 11-keto-progesterone. *Journal of Molecular Structure*. 698 (1-3) 41-58 (2004).
21. Л.С. Смирнов, И. Натканец, Б.Н. Савенко, Д.П. Козленко, С.Е. Кичанов, М. Длоуга, С. Вратислав, М.Л. Мартинез-Саррион, Л. Метрес, М. Херраиз, Л.А. Шувалов, Нейтронные исследования структуры и динамики смешанных кристаллов Rb_{1-x}(NH₄)_xI. *КРИСТАЛЛОГРАФИЯ*, 2004, том 49, № 4, с. 732-738.
22. K. Holderna-Natkaniec, K. Jurga, I. Natkaniec, D. Nowak, A. Szyzewski, Molecular dynamics of ethisterone studied by ¹H NMR, IINS and quantum mechanical calculations. *Chemical Physics* 317 (2005) 178-187.
23. I. Natkaniec, K. Holderna-Natkaniec, I. Majerz, K. Parlinski, Neutron spectroscopy of deuterated substitutes and DFT modeling vibrational spectra of methanol clusters. *Chemical Physics* 317 (2005) 171-177.
24. И. Натканец, Л.С. Смирнов, Л.А. Шувалов, Исследование динамики аммония в разных фазах галогенидов смешанных кристаллов K_{1-x}(NH₄)_xHal с помощью рассеяния нейтронов. *КРИСТАЛЛОГРАФИЯ*, 2005, том 50, № 2, с. 284-291.
25. Л.С. Смирнов, И. Натканец, В.Ю. Казимиров, В.В. Долбина, Л.М. Яковлева, Л.А. Шувалов, Динамика аммония в фазах смешанных кристаллов K_{1-x}(NH₄)_xBr: Неупругое рассеяние нейтронов. *ПОВЕРХНОСТЬ, РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ*, 2005, № 1, с. 3-11.

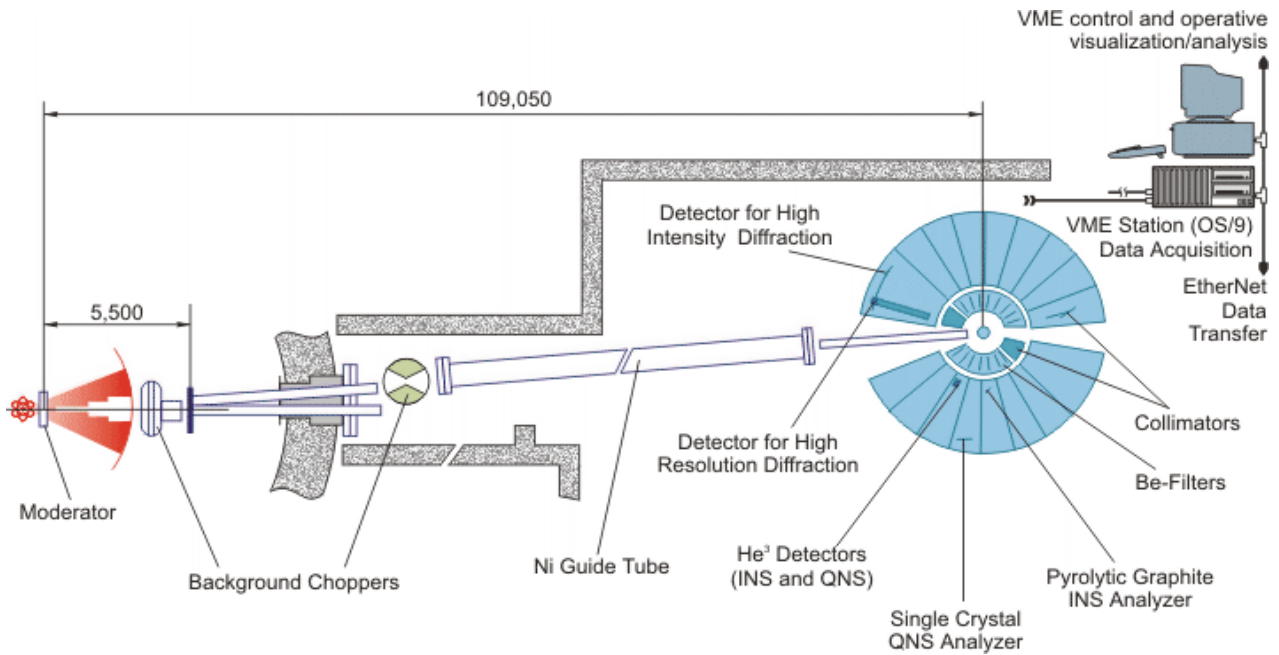


Рис. 1. Схема нейтроновода и спектрометра НЕРА на канале 76 реактора ИБР-2.

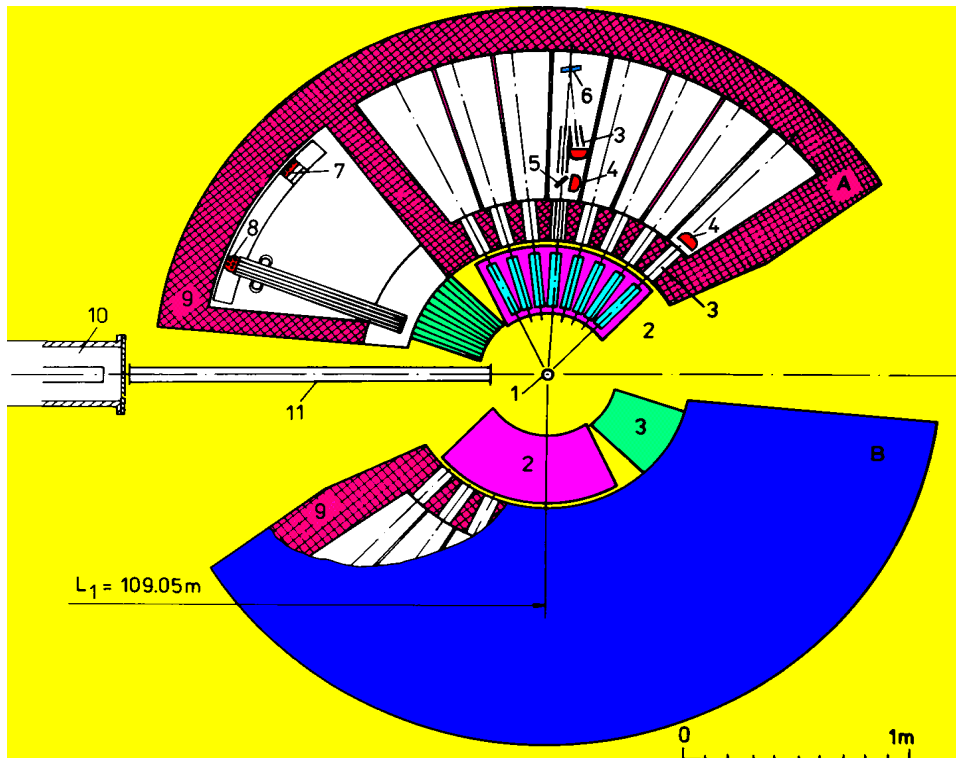


Рис. 2. Схема основных узлов спектрометра НЕРА.

1 - sample, 2 - Be-filters, 3 - collimators, 4 - He³ detectors (INS and QNS), 5 - PG analysers (INS), 6 - single crystal analysers (QNS), 7 - detectors for high intensity diffraction, 8 - detectors for high resolution diffraction, 9 - spectrometer shielding, 10 - Ni-coated mirror neutron guide in a vacuum tube, 11 - vacuum neutron guide.

Спектрометр неупругого рассеяния ДИН-2ПИ

Руководитель проекта: А.В. Пучков.

1. Статус и научная программа.

Спектрометр неупругого рассеяния ДИН-2ПИ, установленный и работающий на канале №2 реактора ИБР-2 с 1985 года, сконструирован по классической схеме прямой геометрии с пролетными базами 20 м и 7 м длиной (до и после образца, соответственно). ДИН-2ПИ оснащен детекторной системой на основе He^3 -счетчиков, охватывающей интервал углов рассеяния 3° - 134° , и системой вращающихся коллиматоров для подавления фона, расположенных в кольцевом коридоре реактора. Камера образца в форме цилиндра диаметром 1200 мм и высотой 800 мм, допускает использование широкого набора систем окружения образца. Общая схема спектрометра представлена на рис. 1, а его технические характеристики можно найти в [1].

Оптимальным режимом работы спектрометра в настоящее время являются эксперименты с начальными энергиями нейтронов $\sim(2-20)$ мэВ. Такой режим обеспечивает удовлетворительное разрешение для упругого и неупругого рассеяния ($\sim 5\%$), и разумную продолжительность эксперимента, позволяющую обеспечить необходимую статистическую точность экспериментальных данных. Как показал многолетний опыт работ на спектрометре ДИН-2ПИ, одним из его главных достоинств является низкий уровень фона и «чистота» получаемых экспериментальных данных, обусловленная отсутствием побочных эффектов, искажающих спектры рассеянных нейтронов.

Компоновка спектрометров типа ДИН оптимальна для получения информации о законе рассеяния (или динамической функции рассеяния) в широком диапазоне динамических переменных Q и ϵ , как в случае твердых тел, так и жидкостей. Традиционными направлениями экспериментальных работ, проводимых и развиваемых на спектрометре, являются:

1. Исследования жидких металлов (Na, Ga, Pb, K) и жидкометаллических систем с примесями (расплавы K-O, Pb-K, Na-Pb) [2-3].
2. Исследования водных ионных и гидрофобных растворов [4], в том числе водных дисперсий углеродных частиц (фуллерены, шунгит, сажи).
3. Исследования квантовых жидкостей как в «объемном» состоянии [5], так и в условиях ограниченной геометрии [6].
4. Исследования многокомпонентных кристаллических и аморфных систем, включающих твердые растворы, оксиды и гидриды металлов, суперионные проводники и тройные примесные системы [7-8].
5. Исследования реакторных материалов в широком диапазоне температур для решения проблем безопасности ЯЭУ.

Как вспомогательный режим, на спектрометре ДИН-2ПИ может быть организован и режим дифракции по времени пролета (после удаления основного прерывателя, см. рис 1), который, в частности, был использован для получения структурной информации о расплавах K, Na, Pb, Pb-K, Na-Pb, Li-N).

3. Предложения по модернизации спектрометра ДИН-2ПИ.

Главной проблемой спектрометра ДИН-2ПИ на данном этапе является низкая интенсивность нейтронов в диапазоне энергий несколько мэВ. По этому показателю он уступает зарубежным аналогам (IN6 (ILL), V-3 (BNSC), FOCUS (PSI)) на порядок, и это притом, что ИБР-2 в настоящее время является самым интенсивным в мире импульсным

источником тепловых нейтронов. Причины такого положения состоят в отсутствии на спектрометре ДИН-2ПИ как холодного замедлителя, так и зеркального нейтронотода, являющихся в наше время на Западе непререкаемыми атрибутами приборов подобного рода. Решение этих двух проблем и являются главнейшими этапами модернизации и развития спектрометра ДИН-2ПИ, полностью определяющими его будущее.

3.1. Холодный замедлитель.

Как показали эксперименты, проведенные на макете холодного замедлителя, установленного на каналах № 4,5,6 реактора ИБР-2, при температуре замедлителя (50-70 К) выигрыш интенсивности в области нейтронов с длинами волн $\sim (4-6) \text{ \AA}$ составляет около 10. Это как раз тот интервал длин волн, который наиболее часто используется в экспериментах на ДИН-2ПИ. Однако, чтобы иметь возможность работать и на нейтронах более высоких энергий (15-20 мэВ), желательно предусмотреть, чтобы холодный замедлитель либо мог быть удален с пучка, либо его можно было бы наполнять водой комнатной температуры. Важным преимуществом спектрометра ДИН-2ПИ является то, что изменение характеристик спектра нейтронов, испускаемых холодным замедлителем, связанное с изменениями в его рабочем веществе в течение цикла работы реактора, несущественны для нормальной работы спектрометра.

3.2. Зеркальный нейтронотод

До недавнего времени считалось, что использование зеркального нейтронотода (ЗНВ) на спектрометре ДИН-2ПИ неэффективно. Причиной тому являются три обстоятельства:

- большая естественная расходимость используемого пучка (~ 0.01 рад); такая величина критического угла рассеяния в случае естественного никеля достигается лишь для нейтронов с длиной волны $> 6 \text{ \AA}$;
- большое расстояние от светящей поверхности до места, откуда конструктивно может быть установлен ЗНВ (~ 6 м);
- примерно равные размеры площадей источника и сечения нейтронотода ($200 \times 200 \text{ мм}^2$).

Однако, после того, как в последние годы были разработаны и вошли в практику многослойные суперзеркала ЗНВ, обеспечивающие двойной и более критический угол рассеяния, ситуацию с ЗНВ на ДИН-2ПИ оказалось возможным и нужным пересмотреть. Проведенные оценки показали, что при использовании сходящегося ЗНВ (переход с сечения $200 \times 200 \text{ мм}^2$ к сечению $100 \times 100 \text{ мм}^2$) длиной ~ 12 м удастся получить выигрыш в интенсивности для интересующих нас длин волн нейтронов в 5-10 раз. К тому же, сходящийся ЗНВ открывает возможности использовать образцы существенно меньших размеров, что в условиях спектрометра ДИН-2ПИ также крайне важно.

3.3. Дополнительные углы рассеяния.

В первоначальном проекте спектрометра ДИН-2ПИ вакуумируемая вторая пролетная база из прочностных соображений была сконструирована состоящей из нескольких секторов таким образом, чтобы охватить весь диапазон углов рассеяния от 3 до 160 град. По ряду причин, связанных с предполагаемой установкой оборудования на соседнем 3-м пучке, два сектора не были установлены.

Предлагается установить дополнительные детекторы, охватывающие углы рассеяния 50-70 и 90-110 градусов. Это позволит проводить эксперименты во всей области динамических переменных, соответствующих углам рассеяния 3-160 градусов. Это чрезвычайно важно при решении широкого спектра задач, связанных с восстановлением закона рассеяния $S(Q, \omega)$, а также при измерении дисперсионных кривых поликристаллических материалов, изучение которых с помощью времяпролетных спектрометров имеет ряд преимуществ. Для установки дополнительных детекторов.

потребуется значительная переделка вакуумных нейтроноводов второй пролетной базы и ее биологической защиты.

3.4. Область малых углов рассеяния.

Круг задач, решаемых на спектрометре ДИН-2ПИ, может быть существенно расширен в случае использования углов рассеяния 1-3 град. Это особенно существенно при проведении дифракционных экспериментов, для которых область $Q \sim (0.1-0.5) \text{ \AA}^{-1}$ является высокоинформативной. Расширить область малых углов рассеяния возможно при незначительном изменении конструкции спектрометра в области вывода прямого пучка. Предварительные оценки показывают, что можно рассчитывать на использование в будущем углов рассеяния $\sim 1^\circ$.

3.5. Окружение образца.

В настоящее время штатные устройства окружения образца обеспечивают температурный интервал от 1.5К до 1200К. Однако, для решения ряда задач, стоящих, в частности, перед атомной отраслью, необходимо расширить этот диапазон в сторону увеличения температур. В текущем году должен быть сдан в эксплуатацию термостат TS3000, что откроет большие возможности для проведения широкого круга практически важных и, пока, недоступных нейтронному методу исследований при температурах до 3000К.

Установленное в настоящее время криогенное оборудование на базе криостата MAX ORANGE ориентировано на использование жидкого гелия для достижения температур 4 -300 К. Представляется целесообразным приобрести для получения температуры в диапазоне 70 - 300 К рефрижератор с замкнутым циклом, не требующий использования жидкого гелия.

4. Предполагаемая стоимость предлагаемых мероприятий.

Зеркальный нейтроновод	120,000	2010	Покупка, частично изготовление в ЛНФ
Установка дополнительных секций второй пролетной базы, оснащение детекторами и электроникой	250,000	2010	Изготовление и установка ГНЦ РФ-ФЭИ
Расширение области малых углов рассеяния	50,000	2008	Изготовление и установка ГНЦ РФ-ФЭИ
Рефрижератор, $T_{\min}=70 \text{ К}$	25,000	2008	Покупка

Итого: 445,000 USD

Литература

1. Ю.Ю.Глазков, С.А.Данилкин, Ю.В.Лисичкин и др. Исследования конденсированных сред с помощью медленных нейтронов. Ат.энергия, 80(1986)391.
2. I.Padureanu, A.Radulescu, A.G.Novikov, V.V.Savostin, Zh.A.Kozlov, Collective motions in liquid gallium, Rom.Journ.Phys., 48(2003)97.
3. N.M.Blagoveshchenskii, Yu.V.Lisichkin, V.A.Morozov, A.G.Novikov, V.V.Savostin, A.L.Shimkevich, Structure and possible cluster formation in liquid lead-potassium alloys. Applied Physics A74(2002)S1107.
4. A.G.Novikov, M.N.Rodnikova, O.V.Sobolev, Reorientation and diffusion motions in liquid ethylene glycol, Physica B 350(2004)363.
5. И.В.Богоявленский, А.В.Пучков, А.Н.Скоморохов, О кривой дисперсии энергетических возбуждений в жидком ^4He . ФНТ, 30(2004)995.
6. H.J.Lauter, I.V.Bogoyavlenskii, A.V.Puchkov, H.Godfrin, A.Skomorokhov, J.Klier, P.Leiderer, Surface excitations in thin helium film in silica aerogel, Appl. Phys. A74(2002) S1547.
7. А.В.Кнотько, А.В.Гаршев, М.Н.Пулькин, В.И.Путляев, С.И.Морозов. Связь динамики атомов кислорода и кинетики окисления твердых растворов на основе $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$, ФТТ, 46(2004)414.
8. Н.Н.Биккулова, С.А.Данилкин, А.И.Бескровный, Е.Л.Ядровский, В.А.Семенов, Г.Н.Ассылгужина, М.Х.Балапанов, М.Б.Сагдаткиреева, У.Х.Мухамедьянов, Нейтронографическое исследование фазовых переходов в суперионном проводнике $\text{Li}_{0.25}\text{Cu}_{1.75}\text{Se}$, Кристаллография, 48(2003)502.

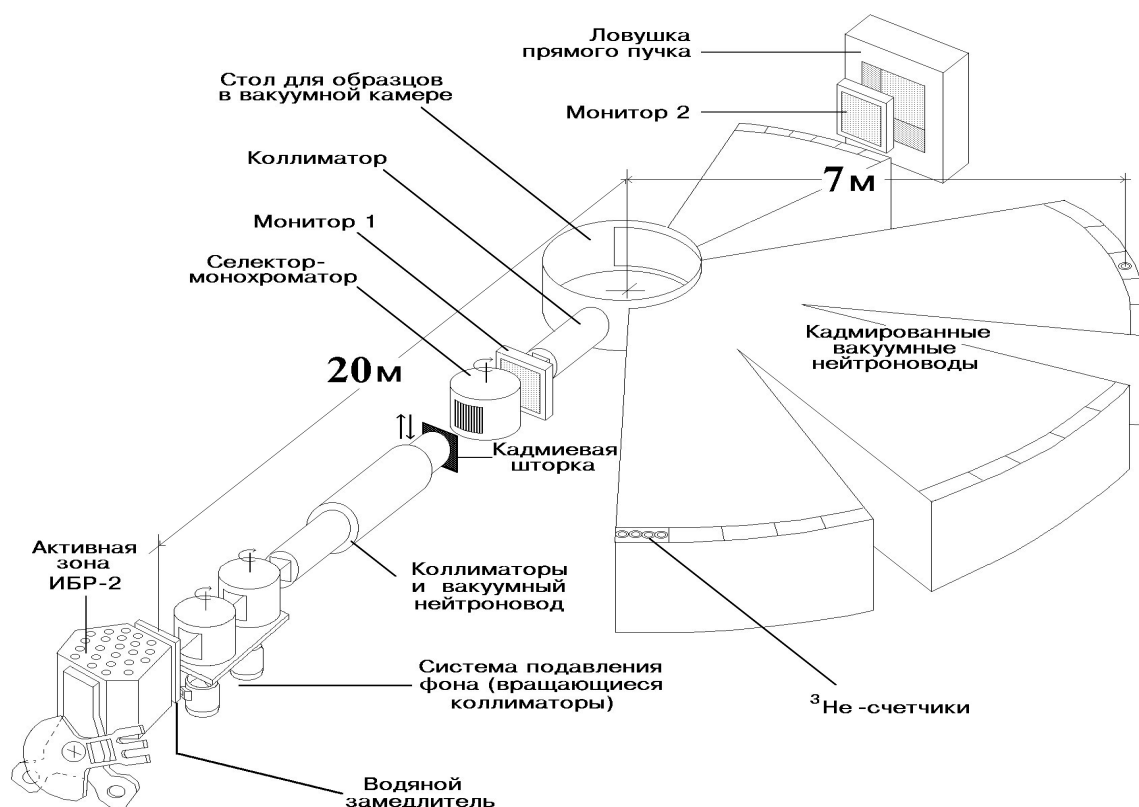


Рис. 1. Основные узлы спектрометра ДИН-2ПИ

Спектрометр поляризованных нейтронов РЕМУР

Руководитель проекта А.В.Петренко

Созданный в 2002 году спектрометр РЕМУР является уникальной установкой для проведения нейтронных экспериментов по рефлектометрии и малоугловому рассеянию поляризованных нейтронов. За время эксплуатации РЕМУР проведены многочисленные эксперименты по исследованию многослойных магнитных плёнок, многослойных полимерных плёнок, сверхпроводящих плёнок, сформировался широкий круг пользователей из России и других стран. Для расширения возможностей спектрометра РЕМУР, улучшения его параметров и подготовки к работе на новом реакторе ИБР-2М с холодным замедлителем необходимо провести доработки некоторых его узлов и оснастить дополнительными узлами и устройствами задания условий на образце.

1. Статус и научная программа установки.

Спектрометр РЕМУР является рефлектометром поляризованных нейтронов с возможностью измерения малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов.

Спектрометр РЕМУР имеет два измерительных режима:

- 1) Рефлектометрический режим (отражение при малых углах скольжения) позволяет проводить исследования отражения нейтронов от слоистых структур при углах скольжения $3\div 10$ мрад, имеет пространственное разрешение порядка $10\div 100$ нм и измеряет пространственный ядерный и магнитный профили на глубину до 1 мкм. В рефлектометрическом режиме спектрометр может работать как с однократным отражением пучка от поляризатора №2 (выше интенсивность), так и с двукратным отражением последовательно от поляризаторов №1 и №2 (выше поляризация).
- 2) Малоугловой режим (отражение при больших углах скольжения, малоугловое рассеяние в объёмных образцах) позволяет проводить исследования отражения нейтронов при углах скольжения $5\div 20$ град и имеет пространственное разрешение $0.2\div 1$ нм. В малоугловом режиме поляризация пучка осуществляется многощелевым поляризатором.

