

Проект «Создание комплекса криогенных замедлителей реактора ИБР-2»

Тема: «Развитие реактора ИБР-2 с комплексом криогенных замедлителей»

Шифр темы: 04-4-1105-2020/2022

Авторы проекта:

Беляков А.А. - г. Дубна, ОИЯИ

Булавин М.В. - г. Дубна, ОИЯИ

Куликов С.А. - г. Дубна, ОИЯИ

Мухин К.А. - г. Дубна, ОИЯИ

Шабалин Е.П. - г. Дубна, ОИЯИ

Руководитель проекта: Мухин К.А.

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТА В НОО _____

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ _____ НОМЕР ДОКУМЕНТА _____

ДАТА ПЕРВОГО УТВЕРЖДЕНИЯ ПРОЕКТА _____

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

Проект «Создание комплекса криогенных замедлителей реактора ИБР-2»

Тема: «Развитие реактора ИБР-2 с комплексом криогенных замедлителей»

Шифр темы: 04-4-1105-2020/2022

Мухин Константин Александрович

УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

НАЧАЛЬНИК НОО

ДИРЕКТОР ЛНФ

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛНФ

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

ОДОБРЕН

ПКК ФКС

Оглавление

Введение	4
1.....	Ф
изическое и методическое обоснования	5
1.1	О
жидаемые результаты и новые разработки	5
1.2	К
онкурентоспособность.....	8
2.....	О
сновные характеристики оборудования и узлов в проекте	8
2.1	К
риогенная гелиевая система охлаждения комплекса замедлителей.....	8
2.2	Т
еплообменники и криогенный коллектор.....	9
2.3	У
никальное, запатентованное, разъемное, криогенное соединение для транспортного трубопровода КЗ 201	10
2.4	И
следовательский и испытательный стенд КЗ 201 на канале № 3 ИБР-2	10
2.5	В
вакуумная система и оборудование по проекту комплекса КЗ.....	10
2.6	К
риогенные замедлители КЗ 201, КЗ 202, водяной ВЗ 301 в сборе.....	11
3.....	О
ценка кадровых ресурсов	11
3.1	С
отрудники, занятые в проекте.....	11
3.2	П
убликации, конференции и диссертации.....	11
4.....	К
омпании-партнеры и организации поставщики оборудования.....	12
5.....	П
лан-график работ	13
6.....	С
мета затрат.....	14
Список использованных источников	15

Введение

Большинство современных экспериментов проводятся в диапазоне длин волн от 0,4 Å и выше [1]. Это область «тепловых» (0,4 – 4 Å) и «холодных» (4 – 28 Å) или длинноволновых нейтронов. Снижение энергии нейтронного потока до энергии «холодных» нейтронов ($5 \cdot 10^{-3}$ эВ) и ниже увеличивает волновые функции нейтрона, и он начинает «видеть» не только отдельные атомы, но и их конгломерации, большие молекулы и молекулярные образования. Длинноволновые нейтроны позволяют с высокой точностью изучать биологические объекты, наноматериалы, магнитные структуры и т.п. Они наиболее предпочтительны при изучении сложных, среднесложных и магнитных структур, автоиндексации, изучении фазовых переходов, процессов синтеза веществ в реальном времени и т.д.

В рамках темы 1105 на исследовательской ядерной установке ИБР-2 создается комплекс криогенных замедлителей нейтронов, успешная реализация которого позволит получать оптимальный спектр нейтронного потока на каждом из 16 физических инструментов. Для достижения этой цели, а также учитывая технологические особенности и геометрическую форму реактора, вокруг активной зоны будет размещено 3 криогенных замедлителя нейтронов:

- КЗ 201 для пучков 1, 4, 5, 6, 9
- КЗ 202 для пучков 7, 8, 10, 11
- КЗ 203 для пучков 2, 3.

