

Объединенный институт ядерных исследований

*На правах рукописи*

Мухин Константин Александрович

**Источник холодных нейтронов реактора ИБР-2 на основе дисперсного мезитилена с системой охлаждения**

01.04.01. – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Дубна 2019

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка  
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна

Научный руководитель:

**Агапов Николай Николаевич**, доктор технических наук, главный инженер  
ЛФВЭ ОИЯИ

Официальные оппоненты:

**Сидоркин Станислав Федорович**, кандидат физико-математических наук,  
и.о. зав. сектора импульсных источников нейтронов Лаборатории  
нейтронных исследований ФГБУН «Институт ядерных исследований» РАН

**Григорьев Сергей Валентинович**, доктор физико-математических наук,  
профессор, зам. директора по международной деятельности ФГБУ  
«Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» НИЦ  
«Курчатовский институт»

Ведущая организация:

Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и  
конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала» (АО  
«НИКИЭТ») г. Москва

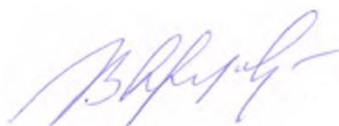
Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 720.001.02 Лаборатории физики высоких энергий  
имени В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных  
исследований.

Адрес: ОИЯИ, ул. Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ и на сайте  
[http://www.info.jinr.ru/dissertation/Disser\\_Mukhin.pdf](http://www.info.jinr.ru/dissertation/Disser_Mukhin.pdf)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного  
совета, кандидат физ.-мат. наук  
старший научный сотрудник



В.А. Арефьев

### **Актуальность тематики.**

Нейтронные исследования позволяют детально изучать структуру веществ, фазовые переходы, изменения кристаллической решетки или атомной структуры под влиянием экстремальных внешних условий (высокая или низкая температура, давление и т.д.). Полученные данные о структуре и свойствах новых материалов определяют их применимость в той или иной области производства. Для изучения веществ в конденсированном состоянии необходимо иметь энергию нейтронного потока сравнимую с энергией колебания атомов, только в этом случае можно получить достоверные данные. Снижение энергии нейтронов от первичных источников (реакторов или ускорителей на основе реакции spallation) происходит при их многократном столкновении с атомами рабочего вещества, в специальных устройствах – замедлителях. Они являются промежуточным звеном между первичным высокоинтенсивным источником нейтронов и исследовательской установкой – спектрометром. Формирование определенного спектра нейтронного потока на образце является основной задачей разработчиков замедлителей. Получение нейтронов оптимальных энергий существенно расширяет возможности спектрометров и дифрактометров (увеличивается разрешающая способность, сокращается время набора статистики, уменьшается статистическая погрешность). 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. [2].

Получение «тепловых» нейтронов не представляет особых сложностей. Обычно для термализации нейтронного потока до тепловой области в качестве замедляющего вещества применяют дистиллированную воду при комнатной температуре, прокачиваемую через камеру замедлителя [3]. В свою очередь создание источника «холодных» нейтронов представляет собой сложную инженерно-физическую задачу, включающую в себя индивидуальные технические решения, компьютерное моделирование геометрической формы замедлителя, подбор замедляющего вещества. Кроме

того, учитываются радиационные поля первичного источника, расположение физического оборудования и установок вокруг активной зоны или мишени. Выход холодных нейтронов зависит не только от вещества замедлителя, но и от его температуры: чем она ниже, тем больше длинноволновых нейтронов и наоборот. Таким образом, меняя температурную составляющую, можно смещать пик нейтронного потока в область больших или меньших длин волн. Такая возможность делает источник более гибким и адаптируемым под конкретные эксперименты. Оптимальный диапазон температур источника составляет от 20 К до 100 К. Для достижения таких температур применяются криогенные системы, надежность и гибкость которых во многом определяет успех и привлекательность источника среди экспериментаторов. В зависимости от принципа работы, формы и инженерной инфраструктуры замедлителей, тепловые нагрузки на систему охлаждения бывают от сотен киловатт до нескольких мегаватт. Расчет и оптимизация работы рефрижераторных установок, их согласование с другим криогенным оборудованием является еще одной сложной инженерно-технической задачей, решаемой для каждого отдельного источника индивидуально.