Функциональная схема спектрометра приведена на рис. 1. Технические характеристики спектрометра приведены в работе [1]. Основным назначением спектрометра РЕМУР является исследование магнитных свойств поверхности и тонких плёнок методом рефлектометрии и исследования диффузного рассеяния поляризованных нейтронов с полным поляризационным анализом. Типичными примерами являются исследования структуры многослойных плёнок $^{56}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}$ [2], исследования распределения магнитного поля в сверхпроводнике $\text{Yb}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ [3], исследования многослойных Fe/Cr плёнок с гигантским магнитным сопротивлением [4]. На спектрометре проводятся также и исследования немагнитных образцов. Типичный пример таких исследований – исследование самоорганизующихся многослойных полимерных плёнок измерением диффузного рассеяния нейтронов [5].

2. Работа РЕМУР на холодном источнике

Спектрометр РЕМУР располагается на канале №8 реактора ИБР-2. На этом канале предполагается установка холодного замедлителя. Это позволит существенно поднять эффективность работы спектрометра т.к. светосила спектрометра в рефлектометрическом режиме работы пропорциональна λ^2 где λ – рабочая длина волны нейтронов и пропорциональна λ^3 при работе в режиме малоугловой установки.

Практика работы РЕМУР показала, что типичное время набора статистики одного спектра равняется 5÷6 часам. При полном поляризационном анализе требуется измерение пяти спектров. Таким образом, **время стабильной работы холодного источника должно составлять не менее суток.**

Другие требования к холодному замедлителю:

- 1) Наиболее важный диапазон длин волн — **2÷20 Å**
- 2) Длина волны, соответствующая максимуму спектра — **4 Å**
- 3) Используемый диапазон длин волн — **1÷25 Å**
- 4) Размеры:
 - А) 200 мм (ширина) x 235 мм (высота) — максимальный
 - Б) 150 x 180 мм² — минимально допустимый
- 5) Центр замедлителя должен либо остаться на нынешней высоте, либо допускается подъём по отношению к нынешнему положению замедлителя. **Не допускается смещение центра замедлителя вниз относительно нынешнего положения.**
- 6) Форма замедлителя — определяется из условия максимума интегрального потока нейтронов.
- 7) Предельно допустимая длительность импульса тепловых нейтронов — **400 мкс.**
- 8) Допустимая нестабильность интенсивности — **1 % за 5 часов.**
- 9) Частота перерывов в работе — **3÷5 дней.**

Желательно, чтобы замедлитель также эффективно работал и при комнатной температуре. Возможное решение – разделение замедлителя по высоте на холодную и тёплую части, либо размещение холодного и тёплого замедлителей один над другим и замена замедлителей перемещением их по высоте (не отодвигая от реактора).

3. Предложения по модернизации РЕМУР

Задачами проекта являются:

- 1) снижение фона быстрых нейтронов и γ -квантов на установке и увеличение потока нейтронов в рефлектометрическом режиме путём установки фокусирующего нейтронотода;
- 2) создание нового и замена существующего прерывателя фона;
- 3) создание новых и замена существующих поляризаторов;
- 4) замена неисправного и устаревшего оборудования;
- 5) обеспечение возможности измерений в криостате с полем $H=3$ Т при помощи создания немагнитного гониометра для криостата;
- 6) обеспечение возможности измерений с полем, выходящим из плоскости образца при помощи установки криогенератора;
- 7) расширение диапазона доступных температур до 0.3 К ÷ 600 С с помощью специализированных вставок в криостат;
- 8) завершение создания блока рефлектометрических детекторов;
- 9) замена однокоординатного ПЧД рефлектометрического режима на двухкоординатный с рабочей областью 200x200 мм²;
- 10) создание и установка на спектрометре анализатора поляризации нейтронов с рабочим сечением 200x200 мм²;
- 11) модернизация программного обеспечения спектрометра.

Стоимости узлов РЕМУР, подлежащих обновлению, приведены в **таблице 1**. Общая схема установки РЕМУР после модернизации показана на рисунке в проекте «Рефлектометр поляризованных нейтронов с атомным разрешением (РЕФАТ)» (пучок 8а).

4. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки модернизации РЕМУР

1. Реактор ИБР-2: 500 часов работы в течение 2005 ÷ 2007 года.
2. ОП ЛНФ – 10 000 нормо-часов.
3. ОП ОИЯИ – 15 000 нормо-часов.
4. КБ ЛНФ – 1 500 нормо-часов.
5. Затраты на материалы и изготовление – 56 тыс. долл. США в год.
6. Количество штатных единиц, участвующих в проекте – 5 чел. (сотрудники НЭО НИКС ЛНФ).

Литература

1. В.Л.Аксёнов, К.Н.Жерненко, С.В.Кожевников, Х.Лаутер, В.В.Лаутер-Пасюк, Ю.В.Никитенко, А.В.Петренко “Спектрометр поляризованных нейтронов РЕМУР на импульсном реакторе ИБР-2” Препринт ОИЯИ Д13-2004-47.
2. L.Deak, G. Bayreuther, L.Bottyan, E.Gerdau, J.Korecki, E.I.Kornilov, H.J.Lauter, O.Leupold, D.L.Nagy, A.V.Petrenko, V.V.Pasyuk-Lauter, H.Reuther, E.Richter, R.Rohloberger, E.Szilagyí “Pure nuclear bragg reflection of periodic 56Fe/57Fe multilayer” J. Appl. Physics 85 (1999) 1 – 7.
3. V.Lauter-Pasyuk, H.J.Lauter, M.Lorenz, A.Petrenko, O.Nikonov, V.L.Aksenov, P.Leiderer “Magnetic field distribution around flux-lines in $YBa_2Cu_3O_7$ superconducting thin films in a parallel field” Phys. B, 276-278 (2000) 776 – 777.
4. E. Kravtsov, V.Lauter-Pasyuk, H.J.Lauter, B.Toperverg, O.Nikonov, A. Petrenko, M.A. Milyaev, L. Romashev, V. Ustinov “Interface formation and magnetic ordering in Fe/Cr hybrid nanostructures” Physica B, 297 (2001) 118-121.
5. V.Lauter-Pasyuk, H.J.Lauter, B.Toperverg, O.Nikonov, A.Petrenko, D.Schubert, W. Petry, V. Aksenov “Off-specular neutron scattering studies of the interface and surface formation in self-assembled polymer multilayers” Proceedings of ILL symposium, 6-7 April 2001, p. 84.

Таблица 1.

Коллиматоры	3	2007	Изготовление в ЛНФ
Блок защиты детекторов рефлектометрической моды	15 000 н./часов	2007	Изготовление в ЛНФ или ООЭП ОИЯИ
Позиционно-чувствительный детектор	6	2007	Доводка в ЛНФ
Анализатор поляризации	90	2010	Покупка
Материалы	35	2010	Покупка
Приборы, оборудование	25	2010	Покупка
Прерыватель	10	2010	изготовление в ЛНФ
Система управления и накопления	10	2007	Разработка в ЛНФ
Немагнитный гониометр для криостата	11	2007	Покупка
Блок питания криомагнита	15	2007	Покупка
Вставка в криостат для работы при T=0.3 К	20	2007	изготовление в ЛНФ
Вставка в криостат для работы при T=600 К	10	2010	изготовление в ЛНФ
Криогенератор для магнитных измерений при T=10÷400 К	40	2007	Покупка
Система насыщения образцов водородом	5	2007	изготовление в ЛНФ
Доработка поворотной платформы	10	2007	изготовление в ЛНФ
Доработка площадок обслуживания криостата и экспериментального домика	5	2007	изготовление в ЛНФ
Фокусирующий нейтронотвод	80	2010	Покупка

Итого: 375 тыс. дол. США + 15 000 н./часов

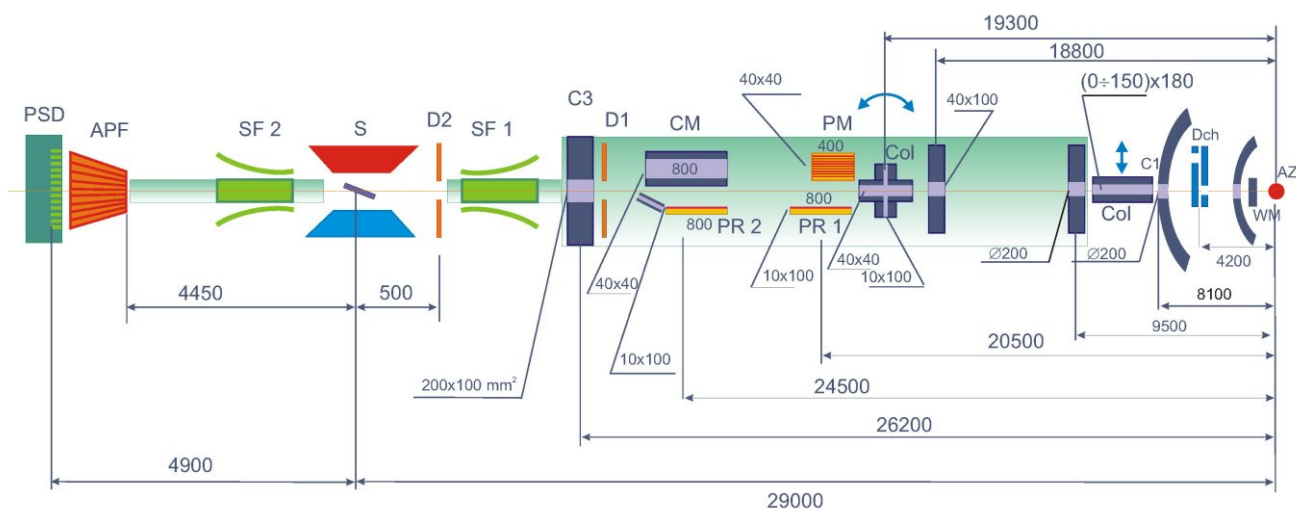


Рис. 1. Схема спектрометра РЕМУР.

- D_{ch} – двухдисковый прерыватель
- PR1, PR2 – поляризаторы рефлектометрического режима
- PM – поляризатор малоуглового режима
- D1, D2 – управляемые диафрагмы
- SF 1, SF 2 – спин-флипперы
- APF – многощелевой анализатор поляризации
- S – позиция образца

КОЛХИДА – спектрометр с поляризованной мишенью

Руководитель проекта: М.И.Цулая.

На канале №1 импульсного реактора ИБР-2 ведутся работы по завершению создания экспериментальной установки «Колхида», состоящей из спектрометра поляризованных нейтронов и поляризованной ядерной мишени. Завершена первая часть работы – введен в эксплуатацию спектрометр поляризованных нейтронов, исследованы его параметры и на нем проведены первые экспериментальные исследования на монокристалле Bi_2CuO_4 . Установка «Колхида» предназначена для исследования взаимодействия поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами и магнитных структур и магнитных свойств кристаллов методом дифракции на поляризованных нейтронах. Для расширения возможностей установки «Колхида», улучшения ее параметров и подготовке к работе на новом реакторе ИБР-2М необходимо провести модернизацию некоторых ее узлов и оснастить дополнительными устройствами.

1. Статус и научная программа.

Спектрометр «Колхида» позволяет вести исследования, как в области ядерной физики, так и в области физики конденсированных сред. Первоначально установка была предназначена для работы на стационарном ядерном реакторе [1], но затем она была перестроена для работы на импульсном реакторе. В состав установки входят:

1. Спектрометр монохроматических поляризованных нейтронов (Рис. 1). Нейтроны поляризуются при дифракционном отражении от монокристалла Co-Fe. Энергия поляризованных нейтронов может быть от 0.06 эВ до 2.0 эВ, поляризация $P_n = 0.98$.

2. Криостат растворения ^3He в ^4He со сверхпроводящим соленоидом, предназначенный для поляризации ядер.

Технические параметры спектрометра поляризованных нейтронов, являющегося частью установки «Колхида», даны в работе [2]. Поляризация ядер осуществляется в криостате растворения $^3\text{He}/^4\text{He}$ как методом «грубой силы», так и динамической накачкой. Образец в криостате можно охлаждать до 24 мК и держать в магнитном поле $H=6$ Т, при однородности поля $\Delta H/H = 10^{-4}$.

В программу исследований на установке в первую очередь входит изучение ядерного псевдомагнетизма, проявляющегося при взаимодействии поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами. При этом наблюдается вращение спина нейтрона вокруг оси поляризации ядер. Особый интерес представляет наблюдение так называемого парамагнитного резонанса, связывающего обычное магнитное поле с псевдомагнитным, а также изучение эффекта в области нейтронного резонанса. В этой области энергии нейтронов ожидается изменение направления вращения спина, однако пока это не исследовано экспериментально.

Еще одно из направлений исследований на установке «Колхида» – наблюдение эффекта нарушения четности при взаимодействии неполяризованных нейтронов с поляризованными ядрами. Этот эффект до настоящего времени практически не изучен.

Планируется также исследование магнитных свойств кристаллов методом дифракции нейтронов. Проведены пробные тестовые измерения на монокристалле Bi_2CuO_4 размером 5x5x7 мм. Использовался поляризованный пучок нейтронов с $\lambda = 1.15$ Å, имеющий максимальную интенсивность – 430 н/см²сек. В эксперименте измерены дифракционные отражения (100) и (200) с межплоскостными расстояниями $d=8.51$ Å и $d=4.25$ Å соответственно. Проведенные измерения показали, что дифракционные эксперименты на монокристаллах могут успешно проводиться на установке «Колхида».

При использовании поляризованных тепловых нейтронов с $\lambda=1.15 \text{ \AA}$, как имеющих максимальную интенсивность, и регистрации рассеянных на образце нейтронов в диапазоне углов $2\Theta = 5^\circ \div 90^\circ$, доступная наблюдению область межплоскостных расстояний лежит в диапазоне $0.8 - 12 \text{ \AA}$.

2. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки проведения модернизации.

Для нормальной работы криостата растворения $^3\text{He} / ^4\text{He}$ со сверхпроводящим магнитом необходимо:

1. Заменить морально устаревшие вакуумные насосы для циркуляции ^3He на новые, с улучшенными параметрами.
2. Приобрести стабилизированный источник питания сверхпроводящего соленоида, управляемый ПК.
3. Приобрести измеритель сверхнизких температур с градуированным датчиком температуры.
4. Установить монохроматор Cu_2MnAl_3 .

Один из наиболее важных параметров установки – ее светосила. Светосилу спектрометра поляризованных нейтронов с целью его использования для дифракционных экспериментов можно увеличить в несколько раз, заменив монокристаллы CoFe (поляризатор и анализатор) на более светосильные поляризаторы нейтронов, например сплав Гейслера Cu_2MnAl_3 . Наиболее радикальным образом (на несколько порядков), светосила будет увеличена при использовании многощелевых поляризатора и анализатора. В этом случае образец размещается в зеркально отраженном пучке поляризованных нейтронов. В такой геометрии возможны эксперименты как с моно-, так и с поликристаллическими образцами.

Для дифракционных экспериментов необходимы:

1. однокоординатный ПЧД ($l \approx 50\text{см}$, пространственное разрешение $\Delta X \approx 0,5\text{см}$) с электроникой и системой накопления емкостью 128К;
2. гониометрическая головка с дистанционным управлением для юстировки монокристаллических образцов;
3. многощелевой поляризатор

Стоимость узлов и оборудования для модернизации и желательные сроки их поставки отражены в таблице 1.

Литература

1. Tsulaya M.I., Gabelya M.S., Djamaspishvili C.I., Blinovski K., Dobrzyn'ski L., Chelmicki L. – Polarized neutron set-up for experimental study the neutron nuclear precession - Nucl. Instr. Meth., 1981, 185, p. 497-504.
2. Абов Ю.Г., Алфименков В.П., Галинский Е.М., Ласонь Л., Мареев Ю.Д., Новицкий В.В., Пикельнер Л.Б., Цулая В.М., Цулая М.И., Черников А.Н. – Спектрометр поляризованных нейтронов – ПТЭ, 2000, 3, с. 9-12.
3. Абов Ю.Г., Цулая М.И. – Ядерная прецессия нейтронов и прецессия спина нейтронов в немагнитных кристаллах, помещенных в однородном магнитном поле – Поверхность, 1997, 7, с. 82-89.

Таблица 1. Стоимость узлов и оборудования (в KUSD) для модернизации «Колхиды» и желательные сроки их поставки.

Наименование	Стоимость	Срок	Примечания
Вакуумные насосы для циркуляции ^3He	75	2007	полный комплект
Измеритель сверхнизких температур с температурным датчиком	10	2006	полный комплект
Источник питания сверхпроводящего соленоида	10	2006	полный комплект
Многощелевой поляризатор	20	2006	покупка
ПЧД $l \approx 50\text{см}$, $\Delta X \approx 0,5\text{см}$	30	2006	покупка или изготовление в ЛНФ
Гониометрическое устройство с дистанционным управлением	10	2010	проектирование и изготовление
Рефрижератор, $T_{\text{min}}=3\text{ К}$	45	2009	покупка
Монохроматор Cu_2MnAl_3	10	2010	покупка
ИТОГО:	210		

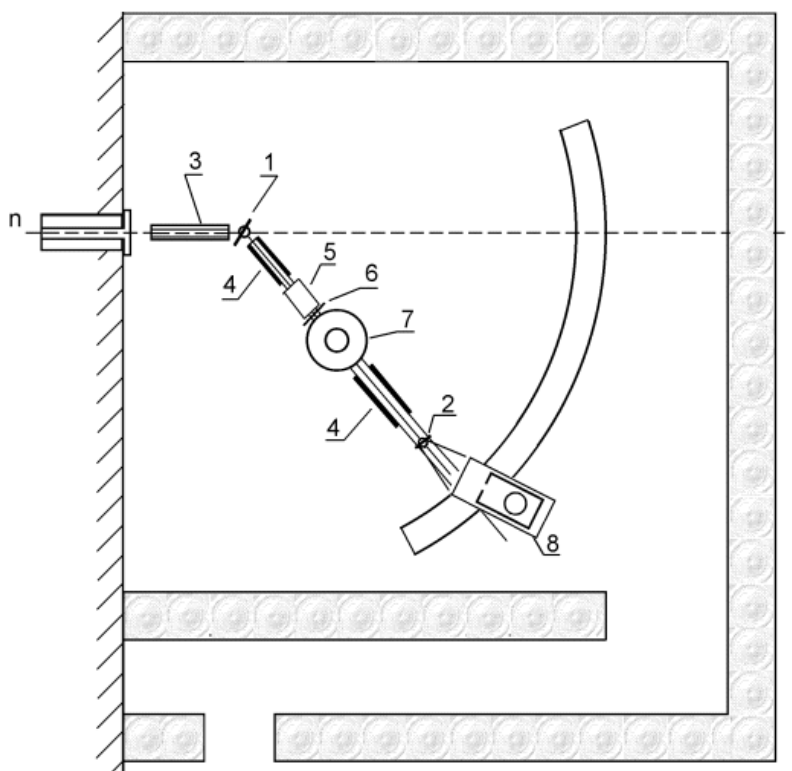


Рис. 1. Общая схема спектрометра.

1 – кристалл поляризатора; 2 – кристалл анализатора; 3 – коллиматор Соллера; 4 – ведущие магнитные поля; 5 – спин флиппер; 6 – шим; 7 – криостат; 8 – детектор.

Нейтронный спектрометр для анализа процессов в реальном времени

Руководитель проекта: Г.М. Миронова

В середине 80-х годов в ЛНФ на реакторе ИБР-2 был развит метод нейтронографии в реальном времени, до сих пор не имеющий аналога в мире. При специальной аранжировке системы образец-детектор на дифрактометре ДН-2 нейтронные спектры, измеряемые одновременно на углах рассеяния от -179 до $+179^\circ$, в интервале длин волн падающего на образец спектра $1 - 25 \text{ \AA}$ имеют достаточную информативность при экспозиции от нескольких секунд до минуты, в зависимости от образца. Метод позволяет изучать механизм и кинетику равновесных и неравновесных фазовых переходов и химических реакций в конденсированной среде. Получены фундаментальные результаты при исследовании процессов плавления и солидификации, диффузии кислорода в керамиках ВТСП, кристаллизации стекол, окисления металлов, гидратации-дегидратации полимеров, липидов, вязущих, фазовых переходов в железе и др. [1-7]. Целью настоящего проекта является создание на реакторе ИБР-2М специализированного стационарного спектрометра, предназначенного для изучения в конденсированных средах переходных процессов в реальном времени с рекордными параметрами.

1. Постановка задачи и научная программа.

Под нейтронографией в реальном времени (НРВ) понимается изучение неравновесного состояния в конденсированных средах при регистрации рассеянного и прошедшего излучений. Уникальные особенности импульсного источника нейтронов ИБР-2 – рекордная светосила, низкая частота следования импульсов, малый фон между импульсами – позволяют иметь рекордные параметры НРВ: экспозицию до одного импульса (что дает возможность микросекундного разрешения [2]), любые углы рассеяния, включая пропускание прямого пучка, диапазон длин волн падающего спектра $1 - 25 \text{ \AA}$ (на базе 20 м), регистрацию трансформированного излучения (гамма-лучей и др.). В общем случае, при исследовании монокристаллов, ориентированных и низкоразмерных объектов, возможно разделение восьми переменных: азимутального и полярного углов ориентации образца и детектора, скорости падающих нейтронов и рассеянного излучения, расстояния образец-детектор, вида рассеянного излучения. Температура, газовое окружение образца и другие воздействия (постоянные или импульсные) представляют собой дополнительные координаты так называемой Многомерной Нейтронографии в Реальном Времени. Принципиальные моменты предлагаемой методики уже апробированы. Осуществлена серия экспериментов с ориентационными эффектами, с изменением условий на образце (температура, газовое окружение, механические воздействия). Измерены спектры рассеяния на малых и больших углах за один импульс реактора и показана реальная возможность проведения кинетических экспериментов с разрешением десятки микросекунд. Цель настоящего проекта – создание на ИБР-2М специализированной стационарной установки для изучения в конденсированных средах переходных процессов в реальном времени с рекордными параметрами – “спектрометра реального времени” (далее СРВ).

2. Техническое описание основных узлов СРВ.

