

«СОГЛАСОВАНО»

Руководитель проекта

А.А. Беляков_____

«УТВЕРЖДАЮ»

Руководитель темы

А.В. Виноградов_____

ОТЧЕТ

по проекту

«Создание комплекса криогенных замедлителей реактора ИБР-2»

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

Шифр темы: 04-4-1105-2017/2019

Составил:

заместитель руководителя проекта

_____ К.А. Мухин

2019 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Определение возможности увеличения непрерывной работы замедлителя до 12 суток (160 МГр) в условиях рациональной нагрузки установки ИБР-2.....	5
2. Разработка устройства определения массового расхода гелия в контуре загрузки шариков.....	6
3. Криогенное фланцевое разъемное соединение для шарикового замедлителя	7
4. Разработка и установка КЗ 201 на штатное место	8
5. Новая криогенная система для комплекса замедлителей установки ИБР-2.....	9
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	12
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	15

ВВЕДЕНИЕ

Проект «Создание комплекса криогенных замедлителей нейтронов реактора ИБР-2» выполняется в рамках темы 04-4-1105-2017/2019 «Развитие реактора ИБР-2 с комплексом криогенных замедлителей». Главной целью проекта является создание комплекса криогенных замедлителей нейтронов, окружающих активную зону реактора ИБР-2 и формирующих оптимальный нейтронный спектр на каждом из 11 физических инструментов. Такой комплекс предполагает создание трех комбинированных замедлителей нейтронов (рис.1).

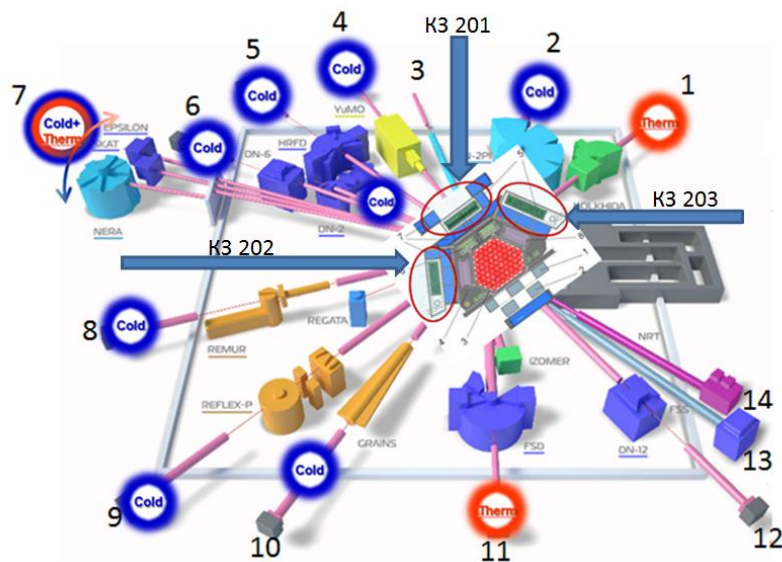


Рисунок 1. Расположение замедлителей вокруг активной зоны реактора с распределением оптимального спектра нейтронного потока для каждого из инструментов на выведенных пучках.

Каждый замедлитель состоит из головной части, защитного блока и блока инженерных коммуникаций. Формирование спектра нейтронного потока происходит в головной части замедлителя, которая состоит из водяных и криогенных камер. Геометрические размеры, форма и расположение камер может отличаться и выбирается в соответствии с расположением физических инструментов «смотрящих» на поверхность замедлителя. В независимости от расположения замедлителя головная часть имеет (от активной зоны реактора) засыпку из карбида бора, для отсекаания потока тепловых нейтронов в сторону активной зоны, камеры предзамедлителя, криогенной камеры с засыпкой замедляющего вещества и камер пост замедлителя. В камерах пред- и пост-замедлителя рабочим веществом является циркулирующая дистиллированная вода, а в криогенной камере – смесь мезитилена с метаксилолом в пропорции 1/3. Смесь находится в твердой фазе в форме шариков диаметром 3.4 – 3.9 мм. Каждый из замедлителей имеет два режима работы: водяной и криогенный. В случае необходимости получать высокий поток нейтронов с энергией 25 мэВ (тепловые нейтроны) применяется тепловой режим, при котором криогенная камера заполняется гелием, а формирование нейтронного спектра проходит в камерах пред- и пост-замедлителя [1]. При работе в режиме криогенного замедлителя криогенная камера заполняется рабочим веществом на весь цикл работы

реактора. Рабочий диапазон температуры замедлителей при работе в криогенном режиме может быть выбран пользователем в диапазоне от 22 К до 150 К (данные получены после ввода в эксплуатацию новой криогенной системы). Поэтапно вводимый в работу комплекс является уникальным в мире по принципу работы и единственным на территории Российской Федерации и странах СНГ высокопоточным источником холодных нейтронов. Применение нейтронов с длиной волны более 4 Å существенно расширяет возможности спектрометров и дифрактометров, увеличивает их разрешающую способность, повышает поток длинноволновых нейтронов на образце. К примеру на рисунке 2 показано, что при использовании зеркальных криволинейных нейтронотводов, как на дифрактометре ФДВР, при применении теплового замедлителя 300 К, поток теряется почти в 2 раза, в то время как от холодного замедлителя пропускается почти полностью.