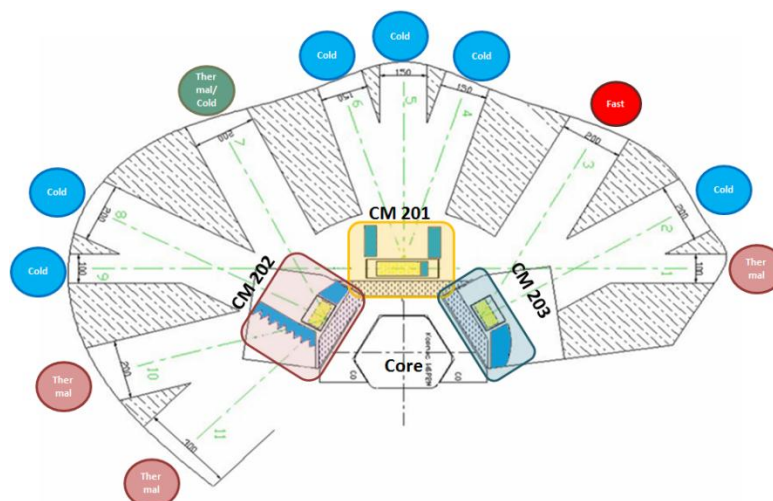


Рисунок 1. Расположение криогенных замедлителей вокруг активной зоны реактора ИБР-2 с оптимальным спектром для каждого физического инструмента, где CM – cold moderator, thermal – тепловые нейтроны, cold – холодные, fast – быстрые.

Учитывая, что на поверхность каждого из замедлителей «смотрит» до 5 инструментов, то наиболее логичным решением является создание замедлителей, имеющих криогенную камеру для формирования потока холодных нейтронов и тепловые камеры для формирования тепловых в заданных направлениях. В качестве вещества-замедлителя в тепловых камерах применяется дистиллированная вода, а в криогенной камере используется мезитилен в смеси с метаксилолом в пропорции 3/1 в твердой фазе в форме шариков диаметром 3,5 – 4 мм.

1. Физическое и методическое обоснование.

1.1 Ожидаемые результаты и новы разработки.

В 2012 году в опытную эксплуатацию была введена первая очередь источника холодных нейтронов реактора ИБР-2 – комбинированных замедлитель нейтронов с проектным названием КЗ 202. В результате эксплуатации этого замедлителя на установках РЕМУР (пучок № 8), НЕРА (пучок № 7с) и СКАТ (пучок № 7b) были проведен цикл экспериментов, нацеленный на выявление преимуществ при использовании биспектрального замедлителя. В результате исследований было выяснено, что применение потока холодных нейтронов на установке РЕМУР позволяет проводить расщепление микропучка без применения анализа поляризации, что сокращает время проведения эксперимента в 2 раза по сравнению с водяным замедлителем. Кроме этого, благодаря 10-ти кратному увеличению интенсивности в области холодных нейтронов удалось расширить рабочий диапазон установки до 16 Å. Ось пучка дифрактометра СКАТ попадает на часть криогенной камеры и на часть гребенчатого водяного замедлителя, в результате чего на образце формируется смешанный спектр нейтронного потока – оптимальный для физической установки. Это приводит к увеличению потока нейтронов в 4 раза в области длины волны 4,31 Å, благодаря чему сокращается время проведения эксперимента в 4 раза, а увеличение интенсивности позволило идентифицировать единственный пик кальцита (104) в сложноструктурном оливите, который при работе теплового замедлителя перекрывался пиками от других минералов [2 – 4]. Для получения

интенсивного потока холодных нейтронов в направлении пучков 1, 4, 5, 6, 9, необходимо создать комбинированный замедлитель (КЗ 201), формирующий оптимальный спектр нейтронного потока на исследовательских установках на выведенных пучках.

В период с 1999 по 2000 гг. на реакторе ИБР-2 цикл работ на физических установках ФДВР – фурье-дифрактометр высокого разрешения (канал 5) и многоцелевом дифрактометре ДН-2 (канал 6). Эксперименты показали новые возможности, появляющиеся в работе со спектром холодных нейтронов. Был определен круг физических задач, а также проведен сравнительный анализ холодного замедлителя со штатным гребенчатым водяным замедлителем [5].

Основными результатами стали количественные и качественные улучшения дифрактометров ФДВР и ДН-2. Под количественными улучшениями следует понимать полный поток нейтронов, попадающий на образец, который увеличивается почти в 2 раза при применении холодного замедлителя (метан при температуре 60 К) по сравнению с водяным гребенчатым замедлителем, работающим при температуре 300 К (рис. 2). Такое увеличение связано с пропускной способностью нейтронных каналов 5 и 6. Дело в том, что в них формирование нейтронного потока происходит в зеркальных изогнутых нейтронных каналах с пропускной способностью 1,5 Å.