2.1. Состав СРВ.

Установка должна представлять собой стационарный вариант действовавшего на базе дифрактометра ДН-2 макета, хорошо себя зарекомендовавшего, дополненного специализированным оборудованием для проведения работ, связанных с ориентированием образца и детекторов, а также с воздействием на образец. Принципиальная схема СРВ приведена на **рис. 1**. Дифрактометр содержит:

- прерыватель в кольцевом коридоре;
- зеркальный канал в защите реактора;
- суперзеркальный нейтроновод;
- регулируемые диафрагмы для формирования нейтронного пучка на образце;
- платформа дифрактометра;
- стол для внешних устройств с образцом, включая гониометр;
- детекторная система для регистрации спектров дифракции и МУРН;
- монитор нейтронного пучка;
- электроника автоматизации измерений, включающая аппаратуру контроля, управления и накопления экспериментальных данных.

Далее приведено краткое описание некоторых узлов СРВ, имеющих принципиальное значение.

2.2. Прерыватель в кольцевом коридоре.

Прерыватель барабанного типа, служит для устранения рециклических нейтронов. За основу конструкции может быть взят прерыватель, действующий в составе ДН-12.

2.3. Суперзеркальный нейтроновод.

Служит для максимального увеличения потока нейтронов на образце. Нейтроновод должен быть сделан по современным технологиям с максимальным увеличением критического угла отражения, вплоть до $5 \cdot 10^{-3} \lambda$ рад. Критическая длина волны (определяемая радиусом кривизны) может быть выбрана в районе 2 Å.

2.4. Детекторная система.

Детекторная система является ключевым узлом СРВ, ее параметры определяют возможности спектрометра. Конструкция детекторной системы должна быть выполнена с учетом современных тенденций создания детекторов с большими телесными углами. За основу могут быть взяты разработки детекторов на ZnS-элементах. Минимально детекторная система должна состоять из трех блоков: малоугловой детектор, допускающий возможность регистрации нейтронов в интервале $0^\circ - 5^\circ$, детекторы на средних углах рассеяния (диапазон $30^\circ - 90^\circ$), детекторы на больших углах рассеяния (диапазон $150^\circ - 179^\circ$).

2.5. Системы задания условий на образце.

Как правило, эксперимент в реальном времени проводится с образцом, находящимся под воздействием каких-либо внешних факторов (температуры, влажности и т.д.). Соответственно, наличие тех или иных средств задания внешних условий определяют тематику проводимых исследований. Минимальный вариант оборудования должен включать: печь для диапазона $20 - 1500^\circ\text{C}$, печь с герметичным объемом, заполняемым смесью газов, для диапазона $20 - 900^\circ\text{C}$, герметичные камеры с уровнем влажности, задаваемым насыщенными растворами солей, на диапазон температур $20 - 100^\circ\text{C}$.

3. Работа СРВ на холодном источнике нейтронов.

Непременным условием успешной реализации научной программы изучения переходных процессов на СРВ является его расположение на канале с холодным источником нейтронов. Эксперименты, проведенные в 1994 и 1999 годах, показали, что холодный замедлитель позволяет значительно повысить качество получаемой информации за счет увеличения эффективного разрешения на порядок [8]. Регистрация на СРВ дифракционных пиков при больших d_{hkl} является принципиальным обстоятельством при изучении многих типов процессов.

Специфической особенностью работы в реальном времени является необходимость хорошей временной стабильности интенсивности нейтронного пучка. Отсюда следует, что эксплуатация СРВ на холодном источнике нейтронов будет возможна, если **время стабильной работы источника составит не менее пяти часов.**

4. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и возможные сроки создания СРВ.

Оптимальным вариантом для создания СРВ, явилось бы использование инфраструктуры дифрактометров ФДВР или ДН-2, расположенных на пучках 5 и 6А, соответственно. В этом случае стоимость создания СРВ фактически совпадает со стоимостью изготовления его основных узлов (**таблица 1**).

Работы по проекту будут осуществляться силами сотрудников группы ФДВР сектора дифракции НЭО НИКС.

Литература

1. Балагуров А.М., Миронова Г.М., "Изучение кинетики реакции гидратации трехкальциевого алюмината методом дифракции нейтронов" **Краткие сообщения ОИЯИ**, 19-86, Дубна, 1986, с.50-56.
2. Миронова Г.М., **Сообщение ОИЯИ**, P13-88-326, Дубна, 1988.
3. Balagurov A.M., Mironova G.M., Simkin V.G., Proc. Int. Seminar on High T_c -superconductivity, Ed. V.L.Aksenov, N.N.Bogolyubov, N.M.Plakida. Singapore, World Scientific, p.590, 1989.
4. Балагуров А.М., Миронова Г.М. "Нейтроннографическое исследование процесса синтеза керамики $YBa_2Cu_3O_x$ " **СФХТ**, 1990, т.3, с.545-552.
5. Balagurov A.M., Mironova G.M., Rudnickij L.A., Galkin V.Ju. "Time-resolved neutron diffraction investigation of the effect of hydrogen on the high- T_c superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ " **Physica C**, 1990, v.172, pp.331-334.
6. Балагуров А.М., Баркалов О.И., Колесников А.И., Миронова Г.М., Понятовский Е.Г., Сеницын В.В., Федотов В.К. "Нейтроннографическое исследование фазовых превращений метастабильного льда высокого давления VIII" **Письма в ЖЭТФ**, 1991, т.53, с.30-33.
7. Балагуров А.М., Миронова Г.М. "Нейтроннографические исследования в реальном масштабе времени" **Кристаллография**, 1991, т.36, с. 314-325.
8. G.M.Mironova, "Cold moderator at the IBR-2 reactor as a basis for new possibilities in neutron scattering experiments" Sec. Int. Seminar "Advanced Pulsed Neutron Sources: Physics of/at Advanced Pulsed Neutron Sources", June 14-17, 1994, Dubna, Russia, Proceedings, p.75.

Таблица 1. Стоимость (в USD) и желательные сроки изготовления (приобретения) некоторых узлов СРВ.

Прерыватель барабанного типа	15	2010	Изготовление
Суперзеркальный нейтроновод	125	2008	Покупка
Детекторная система	100	2008	Изготовление
Системы окружения образца	60	2010	Покупка

Итого: 300 тыс. дол. США

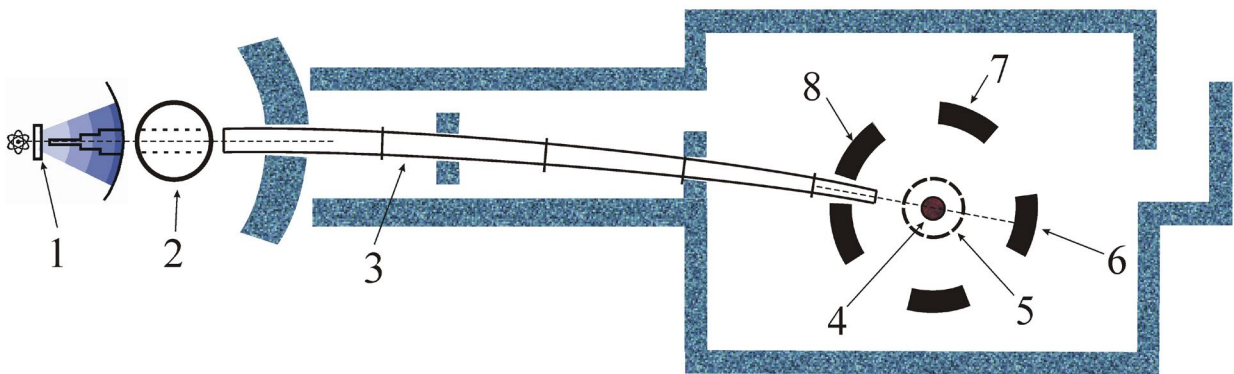


Рис. 1. Функциональная схема СРВ: 1 – замедлитель, 2 – прерыватель барабанного типа, 3 – изогнутый нейтроновод, 4, 5 – образец и его окружение, 6, 7, 8 – блоки детекторов.

Спектрометр ДН-6 для исследования микрообразцов

Руководитель проекта: Б.Н. Савенко

На основе новой методики нейтронографии конденсированных сред под высоким давлением в ЛНФ ОИЯИ, на базе импульсного реактора ИБР-2 совместно с сотрудниками РНЦ “Курчатовский Институт” создан спектрометр для исследований микрообразцов – ДН-12, позволяющий проводить исследования в диапазоне высоких давлений до 7 ГПа. За время его работы был накоплен значительный опыт, связанный как с проектированием, разработкой и модернизацией спектрометра, так и с развитием методики нейтронографии при высоких давлениях. Работы по созданию нового спектрометра ДН-6 на 6Б канале являются логическим продолжением работ на спектрометре ДН-12 на 12 канале ИБР-2 и направлены на значительное увеличение светосилы. Новый спектрометр позволит заметно увеличить диапазон давлений, т.е. решать задачи пока недоступные на ИБР-2.

1. Статус и научная программа.

Эксперименты по рассеянию нейтронов с применением камер высокого давления ведутся в настоящее время только в нескольких наиболее развитых лабораториях мира. Это связано с тем, что для получения приемлемых для анализа экспериментальных данных требуется высокопоточные источники нейтронов и дорогостоящие детекторные системы. До недавнего времени область применения нейтронных методов, как правило, ограничивалась диапазоном давлений 1-2 ГПа, что связано с использованием относительно больших объемов образца в камерах типа цилиндр-поршень. Развитие метода нейтронных исследований при высоких давлениях, основанного на сочетании техники сапфировых и алмазных наковален и низкофоновой нейтронной дифрактометрии позволило расширить диапазон давлений в этих экспериментах до нескольких десятков ГПа. Основным назначением спектрометра ДН-12 [1] в настоящее время является исследование атомной и магнитной структуры конденсированных сред под воздействием высоких давлений 0 – 7 ГПа и низких температур 10 – 300 К. Типичными примерами являются исследование легированных манганитов с эффектом колоссального магнетосопротивления [2, 3] и других магнитных соединений, таких как MnAs и FeVO₃ [4, 5], при высоких давлениях. Кроме этого на спектрометре ДН-12 проводятся эксперименты по исследованию динамики конденсированных сред методом неупругого рассеяния [6].

Дальнейшее развитие техники высоких давлений, направленное на расширение диапазона достижимых давлений до 20-30 ГПа, требует увеличения потока нейтронов на образце, что необходимо для уменьшения объема исследуемых образцов. 12-й канал один из наименее интенсивных на реакторе ИБР-2, и на нем нет возможности работы с холодным замедлителем, что накладывает серьезные ограничения на исследования магнитных структур под давлением.

Канал 6б реактора ИБР-2 обеспечивает поток тепловых нейтронов, величина которого в пять раз выше величины потока тепловых нейтронов на канале 12. Использование холодного замедлителя нейтронов на этом канале позволит существенно расширить возможности исследования магнитной структуры кристаллов при высоких давлениях. Оптимальное сочетание интенсивного нейтронного пучка канала 6б, использование зеркального нейтроновода и уникальная многодетекторная система спектрометра ДН-6 позволит проводить эксперименты при давлениях до 20-30 ГПа, используя новые камеры высокого давления с наковальнями из натурального алмаза и муссонита, со сверхмалыми объемами образцов 0.01 – 0.1 мм³. Основные узлы нового спектрометра ДН-6 представлены на рисунке 1.

1.1. Светосила спектрометра.

Интенсивность нейтронного пучка канала 6б превосходит интенсивность пучка 12 канала в ~5 раз. Для дальнейшего увеличения светосилы планируется создание двух детекторных колец (каждое кольцо состоит из 16 независимых детекторных блоков) на основе сцинтилляторов ZnS. Это позволит сократить время экспериментов в ~5 – 10 раз по сравнению с нынешним уровнем.

1.2. Улучшение фоновых условий.

Планируется установка прерывателя нейтронного пучка. Прототипом для прерывателя нейтронного пучка является устройство, работающее на канале 12 реактора ИБР-2. Будет проведена модернизация нейтроновода канала 6б: замена кожуха нейтроновода и его головной части.

1.3. Устройства окружения образца.

Для создания различных условий на образце будут использоваться гелиевый рефрижератор ($T \geq 8$ К) и камеры высокого давления различных конструкций. Для расширения диапазона достижимых давлений ведется проектирование и изготовление новых камер высокого давления с наковальнями из сапфира и алмаза, а также новых сверхпрочных материалов (например, муссонита). Охлаждаемый бериллиевый фильтр даст возможность измерять неупругое некогерентное рассеяние нейтронов, что необходимо для исследования динамики атомов в кристаллах.

2. Работа ДН-6 на холодном источнике нейтронов.

ДН-12 в настоящее время располагается на 12-м канале ИБР-2, на котором не планируется установка холодного замедлителя. Создание нового спектрометра ДН-6 на канале 6Б, где предусмотрена установка холодного замедлителя, позволит увеличить интенсивность падающего потока холодных нейтронов в диапазоне длин волн 4 – 13 Å в ~5 – 10 раз, что позволит существенно увеличить качество измеряемых дифракционных данных магнитных кристаллов и расширить круг задач по исследованию магнитных структур при высоких давлениях.

3. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки создания ДН-6.

Стоимость комплектующих и изготовления ZnS-детектора (1 модуль) составляет 5,000\$. Полный комплект из 32 модулей – 160,000\$. Детектор может быть изготовлен силами детекторной группы ЛНФ с привлечением (на контрактной основе) сотрудников ЛЯП. Модернизация нейтроновода канала 6б обойдется в сумму ~50,000\$. Стоимости детекторов, новых узлов ДН-6 и оборудования для задания условий на образце отражены в **таблице 1**.

Работы по проекту предполагается осуществлять силами **сотрудников группы №3 сектора дифракции** (руководитель Б.Н.Савенко) и сотрудников ЛНИТТ РНЦ «Курчатовский институт» (лаборатория В.А.Соменкова).

Таблица 1. Стоимость (в USD) и желательные сроки изготовления (приобретения) некоторых узлов ДН-6 в рамках проекта создания нового спектрометра.

<i>Наименование</i>	<i>Стоимость</i>	<i>Сроки изготовления</i>
Детекторный блок (32 шт.)	160,000	до 2010 г.
Прерыватель нейтронного пучка	3,000	до 2008 г.
Электронная система управления и контроля прерывателя нейтронного пучка	3,000	до 2008 г.
Модернизация кожуха и головной части нейтроновода	50,000	до 2009 г.
Измерительно-вычислительный модуль	20,000	до 2009 г.

Итого: 236,000 USD

Литература

1. V.L. Aksenov, A.M. Balagurov, V.P. Glazkov, D.P. Kozlenko, I.V. Naumov, B.N. Savenko, D.V. Sheptyakov, V.A. Somenkov Physica B 265, 258 (1999).
2. D.P.Kozlenko, V.P.Glazkov, Z.Jirák and B.N.Savenko, J. Phys.: Condensed Matter v. 16, pp. 2381 – 2394 (2004).
3. Д.П.Козленко, В.И.Воронин, В.П.Глазков, И.В.Медведева, Б.Н.Савенко Физика твердого тела 46, № 3, стр. 484-490 (2004).
4. В.П.Глазков, Д.П.Козленко, К.М.Подурец, Б.Н.Савенко, В.А.Соменков, Кристаллография 48, стр. 59-62 (2003).
5. V.P.Glazkov, S.E.Kichanov, D.P.Kozlenko, B.N.Savenko, and V. A. Somenkov, JETP Letters 76, pp. 215-217 (2002).
6. Глазков В.П. Козленко Д.П., Савенко Б.Н., Соменков В.А., Сырых Г.Ф.Телепнев А.С., ЖЭТФ, 121 (6), 1321-1327 (2002).

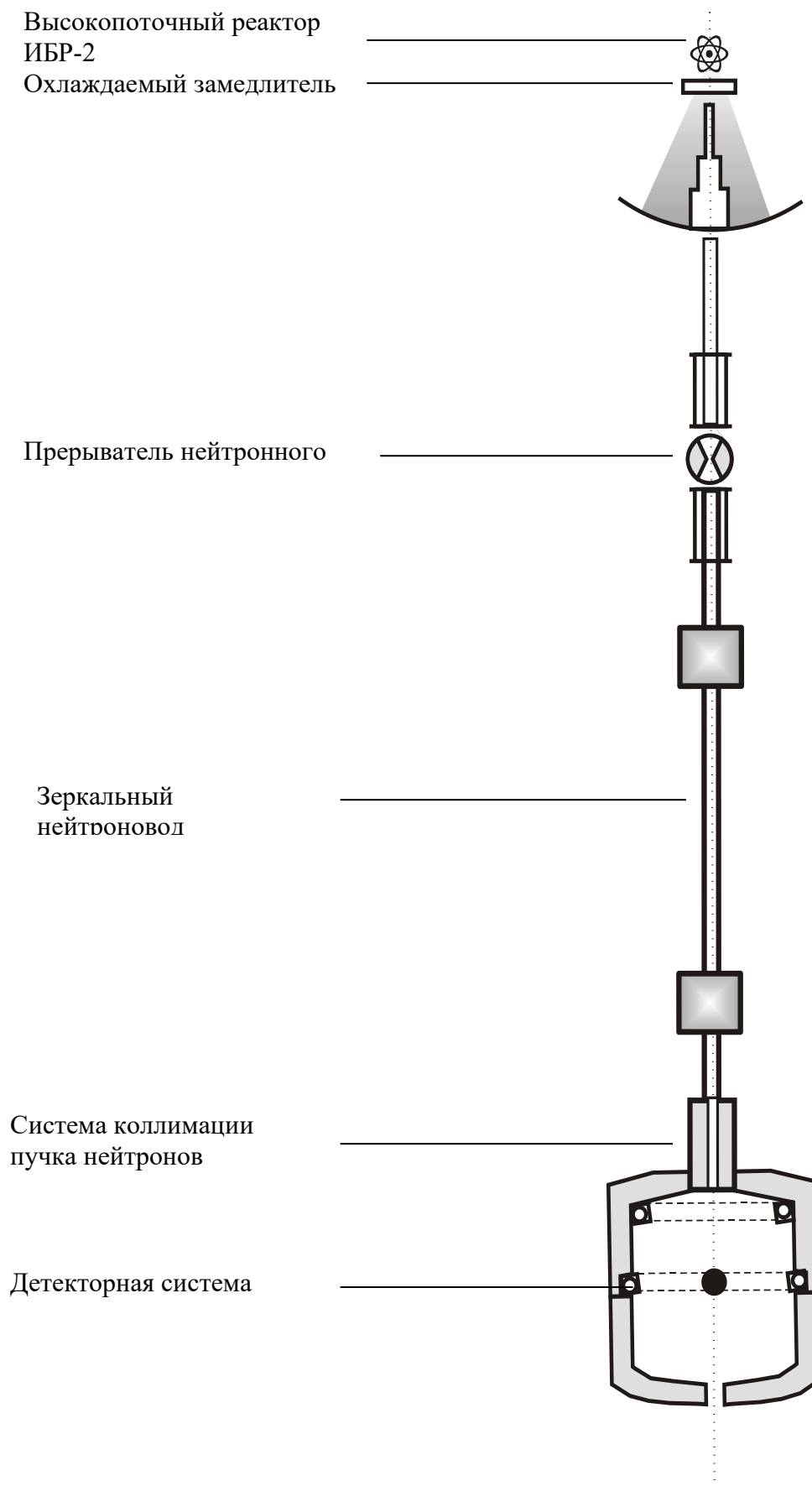


Рис. 1. Основные узлы спектрометра ДН-6.

Спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов МУРН-С

Научный руководитель: В.И.Горделий

В проекте предлагается создать современную высокопоточную установку малоуглового рассеяния на одном из каналов реактора ИБР-2 с холодным замедлителем. Особенности установки будут: изогнутый нейтронный канал, высокий поток нейтронов на образце (от 10^7 до 4×10^7 н/с/см²), широкий диапазон переданных импульсов ($1 \times 10^{-3} - 0.5 \text{ \AA}^{-1}$, что соответствует характерным размерам изучаемых объектов 10 – 6000 Å), использование современного позиционно-чувствительного детектора нейтронов. Необходимость создания подобной установки связана, прежде всего, с высоким спросом на использование метода малоуглового рассеяния, что в свою очередь объясняется как широким кругом решаемых задач (от материаловедения до современных проблем биологии), так и уникальностью метода.

1. Статус и научная программа.

Цель проекта – создание новой установки малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН-С) с параметрами мирового уровня, на одном из пучков ИБР-2 с холодным замедлителем. Два основных элемента установки – изогнутый зеркальный нейтронный канал и двумерный позиционно-чувствительный детектор рассеянных нейтронов. МУРН-С реализует в полной мере уникальные возможности, предоставляемые ИБР-2 для малоуглового рассеяния нейтронов, а именно: широкий диапазон векторов рассеяния (от 0.001 до 0.5 \AA^{-1}), высокую скорость накопления экспериментальных данных, высокое разрешение, возможность исследования анизотропно и слабо рассеивающих объектов.

Модернизированный спектрометр малоуглового рассеяния ЮМО и МУРН-С будут **взаимно дополнять** друг друга. Эффективность их работы будет обеспечиваться правильным распределением экспериментов. Такая концепция позволяет добиться не только минимальных затрат на модернизацию ЮМО, но и существенно снизить затраты на создание новой установки МУРН-С за счет унификации ряда узлов, программного обеспечения, окружения образца обеих установок.

Малоугловое рассеяние нейтронов как эффективный метод для изучения фундаментальных проблем и для решения важнейших технологических задач широко применяется при исследованиях надатомной структуры вещества [1]. Он активно используется в физике конденсированного состояния, физико-химии дисперсных систем и агрегатов поверхностно-активных веществ, биофизике и молекулярной биологии, при исследовании полимерных веществ, в металлургии и других областях науки и техники. Важнейшей особенностью малоуглового рассеяния является возможность анализа структуры разупорядоченных систем. Этот метод, например, часто является единственным способом получения прямой структурной информации о системах с хаотическим и частично упорядоченным расположением неоднородностей плотности размеров порядка 10 – 10000 Å; он дает возможность исследовать дисперсную структуру сплавов, порошков, стекол (механизмы разделения фаз, размер и степень полидисперсности частиц), особенности строения полимеров в различных агрегатных состояниях, весовые и геометрические характеристики биологических макромолекул и их комплексов, биологические надмолекулярные структуры, такие как биологические мембраны и вирусы. Существенное различие длин рассеяния нейтронов на водороде и дейтерии, а также возможность специфического дейтерирования макромолекул и надмолекулярных структур, делает малоугловое рассеяние нейтронов незаменимым инструментом исследования биологических, коллоидных объектов, а также полимеров и жидких кристаллов.