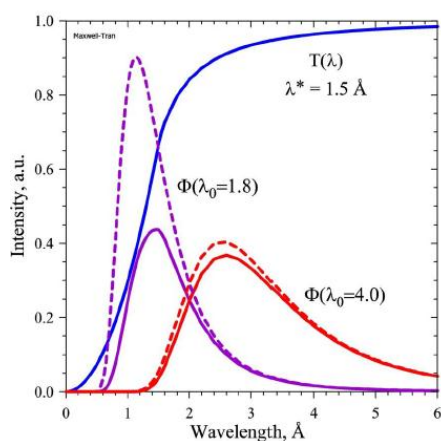


Рисунок 2. Максвелловское распределение потока нейтронов от теплового 300 К ($\Phi(\lambda_0 = 1.8)$) и холодного замедлителя 30 К ($\Phi(\lambda_0 = 4)$), где пунктирной линией показан полный поток, а сплошной поток на образце после прохождения изогнутого нейтронотода с пропускной способностью 1.5 Å.

Увеличение разрешающей способности позволяет регистрировать пики в длинноволновой области, которые в случае применения теплового замедлителя невозможно идентифицировать (рис. 3) [2].

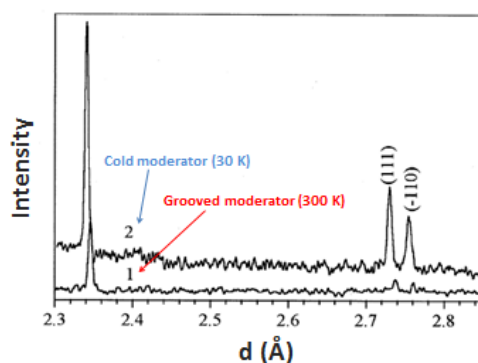


Рисунок 3. Спектр сложно структурного магнита $La_{0,83}Sr_{0,17}MnO_3$ ($V_c=115,7 \text{ \AA}^3$), ферримагнитные пики в направлении (111 и -110) различимы только в случае применения холодного замедлителя.

Таким образом, для сохранения привлекательности реактора ИБР-2 при проведении эффективных экспериментов мирового уровня в области нейтронной физики завершение работы по созданию комплекса криогенных замедлителей нейтронов является приоритетной и важной задачей. В рамках проекта «Создание комплекса криогенных замедлителей реактора ИБР-2» на 2017 – 2019 годы были заявлены следующие работы и исследования:

1. Разработать новый способ определения весового расхода газа
2. Разработать механический способ выгрузки шариков из замедлителя
3. Разработать проект, изготовить и установить КЗ 201 на штатное место
4. Провести доработку КЗ 203 с учетом результатов, полученных на КЗ 202
5. Провести исследования возможных примесей в смеси рабочего вещества, для работы на мощности не менее 12 суток
6. Разработать проект и ввести в эксплуатацию новую криогенную систему.

1. Определение возможности увеличения непрерывной работы замедлителя до 12 суток (160 МГр) в условиях рациональной нагрузки установки ИБР-2

Совместно с химическим факультетом МГУ были проведены исследования и изучались процессы, приводящие к изменению структуры рабочей смеси (мезитилен + метаксилон), приводящие к увеличению вязкости после облучения. Предварительные результаты говорят об образовании коротких олигомеров и радикалов. Стоит отметить, что вероятнее всего изменение вязкости происходит при непосредственном контакте рабочего вещества с воздухом. На основании результатов проведенных исследований могут быть предложены подходы к радиационной стабилизации исследуемых систем путем введения небольших количеств добавок конденсированных ароматических соединений и оптимизации состава системы. В качестве добавки, экспериментально, в смесь был добавлен нафталин, в результате чего удалось снизить вязкость рабочего вещества на 1,5 (с 8.5 до 7) отн. единиц (рис. 4). При этом доза облучения выросла с 107 МГр (что примерно соответствует 7.3 суток) до 120 МГр (8 суток) [3]. Негативным фактором применения добавки из нафталина явилось выпадение осадка, при вакуумировании системы от остаточных паров рабочей смеси, в виде белого плотного налета из мелкодисперсных частиц (мука). Очистка (вакуумированием) системы подачи шариков от этого налета заняла более двух недель. Такая длительность подготовки системы к новому циклу является недопустимой при существующем графике работы установки ИБР-2.

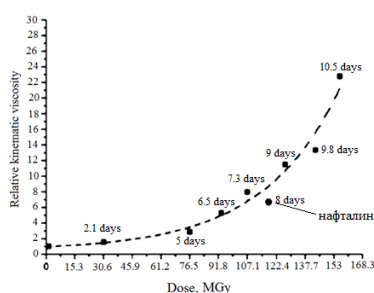


Рисунок 4. Зависимость вязкости рабочего вещества от добавок (нафталин) и дозы облучения ($100 \text{ MWt} \cdot \text{ч} = 30,6 \text{ МГр}$).