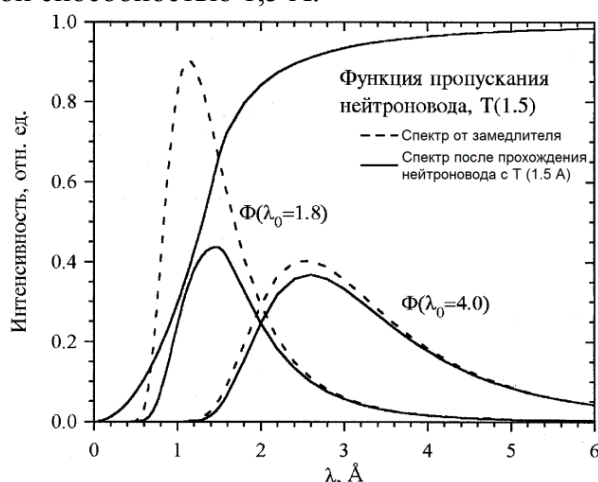


Рисунок 2. Максвелловские спектры нейтронов (пунктирные линии) от замедлителя при $T=300\text{ K}$ ($\lambda_0=1,8\text{ Å}$) и $T=60\text{ K}$ ($\lambda_0=4,0\text{ Å}$) и их измерения (сплошные линии) после прохождения пучка через нейтронный канал с функцией пропускания $T(\lambda^*=1,5\text{ Å})$.

К качественным улучшениям стоит отнести зависимость разрешающей способности дифрактометров ФДВР и ДН-2 от типа замедлителя, а точнее от спектра нейтронного потока, который он формирует. Так при увеличении пространственного положения d_{hkl} происходит улучшение разрешающей способности дифрактометра, т.к. $R \sim 1/d$. Таким образом, применение холодного замедлителя дает возможность измерять дифракционные пики в области больших d_{hkl} при больших углах рассеяния, т.е. с достаточно хорошим разрешением, что исключительно важно при изучении магнитных структур, анализа многофазных образцов и регистрации малых искажений кристаллографической симметрии. К примерам такого улучшения на ФДВР можно отнести регистрацию четких ферромагнитных пиков магнита $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{MnO}_3$, получившихся только при измерении с высоким разрешением и на холодном замедлителе (рис. 3).

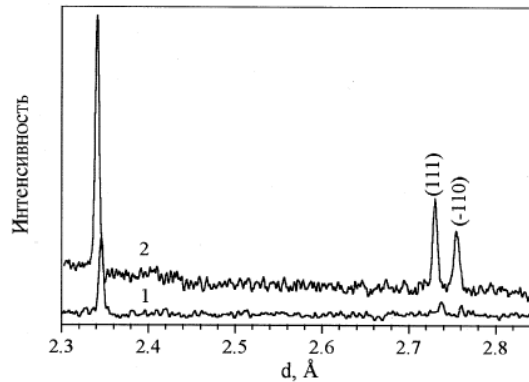


Рисунок 3. Дифракционные спектры $La_{0.83}Sr_{0.17}MnO_3$ (температура образца 8 K) в области больших d_{hkl} , измеренные за одинаковое время на гребенчатом замедлителе (кривая 1) и холодном замедлителе при $T=60$ K (кривая 2). Дифракционные пики (111) и (-110) связаны с ферромагнитным упорядочением магнитных моментов Mn.

На рисунке 4 представлена работа по исследованию процесса синтеза сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{6.5}$ (Y-123) из исходных компонентов Y_2O_3 , $BaCO_3$ и CuO в реальном времени, выполненная на дифрактометре ДН-2. В ходе исследования было показано, что образование конечного продукта идет через промежуточные фазы: $BaCuO_2$, $Y_2Cu_2O_5$, Y_2BaCuO_5 . Идентификация фаз проводилась в интервале d_{hkl} от 2 до 4 Å. Значительное увеличение статистики в этом диапазоне было достигнуто за счет применения холодного спектра нейтронного потока и позволило почти в 2 раза улучшить точность определения кислородного индекса [6].