Малоугловой спектрометр – очень популярный и эффективный инструмент для исследования конденсированного состояния вещества, и, как правило, на нейтронных источниках мира установлены по 2 и более спектрометров (LLB –PAXE, PAXY, ILL- D11, D22, D16, D17; GKSS –SANS-1, SANS-2; KFA – KWS 1, KWS 2; BENSC- V4; V12; KEK – SAN, WINK; JAERI – SANS-J, SANS-U; IPNS –SAD, SAND). Это связано с большими запросами на использование метода малоуглового рассеяния. Такая же ситуация на установке ЮМО на реакторе ИБР-2. В последние годы запрос на время превышает возможности ЮМО в несколько раз.

Для иллюстрации необходимости: так, например, на период с января по май 2005 года подано 32 предложения на проведение экспериментов (свыше 100 дней по времени), при наличии только 50 дней. В список институтов, участвующих и заинтересованных в дальнейшем сотрудничестве, входят: Московский Государственный Университет; Институт им. Белозерского; Институт биоорганической химии, Москва; Институт синтетических и полимерных материалов им. Еникополова, Москва; Институт белка, Пуццино; Faculty of Pharmacy Comenius University, Bratislava, Словакия; University of Bayreuth, Germany; Leipzig University, Germany University of Utrecht, Netherlands; Institute of Macromolecular Chemistry, Czech Republic; LLB, Saclay, France; IBI-2, Forshungszentrum Julich, Germany; National Institute of Materials Physics, Romania.

МУРН-С будет ориентирована преимущественно на решение тех задач, которые не могут быть реализованы на ЮМО, а именно: эксперименты с образцами с низким сечением рассеяния (слабый контраст), большими характерными размерами неоднородностей и их высокой анизотропией.

2. Работа новой установки на холодном источнике нейтронов.

Практически все малоугловые спектрометры в мире работают с холодным источником нейтронов. Это связано, прежде всего, с необходимостью работы в максимально широком диапазоне векторов Q и минимально возможными Q . Требования к холодному замедлителю по размерам определяются размерами нейтронновода, а именно: 200x200 мм. Будет необходима высокая стабильность работы замедлителя в течение суток.

3. Предложения по созданию нового малоуглового спектрометра.

Реализация проекта по созданию современной установки малоуглового рассеяния нейтронов позволит использовать в полной мере возможности предоставляемые реактором ИБР-2. Это становится особенно актуально в связи с вводом в эксплуатацию холодного замедлителя. Риск при создании установки исключен, поскольку существует мировой и российский опыт в создании подобных установок [2, 3]. Проектируемая установка включает следующие узлы (рис.1): 1, 2 - реактор и замедлитель; 3 - прерыватель; 4 - зеркальный изогнутый нейтронновод; 5 – коллимирующая система, 6 - место образца, позволяющее обеспечить соответствующее современное окружение образца (гониометр, магнит, термостат и т.п.); 7 - вакуумная труба; 8 – двумерный ПЧД с размерами 64x64 см² или 100x100 см², который позволит исследовать анизотропно рассеивающие образцы, увеличит диапазон доступных векторов рассеяния и скорость накопления экспериментальных данных; 9 – домик экспериментатора с электроникой и вычислительной техникой. Кроме того, предполагается использование двухдетекторной системы с тем, чтобы выйти в мировые лидеры по динамическому диапазону переданных импульсов. Предлагаемая установка будет обладать параметрами, представленными в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры установки МУРН-С.

Параметры	Значение
-----------	----------

Поток на образце (тепловые нейтроны)	$10^7 - 4 \times 10^7$ n/s/cm ²
Диапазон длин волн	0.5 Å до 20Å
Q-диапазон	$1 \times 10^{-3} - 0.5$ Å ⁻¹
Диапазон масштабов исследуемых объектов	10 - 6000 Å
Измеряемое сечение рассеяния (нижний предел в абсолютных единицах)	0.001 см ⁻¹
Система калибровки (нормировка)	V, H ₂ O, графит
Детекторная система	ПЧД с разрешением 1 см.
Температурный диапазон	от 4 К до +1000°С
Разрешение по переданному импульсу	1-20%

Кроме того, установка будет обладать низкими фоновыми условиями, позволяющим исследовать слабо рассеивающие объекты (минимальное сечение рассеяния 10^{-3} см⁻¹) и современным окружением образца.

4. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки создания установки МУРН-С

Таблица 2. Стоимость (в USD) и желательные сроки изготовления (приобретения) некоторых узлов МУРН в рамках проекта создания новой установки.

Нейтронород	120,000	2009	Полный комплект, покупка
Прерыватель	55,000	2010	Покупка или изготовление в ЛНФ
Детекторы	560,000	2010	Покупка, изготовление
Электроника	55,000	2010	Покупка
Окружение образца	95,000	2010	Покупка, изготовление
Итого:	885,000		

Работы по проекту будут осуществляться силами сотрудников группы ЮМО и отделом НЭОКС.

Литература

1. В.И.Горделий, А.И.Куклин, Малоугловое рассеяние нейтронов на реакторе ИБР-2, Сообщения ОИЯИ, P13-2002-250.
2. Куклин А.И., Бобарыкина Г.Н., Богдзель А.А., Горделий В.И., Исламов А.Х., Коновалов В.Ю., Рогов А.Д. и Флорек М. Измерение и расчет методом Монте-Карло спектра пучка нейтронов. Параметры пучка малоугловой установки ЮМО на 4-м канале реактора ИБР-2. Препринт ОИЯИ E13-2002-249, Дубна, 2003.
3. А.И. Куклин, А.П. Сиротин, А.С. Кирилов, А.Х. Исламов, Т.Б. Петухова, Н.В. Астахова, П.К. Утробин, Ю.С. Ковалев и В.И.Горделий, Автоматизация и окружение образца модернизированной установки ЮМО. Препринт ОИЯИ P13-2004-77. Дубна, 2004.

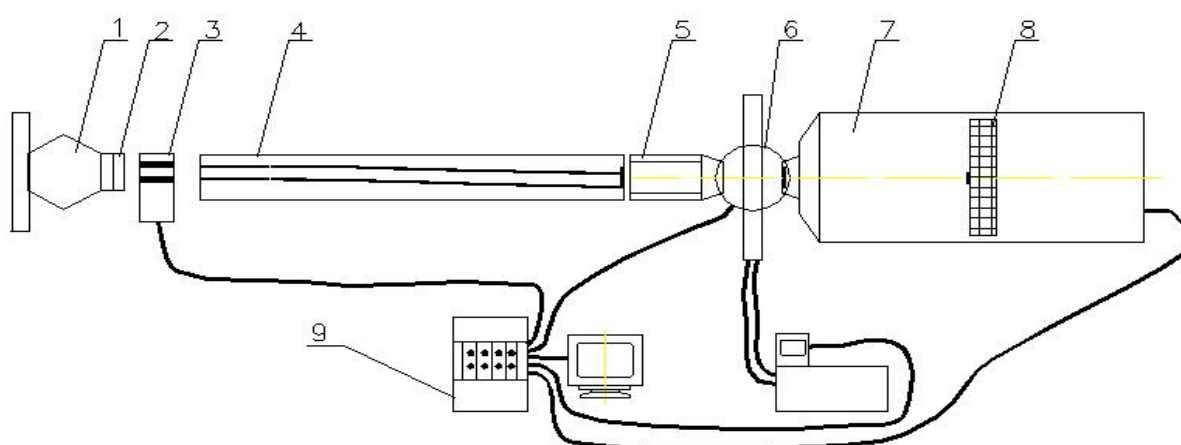


Рис. 1. Общий вид малоуглового спектрометра МУРН-С.

РЕФАТ – рефлектометр поляризованных нейтронов с атомным разрешением

Руководитель проекта: Ю.В. Никитенко

Рефлектометр поляризованных нейтронов с атомным разрешением позволит проводить исследования ядерной и магнитной структуры приповерхностного слоя вещества и границ раздела в слоистой наноструктуре с разрешением вплоть до 1 Å. Исследования со столь высоким разрешением важны как для решения задачи создания новых слоистых наноструктур с совершенными границами раздела, так и при изучении явлений, возникающих на границе раздела магнитных, сверхпроводящих и других сред при короткодействующем характере взаимодействий между ними.

1. Постановка задачи и научная программа.

В настоящее время в микроэлектронике повсеместно используются слоистые магнитные структуры в качестве элементов памяти, головок считывания и записи информации, датчиков в измерителях температуры, магнитного поля, давления и т.д. Хорошо установлено, что магнитные, электрические, сверхпроводящие и особенно частотные свойства слоистой структуры определяются структурой и пространственным масштабом границ раздела. В последнее время достигнуты определённые успехи в создании слоистых наноструктур с совершенными границами раздела. Так, методами молекулярной эпитаксии и магнетронного распыления, удаётся изготовить Fe/V слоистые структуры с периодом повторения 50 Å и числом пар слоёв 20, в которых среднеквадратичное значение пространственного отклонения границы раздела составляет 3 Å, что соответствует двум монослоям. Однако, этого зачастую оказывается недостаточно, так как многие явления в слоистых структурах (сосуществование магнетизма и сверхпроводимости, гигантское магнитное сопротивление, магнитное упорядочение и т.д.) характеризуются линейным масштабом взаимодействия 1÷10 Å. В связи с этим, стоит задача определения магнитно-ядерного профиля в глубь наноструктуры с разрешением вплоть до $\delta_z \approx 1$ Å. Для исследований магнитно-ядерной структуры со столь высоким (атомным) разрешением естественным является применение поляризованных нейтронов с максимальным значением волнового вектора $k_{\max} \approx 1/(2\delta_z) = 0.5 \text{ \AA}^{-1}$. Спектрометр также позволяет проводить исследования магнитно-ядерных структур в плоскости интерфейсов, путём измерения диффузного рассеяния от неупорядоченных кластеров (доменов) и дифракционного отражения от решётки. Спектрометр (рефлектометр) поляризованных нейтронов предполагается использовать для исследований явлений сосуществования магнетизма и сверхпроводимости в периодических структурах и бислоях “ферромагнетик (парамагнетик) – сверхпроводник”, образования магнитных и ядерных кластеров в окрестности границ раздела “ферромагнетик – неферромагнетик”, магнитного упорядочения в структуре “ферромагнетик – неферромагнетик (антиферромагнетик) – ферромагнетик”, изменений магнитного упорядочения вблизи границы раздела “ферромагнетик – неферромагнетик” в зависимости от толщины слоёв и температуры и т.д.

2. Техническое описание основных узлов

Нейтронная поляризационная техника эффективна начиная с длины волны нейтронов ~ 1.5 Å. Двухдисковый прерыватель нейтронов на пучке №8 ИБР-2 хорошо подавляет фон быстрых нейтронов, начиная с длины волны 2 Å. Это определяет желаемую среднюю длину волны нейтронов в спектре $\lambda_{av} = 3$ Å и необходимость использования холодного замедлителя

нейтронов. При $\lambda_{av} = 3 \text{ \AA}$ и $(\delta k/k)_{max} = 0.03$ для максимального угла скольжения нейтронов на исследуемой структуре и его среднеквадратичного отклонения получаем соответственно $\theta_z \approx 0.22$ рад и $\delta\theta_{z,max} = 6.6$ мрад. Чтобы получить столь большие значения $\delta\theta_{z,max}$, необходимо применять нейтронород. Рефлектометр РЕФАТ предлагается разместить на пучке “б” канала №8. На рисунке показана схема восьмого канала с пучками “а” и “б”. На пучке “а” расположен рефлектометр, на котором реализуются углы скольжения $3 \div 20$ мрад и исследуются структуры с максимальным пространственным разрешением ~ 2 нм. Этот рефлектометр является, по-существу, действующим спектрометром “РЕМУР”, который для повышения светосилы дополнен двухстеночным нейтронородом длиной 20 м (стенки нейтронорода расположены горизонтально) и двумерным ПЧД с размером $20 \text{ см} \times 20 \text{ см}$.

Для пучка “б” необходим четырёхстеночный нейтронород длиной 24 м с расстоянием между вертикальными стенками $a = 4.5 \text{ см}$ ($\lambda_{ch} = 2.0 \text{ \AA}$). Нейтронород на отстоящем от его выхода на два метра образце создаёт пучок нейтронов с $\delta\theta_z = 6.6$ мрад. Ось нейтронорода ориентирована под углом 40 мрад к оси канала, что вместе с искривленностью нейтронорода обеспечивает расстояние между пучками “а” и “б” в районе установки образцов 1.5 м. На выходе нейтронорода расположен поляризатор нейтронов РЗ в виде стопки суперзеркал с сечением $5 \text{ см} \times 5 \text{ см}$. Коллимация нейтронного пучка осуществляется диафрагмами D3 и D4. Между диафрагмами размещён градиентный радиочастотный флиппер нейтронов FL3, работающий при $\lambda > 1.5 \text{ \AA}$. Исследуемый образец помещён в позиции S2, за образцом размещён флиппер FL4 (токовая фольга), работающий при $\lambda < 20 \text{ \AA}$. За флиппером расположены широкоапертурные анализатор поляризации AP2 и позиционно-чувствительный детектор нейтронов PSD2. Благодаря большим размерам детектора 50см и возможности его перемещения в пределах $1.5 \div 5 \text{ м}$ от образца, будут возможны исследования магнитно-ядерных решёток в плоскости интерфейса с параметром решётки в пределах $10 \div 1000 \text{ \AA}$ или неупорядоченной структуры с корреляционными длинами L_x и L_y в пределах $10 \div 1000 \text{ \AA}$.

3. Требования к холодному замедлителю.

Размер замедлителя $20 \text{ см} \times 20 \text{ см}$. Максимум спектра нейтронов должен быть смещён к длине волны 3 \AA .

4. Запрашиваемые ресурсы, стоимость, сроки реализации

Создание спектрометра возможно силами подразделений ЛНФ и ОИЯИ при участии ПИЯФ (Гатчина) и сотрудников группы РЕМУР НЭОФКС ЛНФ. Стоимости отдельных узлов указаны в Таблице.

Таблица. Стоимость (в KUSD) узлов спектрометра.

Доработка прерывателя	2	ЛНФ, 2008
Вакуумный нейтроновод	8	ЛНФ, 2008
Нейтроновод	100	ПИЯФ, 2007
Поляризатор нейтронов	15	ПИЯФ, 2009
Диафрагма (2шт)	10	ЛНФ, 2010
3-х осевой гониометр	30	Покупка, 2011
Электромагнит с питанием	20	Покупка, 2011
Анализатор поляризации 25 см×25 см	100	ПИЯФ, 2011
Двумерный ПЧД 50см×50см с разрешением 2мм	100	Покупка, 2012
Спин-флипперы (градиентный и типа токовая фольга)	2+20=22	ЛНФ, 2010
Электроника и программное обеспечение	25	ЛНФ, 2010
Технический проект	10	ЛНФ, 2007
Защита, коллиматоры	30	ЛНФ, 2009
Конструкторские работы	8	ЛНФ, 2008

Итого: 480 KUSD

Сроки создания спектрометра:

2006÷2007: Технический проект

2008÷2010: Изготовление, закупка и размещение на канале №8б

2011÷2012: Испытания на пучке нейтронов и ввод в эксплуатацию

Литература

1. V.L. Aksenov, K.N. Jernenkov, Yu.N. Khaidukov, Yu.V. Nikitenko, A.V. Petrenko, V.V. Proglyado, G. Andersson, R. Wäppling, Interplay between superconductivity and ferromagnetism in Fe/V multilayered structure studied by polarized neutron reflectometry, Physica B, 2004.
2. V.L. Aksenov, K.N. Jernenkov, S.V. Kozhevnikov, H. Lauter, V. Lauter-Pasyuk, Yu.V. Nikitenko, A.V. Petrenko, The polarized neutron spectrometer REMUR at the pulsed reactor IBR-2, D13-2004-47, Dubna, 2004.

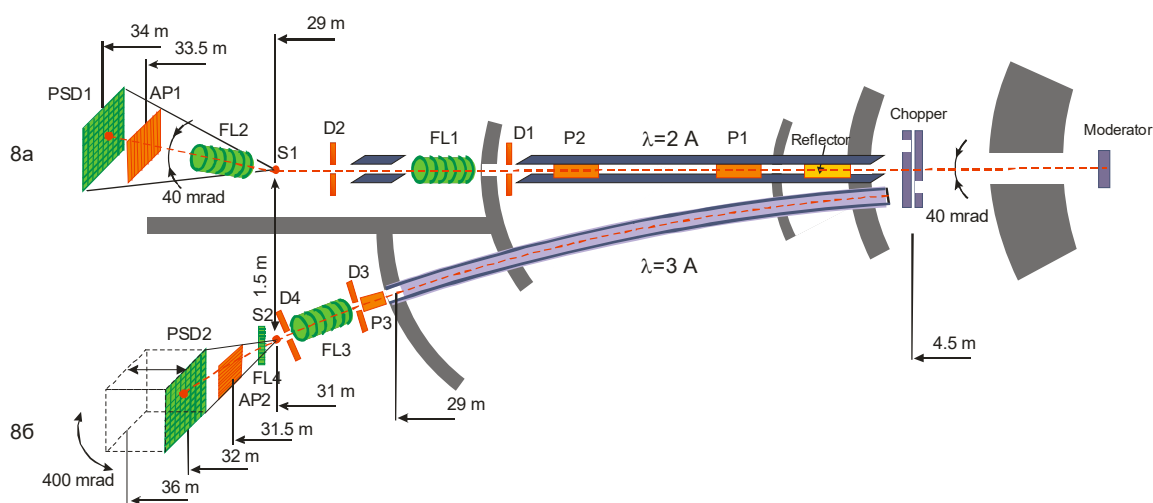


Рис. 1. Схема спектрометра РЕФАТ.

Рефлектометр с поляризованными нейтронами с вертикальной плоскостью рассеяния

Руководитель проекта: В.В. Лаутер-Пасюк

Введенный в эксплуатацию в середине 90-х годов нейтронный рефлектометр с поляризованными нейтронами РЕФЛЕКС ориентирован на исследования физики поверхностных явлений. На РЕФЛЕКСе реализована геометрия с горизонтальной плоскостью отражения (отражающая поверхность образца располагается вертикально). Геометрия установки выбиралась исходя из простоты реализации, и эксперименты на рефлектометре ориентировались на изучение, главным образом, металлических пленок. Такой выбор был вполне обоснован для периода проектирования установки, поскольку наибольший научный интерес представляли именно металлические пленки. Например, одной из задач, выполненной на рефлектометре РЕФЛЕКС, было изучение глубины проникновения магнитного поля в сверхпроводящие пленки. Однако в последнее время бурное развитие науки о живом ставят целый комплекс вопросов, которые можно в принципе решать методом рефлектометрии тепловых нейтронов. Как правило, биологические образцы представляют собой жидкие растворы и для изучения их поверхностных свойств необходима организация вертикальной плоскости рассеяния. Учитывая это обстоятельство, а также то, что на реакторе ИБР-2 успешно проведена модернизация другого рефлектометра с поляризованными нейтронами - РЕМУР с горизонтальной плоскостью рассеяния, имеет смысл полностью перестроить рефлектометр РЕФЛЕКС, реализовав на этом же канале реактора рефлектометр с вертикальной плоскостью рассеяния для изучения поверхностей жидких образцов.

1. Постановка задачи и научная программа.

Недостаток финансирования в период создания спектрометра РЕФЛЕКС во второй половине 90-х годов привел к тому, что время создания от момента проектирования до сдачи в эксплуатацию оказался растянутым. В связи с этим, по многим параметрам спектрометр проигрывает аналогичным приборам и, в том числе, обновленному рефлектометру РЕМУР. В частности, чрезмерно длинная пролетная база приводит к неоправданным потерям интенсивности на образце, использование в качестве поляризующих зеркал FeCo пленки дает низкую степень поляризации пучка по сравнению с суперзеркалами, достаточно большой путь пучок нейтронов идет по воздуху, что также приводит к потерям интенсивности. Система коллиматоров спектрометра, выполненная из полиэтилена, требует замены, поскольку ухудшает фоновые условия. Кроме этого, необходима полная замена системы автоматизации эксперимента, электроники накопления данных, программного обеспечения, а также оснащение спектрометра позиционно-чувствительным детектором. Весь комплекс работ по модернизации спектрометра требует значительных финансовых вложений. В этих условиях при наличии на реакторе ИБР-2 фактически нового действующего рефлектометра с поляризованными нейтронами РЕМУР, имеющему горизонтальную плоскость рассеяния имеет смысл говорить о создании на месте рефлектометра РЕФЛЕКС, другого рефлектометра, которого бы отличало принципиально новое качество и позволившее бы существенно расширить круг научных задач, которые можно решать методами рефлектометрии. Таким новым качеством является изменение плоскости рассеяния с существующей горизонтальной на вертикальную.

Ниже перечислены некоторые актуальные научные направления, которые можно решать методами рефлектометрии с вертикальной плоскостью рассеяния:

- исследование структуры тонких пленок (монослоев) образованных из липидных молекул Stratum Corneum (верхнего слоя кожи) на поверхности воды, определение их латеральной и ламелярной структуры как функции поверхностного давления.
- исследование влияния дисахаридов на структуру фосфолипидных и липидно/белковых монослоев в процессе дегидратации с последующей гидратацией, изучение физико-химических закономерностей биопротекторных свойств дисахаридов.
- исследование структуры липид/белковых монослоев как функции поверхностного давления.
- исследование структуры блочных сополимеров на жидкой поверхности.
- исследования феррожидкостей.

2. Техническое описание основных узлов.

Для реализации задачи по созданию рефлектометра с поляризованными нейтронами и с вертикальной плоскостью рассеяния необходимы следующие компоненты.

А) Оптическая система. Оптическая система нового рефлектометра должна включать в себя: нейтронотвод на основе суперзеркал NiMo/Ti в кольцевом коридоре сразу после замедлителя, **бендер-поляризатор (суперзеркало FeCoV/TiZr); отклоняющие зеркала (суперзеркала NiMo/Ti)**, для организации вертикальной плоскости рассеяния с возможностью установки как поляризующего так и неполяризующего зеркала; широкоугольный анализатор поляризации.

В) Детекторная система должна включать в себя двухкоординатный ПЧД-детектор и монодетектор.