Учитывая малую эффективность вклада добавки в уменьшение вязкости рабочего вещества, но вместе с тем существенное усложнение технологического процесса от добавки нафталина в рабочее вещество отказались. Тем не менее, в результате опытной эксплуатации и поэтапного повышения радиационной нагрузки на рабочее вещество (мезитилена в смеси с метаксилолом) замедлителя путем увеличения длительности циклов работы установки ИБР-2 в режиме криогенного замедлителя в цикле № 2 (06 – 16 февраля) и № 4 (09 – 20 апреля) 2018 года были достигнуты параметры непрерывной работы замедлителя 272 часа на мощности 1.8 МВт (160 МГр или 11,3 суток), что сравнимо с циклом работы замедлителя в водяном режиме.

2. Разработка устройства определения массового расхода гелия в контуре загрузки шариков

За период опытной эксплуатации КЗ 202 были выяснено, что после 5 суток работы замедлителя в криогенном режиме в программе контроля перестаёт отображаться массовый расход гелия в системе 2-ого контура (контур загрузки). В настоящее время массовый расход измеряется путем сравнения полного и статического давления внутри трубопровода. Используемое устройство – трубка Пито-Прандтля, вторичный прибор преобразовывающий значение давления в электрический сигнал – мембранный датчик низкого дифференциального давления DXLdp, работающий в диапазоне от 0 – 100 Па. Наиболее вероятной причиной пропадания расхода следует считать закупорку отверстий трубки Пито-Прандтля мелкодисперсной пылью и осколками шариков рабочего вещества, образующихся в результате разрушения в процессе загрузки и под облучением, при выходе радиолитического водорода.

Одним из вариантов решения проблемы является замена первичного прибора – трубки Пито-Прандтля на диафрагму (рис. 5) [4]. Диафрагма прошла испытания на лабораторном стенде при комнатной температуре. В качестве рабочего вещества использовался азот, который при комнатной температуре схож, по свойствам, с гелием при температуре 20 К. Исследования показали хорошую сходимость с показаниями трубки Пито-Прандтля. Полномасштабные испытания диафрагмы на стенде КЗ 201 при криогенных температурах намечены на апрель – май 2019 года.

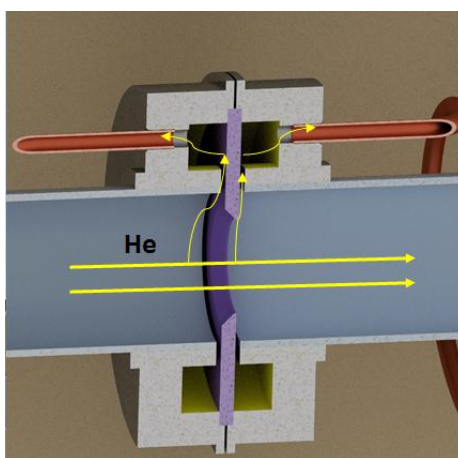


Рисунок 5. Диафрагма для измерения массового расхода гелия в системе КЗ

3. Криогенное фланцевое разъемное соединение для шарикового замедлителя

Учитывая, что помещение обслуживания комбинированного замедлителя (далее по тексту КЗ 201) «центрального» направления (пучки 1, 4, 5, 6, 9) расположена ниже активной зоны реактора, а сам замедлитель имеет возможность перегрузки (замены), одной из важных задач определяющих успех создания КЗ 201 было создание специальных криогенных разъемных соединений, позволяющих быстро и без применения механических машин и сварочных работ провести монтаж (демонтаж) инженерных трубопроводов замедлителя с внешними коммуникациями. Опираясь на данные, полученные при лабораторных и полномасштабных исследованиях движения шарика в трубе, были сформулированы требования к конструкции соединения:

- соединение должно быть легкоразъемным, без применения механических машин и механизмов;
- отсутствие преграды или ступеньки в месте стыковки по ходу движения шарика;
- отсутствие гибких частей (сильфонных узлов);
- соединение должно быть компактным и укладываться в размеры защитного блока в разобранном виде;
- соединение должно быть прочным и герметичным при циклическом изменении температур от 20 К до 300 К;
- локальный теплоприток в месте стыковки не допускается.

Высокие требования к гладкости поверхности трубопровода в месте стыковки, отсутствию локального теплопритока не позволяли использовать уже известные «штыковые» или байонетные соединения. Учитывая предъявляемые требования к соединению было разработано, испытано и запатентовано уникальное криогенное разъемное фланцевое соединение для шарикового замедлителя (рис. 6). Испытания разъемных соединений проходили на криогенных трубопроводах системы охлаждения. Они были использованы для соединения всех криогенных трубопроводов системы охлаждения комплекса замедлителей ИБР-2. При проведении проверки было установлено, что сборка-разборка участков трубопроводов с применением разъемных соединений описанной конструкции в зависимости от сложности участка трубопровода занимает от 5 до 20 минут. Испытания соединения на прочность и герметичность проводилось при температуре от 10 К до 300 К с циклическим изменением температуры.