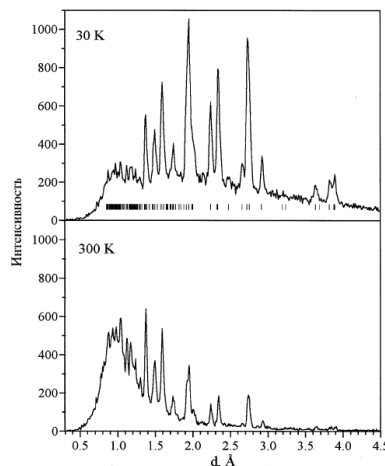


Рисунок 4. Сравнение дифракционных спектров $YBa_2Cu_3O_{6.5}$, измеренных при температурах 300 K (внизу) и 30 K (вверху) за 1 минуту. Дифракционные пики, указывающие на наличие сверхстехеометрического кислорода в области 3,5 – 4 Å, практически не видны при работе с тепловым замедлителем.

Принимая во внимание физические улучшения, продемонстрированные на инструментах ИБР-2, мировой интерес к исследованиям при помощи нейтронов с большой длиной волны, необходимо закончить проект создания комплекса криогенных замедлителей нейтронов для реактора ИБР-2 на основе дисперсного мезитилена, провести их нейтронно-физические исследования, создать инфраструктуру, повести модернизацию оборудования для надежной работы систем, разработать программное обеспечение.

В рамках темы 1105 по проекту «Создание комплекса криогенных замедлителей ИЯУ ИБР-2» в 2020-2022 году планируется:

- продолжить работу на КЗ 202 в режиме опытной эксплуатации, с проведением работ по исследованию вязкости рабочей смеси в зависимости от дозы ионизирующего излучения;
- ввести в опытную эксплуатацию на физический эксперимент КЗ 201 и определить его нейтронно-физические параметры в различных режимах работы и при разных температурах на физических установках ИБР-2;
- продолжить модернизацию криогенной системы комплекса замедлителей с учетом покупки нового рефрижератора холодильной мощностью 1800 Вт при 10 К;
- провести оптимизацию работы оборудования криогенной системы, с учетом вновь вводимого оборудования в эксплуатацию;
- разработать и провести лабораторные испытания устройства порционной выгрузки шариков из камеры замедлителя в твердой фазе;
- на полномасштабном стенде КЗ 201 испытать и внедрить устройство подсчета каждого шарика оптическим методом;
- организовать собственный участок по проектированию, изготовлению и проверке на прочность и герметичность криогенных трубопроводов, сильфонных узлов, герметичных вакуумных выводов.

1.2 Конкурентоспособность.

В настоящее время на территории Российской Федерации, единственным действующим источником холодных нейтронов является источник – заявленный в данном проекте. В то время как в мире действует более 15 таких источников на реакторах и ускорителях средней и большой мощности. Завершение проекта создания криогенных замедлителей для реактора ИБР-2 даст возможность расширить номенклатуру проводимых экспериментов, а также улучшит разрешающую способность исследовательских установок и позволит ИЯУ ИБР-2 сохранить привлекательность и лидирующие позиции среди высокопоточных исследовательских установок в мире.

2. Основные характеристики оборудования и узлов в проекте.

2.1 Криогенная гелиевая система охлаждения комплекса замедлителей.

Основными источниками холода в системе криогенных замедлителей являются две криогенные установки. КГУ 700/15 мощностью 700 Вт при 20 К производства ОАО «НПО Гелиймаш» и приобретенная КГУ 1200/10 мощностью 1200 Вт при 10К. Установка КГУ 700/15 имеет два основных режима работы на температуре 20 К и 80 К. После модернизации системы в 2017 – 2019 годах появилась возможность менять температуру в камерах замедлителей в диапазоне от 20 К до 150 К. Меняя температуру замедляющего вещества можно смещать пик нейтронного потока в область более длинных или коротких волн, делая источник более гибким и адаптируемым к конкретным экспериментам. После модернизации системы удалось снизить температуру замедляющего вещества на 10 К – это дало выигрыш в потоке нейтронов с длиной волны 7 Å до 22 %. На рисунке 5 представлены данные по фактору выигрыша в потоке холодных нейтронов в зависимости от температуры, полученные на установках РЕМУР (пучок № 8) и НЕРА (пучок № 7b).