С) Узел образца. Требуется разработка и создание юстировочного стола на антивибрационной платформе, держатели образцов, предусматривающие установку жидких образцов. Стол должен позволять размещать вокруг образца дополнительное оборудование: электромагниты, криостат, источники питания, печки и др.

Д) Электроника и программное обеспечение. Требуется разработка электроники накопления и соответствующего программного обеспечения.

Е) Вспомогательное оборудование. Необходима разработка, изготовление и приобретение нового вспомогательного оборудования, включающего электромагниты, спин-флипперы, нагреватели, спиновые ротаторы, юстировочные устройства, источники тока и др.

3. Требования к холодному замедлителю.

Особенность метода рефлектометрии состоит в отражении пучка нейтронов от гладкой поверхности под малыми углами скольжения ($\sim 10^{-2} \div 10^{-3}$ радиан), поэтому доступный для изучения диапазон переданных импульсов ограничивается сверху значением $Q \sim 10^{-1} \text{ \AA}^{-1}$. Однако при изучении биологических объектов наиболее информативная область в спектре рассеянных нейтронов лежит в области малых переданных импульсов ($Q \sim 10^{-4} \div 10^{-3} \text{ \AA}^{-1}$), поэтому в спектре падающих нейтронов желательно иметь как можно больше холодных нейтронов. Кроме этого увеличение доли холодных нейтронов в спектре существенно повышает эффективность установки. При заданных параметрах разрешения и величины переданного импульса переход на более холодные нейтроны позволяет увеличивать углы отражения от образца и использовать большие диафрагмы на детекторе. Поэтому проектируемый спектрометр должен располагаться на пучке с холодным источником нейтронов. В рефлектометрии используются узкие пучки сечением в несколько миллиметров в плоскости рассеяния, а другой размер зависит от размеров источника. Учитывая размеры шиберного отверстия на канале №9 ($100 \times 200 \text{ мм}^2$), на котором расположен в настоящее время рефлектометр РЕФЛЕКС, расстояние от поверхности замедлителя до шиберного отверстия

(~2 м.) и принимая горизонтальный размер пучка ~ 100мм, можно сказать, что размеры холодного замедлителя должны быть в пределах 100÷400мм в горизонтальном сечении.

4. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки проведения модернизации.

Стоимости (в KUSD), узлов модернизированного рефлектометра РЕФЛЕКС отражены в таблице.

Система формирования пучка (прерыватель, коллиматоры, вакуумная система)	70	2010	Изготовление в ЛНФ
Оптика (поляризатор, отклоняющие зеркала, анализатор)	100	2010	Изготовление в ПИЯФ
2D-ПЧД	100	2010	Покупка и изготовление
Окружение образца	250	2011	Покупка и изготовление
Электроника и программное обеспечение	150		Изготовление в ЛНФ
Вспомогательное оборудование	200	2010	Покупка и изготовление

Итого: 870 тыс. дол. США

Работы по проекту будут осуществляться сотрудниками сектора нейтронной оптики отдела НИКС ЛНФ им. И.М. Франка при участии специалистов ПИЯФ (г. Гатчина), ИЛЛ (г. Гренобль, Франция)

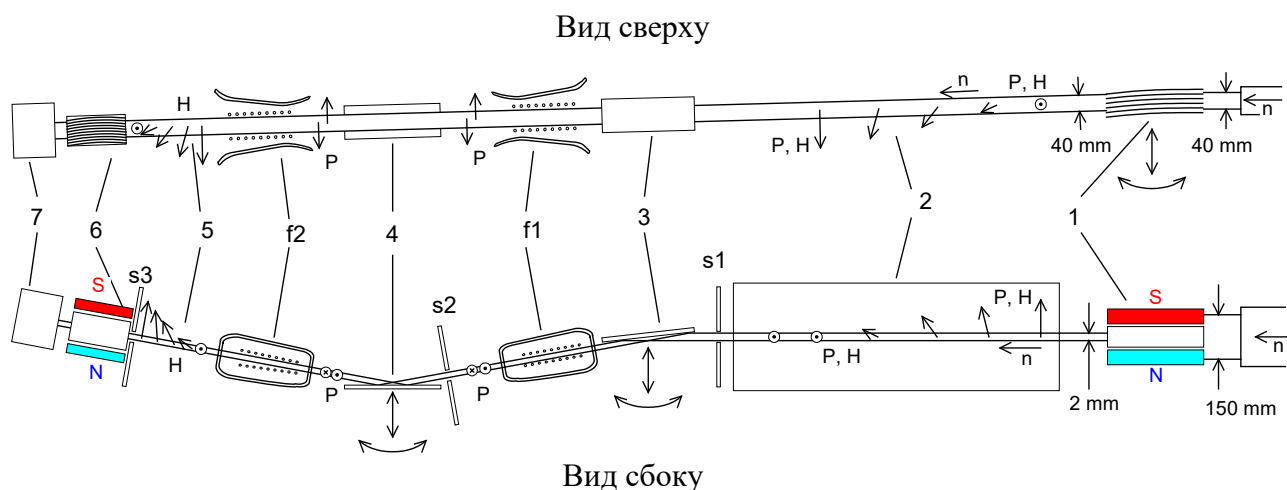


Рис. 1. Схема рефлектометра с поляризованными нейтронами РЕФЛЕКС с вертикальной плоскостью рассеяния.

1 – Бендер-поляризатор нейтронного пучка на основе суперзеркал FeCoV/TiZr; 2 – Область адиабатического поворота ведущего магнитного поля H и поляризации нейтронного пучка P ; 3 – Отклоняющее зеркало на основе суперзеркала NiMo/Ti; 4 – Узел образца; 5 – Область адиабатического поворота ведущего магнитного поля H и поляризации нейтронного пучка P ; 6 – Многоканальный анализатор поляризации на основе суперзеркал FeCoV/TiZr; 7 – Нейтронный позиционно чувствительный детектор; s1, s2, s3 – Формирующие пучок щели; f1, f2 – Радио-частотные флипперы

Литература

1. Д.А. Корнеев, В.И. Боднарчук, С.П. Ярадайкин, Спектрометр поляризованных нейтронов РЕФЛЕКС-П, препринт ОИЯИ РЗ-2002-189, 2002.
2. Ю.В. Никитенко, А.В. Петренко, В.В. Лаутер, Х. Лаутер, Рефлектометр поляризованных нейтронов в горизонтальной геометрии на холодном источнике (“Горизонт”). “Предложения по программе развития комплекса спектрометров на реакторе ИБР-2 до 2010 года”, изд. ОИЯИ, Д-2000-66, 2000 г.

SESANS – спин-эхо спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов

Руководитель проекта: Ю.В. Никитенко

При реализации проекта SESANS станут возможными ранее недоступные для слоистых структур и сплошных материалов исследования ядерной структуры в диапазоне изменения корреляционной длины $L_c = 1 \text{ нм} \div 100 \text{ мкм}$ и низкочастотной динамики в диапазоне изменения корреляционного времени $\tau_c = 0.1 \text{ псек} \div 10 \text{ мсек}$. Создание спектрометра SESANS позволит проводить изучение крупномасштабных объектов и медленных процессов, характерных для биологии, полимерной науки, коллоидной химии и других наук.

1. Постановка задачи и научная программа.

В настоящее время растет интерес к нано-структурному анализу, т.е. изучению структуры синтетических и биологических полимеров, коллоидов, пористых материалов, а также проведению фундаментальных исследований в нано-диапазоне размеров. В последние два десятилетия использование малоуглового рассеяния (SANS) холодных нейтронов с длиной волны $4 \div 10 \text{ \AA}$ показало, что этот метод исследования является одним из наиболее информативных. Это связано с высокой проникающей способностью нейтронов, возможностью манипулирования локальной плотностью амплитуды рассеяния через изотопическое замещение или составом растворителя, а также с минимальными радиационными повреждениями исследуемого объекта. С помощью SANS получена новая информация в структурной биологии (определение размещения протеинов в рибосомах и внутренней структуры вирусов) и полимерной науке (определение конформации полимерных цепей в аморфном и кристаллическом состояниях, подтверждение предсказаний для фазовых диаграмм полимерных растворов и мембран). Сейчас практически в любом нейтронном центре существуют SANS инструменты, покрывающие интервал вектора рассеяния $Q = 10^{-3} \div 1 \text{ \AA}^{-1}$, что даёт для верхнего предела корреляционной длины значение $L_c \sim 10^3 \text{ \AA}$.

На микроуровне ($L_c > 10^2 \text{ нм}$, $\tau_c > 10^{-9} \text{ сек}$) исследования структуры и динамики также чрезвычайно важны, в частности, для материаловедения (керамика, фиброгласс), фундаментальной физики (фазовые переходы, сверхпроводимость), физики полимеров (фазовая сепарация и критические явления), коллоидной химии (коллоидные кристаллы) и т.д. Линейный размер и частота колебаний макромолекул в мягких материалах (полимеры, биоматериалы, гели и т.д.) составляют $r = 1 \text{ нм} \div 100 \text{ мкм}$ и $f = 1 \text{ кГц} \div 1 \text{ ТГц}$ ($\tau_c = 10^{-3} \div 10^{-12} \text{ сек}$), соответственно. Необходимость изучения структурной организации материи и низкочастотной динамики на мезо- и микро-уровнях ставят задачу создания техники рассеяния нейтронов, покрывающей ультра-малый диапазон вектора рассеяния $Q = 10^{-6} \div 10^{-3} \text{ \AA}^{-1}$ (USANS техника). Обычная USANS техника представляет собой двухкристальный дифрактометр (DCD). USANS спектрометрия была разработана в 1970-1980 годах и используется сейчас в США, Австрии, Германии, Японии и России. В настоящее время USANS спектрометр на основе DCD получил дальнейшее развитие путём адаптации Bonse-Hart техники, использующей трёхкратное брэгговское отражение. Однако USANS спектрометр на основе DCD имеет существенный недостаток, связанный с тем, что высокое разрешение достигается благодаря высокому уровню монохроматизации и коллимации падающего на образец нейтронного пучка и коллимации отражённого пучка. Другими словами, проводится точная селекция начального и конечного значений волнового вектора нейтрона. В результате, светосила такого спектрометра оказывается невелика, что приводит

к большим затратам времени на проведение измерений. Свободным от этого недостатка является малоугловой спектрометр, основанный на спин-эхо технике (SESANS). В SESANS селектируется только переданный момент. В связи с этим, разрешение по входному и выходному волновым векторам нейтронов может быть достаточно плохим (10%). В результате, в спектрометре одновременно реализуются и высокая светосила и высокое разрешение. В настоящее время спин-эхо спектрометры создаются и работают в ILL (Гренобль, Франция), CEA-CNRS (Сакле, Франция), FJ GmbH (Юлих, Германия), ANL (Аргонна, США), HMI (Берлин, Германия), IRI (Делфт, Нидерланды) и других нейтронных центрах.

2. Техническое описание основных узлов.

Спектрометр SESANS будет установлен на канале №10 реактора ИБР-2. На канале сейчас имеются два прерывателя пучка нейтронов: дисковый и барабанный, находящиеся на расстоянии 5 м и 8.8 м от замедлителя, соответственно. При работе с дисковым прерывателем, снижающем фон в 20 раз, безфоновая полоса длин волн составляет $2 \div 15 \text{ \AA}$, а при работе с барабанным - $2 \div 9 \text{ \AA}$. При этом, барабанный прерыватель дополнительно снижает фон в 100 раз, что важно при исследовании слабо рассеивающих образцов. В свободных промежутках на пути пучка после шибера (шибер расположен на расстоянии 2.6 м от замедлителя) устанавливаются нейтроноводы (прямые и изогнутые). Поляризационно-чувствительная часть SESANS- спин-эхо инструмент (СЭИ) размещается на расстоянии $25 \div 35$ м от замедлителя.

На рисунке показана схема СЭИ. СЭИ функционально состоит из поляризатора нейтронов, ротатора поляризации на угол $\pi/2$, первого спин-прецессора, места установки образца, ротатора поляризации на угол π , второго спин-прецессора, второго ротатора поляризации на угол $\pi/2$ (или $-\pi/2$), анализатора поляризации и детектора нейтронов. Ротаторы поляризации, спин-прецессоры и корректирующие катушки образуют фазочувствительную систему (ФЧС). В данной ФЧС предусмотрены ротаторы поляризации в виде токового листа, образованного проводом с током и три типа спин-прецессоров. Спин-прецессоры разного типа позволят реализовать разные возможности при работе отдельно и совместно. Спин-прецессоры №1 и №2 основаны на явлении прецессии в нулевом магнитном поле. Спин-прецессор в нулевом магнитном поле состоит из двух электромагнитов (EL1 и EL2 образуют первый спин-прецессор, EL3 и EL4 – второй) между полюсами которых находятся широкополосные спин-флипперы. Полюсы электромагнитов выполнены в виде параллелограмма с углом θ_0 и могут поворачиваться с шагом $\Delta\theta_0 = 3 \times 10^{-5}$ рад. При повороте полюсов на угол $\pi/2 - \theta_0$ пространство между двумя полюсами будет прямоугольной формы. При этом, реализуется прецессор №1. При любом другом угловом положении полюсов, пространство между ними будет в форме параллелограмма. Таким образом, реализуется прецессор №2. Конструктивно все элементы ФЧС до образца размещены на одной платформе, а элементы после образца – на второй. Вторая платформа может поворачиваться вокруг позиции образца на угол θ . Это позволяет проводить измерения динамики возбуждений в образце при известных переданной энергии E и переданном волновом векторе Q (закон рассеяния нейтронов на образце $S(E, Q)$):

$$K_f^2 - K_i^2 = \alpha E, Q = (K_f^2 + K_i^2 - 2 K_i K_f \cos(\theta))^{1/2}, (L_1/K_i + L_2/K_f) = \beta T_{\text{TOF}} \quad (1)$$

где K_i , K_f - начальный и конечный волновые векторы, L_1 и L_2 – пролётные базы от замедлителя до образца и от образца до детектора, соответственно, T_{TOF} – время пролёта. Прецессоры №3 в виде магнитных слоистых структур подмагничиваются электромагнитами E1 и E2 и предназначен для измерения переданного момента в направлении перпендикулярно падающему пучку. Общая длина СЭИ составляет 8м.

3. Требования к холодному замедлителю.

Светящая площадь замедлителя должна быть максимально возможной, т.е. 20 см×20 см. Температура замедлителя должна быть минимально возможной, чтобы получать спектр нейтронов с как можно большей средней длиной волны нейтронов.

4. Запрашиваемые ресурсы, стоимость, сроки реализации.

В таблице указаны блоки спектрометра и их стоимость (в KUSD).

Фазочувствительная система:		
Электромагнит EL (4шт)	80	Изготов. ЛНФ, 2009
Электромагнит E (2шт)	20	Изготов. ЛНФ, 2009
Ротатор поляризации (3шт)	10	Изготов. ЛНФ, 2009
Источники питания электромагнитов (2шт)	15	Покупка, 2008
Генератор 1-3 МГц	25	Покупка, 2008
Поляризатор	15	Изготов. ПИЯФ, 2010
Анализатор поляризации	70	Изготов. ПИЯФ, 2010
Позиционно-чувствительный детектор	70	Покупка, 2011
Нейтронород	80	Изготов. ПИЯФ, 2010
Платформа (2шт)	15	Изготов. ЛНФ, 2009
Электроника и программное обеспечение	20	Изготов. ЛНФ, 2009
Защита	20	Покупка, 2010

Итого: 440

Сроки создания спектрометра:

2005÷2006гг.: Разработка технического проекта

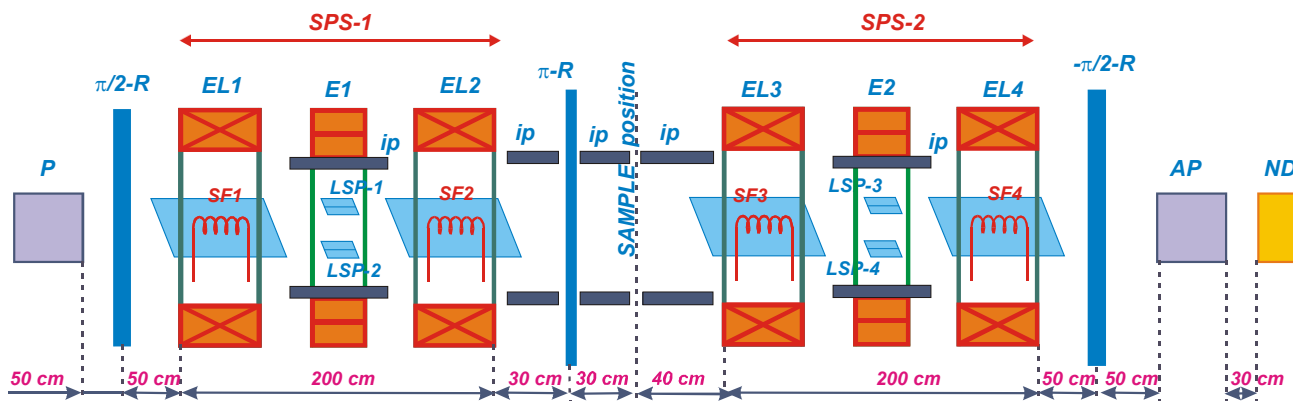
2006÷2008гг.: Разработка и изготовление фазочувствительной системы

2007÷2010гг.: Приобретение нейтронорода, поляризатора, анализатора поляризации и детектора нейтронов

2010: Установка узлов на пучке нейтронов

2011: Настройка и пробные измерения на пучке

Neutron spin-echo instrument



ip-iron plates, LSP1÷LSP4 - layered spin precessors

Рис. 1. Поляризационно-чувствительная система спин-эхо спектрометра малоуглового рассеяния нейтронов.

Литература

1. V.L. Aksenov, Yu.V. Nikitenko, Layered structures as elements of the neutron spin-echo reflectometer, NIM in Physics Research B 187 (2002) 560-565.
2. V.L. Aksenov, V.I. Bodnarchuk, S.V. Kozhevnikov, Yu.V. Nikitenko, Three-layered Fe/Si/Cu structure as a neutron spin-precessor for low-frequency spectrometry of thin layers and surfaces, JMMM 272-276 (2004) 845-847.
3. V.L. Aksenov, E.B. Dokukin, S.V. Kozhevnikov, Yu.V. Nikitenko, Spin-precessor intended for microstructure investigations at ultrasmall-angle neutron spectrometer, Physica B 345 (2004) 254-257

Комплекс замедлителей реактора ИБР-2М

Научные руководители проекта: Е.П. Шабалин, В.Д. Ананьев

Для обеспечения эффективной работы некоторых типов нейтронных спектрометров, предназначенных для экспериментов в области физики конденсированных сред, необходимы нейтроны с большими длинами волн ($\sim 4 - 10 \text{ \AA}$). Такие нейтроны генерируются в «холодных» (криогенных) замедлителях нейтронов. На модернизируемом реакторе ИБР-2М планируется установка трех холодных замедлителей нейтронов, способных обеспечить рекордные потоки нейтронов с длиной волны более 4 \AA . Это позволит резко улучшить условия для проведения экспериментов по изучению длиннопериодных структур, полимеров и биологических молекул в растворах, многослойных пленок, диффузионных движений в жидкостях и т.д.

1. Комплекс замедлителей реактора ИБР-2М.

К настоящему времени в ЛНФ накоплен богатый опыт по созданию и обслуживанию криогенных замедлителей на основе метана [1–5]. Они, однако, не удовлетворяли полностью потребности экспериментов с холодными нейтронами. Основной причиной являлась необходимость периодического (несколько раз в сутки) увеличения температуры замедлителя для удаления избыточного водорода, способного повредить камеру замедлителя [5, 6]. Благодаря проведенным в ЛНФ исследованиям [7–15] стало возможным создание нового типа криогенного замедлителя на основе ароматических углеводородов, способного работать непрерывно в течение нескольких дней.

Новый комплекс замедлителей нейтронов реактора ИБР-2М будет состоять из теплых и криогенных замедлителей нейтронов (рис. 1). Для наиболее эффективного размещения замедлителей, выбора материалов и их толщины была выполнена расчетная работа по оптимизации всего комплекса замедлителей.

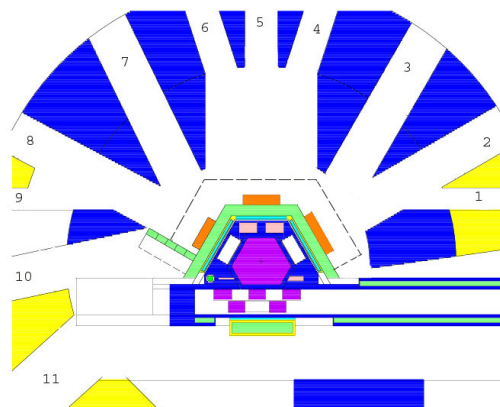


Рис. 1. Горизонтальное сечение реактора ИБР-2М с комплексом замедлителей. Указаны номера выведенных нейтронных пучков.

Расчеты, в которых сравнивались утечки холодных нейтронов из замедлителей реактора ИБР-2М с учетом накладываемых на их использование условий, показали, что холодные замедлители на основе ароматических углеводородов более эффективны, чем на основе метана. Результаты расчетов для одного из замедлителей приведены на рис. 2.

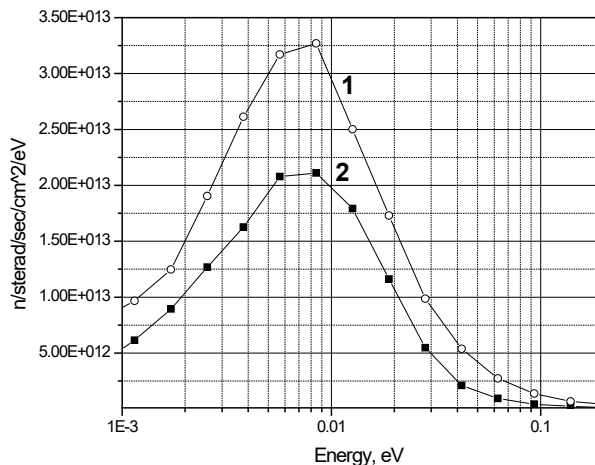


Рис. 2. Сравнение спектров нейтронов для криогенного замедлителя на основе метана и мезитилена при оптимальных для использования на ИБР-2М замедлителей параметрах: 1- мезитилен при 20 К и толщине предзамедлителя 5 см, 2 - метан при 60 К и толщине предзамедлителя 9 см.

При использовании холодных замедлителей количество нейтронов с энергией < 0.005 эВ (длина волны > 4 Å) увеличивается в ~ 10 раз по сравнению с гребенчатым водяным замедлителем, находящемся при комнатной температуре.