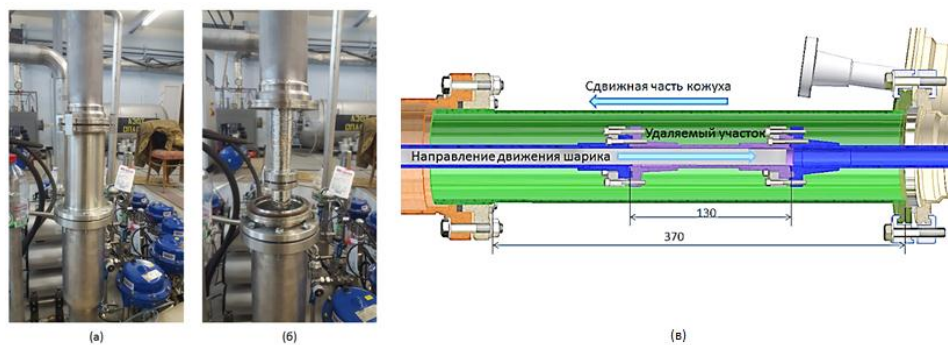


Рисунок 6. Криогенное фланцевое разъемное соединение шарикового замедлителя, где а – фотография соединения в собранном виде, б – разобранном виде, в – модель соединения в разрезе.

В результате испытаний запотеваний, не плотностей, натеканий во внутренний объем и потерь вакуума отмечено не было [5].

4. Разработка и установка КЗ 201 на штатное место

Комбинированный замедлитель нейтронов с проектным номером ИРМ.2М.201.000 (далее по тексту КЗ 201), разработан в ЛНФ ОИЯИ совместно с АО НИКИЭТ. Замедлитель предназначен для формирования оптимального спектра нейтронного потока в направлении выведенных, экспериментальных пучков 1, 4, 5, 6, 9 установки ИБР-2. Замедлитель КЗ 201 представляет собой сборку из защитного блока, юстировочной опоры, блока инженерных коммуникаций и головной части, формирующей поток нейтронов (рис. 7б). На рисунке 7а представлен разрез головной части замедлителя. Из рисунка видно, что головная часть состоит из (от стационарного отражателя) засыпки карбида бора толщиной 10 мм., водяного предзамедлителя толщиной 40 мм., вакуумной полости в которой расположена криогенная камера толщиной 40 мм и фокусирующей рамки постзамедлителя 100 мм [6].

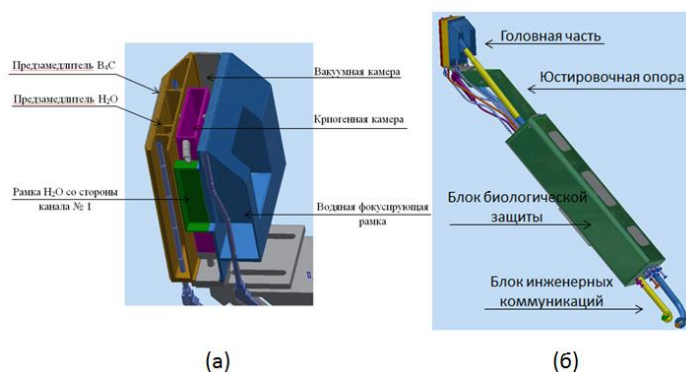


Рисунок 7. Комбинированный замедлитель нейтронов установки ИБР-2 для пучков 1, 4, 5, 6, 9, где а – разрез $\frac{3}{4}$ головной части, б – рабочая модель замедлителя.

В июне – июле 2018 года была проведена первая примерка замедлителя на штатном месте в рабочем положении. На головную часть были установлены маяки, а замедлитель поднят в рабочее положение (рис. 8).

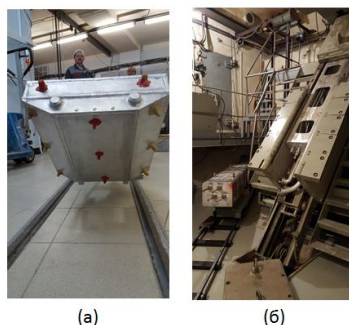


Рисунок 8. Примерка замедлителя КЗ 201 в рабочем положении, где а – головная часть перед примеркой, с установленными маркерами; б – подъем замедлителя в рабочее положение.

В результате примерки головную часть на юстировочной опоре установили таким образом, что фронтальная часть замедлителя расположена в 5 мм от стационарного отражателя ИБР-2. После примерки замедлитель был передан на завод изготовитель в «НПО АТОМ», где был произведен окончательных монтаж инженерных коммуникаций между защитным блоком и головной частью замедлителя. В декабре 2018 – январе 2019 годы была произведена вторая примерка замедлителя на штатном месте, в ходе которой были выявлены отклонения размеров и соосности отдельных частей замедлителя с размерами указанными в рабочих чертежах. С февраля по май 2019 года была проведена доработка замедлителя с учетом недостатков выявленных при приемке и примерках замедлителя. В соответствии с планом работ группы № 2 МТО ЛНФ на 2019 года, ожидаемый срок начала эксплуатации комбинированного замедлителя нейтронов КЗ 201 для пучков 1, 4, 5, 6, 9 установки ИБР-2 в опытном режиме назначен на осень 2019 года.