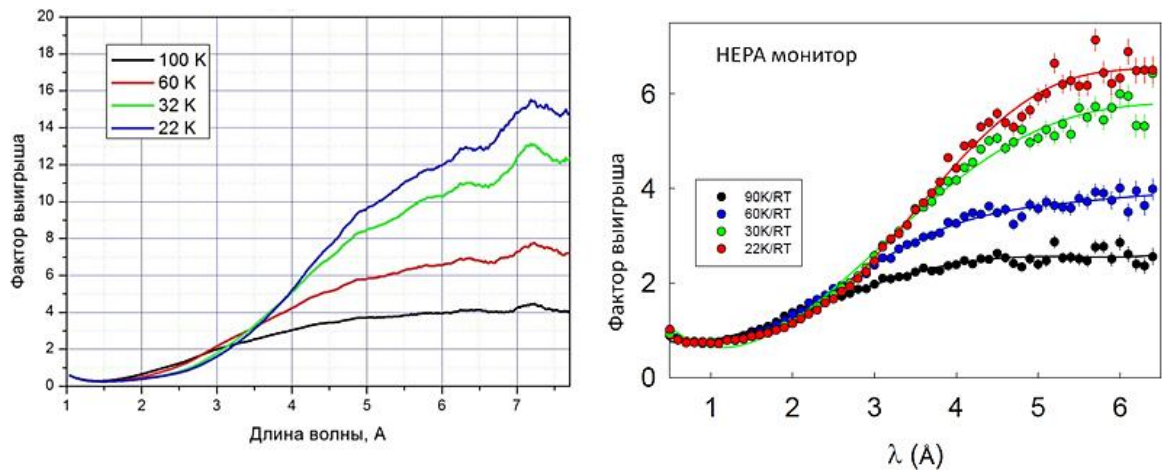


Рисунок 5. Вклад температурного эффекта на выход холодных нейтронов на установке РЕМУР – слева и установке НЕРА – справа.

Для повышения надежности и возможности работать на температурах ниже 20 К в рамках проекта 2020 – 2022 гг. планируется приобретение нового рефрижератора холодильной мощностью 1800 Вт на 10 К. Общий план размещения оборудования нового рефрижератора на криогенном участке ИБР-2 представлен на рисунке 6. Реконструкция помещений будет выполняться по проекту ПрПО ОИЯИ № АС-5792-18.