2. Принципиальная схема холодного замедлителя и гелиевого охлаждения.

Для заполнения камеры замедлителя наиболее приемлемым решением представляется использование твердых шариков из смеси мезитилена с псевдокумолем или *m*-ксилолом. Такая смесь в замороженном состоянии имеет аморфную структуру, что важно как для увеличения выхода холодных нейтронов, так и для получения правильных однородных шариков. В камеру замедлителя шарики доставляются потоком холодного гелия с $T = 20 - 22$ К. Этим же гелием шарики охлаждаются в процессе нормальной работы. По истечению времени, когда выгорание мезитилена начинает сказываться на выходе холодных нейтронов, отработавшие шарики заменяются свежими.

Принципиальная схема гелиевого охлаждения холодного замедлителя дана на рис. 4. Охлаждение замедлителя – двухконтурное. По первичному контуру, в котором находится камера, циркуляция гелия осуществляется специальной газодувкой (например, BNHeP-25 фирмы Barber-Nicols). Для каждого из замедлителей – свой контур с газодувкой и трактом подачи шариков. Во вторичном контуре источником холода является холодильная гелиевая установка ХГУ-500 или КГУ-700 производительностью соответственно 500 и 700 Вт при температуре 15 К. На реакторе ИБР-2М предусматривается установить три холодных замедлителя с тремя первичными и двумя вторичными контурами. В настоящее время разрабатываются устройство массового приготовления шариков и технология их доставки в камеры замедлителей.

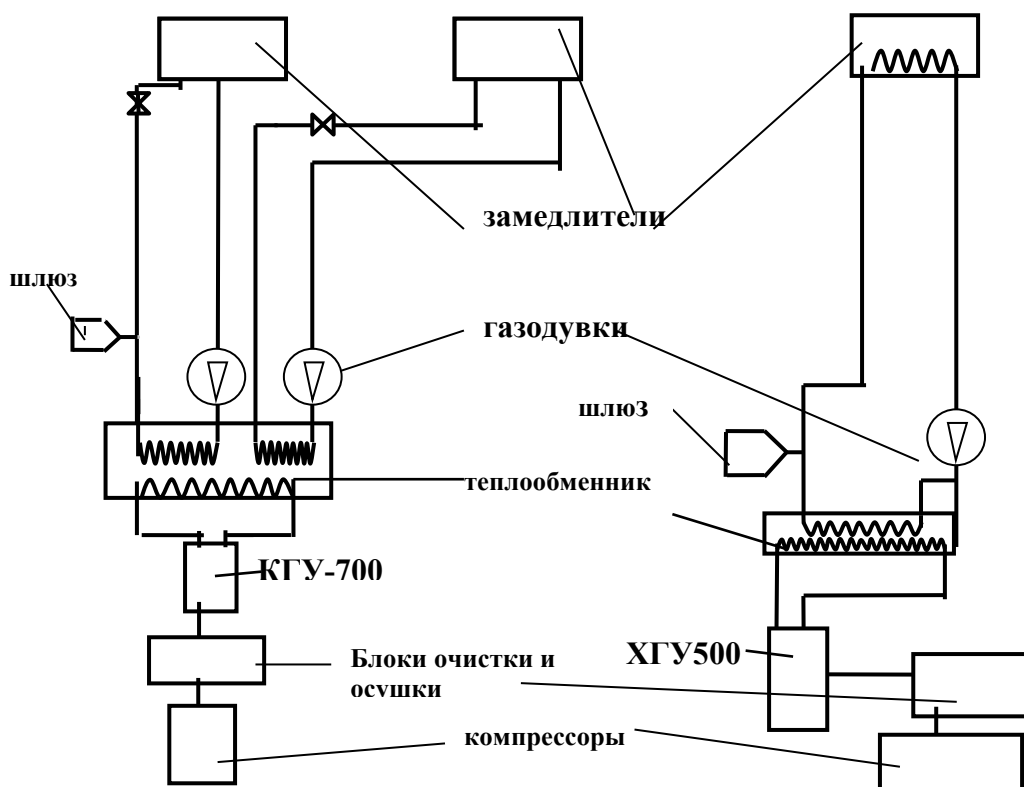


Рис. 3. Схема гелиевого охлаждения холодного замедлителя

3. Запрашиваемые ресурсы, стоимость (в USD) и сроки завершения создания комплекса замедлителей.

Проект комплекса замедлителей и технологических линий	400	2007	Полный комплект (НИКИЭТ, ГСПИ)
Исследования криогенных замедлителей и технологических линий	100	2007	в ЛНФ совместно с ГСПИ и НИКИЭТ
Приобретение газодувок и вспомогательного технологического оборудования	200	2007	Покупка
Изготовление криогенных замедлителей	500	2009	Заказ
Гелиевый трубопровод: проект, изготовление и монтаж	150	2009	Заказ, монтаж в ЛНФ

ИТОГО 1350 тыс. долл. США

Литература

1. A.A.Beliakov, V.G.Ermilov, V.L.Lomidze, and et.al, The First Experience of a Cold Moderator and of Solid Methane Irradiation at the IBR-2 Pulsed Reactor, Abingdon, Oxon, England, 25-5-0093, P. 144-155.
2. A.A.Beliakov, I.T.Tretiakov, E.P.Shabalin, V.V.Golikov, and V.I.Luschikov, Solid Methane Cold Moderator for the IBR-2 Reactor, Proc. ANL, Argonne, Illinois, 1998, P. 73-78.
3. A.A.Beljakov, I.T.Tretiakov, and E.P.Shabalin, First experience with the new solid methane moderator at the IBR-2 reactor, Tsukuba, Japan, 6-11-2000
4. A.A.Belyakov, Solid methane cold moderator at the IBR-2 reactor// Journal of Neutron Research - 1996.- 3.- P. 209-221.
5. E.P.Shabalin, A.A.Belyakov, V.G.Ermilov, and V.V.Melikhov, Solid methane cold moderator at the IBR-2 reactor: test operation at 2 MW, Proc. JINR, Dubna, Dubna, 14-6-1995
6. J.Carpenter, Cold moderator for pulsed neutron sources, Proc. LANSCE, Los-Alamos, US, 1990, P. 131-153.
7. E.Kulagin, S.Kulikov, V.Melikhov, and E.Shabalin, Some Radiation Effects In Cold Moderator Materials, Experimental Study. In: Proceedings of 16th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Dusseldorf-Neuss, Germany, 12-5-2003, P. 911-919.
8. E.Kulagin, S.Kulikov, V.Melikhov, and E.P.Shabalin, Radiation Effects In Cold Moderator Materials: Experimental Study of Accumulation and Release of Chemical Energy// Nuclear Instr.and Methods in Physics Research, B. - 2004.- 215/1-2.- P. 181-186.
9. E.P.Shabalin, V.V.Golikov, S.A.Kulikov, and et.al URAM-2 cryogenic irradiation facility/ E.P.Shabalin, V.V.Golikov, S.A.Kulikov, and et.al: JINR Communications, 2002.
10. E.Shabalin, E.Kulagin, S.Kulikov, and V.Melikhov, Experimental study of spontaneous release of accumulated energy in irradiated ices// Radiation Physics and Chemistry - 2003.- 67.- P. 315-319.
11. I.Natkanec, K.Holderna- Natkanec, J.Kalus, and I.Majerz, Vibrational spectra of selected methyl derivatives of benzene and their solutions as potential materials for cold moderators, Proc. FZJ, Dusseldorf-Neuss, Germany, 12-5-2003, P. 903-910.
12. S.Kulikov, V.Melikhov, E.Kulagin, and E.Shabalin, The URAM-2 irradiation facility at the IBR-2 Reactor for Radiolysis Study, 2005
13. V.Golikov, E.Kulagin, and E.Shabalin Dose rates near water moderator of the IBR-2 reactor: experiment and analysis/ V.Golikov, E.Kulagin, and E.Shabalin: JINR-Communications, 2002.
14. Е.П.Шабалин, Е.Н.Кулагин, С.А.Куликов, and В.В.Мелихов, Радиационные эксперименты с водородсодержащими материалами на криогенной облучательной установке УРАМ-2 реактора ИБР-2// Атомная Энергия - 2004.- 97.- P. 183-189.
15. Е.П. Шабалин. Холодные замедлители нейтронов. Журнал ЭЧАЯ, No 6, 2005.

Совершенствование оборудования спектрометров на реакторе ИБР-2М

Руководитель проекта: В.Г. Симкин.

Проект «Окружение образца», осуществленный в ЛНФ в 1995-1998 годах при финансовой поддержке России, ФРГ и Польши, позволил в основном оснастить спектрометры реактора ИБР-2 стандартным, современным для того времени оборудованием. Быстрое развитие экспериментальной техники за последние годы открывает новые возможности для проведения исследований в экстремальных по некоторым параметрам условиях: высокие давления, низкие температуры, сильные магнитные поля. Реализация этих новых возможностей и поддержка условий успешной эксплуатации существующего парка оборудования – основная цель настоящего проекта. Его осуществление предполагается провести по следующим основным направлениям: низкие и высокие температуры, высокие давления, сильные магнитные поля, гониометрическое оборудование, вакуумное оборудование.

1. Низкие и высокие температуры.

В настоящее время (2005 г.) измерения на спектрометрах ИБР-2 при низких температурах осуществляются с помощью гелиевых криостатов (Orange-100 - 1шт., Orange -50 - 2шт.) и рефрижераторов замкнутого цикла (СТ1 - 2шт., RGD - 5шт.). С помощью криостатов достигаются температуры 1.5 К откачкой паров над жидким гелием специальными насосами. Работа с криостатами требует наличия жидкого азота и жидкого гелия. Более простыми, надежными в эксплуатации, удобными в эксперименте являются рефрижераторы замкнутого цикла, не требующие дополнительных хладагентов. Предельные низкие температуры работающих в лаборатории рефрижераторов составляют 7 – 10 К. Современные рефрижераторы, основанные на работе с пульсирующими трубками, имеют нижний предел $T \approx 3$ К и значительно меньшие вибрации, чем СТ1 или RGD. Более простые по конструкции и дешевые одноступенчатые рефрижераторы замкнутого цикла позволяют без хладагента (жидкий азот) охлаждать бериллиевые фильтры для спектрометров неупругого рассеяния.

Для получения высоких температур до 1000°C необходимо приобрести газонаполненные (инертный газ) и вакуумные печи, для эксплуатации которых необходимо дополнительное оборудование.

2. Высокие давления.

Измерения при высоких давлениях (до ~70 кбар) на микрообразцах осуществляются в специально разработанных (ОИЯИ-КИАЕ) камерах с сапфировыми наковальнями, которые разрушаются после нескольких циклов давление - охлаждение - нагрев. Существенно большего диапазона давлений (до ~300 кбар) можно достичь в камерах с алмазными наковальнями. Для проведения экспериментов требуется иметь набор камер и возобновлять запас наковален.

3. Магнитные поля.

В настоящее время эксперименты в сильных магнитных полях на реакторе ИБР-2 ведутся на спектрометрах поляризованных нейтронов, для чего используются сверхпроводящие магниты, расположенные в гелиевых криостатах типа Orange. Предельное магнитное поле составляет 3 – 4 Т. Для расширения области исследований в этом направлении требуется приобретение современного криомагнита на 6 – 7 Т.

4. Гониометрическое оборудование .

Дифракционные исследования монокристаллов на ИБР-2 в основном проводятся с помощью гониометрических головок GKS-100, позволяющих работать с имеющимися в наличии рефрижераторами замкнутого цикла. Современные гониометры совместимые с современным рефрижератором позволят более эффективно и в более широком диапазоне температур проводить эти исследования. Помимо полнокружных гониометров необходимо иметь в наличии поворотные и поступательные прецизионные гониометрические столики.

Таблица 1. Перечень необходимого оборудования и его стоимость (в KUSD).

ОБОРУДОВАНИЕ	МОДЕЛЬ	ФИРМА	ЦЕНА	КОЛ-ВО	ПОЛНАЯ ЦЕНА
Рефрижератор замкнутого цикла, 3 К	SHI-3	Janis, USA	55	1	55
Одноступенчатый рефрижератор замкнутого цикла на 77°К	AL200	Cryomech, USA	24	2	48
Регулятор температуры	900S	Evrotherm, UK	1.5	3	4.5
Силиконовый диод	ДТ470	Lake Shore, USA	0.5	5	2.5
Калибратор температуры	CZ125	Omega, UK	0.5	1	0.5
Нагревательный элемент	62M36A5X	Watlow, USA	0.05	10	0.5
Турбомолекулярный насос		Leybold	8	2	16
Форвакуумный насос	2НВР-9ОД	Россия	1.7	1	1.7
Форвакуумный насос	2НВР-9ДМ	Россия	0.7	1	0.7
Вакуумметр с лампами низкого и высокого вакуума	L8350301	Varian, USA	4	5	20
Вакуумная арматура (вакуумные линии, вентили, разъемы, смазка)		Leubold, Germany	10		10
Гониометр Huber с рефрижератором до 4°К	DISPLEX202N	Huber, Germany	62	1	62
Столики линейного перемещения		Micromech	3	4	12
Столики вращения		Micromech	3	1	3
Сапфировые и алмазные наковальни		Россия	10	1	10
Криомагнит 7 Т	7ТНЛ	Janis, USA	85	1	85
Азотный танк		Россия	45	1	45
Гелиевый дуар		Россия	4	3	12
Высокочистые газы	He, ³ He, CO, Ar	Россия			2
Многоцелевой поляризатор		Гатчина, Россия	15	1	15
Система управления дисковыми прерывателями	Vector	CTDL, Germany	10	5	50

Итого: 455,4

Газовые позиционно-чувствительные детекторы нейтронов

Руководитель проекта: А.В. Белушкин

Многие проекты развития нейтронных спектрометров на реакторе ИБР-2 включают оснащение спектрометра современным одно- или двухкоординатным позиционно-чувствительным детектором (ПЧД). В мире существует ограниченное число фирм при нейтронных центрах, занимающихся разработкой, изготовлением и продажей позиционно-чувствительных детекторов: ORDELA (США), DENEX (GKSS, Германия), D2L (ILL, Франция). Тем не менее, сформировавшегося рынка нейтронных детекторов на сегодня не существует, за исключением пропорциональных типовых газовых счетчиков, не обладающих позиционной чувствительностью, и однокоординатных ПЧД с резистивной нитью. В каждом конкретном случае изготовление ПЧД представляет собой предмет специального договора между заказчиком и исполнителем. Ориентировочные цены на такие детекторы по данным фирмы ORDELA находятся в диапазоне от 9000\$ (нейтронные мониторы) до 200000\$ (двухкоординатный многопроволочный MWPC детектор площадью 650× 650 мм²). Как правило, в эту цену не включаются затраты на электронику и программное обеспечение. Поскольку в ЛНФ есть возможность выполнить разработку и освоить производство ПЧД нейтронов, обладающих требуемыми характеристиками, то очевидна необходимость развернуть работы по их созданию на собственной базе и собственными силами, что позволит сэкономить значительные средства.

1. Статус разработок детекторных систем в ЛНФ.

В настоящее время в Лаборатории создана соответствующая инфраструктура для разработки и производства детекторов – чистое помещение, газовые и испытательные стенды, разработаны и изготовлены макеты однокоординатного (1D) позиционно-чувствительного детектора [1] и двухкоординатного (2D) монитора [2] на основе MWPC со съемом информации с линий задержки. Разработана также электроника сбора и накопления данных, интегрированная в персональный компьютер, и программное обеспечение. Таким образом, речь идет о детекторных системах, включающих в себя собственно детектор, детекторную электронику, электронику регистрации и накопления данных, компьютер и программное обеспечение [3]. По существу, это законченный автономный элемент нейтронного спектрометра, который легко встраивается в любую систему управления экспериментом.

На **Рис. 1** и **Рис. 2** показаны однокоординатный (1D) ПЧД на основе MWPC со съемом информации с линий задержки, изготовленный для спектрометра РЕФЛЕКС, и принципиальная схема подключения электроники. Характеристики детектора приведены в **Табл.1**.

На **Рис. 3** показан двухкоординатный (2D) позиционно-чувствительный монитор нейтронов, разработанный для исследовательского реактора FRM-II (Германия), а в **Табл.2** приведены его характеристики.

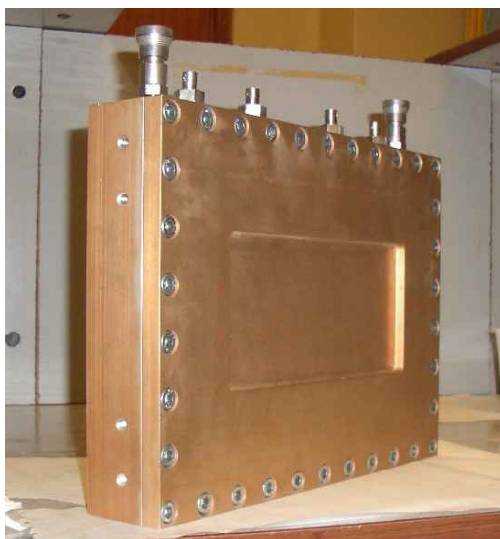


Рис. 1 Однокоординатный ПЧД спектрометра РЕФЛЕКС.

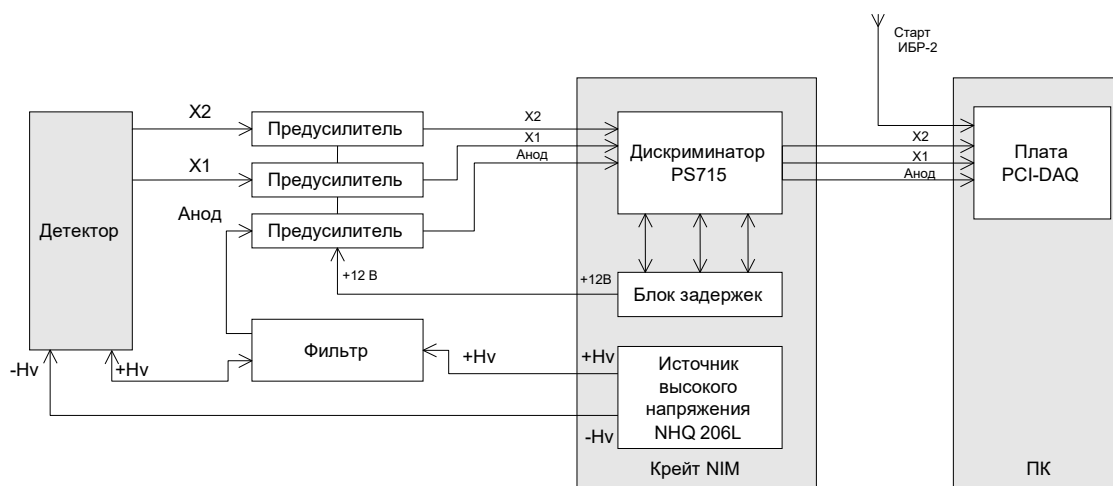


Рис. 2. Принципиальная схема подключения электроники.

Таблица 1. Параметры 1D ПЧД спектрометра РЕФЛЕКС на основе MWPC со съемом информации с линий задержки.

№	Параметр	Описание
	Тип детектора	одномерный позиционно-чувствительный детектор
	Рабочая область	200x80 мм ²
	Эффективность	40-45% (для нейтронов с длиной волны 1 Å)
	Координатное разрешение	Не хуже 2 мм (определяется шириной на полувысоте (FWHM) распределения интенсивности на детекторе при облучении пучком с истинными размерами не более 0,3 мм (FWHM))
	Загрузка	до 100 kHz (максимальная скорость счета, ниже которой просчеты из-за нарушения адресации, мертвого времени и насыщения электроники не превышает 10% от истинной скорости счета)
	Стабильность	< 0.5%/24ч
	Однородность каналов	< 10%
	Материал корпуса	алюминий Д16Т
	Входное окно	алюминий 7 мм
	Газовая смесь	4,0 атм. ³ He + 2 атм. CF ₄
	Съем информации	линия задержки

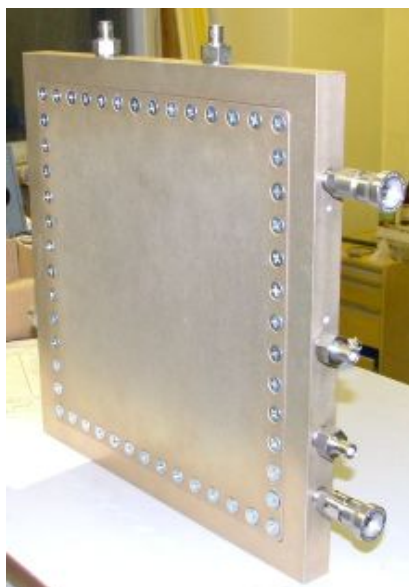


Рис. 3 Корпус 2D монитора.

Таблица 2. Параметры 2D позиционно-чувствительного монитора нейтронов для исследовательского реактора FRM-II.

№	Параметр	Описание
	Тип детектора	двухмерный позиционно-чувствительный детектор на основе MWPC
	Рабочая область	100x100 mm ²
	Эффективность	10 ⁻³ -10 ⁻⁶ % (для нейтронов с длиной волны 1 Å, в зависимости от газовой смеси)
	Координатное разрешение	4x4 mm ²
	Загрузка (планируемая)	до 100 kHz
	Материал корпуса	алюминий Д16Т
	Входное окно	алюминий 1 мм
	Рабочий газ	N ₂ + CF ₄ , суммарное давление 1 атм.
	Съем информации	линии задержки

2. Предложения по разработке и изготовлению детекторных систем и оснащению ими спектрометров ИБР-2М.

В проекте ставятся задачи разработки, совершенствования технологии изготовления и освоения производства 1D и 2D ПЧД нейтронов, отвечающих современным требованиям к разрешению и быстродействию:

- координатное разрешение на уровне 2 мм;
- скорости счета на уровне 10⁵-10⁷ /(см²·с);
- эффективность 40-80%.

2.1 Разработка 2D ПЧД нейтронов со съемом информации с линий задержки.

Предлагается разработать 2D ПЧД для измерения пространственного распределения нейтронного потока в первичном (выход нейтроновода) и рассеянных пучках нейтронов. В качестве исходных параметров для разработки выбраны:

Падающий пучок

Рассеянный пучок

плотность потока нейтронов (н/(см ² ·с))	10 ⁷	10 ⁵
чувствительная площадь (мм ²) 225×225	130×70	
координатное разрешение (мм)	2,0 мм	2,0 мм.