5. Новая криогенная система для комплекса замедлителей установки ИБР-2

Система охлаждения комбинированных замедлителей нейтронов установки ИБР-2 включает в себя:

- водяную (300 К);
- криогенную 20 К – 150 К.

Водяная система охлаждения предназначена для теплосъема и термолиза нейтронного потока до тепловой области. В этой системе в качестве рабочего вещества используется дистиллированная вода постоянно циркулирующая в камерах пред- и пост-замедлителя. Система выполнена таким образом, что в случае разгерметизации и опорожнения подводящих трубопроводов, камеры замедлителя останутся заполненными водой.

В рамках проекта темы 1105 на 2017 – 2019 гг. была проведена глубокая модернизация криогенной части системы охлаждения. Как известно температурная составляющая сильно влияет на выход холодных нейтронов, чем ниже температура рабочего вещества, тем больше длинноволновых нейтронов выходит с поверхности замедлителя, пик нейтронного потока смещается в область больших длин волн (рис. 9) (ссылка Балагуров).

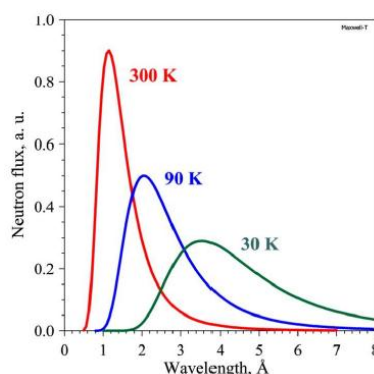


Рисунок 9. Распределение нейтронного потока в зависимости от температуры замедляющего вещества.

Необходимость модернизации была выяснена в процессе опытной эксплуатации КЗ 202 и экспериментов по одновременному захолаживанию замедлителя КЗ 202 и полномасштабного стенда КЗ 201. В результате этой работы были определены минимальные температуры в камере замедлителя при охлаждении одного замедлителя (КЗ 202) и двух одновременно (КЗ 202 и стенда КЗ 201), которые составили 32 К и 60 К соответственно. Проектная температура замедляющего вещества в камере должна была быть 20 К. Снижение температуры рабочего вещества до проектных значений, могло дать выигрыш в потоке холодных нейтронов с поверхности замедлителя до двух раз. Кроме того, учитывая, что на поверхность замедлителя смотрят несколько экспериментальных пучков, проводящих разные исследования, оптимальный поток нейтронов для каждого инструмента будет своим. Используемое в качестве замедлителя рабочее вещество (смесь мезитилена с метаксилолом) может работать в диапазоне температуры от 20 К до 150 К, что позволяет смещать пик нейтронного потока в область больших или меньших длин волн, делая замедлитель гибким и подготовленным для проведения широкого круга экспериментов. Кроме того, следовало учесть, что при работе двух замедлителей одновременно было необходимо обеспечить в каждом из замедлителей свой индивидуальный температурный режим, наиболее подходящий для спектрометров и дифрактометров на каждом исследовательском пучке. Таким образом, для новой криогенной системы были сформулированы следующие требования:

- стабильные температуры в системе, без скачков и перепадов (стабильность спектра нейтронного потока, режимы загрузки без слипания и заторов);
- возможность менять рабочую температуру в камере замедлителя от 20 К до 150 К (позволяет смещать пик спектра нейтронного потока в область больших или меньших длин волн, что сделает источник «гибким» и легко адаптируемым к тем или иным исследованиям);
- индивидуальные температуры в каждом из замедлителей.

Для выполнения требований, сформулированных выше, был разработана проект новой криогенной системы, включающий в себя две рефрижераторные установки мощностью 1200 Вт при 10 К и 700 Вт при 15 К, объединенные коллектором, распределяющем потоки охлаждающего гелия, а так же позволяющего резервировать установки в случае выхода одной из них в ремонт или сервисное обслуживание (рис. 10, 11).