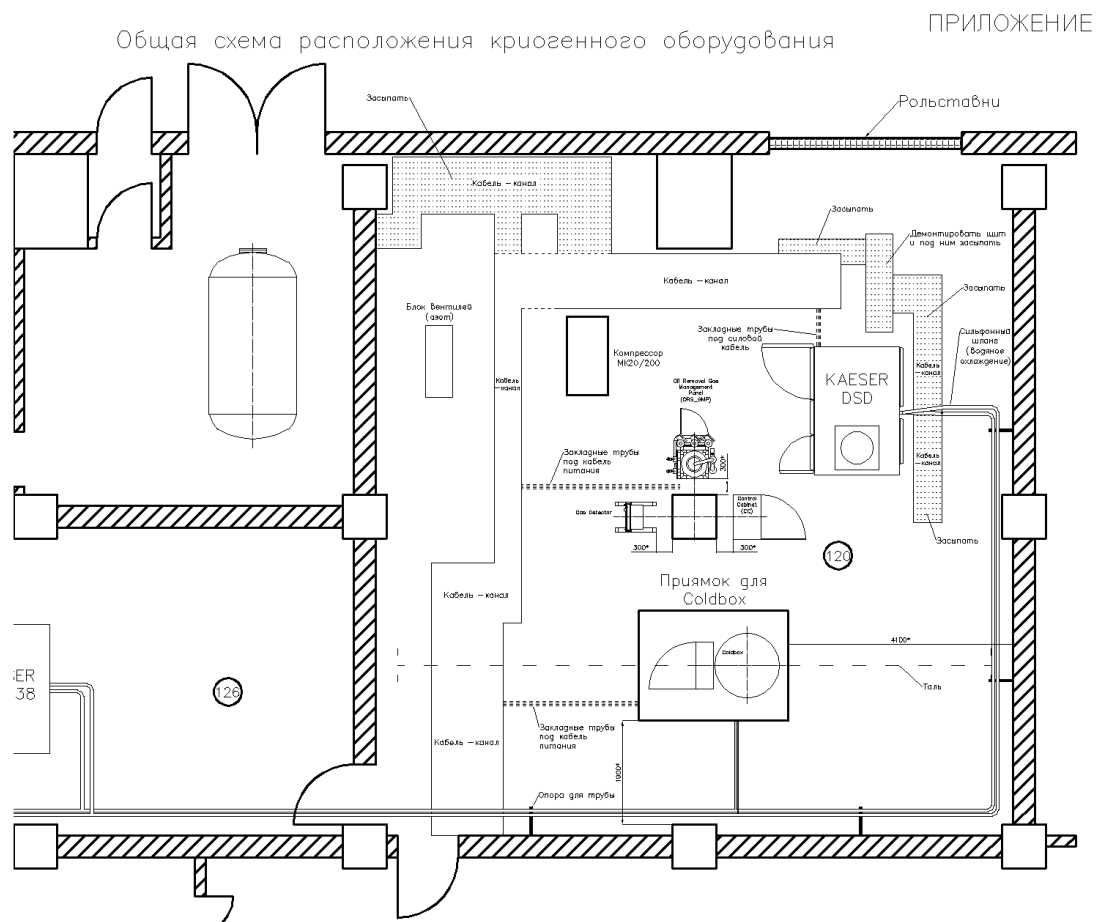


Рисунок 6. Общая схема расположения криогенного оборудования рефрижератора 1800/10.

2.2 Теплообменники и криогенный коллектор.

В состав криогенной системы входит два теплообменника производства ОАО «НПО Гелиймаш» с одной и двумя газодувками. Эти теплообменники обеспечивают разделения потоков гелия и охлаждение петли криостат-замедлитель от петли КГУ-криостат. В рамках проекта на криогенном участке будет смонтирован криостат с одной газодувкой, обеспечивающий охлаждение петли центрального направления КЗ 201.

Для объединения криогенной системы рефрижераторов в единую взаимозаменяемую систему силами ЛНФ разработан специальный криогенный коллектор распределения потоков гелия в системе комплекса. Такой коллектор позволит разделить потоки гелия от машин в любых направлениях. С помощью коллектора можно будет получить независимые температурные режимы в различных направлениях (КЗ 201, КЗ 202, КЗ 203). Общая схема криогенного и вакуумного оборудования комплекса замедлителей представлена на рисунке 7.

Блок-схема криогенных замедлителей реактора
реактора ИБР-2

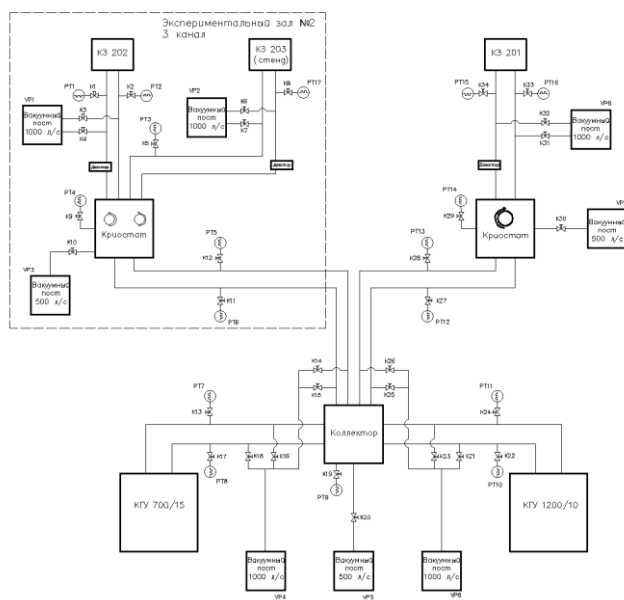


Рисунок 7. Блок-схема криогенной системы источника холодных нейтронов ИБР-2, где PT1-PT16 – мановакуумметры; V1-V33 – ручные сифонные вентили; VP1-VP8 – турбомолекулярные посты различной производительности.

2.3. Уникальное, запатентованное разъемное, криогенное соединение для транспортного трубопровода КЗ 201.

Специальное соединение имеет общую вакуумную рубашку, не имеет теплового моста в месте стыковки, ступеньки или преграды по ходу движения шарика, имеет простую конструкцию и не вносит корректировок в траекторию движения шариков.

2.4 Исследовательский и испытательный стенд КЗ 201 на канале № 3 ИБР-2.

- разработка и испытания перспективных устройств выгрузки шариков из рабочей камеры КЗ;
- испытания «сухого» дозирующее устройство подачи шариков в тракт;

- исследование и испытание нового устройства подсчета шариков оптическим методом;
- установка нового прибора расхода гелия в трубопровод и его испытания;
- датчики дифференциального давления DXLdp мембранного типа.

2.5 Вакуумная система и оборудования по проекту комплекса КЗ.