Указанные параметры будут достигнуты за счет совершенствования технологии намотки сигнальных проволочек анодной и катодной плоскостей детектора, подбора компонентов газовой смеси и разработки новой быстродействующей электроники.

2.2 Разработка 2D ПЧД с индивидуальным съемом информации.

Предварительное макетирование показало реальную возможность создания 2D ПЧД большого размера (500×500 мм²) с индивидуальным съемом информации с каждой нити. Для решения этой задачи потребуется проектирование и изготовление нового намоточного станка, проектирование корпуса детектора, разработка электроники съема и накопления данных, многоканальной детекторной электроники съема и преобразования сигналов, а также электроники регистрации, определения координат события (в бинарном и полутоновом вариантах) и накопления данных.

2.3 Разработка новой электроники и программного обеспечения для регистрации и накопления данных.

Для 1D и 2D ПЧД со съемом информации с линий задержки планируется разработка быстродействующей унифицированной DAQ электроники на основе программируемых логических матриц (FPGA) с оптическими интерфейсами для ввода данных в персональный компьютер. Планируемая скорость регистрации – до 1 млн. соб./с, объем гистограммной памяти на плате – 1 Гбайт, все операции фильтрации и предварительной обработки событий выполняются на аппаратном уровне в FPGA. С точки зрения hardware электроника для 1D и 2D детекторов является одинаковой, все функциональные отличия и параметры программируются в FPGA. Платы DAQ будут размещаться в крейте NIM вместе с детекторной электроникой, связь с PC осуществляется по оптоволоконному кабелю. Так же как и в существующей плате DAQ, будут предусмотрены два режима работы – гистограммный и “списочный” (накопление сырых данных). Программное обеспечение платы DAQ будет интегрировано в существующий комплекс Sonix +.

Для ПЧД с индивидуальным съемом информации будет разработана или приобретена многоканальная детекторная электроника для съема и преобразования сигналов, а также электроника регистрации, определения координат событий (в бинарном и полутоновом вариантах) и накопления данных. Интерфейс к PC будет аналогичен интерфейсу платы DAQ для детекторов с линиями задержки.

2.4 Оснащение детекторами спектрометров ИБР-2М.

В рамках данного проекта планируются только разработки детекторов, изготовление макетов и опытных образцов, а также развитие “детекторной инфраструктуры” (технологическое оборудование, стенды и т.п.). Оснащение детекторами конкретных установок будет осуществляться и финансироваться в соответствии с проектами создания и развития спектрометров. Ориентировочная стоимость детекторных систем составляет около 60 тыс. долларов (1D) и 70 тыс. долларов (2D). В настоящее время силами НЭОКС можно изготавливать два детектора в год (одномерные детекторы, аналогичные детектору для спектрометра «Рефлекс», можно изготавливать до трех детекторов в год).

3. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки реализации.

Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки разработки и изготовления детекторных систем приведены в Табл.3.

Табл.3

№	Перечень работ	Стоимость (тыс. \$)	Сроки	Исполнитель
6.	<i>Развитие “детекторной” инфраструктуры (чистое помещение, технологическое оборудование, газы, стенды)</i>	40 (10тыс.\$/год)	2007-2010	Изготовление в ЛНФ, покупка
7.	<i>Разработка, изготовление и тестирование 2D ПЧД системы (225x225 мм², 2,0 мм) для рассеянного пучка</i>	70	2006-2007	Изготовление в ЛНФ, ОП ОИЯИ
8.	<i>Разработка, изготовление и тестирование 2D ПЧД системы (130x70 мм, 2,0 мм) для падающего пучка</i>	70	2006-2007	Изготовление в ЛНФ, ОП ОИЯИ
9.	<i>Разработка новой DAQ-электроники и программного обеспечения для MWPC детекторов с линиями задержки</i>	25	2006-2007	Изготовление в ЛНФ, покупка станд. электроники
10.	<i>Разработка, изготовление и тестирование 2D ПЧД с индивидуальным съемом информации и DAQ электроники</i>	80	2008-2009	Изготовление в ЛНФ и ОП ОИЯИ, покупка станд. электроники

Итого: 285 тыс. \$

Литература

1. Shvetzov V. et al. “Developments of Gas-filled Detectors at FLNP” Proc. of Germany-JINR User Meeting “Condensed Matter in Physics with Neutrons at IBR-2 Pulsed Reactor”, FLNP JINR, Dubna, Russia, June 12-16, 2004, JINR E14-2004-148, Dubna, 2004, p.p. 110-112.
2. A.V.Belushkin et al. “Two-dimensional Monitor Position-sensitive Detector of Thermal Neutrons” E 10,11-2006-45 NEC 2005, Bulgaria, Varna, September 2005.
3. F.Levchanovski et al. “A PCI DAQ Board for MWPC Detectors with Delay Line Position Readout” Nucl. Instr. and Meth. A529 (2004), p.p. 413-416.

Позиционно-чувствительные сцинтилляционные детекторы на основе ZnS(Ag) сцинтиллятора

Руководитель проекта: Е.С. Кузьмин

Сцинтилляционные детекторы тепловых нейтронов хорошо зарекомендовали себя при использовании их в качестве широкоапертурных счетчиков с геометрической фокусировкой. Однако наиболее информативные, позиционно-чувствительные детекторы, до настоящего времени оставались почти исключительно газовыми из-за высокой стоимости фотоумножителей (~300 долл./канал). В настоящее время, в связи с появлением нового поколения фотоприемников – матриц фотоумножителей, с рекордно низкой ценой канала (~25 долл./канал), появилась возможность разработки нового класса конкурентоспособных приборов, обладающих всеми необходимыми качествами для широкого круга задач, где необходимы высокая эффективность регистрации, низкая гамма – чувствительность, регистрация координат и времени захвата нейтрона.

1. Статус разработок сцинтилляционных детекторов в ЛНФ.

За время, прошедшее с начала разработок сцинтилляционных детекторов в ЛНФ (1998-2005 годы), на основе проведенных методических исследований были выполнены следующие оригинальные разработки и построены отдельные детекторы и системы регистрации:

- построены прототипы счетчиков с геометрической фокусировкой дифрактометра ФСД;
- разработана новая версия геометрической фокусировки детекторной системы ФСД;
- разработан метод «грубой» временной фокусировки для дифрактометрии умеренного разрешения;
- построен экспериментальный модуль дифрактометра ДН-6;
- построены 24 рабочих модуля дифрактометра ФСД;
- разработан модульный многоканальный детектор для суперпозиционных измерений;
- построен 100 – канальный модульный детектор для ИФМ УрО РАН.

Благодаря накопленному опыту работы удалось добиться высоких характеристик регистрации: гамма – чувствительность детекторов понижена до 10^{-7} , что является хорошим показателем для газовых детекторов, электронная эффективность регистрации возросла до 99%, и счетчики значительной протяженности (до 40 см) демонстрируют наличие счетного плато регистрации и долговременную устойчивость.

2. Предложение о разработке нового класса детекторов – модульных позиционно-чувствительных детекторов тепловых нейтронов.

Используемые в настоящее время газовые позиционно-чувствительные детекторы представляют собой, как правило, уникальные приборы, требующие постоянного высококвалифицированного обслуживания и регулярной замены рабочего газа. Таким образом, кроме высоких расходов на индивидуальную разработку, использование газовых детекторов предполагает значительные эксплуатационные расходы. Предлагаемая система призвана свести задачу разработки позиционно-чувствительных детекторов к разработке единого модуля, который представляет собой независимый прибор с индивидуальной связью с компьютером. В этом случае компоновка позиционно - чувствительного детектора произвольной формы и размера сводится к пространственному размещению модулей и модификации программы накопления результатов.

Современный рынок фотоприемников предлагает специализированные приборы (Flat Panel type), предназначенные для решения подобных задач. Особо привлекательную модель по критерию цена/качество предлагает фирма Hamamatsu Photonics. Матрица фотоумножителей H9500 имеет следующие геометрические параметры:

- размер пикселя (2.8×2.8) мм;
- шаг расположения пикселей 3.04 мм;
- число пикселей 256 (матрица 16×16);
- эффективная площадь фотокатода 49×49 мм;
- внешние размеры 52×52 мм;
- плотность упаковки (эффект. пл./ внешн. разм.) 89%.

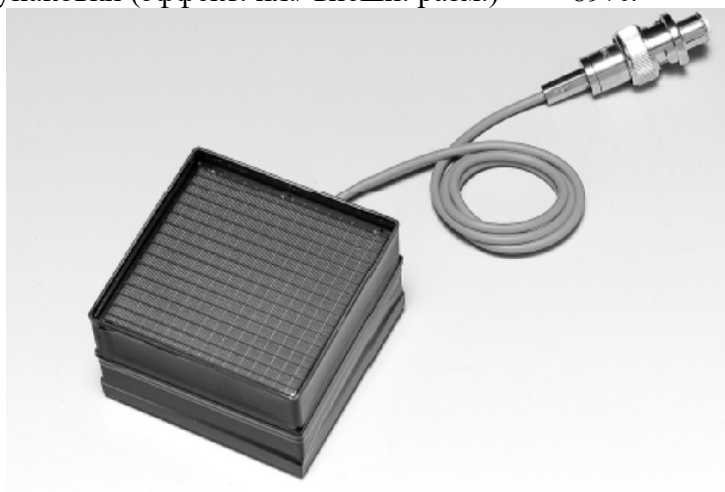


Рис. 1. Матрица фотоумножителей H9500

Таким образом, при компоновке модулей в единый детектор общая ширина образованных «мертвых зон регистрации» будет равна ширине единичного пикселя. Предлагаемое устройство будет состоять из матрицы фотоумножителей, непосредственно на входном окне которой располагается экран ND. В задней части модуля размещается источник высокого напряжения, электроника обработки сигнала и связи с компьютером. Устройство помещается в тонкую светонепроницаемую оболочку.

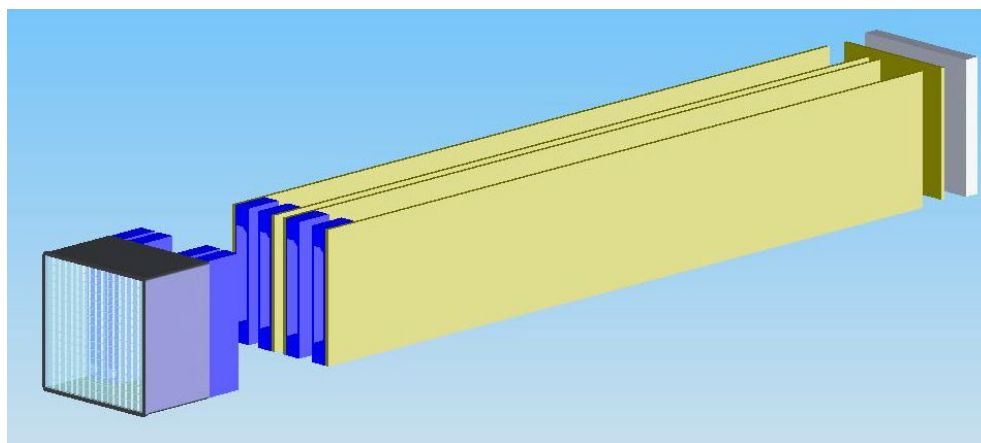


Рис.2. Внутреннее устройство модуля сцинтилляционного позиционно – чувствительного детектора. Модуль размещается внутри тонкостенной металлической оболочки, имеющей форму параллелепипеда. Входной торец модуля образован матрицей H9500, на выходном торце расположены разъемы передачи данных, сигнала синхронизации и питания. Основной объем модуля занимают электронные платы селекции и кодировки сигналов.

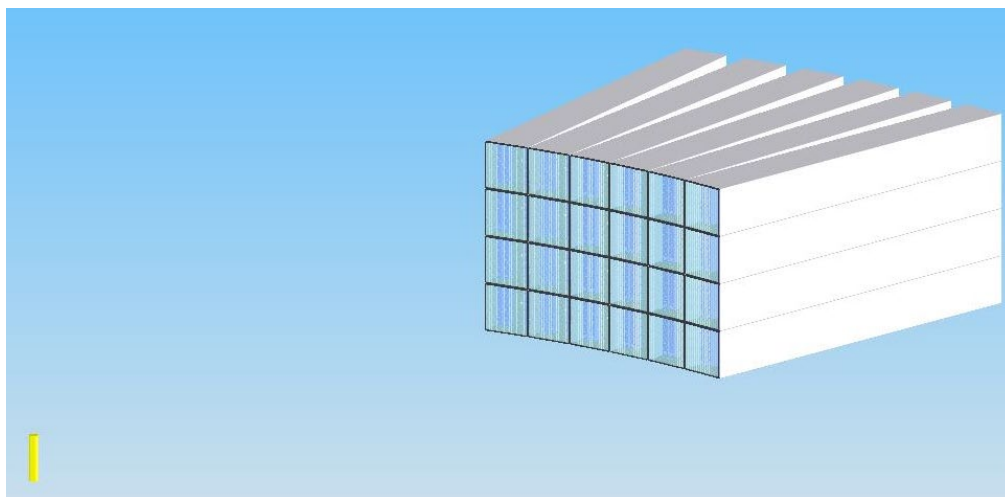


Рис.3. Позиционно – чувствительный детектор в сборе.

На первом этапе разработки предлагается создать прибор с относительно низким разрешением – на уровне размера пикселя фотоприемника. В этом варианте регистрации подлежат лишь события, амплитуда которых превысила установленный порог и прошедшие систему селекции нейтронных сигналов. В зависимости от оптической схемы сочленения экрана и фотоприемника один акт захвата нейтрона в экране может индуцировать сигнал на различном количестве пикселей, что повлияет на координатное разрешение прибора.

Предполагаемые характеристики модуля:

- тип детектора 2D + время;
- размеры чувствительной области модуля 50×50 мм;
- координатное разрешение 2,5 мм;
- вывод информации на компьютер USB/CAN;
- максимальное число модулей в детекторе 96;
- эффективность регистрации (каналы ИБР-2) 40%;
- гамма – чувствительность 10^{-7} ;
- максимальная скорость счета/модуль 10^5 .

3) Перспективы развития прибора.

В случае успешной реализации проекта может быть осуществлено дальнейшее развитие разработки, что потребует значительного усложнения электроники, однако позволило бы добиться разрешения на уровне десятых долей миллиметра. Для реализации перспективного варианта прибора необходимо регистрировать величину заряда, выделенную на каждом активированном пикселе и использовать программные средства для точного восстановления координаты захвата нейтрона. В этом случае оптическая схема прибора должна быть оптимизирована по критерию геометрического разрешения, и объем передаваемой информации возрастает на два порядка.

4) Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки завершения разработки.

Разработка может быть осуществлена в течение двух лет в 2006 – 2007 годах. Ориентировочная стоимость разработки – 55 тыс. долл. Оцениваемая стоимость модулей при серийном изготовлении – 15 тыс. долл.

Стоимость разработки

Статьи расходов	Стоимость	Период
Оборудование и материалы	20000 USD	2006
Услуги сторонних организаций	25000 USD	2006 - 2007
Премияльный фонд	10000 USD	2006 - 2007

Итого 55000 USD

1. Оборудование и материалы

Наименование	Фирма	Цена за ед.	Кол.	Сумма
Матрица фотоумножителей H9500	Hamamatsu	5350 USD	2	11000 USD
Электронные компоненты и узлы	-	-	-	7000 USD
Инженерные материалы	-	-	-	2000 USD

2. Услуги сторонних организаций

Услуги	Стоимость
Разработка механической конструкции	5000 USD
Изготовление механической конструкции	5000 USD
Разработка электроники	8000 USD
Изготовление электроники	7000 USD

Работы по проекту будут осуществляться силами группы сцинтилляционных детекторов с привлечением сторонних коммерческих организаций.

Литература

1. E.S. Kuzmin, A.M. Balagurov, G.D. Bokuchava, V.V. Zhuk, V.A. Kudryashev. Time-focused Large Area Counters on the base of ZnS(Ag)⁶LiF screen and WLS-fibers readout. II German-Russian User Meeting "Condensed Matter Physics with Neutrons at IBR-2". Dubna, April 21-25, 2001.
2. E.S. Kuzmin, F.V. Balagurov, G.D. Bokuchava, V.V. Zhuk, V.A. Kudryashev, A.P. Bulkin and V.A. Trunov. Journal of Neutron Research, 2002 Vol. 10(1). "Detector for the FSD Fourier-diffractometer Based on ZnS(Ag)⁶LiF Scintillation Screen and Wavelength Shifting Fiber readout".
3. A.V. Belushkin, V.N. Shvetsov, E.S. Kuzmin. International Conference on Neutron Optics" (NOP2004), 12-16 January 2004, Tokyo, Japan "Detector development at Frank Laboratory of neutron physics".
4. A.V. Belushkin, E.S. Kuzmin, V.N. Shvetsov Nucl.Instr.Meth. A 529(2004)249-253. "Status of the FLNP project on neutron positive-sensitive detectors".

Мобильные криогенные системы

Руководитель проекта: А.Н.Черников

Развитие криогеники в последнее десятилетие, прежде всего, связано с разработкой рефрижераторов замкнутого цикла на основе импульсных труб (PTR). Эти рефрижераторы имеют предельную температуру 2.2 К и холодопроизводительность до 1 Вт при 4.2 К, что соответствует скорости испарения жидкого гелия до 1.5 л/сек. Особенностью рефрижератора этого типа является очень низкий уровень шумов и вибраций, так как его холодная головка не имеет поршневой системы. На базе таких рефрижераторов появилась техническая возможность изготавливать криостаты разнообразного назначения и для широкого диапазона температур без жидкого азота и гелия (cryogen free). Для обеспечения криогенными устройствами нейтронных спектрометров ИБР-2 в ЛНФ в последнее время разработан и изготовлен целый ряд оригинальных “cryogen free” криостатов и криостатов-рефрижераторов. В настоящем проекте предлагается оборудовать криостенд для разработки и изготовления мобильных и автономных криостатов различного типа, отвечающих мировому современному уровню.

1. Состояние разработок криостатов в ЛНФ.

1.1. Шахтный криостат на диапазон температур 6–300 К.

Подобный криостат был сконструирован и изготовлен при участии ЛНФ (Рис. 1), но с рефрижератором старого типа (Гиффорда-Макмагона) для диапазона 6-300 К [1].



Рис. 1. Шахтный криостат замкнутого цикла на базе двухступенчатого криогенератора CoolPower 100T.

1.2. Криостат на диапазон температур 2.5–300 К с загрузкой образца путем установки его на холодной платформе головки (Рис. 2).



Рис. 2 Рефрижератор-криостат RC2.5-300.

В 1-м цикле реактора ИБР-2 в 2006 году на спектрометре ДИН-2ПИ был установлен такой криостат, изготовленный в ЛНФ, на базе рефрижератора РТ 405.

1.3. Криостаты сверхнизких температур:

1.3.1. Криостат с циркуляцией ^3He на диапазон температур 0.4–3 К (предмет планируемых разработок).

1.3.2. Криостат с сорбционным рефрижератором ^3He на температуры 0.3–3 К.

Такой криостат был изготовлен при участии ЛНФ для работы в автономном режиме [2, 3] однако имеет техническое исполнение в 4.2 К гелиевом криостате (Рис. 3). Работы над такими криостатами ведутся фирмами Oxford Instruments [4] (модель HelioxAC-V) и Janis [5] (модель HE-3-CCR-SSV с рефрижератором старого типа – Гиффорда-Макмагона). Работы по разработке и изготовлению таких криостатов на базе PTR RP-052A (Sumitomo) ведутся и при участии ЛНФ.

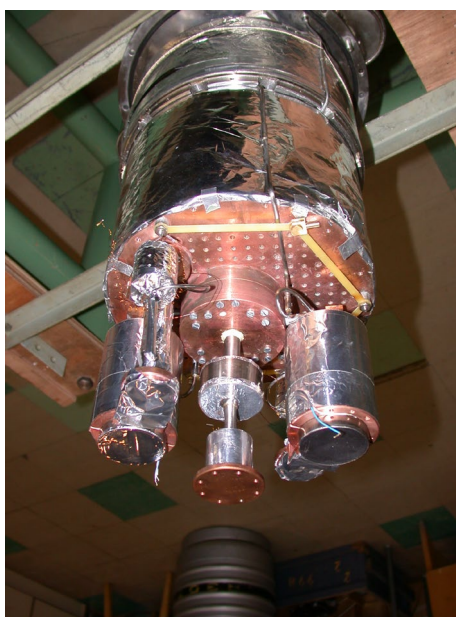


Рис. 3. Микрорефрижератор с сорбционной откачкой для получения температур до 0.3 К.

1.3.3. Рефрижератор растворения ^3He в ^4He с внешней циркуляцией до 0.3 ммоль/сек с конечной температурой до 20 мК.

Работа ведется фирмой VeriCold (ФРГ) и представлена моделью He7-System [6]. В ЛНФ совместно с ИТЭФ представлен проект выстроенной ядерной мишени с рефрижератором растворения ^3He в ^4He на базе PTR PT405 (Cryomech) с внешней циркуляцией ^3He [7].

1.3.4. Рефрижератор растворения ^3He в ^4He с сорбционной откачкой с конечной температурой до 20 мК.

Опытный экземпляр такого рефрижератора предлагается впервые в России разработать в данном проекте.

Все указанные типы криостатов являются мобильными и автономными и могут устанавливаться и демонтироваться на спектрометрах ИБР-2 в течение короткого времени. Состояние разработок криостатов в ЛНФ отвечает мировому современному уровню.

2. Предложение о развитии криогенной базы в ЛНФ.

Для успешной и быстрой разработки и изготовления всех вышеуказанных типов мобильных криостатов для спектрометров ИБР-2 предлагается оборудовать в корп.119 криостенд, который содержит рефрижератор на импульсных трубах, экспериментальный криостат, систему циркуляции ^3He , вакуумное оборудование, измерительную аппаратуру.

Стоимость проекта отражена в таблице и оценивается в **228 KUSD**.

Сроки создания:

2006÷2007 гг.: Разработка технического проекта криостенда. Приобретение необходимого оборудования.

2007÷2008 гг.: Изготовление узлов криостенда согласно техническому проекту.

2006÷2010 гг.: Разработка и изготовление криостатов.