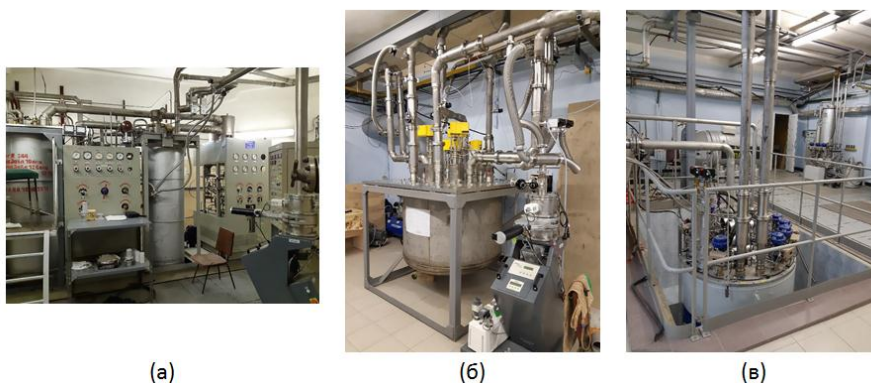


Рисунок 10. Общий вид оборудования, где а – КГУ 700, б – коллектор, в – КГУ 1200

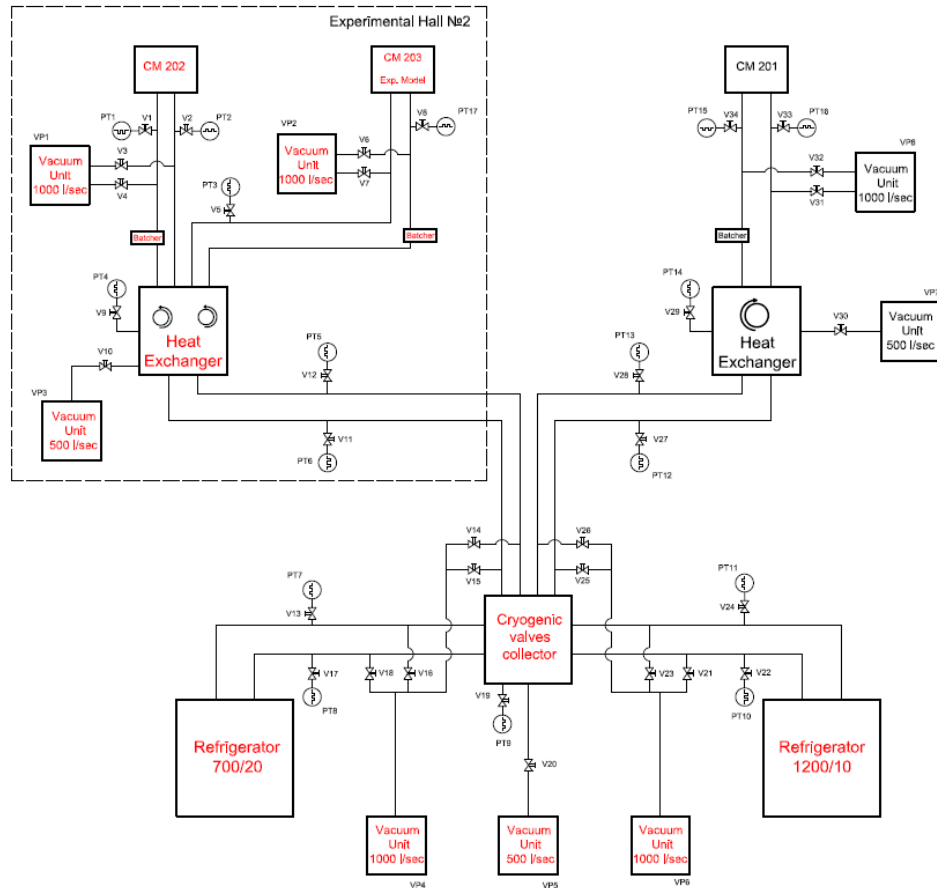


Рисунок 11. Принципиальная схема новой криогенной системы.

В июле 2017 года в рамках темы 1105 на 2017 – 2019 годы по проекту «Создание комплекса криогенных замедлителей реактора ИБР-2» были проведены первые пуски новой криогенной системы охлаждения «на себя», на замедлитель КЗ 202, на стенд КЗ 201 в различных режимах. В результате этих пусков были подобраны оптимальные параметры работы системы, проведено согласование и адаптация алгоритма работы отдельного оборудования для работы комплекса как единого целого. Разработка новой криогенной системы затронула не только приобретение, монтаж и наладку вакуумного и криогенного оборудования, но и разработку, внедрение нового программного обеспечения по контролю за вакуумом, термометрией, контролю и управлению криогенными клапанами, размещенными в коллекторе. По итогам экспериментов удалось установить, что при работе на новой криогенной системе (одной КГУ 1200/10) удалось снизить температуру в камере КЗ 202 с 32 К до 22 К, а при работе на 2 направления (КЗ 202 и стенд КЗ 201) с 60 К до 22 К. Кроме того появилась возможность плавно менять температуру в камерах замедлителей от 20 К до 150 К индивидуально. Объединение двух рефрижераторов через коллектор дает возможность резервировать установки и в случае поломки или вывода одного из рефрижераторов в ремонт сохраняется возможность работы комплекса в криогенном режиме без нарушения графика работы установки ИБР-2. В ноябре 2017 года замедлитель КЗ 202 отработал первый цикл с новой криогенной системой в тестовом режиме. В результате опытной эксплуатации КЗ 202 на физический эксперимент с новой