- турбомолекулярные посты фирмы Adixen, Simatzu, Leybold на основе турбины производительностью от 400 до 900 л/с и форвакуумных насосов рутса АСР 40; спиральных насосов ISP 250 и ISP 500;
- форвакуумные химические насосы;
- арматура, шиберы, затворы, вакуумные датчики MKS 925, 901P;
- компактный течеискатель ASM 310, phoenix 300 dry.

2.6 Криогенные замедлители КЗ 201, КЗ 202, водяной ВЗ 301 в сборе.

- комбинированный замедлитель КЗ 201 (пучки 1, 4, 5, 6, 9) с тележкой, блоком защиты, засыпкой из карбида бора для отсечения тепловых нейтронов из предзамедлителя от активной зоны реактора, рабочей криогенной камерой для формирования потока холодных нейтронов, водяным предзамедлителем, водяной камерой для формирования потока тепловых нейтронов на пучке № 1, водяным постзамедлителем, трубопроводами прямого и обратного потоков гелия, водяными трубопроводами, трубопроводом вывода термометрического оборудования, трубопроводом слива отработанного мезитилена.
- комбинированный замедлитель КЗ 202 (пучки 7, 8, 10, 11) с тележкой, блоком защиты, засыпкой из карбида бора для отсечения тепловых нейтронов из предзамедлителя от активной зоны реактора, рабочей криогенной камерой для формирования потока холодных нейтронов, водяным предзамедлителем, водяными гребенчатыми камерами для формирования биспектрального потока нейтронов на пучке № 10 и 11, водяным постзамедлителем, трубопроводами прямого и обратного потоков гелия, водяными трубопроводами, трубопроводом вывода термометрического оборудования, трубопроводом слива отработанного мезитилена.
- водяной замедлитель ВЗ 301 с гребенчатой водяной камерой, засыпкой карбидом бора, блоком защиты и подводящими и отводящими трубопроводами.

3. Оценка кадровых ресурсов

3.1 Сотрудники, занятые в проекте.

Таблица 1.

Сотрудники, привлекаемые к проекту.

№ п/п	Наименование подразделения / отдела / группы	Количество человек	Занятость
-------	--	--------------------	-----------

1	МТО ЛНФ группа № 2	Мухин К.А. + 10	Полная
2	МТО ЛНФ	Зайцев Д.В.	Полная
3	МТО ЛНФ группа № 3	Басюлев Э.Э + 3	Частичная
4	НЭОКС ЛНФ группа № 6	Булавин М.В. + 2	Частичная
5	НЭОКС ЛНФ группа № 3	Петухова Т.Б. + 1	Частичная (по заявке)
6	НЭОКС ЛНФ группа № 4	Сиротин А.П. + 1	Частичная (по заявке)
7	КБ ЛНФ	Кустов А.А. + 1	Частичная (по заявке)
8	Мастерские ЛНФ	Кузнецов А.Н.	Частичная (по заявке)

3.2 Публикации, конференции и диссертации.

По теме проекта опубликовано более 30 работ, из которых не менее 15 в реферируемых журналах ВАК, защищено 2 кандидатские диссертации (1 – физ-мат. наук, 1 – технических наук), 1 докторская диссертация. Результаты и планы по проекту регулярно докладываются на российских и международных конференциях профильной тематики, в том числе и на тематических совещаниях МАГАТЭ.

4. Компании-партнеры и организации поставщики оборудования.

- Linde Kryotechnik AG
- ГК «Криогенные технологии»
- BLM Synergie (Adixen, [Adixen by Pfeiffer Vacuum](#))
- Oerlikon Leybold Vacuum
- НИКИЭТ
- мастерские ЛНФ
- ОАО «НПО АТОМ»
- ГСПИ
- Gertner Group
- Lakeshore
- ООО «Промышленная экспертиза»
- «НТЦ АНКЛАВ»
- ООО «Лейфикон вакуум сервис»
- НПП «Ковинт»
- ООО «Вактрон»
- Хроматэк СКБ ЗАО

5 . План-график работ

Форма № 26

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления проекта «Создание комплекса комбинированных замедлителей реактора ИБР-2»