Запрашиваемые ресурсы:

№	Наименование	Изготовитель	Сумма (KUSD)	Срок	Примечание
1	<u>Криостенд:</u> - криокулер PT410 - измеритель температур (модель 370) - термометры - вакуумное оборудование - экспериментальный криостат с пультом управления - He3	Cryomech	40	2007	Разработка и изготовление
		Lake Shore	10	2006	
		Lake Shore	6	2007	
		Varian	10	2006	
			30	2007	
		Россия	13	2007	
	- материалы	Россия	5	2006	
2	Ремонт помещения под криостенд		4	2006	
3	Криостат с циркуляцией ^3He на диапазон температур 0.4–3 К.	Россия	50	2009	Разработка и изготовление
4	Криостат для работы с сверхпроводящими магнитами	Россия	60	2010	Разработка и изготовление

ИТОГО 228 KUSD

Работы по проекту будут осуществляться силами сотрудников группы №2 «Автоматизации и окружения образца» сектора №2 «Развития спектрометров» НЭОКС ЛНФ с привлечением сторонних коммерческих организаций.

Литература

1. А.Н.Черников и др. Шахтный криостат для порошковой дифракции нейтронов на основе рефрижератора замкнутого цикла для работы в диапазоне температур 6-300 К. Сообщение ОИЯИ 8-2005-23 (Shaft cryostat on the basis of closed-circuit refrigerator for neutron powder diffraction studies in the temperature range 6–300 K);
2. В.Н.Трофимов, А.Н.Черников. Автономный сорбционный рефрижератор для работы при 0.3 К. (Autonomous sorption refrigerator for cooling to 0.3 K) ПТЭ, 2003, 4;
3. В.Н.Трофимов, А.Н.Черников и др. Оптический криостат с сорбционным рефрижератором He3. Сообщение ОИЯИ 8-2005-41;
4. www.oxinst.com/SCNPDP714.htm;
5. www.janis.com/p-3he14.html;
6. www.vericold.com;
7. Beda A.G., Chernikov A.N. "Aligned nuclear targets for the test of time reversal invariance". Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 55 (2005), Suppl. B.

Развитие систем сбора данных комплекса спектрометров ИБР-2 и информационно-вычислительной инфраструктуры ЛНФ

Руководитель проекта: В.И.Приходько

В период коренной модернизации реактора ИБР-2 планируется создание новых и развитие существующих нейтронных спектрометров. В этой связи, в ЛНФ разработана долгосрочная программа развития системы сбора данных (DAQ) для комплекса спектрометров и информационно-вычислительной инфраструктуры ЛНФ. В настоящем проекте изложены основные составляющие этой программы. Поставленная в проекте цель – создание электроники и программного обеспечения систем сбора, накопления и обработки данных, адекватные мировому уровню спектрометров ЛНФ – требует применения самых современных технических средств, программных продуктов и информационных технологий, а также единого для всех спектрометров подхода к проектированию этих систем. На достижение этой цели направлены исследования и разработки, запланированные в проекте.

1. Статус и научная программа.

Развитие систем сбора данных и информационно-вычислительной инфраструктуры имеет ключевое значение для успешной реализации программы научных исследований конденсированных сред на реакторе ИБР-2. Совершенствование методики измерений, рост числа управляемых и контролируемых параметров, увеличение количества и усложнение используемых в эксперименте детекторов, повышение требований к точности и быстродействию регистрирующей аппаратуры, необходимость обеспечения удаленного (из любой точки локальной вычислительной сети) управления подсистемами спектрометра и экспериментом в целом выдвинули новые требования к системам автоматизации экспериментов, которые не могут быть удовлетворены в полном объеме в рамках существующей программно-аппаратной среды и информационно-вычислительной инфраструктуры. Пользовательский режим работы спектрометров ИБР-2 выдвигает дополнительные требования к системам сбора данных: простота освоения и работы, удобный графический интерфейс, доступ к результатам измерений по Интернету и др.

Главными проблемами в создании новых систем сбора данных для нейтронных спектрометров являются надежность, стоимость, время разработки и ввода в эксплуатацию, а также возможность быстрой адаптации систем к изменениям требований эксперимента. Адаптируемость имеет принципиальное значение, т.к. обеспечивает необходимую гибкость для выполнения требований (иногда неизвестных) будущих экспериментов.

В многоуровневой архитектуре систем сбора данных относительно легко поддается модификации только программное обеспечение. В практическом плане это означает, что необходимо как можно раньше начинать цифровую обработку сигналов. Именно такой подход был использован при создании действующих в настоящее время на спектрометрах ИБР-2 унифицированных VME DAQ-системах. Цифровые системы для регистрации и накопления данных для всех спектрометров выполнены в стандарте VME и представляют собой ограниченный по номенклатуре, но функционально полный ряд идентичных с точки зрения hardware модулей, в которых различия в параметрах, функциональных возможностях, кодировке, а также в процедурах коррекции и предварительной обработки, специфичных для каждого конкретного спектрометра реализованы на уровне микропрограмм, электронных таблиц и унифицированного управляющего программного комплекса SONIX.

Ядро DAQ-системы сосредоточено в процессорном модуле, построенном на базе высокопроизводительного сигнального процессора, который выполняет промежуточное запоминание исходных данных для каждого цикла реактора, преобразование форматов

данных, вычисляет коды позиций в линейных и двухкоординатных ПЧД, коррекцию времени пролета (временную фокусировку), адреса гистограммной памяти, а также осуществляет контроль параметров реактора и спектрометра и выполняет команды VME-системы.

По такому же принципу будут создаваться DAQ-системы для будущих спектрометров и экспериментов на модернизированном реакторе ИБР-2. Основными направлениями этих работ являются:

- Интеграция PC в состав VME-систем сбора данных для обеспечения дружественного интерфейса пользователя в привычной среде Windows и эффективного использования разработанного в ЛНФ и других нейтронных центрах программного обеспечения PC для первичной обработки и анализа данных.
- Разработка новых программных продуктов.
- Интеграция модульных PC в отдельные измерительные и управляющие подсистемы и создание мини-ферм PC для управления спектрометрами и обработки данных.
- Разработка новых специализированных для нейтронных экспериментов электронных блоков с улучшенными характеристиками с учетом естественного прогресса в создании и производстве электронных компонентов, что позволит:
 - повысить быстродействие систем регистрации до 10^6 соб/с;
 - увеличить объем гистограммной памяти до 1 Гбайт;
 - повысить точность измерений и число регистрируемых и контролируемых параметров;
 - применять более сложные алгоритмы фильтрации и предварительной обработки данных и т.д.
- Гальваническая развязка детекторной электроники.
- Радикальное улучшение системы электропитания.
- Сокращение числа собственных разработок и ориентация на широкое применение промышленных стандартов и систем, а также коммерческих программных продуктов.
- Применение новых технологий построения DAQ-систем, в первую очередь, мезанинных и сетевых технологий.

Архитектура нового поколения DAQ-систем показана на рис. 1. В настоящее время ведутся работы по всем указанным направлениям, что, наряду с действующими системами сбора данных, является весомым заделом для выполнения этой части проекта.

Другим важным направлением работ по проекту является развитие информационно-вычислительной инфраструктуры комплекса спектрометров ИБР-2 (локальная вычислительная сеть (ЛВС) и компьютеринг). Как известно, существующий центральный файл-сервер Enterprise 3000 фирмы Sun Microsystems (два процессора Ultra Sparc 250 MHz, RAM – 250 Mbyte, HDD –200 Gbyte) является единственным мощным вычислителем и поставщиком дискового пространства для пользователей ЛВС ЛНФ. Сервер находится в эксплуатации 8 лет, что недопустимо долго для вычислительной техники, и в связи с этим возникли проблемы с поддержкой hardware и software сервера, малой емкостью дисковой памяти, высокой стоимостью обслуживания и др. В 2005 г. были приобретены новый центральный сервер Sun Fire X4200 и массовая память емкостью 6,4 Тбайт, установка которых, запланированная на 2006 г., поможет решить указанные проблемы. Enterprise 3000 будет использоваться в ЛВС до полного износа для работы с приложениями, написанными под старую операционную систему.

Наряду с инсталляцией новых серверов и массовой памяти планируется создание новой архитектуры ЛВС ЛНФ и переход к гигабитным скоростям в основных сегментах сети (рис. 2). В настоящее время центральный маршрутизатор ЛВС Cisco 8510 связан с сетью ОИЯИ по двум линиям с общей пропускной способностью 200 Мбит/с. В условиях постоянного увеличения трафика и нагрузки на маршрутизирующее оборудование эта связь больше не может обеспечить стабильный и высокоскоростной сервис для пользователей.

Перевод ядра сети на недавно приобретенные маршрутизаторы Cisco 3750, установка интерфейса 1 Гбит/с в маршрутизатор 8510 и переход на высокоскоростные линии связи позволит решить существующие проблемы, повысит надежность сетевых операций и обеспечит связь с сетью ОИЯИ и другими сетями на гигабитных скоростях.

2. Предложения по модернизации и развитию систем сбора данных и информационно-вычислительной инфраструктуры.

Системы сбора данных и программное обеспечение для новых спектрометров будут создаваться в соответствии архитектурой, показанной на рис. 1. Все электронные блоки новых DAQ-систем логически не будут привязаны к существующим стандартам ядерной электроники, имеющиеся крейты CAMAC, VME, NIM будут использоваться только как механические конструктивы для размещения и электропитания блоков. Возможно также размещение блоков непосредственно в корпусе персонального компьютера. Все блоки будут иметь интерфейс к PC и подключаться к нему по высокоскоростным линиям связи (преимущественно оптическим).

Планируется разработка ряда унифицированных блоков для сбора и накопления данных от различных типов детекторов:

- точечные (нейтронные счётчики, сцинтилляционные детекторы);
- двухкоординатные ПЧД со съёмом информации с линий задержки или с индивидуальным съёмом;
- однокоординатные ПЧД со съёмом информации с линии задержки или с резистивной нити.

В этих блоках будут предусмотрены различные режимы накопления данных – интегральный (мониторные счетчики), гистограммный (on-line сортировка и накопление спектров в памяти блока), «списочный» (накопление сырых данных с последующей обработкой и сортировкой в PC). Все функции и параметры блоков являются программируемыми. Различные версии firmware программ (в зависимости от типа и параметров детектора, выбранного режима работы, а также операций фильтрации и предварительной обработки) записываются управляющей программой PC в логические матрицы блоков, что позволяет реализовать различные функции и использовать эти блоки для накопления данных на разных спектрометрах без каких-либо изменений в hardware.

Кроме указанных выше “типовых” блоков, будут разработаны также некоторые специализированные блоки для конкретных применений, например, фурье-анализатор с накоплением в реальном времени полной картины событий (запись параметров peak-up сигнала и интенсивности счета детектора с заданной временной дискретностью), блок накопления множества гистограмм в коротких интервалах времени для изучения в конденсированных средах переходных процессов в реальном времени и др.

Программное обеспечение систем сбора данных будет базироваться на усовершенствованной версии комплекса Sonix+ с операционной системой Windows.

Отдельные подсистемы спектрометров, в первую очередь, позиционно-чувствительные детекторы могут включать в себя “собственный” PC, который имеет встроенную электронику для регистрации и накопления данных. Таким образом, в состав спектрометра могут входить несколько “подчиненных” PC, при этом управление экспериментом осуществляется “центральный” компьютером, на котором установлен пакет Sonix+.

Частичная модернизация систем сбора данных может быть выполнена более простым и дешевым путем. Суть его заключается в замене процессорного блока VME крейта внешним PC, связанным с шиной VME посредством VME-PCI адаптера. В этом случае функции VME компьютера берет на себя PC, а управляющий комплекс Sonix заменяется на Sonix+ с операционной системой Windows вместо OS-9. Такой подход позволяет сохранить

всю существующую VME электронику без каких-либо изменений и в то же время дает возможность пользователям работать в привычной дружественной среде Windows, богатой различными полезными программными продуктами. Значительно облегчается также развитие комплекса Sonix, в первую очередь, благодаря возможности применения современных технологий программирования. Положительный опыт такой модернизации получен в работах на спектрометрах НЕРА-ПР и РЕМУР, где установлены VME-PCI адаптеры и Sonix+.

Выбор пути модернизации DAQ-систем на каждом спектрометре будет зависеть от программы модернизации собственно спектрометра и от финансовых возможностей. В любом случае следует иметь в виду, что спектрометры будут работать на модернизированном реакторе с 2010 года и выбранные технические решения должны учитывать тенденции развития микроэлектроники и компьютерных технологий, т.е. это должны быть системы “завтрашнего дня”.

В планируемый период некоторой модернизации будут подвергнуты и системы управления более консервативными элементами спектрометров – прерывателями, исполнительными механизмами и системами окружения образца. Необходимо также улучшить систему электропитания электроники и компьютерного оборудования в экспериментальных залах реактора. Самый простой и доступный путь – установка на каждом спектрометре источников бесперебойного питания.

Модернизация и развитие сетевой инфраструктуры имеет целью:

- увеличить реальную пропускную способность сети на основных магистралях до 1Гбит/с;
- обеспечить механизм контроля, анализа и фильтрации сетевого трафика;
- организовать виртуальные подсети для пользователей (или установок) независимо от их географического расположения;
- обеспечить гарантированную полосу пропускания для наиболее важных сетевых приложений (например, для конкретных спектрометров);
- обеспечить резервирование наиболее критичных элементов сети;
- организовать специальный сервер на платформе Intel для централизованного хранения экспериментальных данных со спектрометров ИБР-2 и др.

В результате выполнения проекта для комплекса спектрометров ИБР-2 будет создано новое поколение унифицированных систем сбора данных с характеристиками, отвечающими мировому уровню. Выбранная архитектура DAQ-систем хорошо вписывается в сетевую инфраструктуру и обеспечит простоту и низкую стоимость их постоянной модернизации в соответствии с прогрессом в вычислительной технике и коммуникационных технологиях. Будет выполнена также вторая жизненно важная для Лаборатории задача развития и поддержания на современном уровне информационно-вычислительной инфраструктуры.

3. Запрашиваемые ресурсы, стоимость и сроки реализации.

Затраты на системы сбора данных в основном должны предусматриваться в рамках проектов создания или модернизации спектрометров. В данном проекте финансирование запрашивается на методические исследования и разработки, изготовление опытных образцов электронных блоков, создание испытательных стендов, оборудование рабочих мест инженеров и программистов и на развитие информационно-вычислительной инфраструктуры Лаборатории.

Таблица 1

№ п/п	Перечень работ	Стоимость (тыс.\$)	Сроки	Исполнитель
1.	Разработка и изготовление опытных образцов новых электронных блоков и	60 (15 т./год)	2007-2010	Изготовление в ЛНФ, покупка

	стендов			комплектующих изделий
2.	Разработка, отладка и оптимизация программного обеспечения DAQ-систем	30 (7 т./год)	2007-2010	Разработка в ЛНФ, покупка и обновление вспомогат.прогр. продуктов
3.	Оборудование рабочих мест инженеров и программистов (приобретение и модернизация PC, CAD/CAE – систем, контрольно-измерительных приборов и др.)	40 (10 т./год)	2007-2010	Покупка
4.	Модернизация систем электропитания электроники и компьютеров на спектрометрах ИБР-2	15	2007-2010	Покупка
5.	Модернизация систем управления прерывателями, исполнительными механизмами и системами окружения образца	40 (10т./год)	2007-2010	Изготовление в ЛНФ, покупка
6.	Изготовление новых систем сбора данных (аппаратура и программное обеспечение) в соответствии с планами развития спектрометров;	-	2009-2010	Изготовление в ЛНФ
7.	Замена выработавших ресурс специализированных серверов и рабочих станций, дисков, подсистем	50	2008-2010	Покупка
8.	Модернизация архитектуры ЛВС, обновление операционных систем	20	2007-2010	Покупка, изгот. в ЛНФ
9.	Прокладка дублирующих линий связи и модернизация коммуникационного оборудования	30	2009-2010	Покупка, изгот. в ЛНФ
10.	Замена выработавшего ресурс периферийного оборудования ЛВС (сетевые принтеры, копировальное и проекционное оборудование)	40 (10 т./год)	2007-2010	Покупка

Итого: 295 тыс. \$

Литература

1. A.Kirilov, F.Levchanovski, V.Prikhodko. Data Acquisition Systems and Computing Infrastructure of the IBR-2 Spectrometer Complex: Present and Near Future. Proc. of the Inter. Conf. Computing in High Energy and Nuclear Physics, March 24-28, 2003, La Jolla, CA USA, pp324-328.
2. F. Levchanovski et al. A PCI DAQ Board for MWPC Detectors with Delay Line Position Readout. Nucl. Instr. and Meth. A529(2004), pp. 413-416.
3. A.Kirilov, et al. The NERA-PR instrument control software: experience of using the VME-PCI adapter. JINR communications, P13-2003-63, Dubna, 2003
4. А.А.Богдзель и др. "Система автоматизации экспериментов на нейтронном Фурье-дифрактометре ФСД" Препринт ОИЯИ, P10-2004-21, Дубна, 2004.
5. E.Litvinenko. Visualization and Data Treatment Software Based on PV WAVE and IDL Packages. Book of Abstracts of the XIX Inter. Symposium on Nuclear Electronics and Computing (NEC-2003). 15-20 September, Varna, Bulgaria. JINR E10,11-2003-157, pp 40-41.
6. Yu.Grigoriev, A.Sirotnin, et al. A Facility on the Basis of a Neutron Mechanical Chopper for Monochromatization of Neutrons and Neutron Burst Shortening. Preprint PhEI-2991, Obninsk, 20

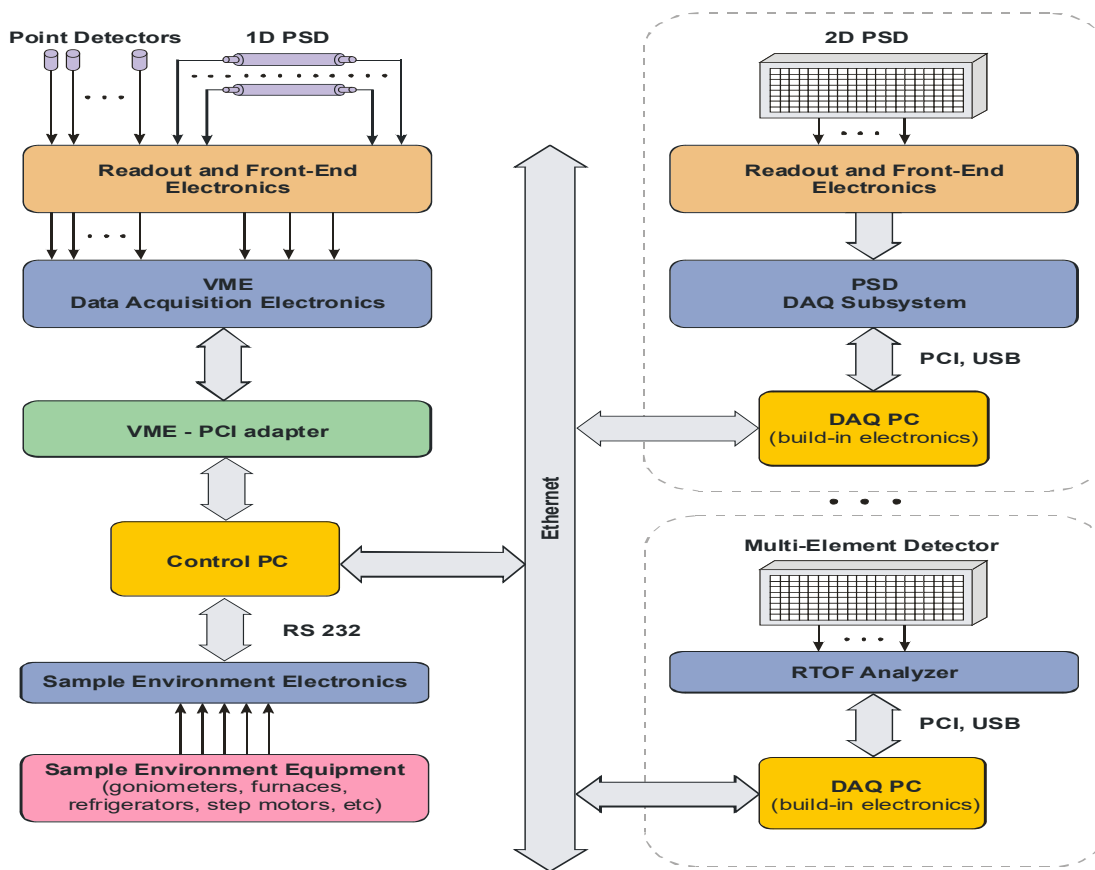


Рис. 1. Архитектура нового поколения систем сбора данных.

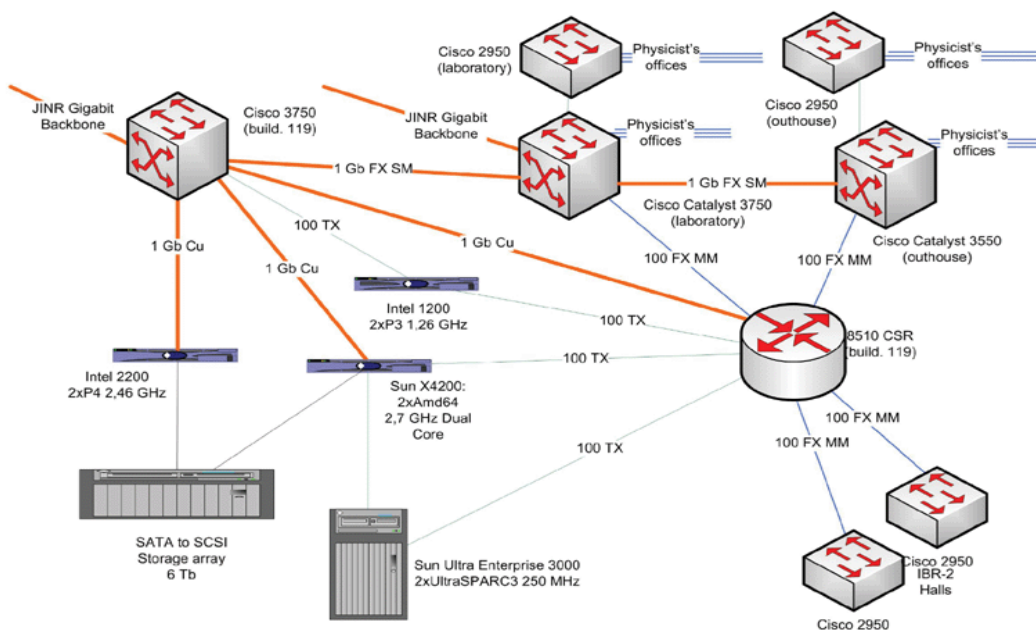


Рис. 2. Новая архитектура ЛВС ЛНФ.