криогенной системой охлаждения с ноября 2017 года по апрель 2018 года был проведен цикл экспериментов нацеленный на выявление улучшений, полученных при снижении температуры замедляющего вещества для физических установок. Эксперименты по определению зависимости нейтронного спектра от температуры, а также оценка фактора выигрыша нейтронного потока при эксплуатации новой криогенной системы были проведены на спектрометре поляризованных нейтронов РЕМУР (пучок № 8) (рис. 12 (а)), времяпролетном спектрометре с обратной геометрией НЕРА (пучок № 7с) (рис. 12 (б)). Из рисунков видно, что понижение температуры на 10 К (с 32 К до 22 К) дало фактор выигрыша в потоке холодных нейтронов до 22% в области 7 Å на обеих установках. Сравнение проводилось с предзамедлителем, когда криогенная камера пустая. Далее, камера заполнялась замедляющим веществом, и проводились измерения спектра при разных температурах. Если захолаживать и работать на 2 направления одновременно (КЗ 202 и КЗ 201), то новая криогенная система с КГУ 1200 по сравнению с КГУ 700 даст понижение температуры с 60 К в камерах замедлителей до 22 К. Выигрыш в области холодных нейтронов составит до 200% (рис. 12 (в)). Полученные результаты показывают существенное повышение нейтронного потока за счет снижения температуры и оптимизации работы криогенной системы, что в свою очередь позволяет существенно сократить время проведения экспериментов и расширяет потенциал физических установок (разрешающая способность, методика эксперимента и т.д.).

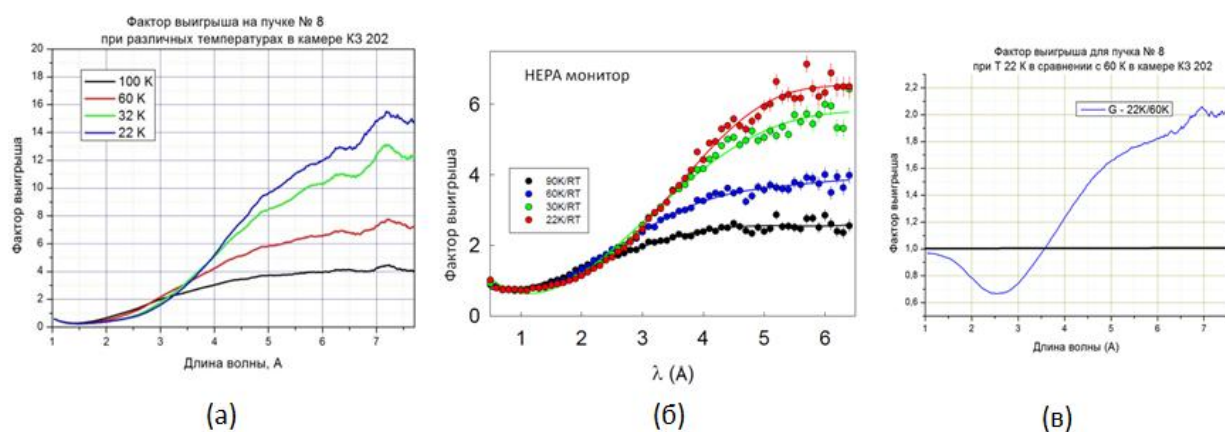


Рисунок 12. Зависимость спектра нейтронного потока от температуры замедляющего вещества внутри криогенной камеры КЗ 202 где, а – фактор выигрыша на спектрометре РЕМУР при различной температуре, б – на спектрометре НЕРА, в – выигрыш при снижении температуры с 60 К до 22 К на спектрометре РЕМУР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках темы 04-4-1105-2017/2019 «Развитие реактора ИБР-2 с комплексом криогенных замедлителей» по проекту «Создание комплекса криогенных замедлителей реактора ИБР-2» выполнялась работа по исследованию и уточнению нейтронно-физических параметров криогенного замедлителя КЗ 202, работающего в режиме опытной эксплуатации на физический эксперимент, проводилась глубокая модернизация криогенной части системы охлаждения комплекса замедлителей, разрабатывалось и обновлялось программное обеспечение визуализации и управления основными параметрами работы замедлителей и оптимизировалась работа всего комплекса с учетом

вновь вводимого оборудования в эксплуатацию. В рамках проекта был разработан, изготовлен и применен на штатное рабочее место замедлитель нейтронов «центрального» направления (КЗ 201) для пучков 1, 4, 5, 6, 9. Для этого замедлителя разработано, прошло испытания и запатентовано новое криогенное фланцевое соединения, не вносящее коррективов в движение шариков внутри транспортного трубопровода. Такое соединение не имеет локального теплопритока, просто в изготовлении и эксплуатации. Соединение позволяет оперативно, без применения механических угловых машин и сварочных работ провести монтаж (демонтаж) замедлителя или его замену на другой замедлитель, что в свою очередь, во-первых существенно расширяет возможности экспериментальных установок (можно подобрать замедлитель с оптимальной конфигурацией и потоком для конкретного эксперимента), во-вторых сокращается время замены замедлителей, а следовательно и нахождение обслуживающего персонала в зоне спецдопуска (снижается действие ионизирующего излучения на персонал). Новая, разработанная криогенная система позволяет получить индивидуальные температуры в каждом замедлителе в диапазоне от 22 К до 150 К. Снижение температуры в камере КЗ 202 на 10 К дало выигрыш в потоке холодных нейтронов на 22% (измерения проводились на установке РЕМУР и НЕРА). Единственной работой, которую не удалось выполнить в рамках проекта в 2017-2019 годах, стала разработка устройства механической выгрузки рабочего вещества из камеры замедлителя. Эта работа считается перспективной, но для её реализации требуются большие затраты рабочего времени персонала, занятого на эксплуатации оборудования КЗ 202 и вводе в опытную эксплуатацию КЗ 201. Авторы проекта отмечают, что создание холодного замедлителя с постоянно или поэтапно сменяемым веществом в камере является важной задачей и при успешной реализации позволит получить «вечный» замедлитель и предлагают перенести разработку такой системы на 2020 – 2023 годы. В таблице 1 сведены заявленные, выполненные и не реализованные работы в рамках проекта «Создание комплекса криогенных замедлителей реактора ИБР-2» темы 1105 на 2017 – 2019 гг.