Наименование затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость узлов (тыс. дол.) установки. Потребности в ресурсах.	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов		
			2020	2021	2022
Основные узлы и оборудование.	1.КЗ 202	40	15	15	10
	1.1 Ввод в эксплуатацию КЗ 202 по п. 5	10	-	5	5
	1.2 Автоматизация системы контроля и управления вакуумом (закупка необходимого оборудования, разработка программного обеспечения)	30	15	10	5
	2. Криогенная система КЗ	1180,5	1020,5	95	65
	2.1 Покупка КГУ 1800/10	920,5	920,5	-	-
	2.2 Подготовка помещений для монтажа КГУ, разработка такелажных и вспомогательных устройств, монтаж.	60	40	15	5
	2.3 Экспертиза проекта криогенной системы; ввода в эксплуатацию.	40	10	10	20
	2.4 Автоматизация системы управления и контроля за вакуумом	70	10	30	30
	2.5 Покупка необходимого оборудования, модернизация и автоматизация системы заправки гелия.	90	40	40	10
	3. КЗ 201	142	62	55	25
	3.1 Проведение экспериментов, разработка и испытания новых узлов, оборудования, отработка режимов работы на стенде КЗ 201	32	12	10	10
	3.2 Определение физико-технических параметров КЗ 201 и ВЗ 304	60	30	30	-
	3.3 Проектирование. Изготовление и монтаж биологической защиты места временного хранения подменного замедлителя пом. 165 зд. 117	25	15	10	-

	3.5 Ввод в эксплуатацию и необходимые экспертизы.		25	5	5	15
	4. Новые разработки		130,5	75	45	10,5
	4.1 Разработка концепции и экспериментальной модели узла выгрузки мезитилена в твердой фазе из камеры КЗ (на стенде КЗ 201)		60	25	25	10
	4.2 Создание участка изготовления криогенных трубопроводов и сильфонных узлов		70,5	50	20	0,5
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Мех. мастерские ЛНФ	6000	2000	2000	2000
		КБ	3000	2000	500	500
		Реактор	-	-	-	-
Источник финансирования	Бюджет	Тема 1105	1493	1172,5	210	110,5

Оценка расходов проведена по курсу ЦБ РФ доллара к рублю (на 12.03.2019 г.) – 66 рублей 08 копеек за один доллар США.

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

К.А. МУХИН

6. Смета затрат

Форма № 29

Смета затрат по проекту «Развитие реактора ИБР-2 с комплексом комбинированных замедлителей»

№	Наименование статей затрат	Полная стоимость	2020	2021	2022
Прямые расходы					
1	Реактор ИБР-2	час.	-	-	-
2	КБ	нормо-час	1000	1000	1000
3	Материалы	тыс.\$	62	47	30,5
4	Оборудование	тыс.\$	1065,5	110	25
5	Оплата НИР, выполняемых по договорам	тыс.\$	45	53	55
	Командировочные расходы	тыс.\$ по плану МТС			
6	а) в страны нерублевой зоны		20	20	20
	б) в города стран рублевой зоны		8	8	8
	в) по протоколам		2	2	2
Итого по прямым расходам			1202,5	240	140,5

Оценка расходов проведена по курсу ЦБ РФ доллара к рублю (на 12.03.2019 г.) – 66 рублей 08 копеек за один доллар США.

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

К.А МУХИН

ДИРЕКТОР ЛНФ

В.Н. ШВЕЦОВ

ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭКОНОМИСТ ЛНФ

Л.С. ОВСЯННИКОВА

Список использованных источников.

1. Научные установки реактора ИБР-2 [Электронный ресурс], – <http://flnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2/instruments> – электронный ресурс со свободным доступом.
2. Использование криогенного замедлителя на нейтронном рефлектометре РЕМУР / С. В. Кожевников [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – №1, с. 5-14.
3. Спектрометр поляризованных нейтронов РЕМУР на импульсном реакторе ИБР-2 / В.Л. Аксенов [и др.] // Сообщения Объединенного Института Ядерных Исследований. – 2004. – Д13-2004-47. – Р. 37
4. Vasin, R.N. Elastic anisotropy modeling of Kimmeridge shale / R.N. Vasin [et al.] // Journal of geophysical research: solid earth. – 2013. – Vol. 118. – Р. 3931-3956.
5. Beliakov A. A., Tretyakov I. T., Shabalin E. P. First experience with the new solid methane moderator at the IBR-2 reactor // Proc. of the 15th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources (ICANS-XV), 2000. – Tsukuba, Japan, Nov. 6-9,.
6. Дифракционные исследования на реакторе ИБР-2 с использованием холодного замедлителя / Балагуров А.М. и др. // Сообщение ОИЯИ РЗ-2000-220, г. Дубна, 2000 г.