Таблица № 1. Основные работы их статус и результаты в рамках проекта на 2017 – 2019 гг.

Создание комплекса криогенных замедлителей реактора ИБР-2 в рамках темы 1105 на 2017 – 2019 гг.			
№ п/п	Название работы	Статус	Основные результаты
1	Определение возможности увеличения непрерывной работы замедлителя до 12 суток (160 МГр) в условиях рациональной нагрузки установки ИБР-2	Выполнено	Проведено исследование влияние добавки нафталина на итоговую вязкость вещества. Нафталин несущественно снижает образование длинных олигомеров и снижает вязкость. При откачки системы от паров и остатков рабочего вещества нафталин выпадает в виде белого мелкодисперсного, трудно удаляемого осадка. Применение добавки в качестве нафталина существенно усложняет технологический процесс подготовки системы к циклу работы. Поэтапным плановым увеличением работы криогенного замедлителя, удалось достигнуть 12 суток (160 МГр) работы КЗ

			на физический эксперимент без полимеризации рабочего вещества в камере замедлителя, а деградация нейтронного потока составила не более 10% к концу цикла.
2	Разработка устройства определения массового расхода гелия в контуре загрузки шариков.	В процессе испытаний	В качестве альтернативы трубки Пито-Прандтля, предлагается использовать диафрагму. Успешно проведены испытания диафрагмы на лабораторных стендах при комнатной температуре. Испытания на стенде КЗ 201 при криогенных температурах намечено на апрель – май 2019 гг.
3	Криогенное фланцевое разъемное соединение для шарикового замедлителя.	Выполнено	Испытано и внедрено
4	Разработка и установка КЗ 201 на штатное место	Выполнено	Разработан и создан комбинированный замедлитель КЗ 201 для пучков 1, 4, 5, 6, 9 ИЯУ ИБР-2. Планируемая дата ввода в опытную эксплуатацию осень 2019 года.
5	Новая криогенная система для комплекса замедлителей установки ИБР-2	Выполнено	Разработан проект, проведен монтаж и введена в опытную эксплуатацию новая криогенная система, позволяющая каждому из замедлителей работать в индивидуальном температурном режиме от 22 К до 150 К. Модернизацией системы в целом (опоры, тепловые мосты и т.д.) удалось снизить температуру на 10 К (с 32 К до 22 К) в камерах КЗ и получить выигрыш в потоке холодных нейтронов до 22 % (исследования проводились на спектрометрах РЕМУР и НЕРА ИБР-2)
6	Разработка устройства механического удаления шариков из камеры замедлителя	Не выполнено	Перенос разработки на 2020 – 2023 гг.
7	Доработка КЗ 203 (пучки 2, 3) с учетом параметров, полученных на КЗ 202	Не выполнено	Разработка и создание КЗ 203 задержано в связи с отсутствием данных по необходимому спектру на пучке № 2. Сама разработка системы загрузки шариков не представляет сложностей, т.к. есть все данные по параметрам работы систем для загрузки шариков без заторов и существенной дефрагментации для КЗ 202, КЗ 201, которые можно применить на КЗ 203

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Anan'ev V. Current status of development advanced pelletized cold moderators for the IBR-2M research reactor / V. Anan'ev [et al.] // Physics of particles and nuclei, letters. – 2013. – Vol. 10. – №2. – P. 230-235.
2. Балагуров А.М. и др. Дифракционные исследования на реакторе ИБР-2 с использованием холодного источника нейтронов. Сообщения ОИЯИ РЗ-2000-220, Дубна 2000 г.
3. Холодный замедлитель нейтронов на модернизированном реакторе ИБР-2 / В.Д. Ананьев, А.А. Беляков, М.В. Булавин, А.Е. Верхоглядов, С.А. Куликов, К.А. Мухин, Е.П. Шабалин // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, №2. – С. 131-134.
4. Монахов В. И. Измерение расхода и количества жидкости, газа и пара, М.—Л., Госэнергоиздат, 1962, 128 с. с черт.
5. Патент № 2492538 Российская Федерация, МПК G 21 К 1/00. Криогенное фланцевое разъемное соединение для шарикового холодного замедлителя нейтронов [Текст] / К.А. Мухин в соавторстве с А.А. Кустовым; заявитель и патентообладатель Объединенный институт ядерных исследований. – Оpubл. RU Бюл. № 11, 16.04.2018. – С. 12.
6. Мухин К.А. Оптимизация и сравнение вариантов головной части замедлителя «центрального» направления реактора ИБР-2 / Мухин К.А., Рогов А.Д. // Письма в ЭЧАЯ, 2018. Т 15, № 2 (214). С. 152-161.