В настоящее время в мире действует 15 источников холодных нейтронов (2 в Германии, 1 в Венгрии, 4 в США, 1 во Франции, 3 в Англии, 2 в Японии, 1 в Австралии, 1 в России). На сегодняшний день в России только на импульсном реакторе ИБР-2 введена в опытную эксплуатацию первая очередь источника холодных нейтронов. Для расширения экспериментальных возможностей физических установок реактора **целью диссертационной работы является создание комбинированного замедлителя нейтронов реактора ИБР-2 на основе дисперсного мезитилена в направлении экспериментальных пучков 1, 4, 5, 6, 9 с многоконтурной системой охлаждения, обеспечивающей гибкий и независимый температурный режим в камерах замедлителей.**

**Задачи**, решаемые в рамках достижения цели.

1. Разработать и сконструировать головную часть замедлителя КЗ 201, оптимальную с точки зрения нейтронно-физических характеристик, технологической возможности изготовления и безопасной эксплуатации.
2. Разработать устройства коммутации замедлителя КЗ 201 с инженерными коммуникациями систем охлаждения и транспортировки шариков.
3. Изучить и экспериментально доказать возможность применения метода пневмотранспортировки для доставки дисперсного мезитилена в камеру замедлителя.

4. Разработать и оптимизировать работу системы охлаждения комплекса замедлителей для достижения проектных температурных параметров 20 К в камерах холодных замедлителей, а также предусмотреть возможность регулирования независимого температурного режима от 20 К до 150 К в каждом из направлений.

#### **Научная новизна и практическая значимость полученных результатов.**

- Впервые разработан комбинированный замедлитель нейтронов на основе дисперсного мезитилена в направлении 1, 4, 5, 6, 9 экспериментальных пучков реактора ИБР-2, сочетающий в себе водяные камеры для формирования спектра тепловых нейтронов и криогенную камеру для формирования спектра холодных нейтронов. Такой замедлитель обеспечивает непрерывный стабильный режим работы в течение 11 суток и повышает выигрыш в области длинноволновых нейтронов в 9 раз, а в тепловой области – в 1,4 раза.
- На реакторе ИБР-2 внедрена многоконтурная система охлаждения комбинированных замедлителей, позволяющая получить гибкий и независимый температурный режим в каждом замедлителе в одно и то же время в зависимости от потребности экспериментаторов. Система предусматривает резервирование рефрижераторных установок в случае выхода одной из них из строя, на время ППР и т.д. Благодаря новой системе охлаждения удалось снизить температуру в камерах замедлителей до 22 К (на 10 К при работе в одном направлении и на 38 К при работе на 2 направления одновременно). В результате этого нейтронный поток в области нейтронов с длиной волны 7 Å вырос на 22% и на 200% соответственно.
- Для соединения замедлителя с инженерными системами охлаждения и транспортировки шариков применено новое запатентованное изобретение – криогенное фланцевое разъемное соединение с минимальной ступенькой (снижение вероятности дефрагментации шариков), единым вакуумным кожухом и отсутствием локального теплового нагрева в месте стыка. Соединение имеет компактные размеры, просто в эксплуатации и не требует специального оборудования для изготовления.

- Получены экспериментальные данные позволяющие загружать шарики в камеру замедлителя по трубопроводу сложной геометрии с критическим участком подъема (поворот  $100^{\circ}$  перед участком подъема длиной 4 метра и углом  $52^{\circ}$ ) при криогенных температурах. Разработана методика и подобраны оптимальные параметры работы устройств и характеристик среды пневмосистемы с наглядной демонстрацией загрузки шариков без существенной дефрагментации, слипания и заторов. Полученные данные можно коррелировать на любой трубопровод более, геометрически простой конфигурации с тем же диаметром внутреннего трубопровода.

### **Положения, выносимые на защиту**

- 1. На полномасштабном стенде комбинированного замедлителя центрального направления проведено моделирование и доказана возможность применения метода пневмотранспортировки шариков в камеру замедлителя в направлении 1, 4, 5, 6, 9 экспериментальных пучков, определены оптимальные физико-технические параметры работы системы в режиме загрузки без существенной дефрагментации и слипания шариков (массовый расход гелия в трубе от 1,6 до 3 г/с, температура системы в режиме загрузки 81 – 100 К, скорость подачи шариков из дозатора в трубопровод 1,5 – 1,8 шт/сек., среднее время загрузки камеры 5 – 6 часов).**
- 2. Разработана и создана система охлаждения** комплекса замедлителей реактора ИБР-2 с возможностью работы в широком диапазоне температур (от 20 К до 150 К), обеспечивающая индивидуальные температуры в каждом из замедлителей. Это позволяет:
  - снизить температуры в камерах замедлителей с 32 К до 22 К при работе в одном направлении и с 60 К до 22 К при работе двух замедлителей одновременно. Снижение температуры до 22 К увеличивает поток холодных нейтронов на 22% и на 200% соответственно;
  - появилась возможность плавного изменения температур в камерах замедлителей от 20 К до 150 К (смещение пика нейтронного спектра в область длинных или коротких волн);
  - обеспечить индивидуальные независимые температуры в криогенных камерах комбинированных замедлителей КЗ 201, КЗ 202

(возможность в одном и том же цикле работы реактора получить индивидуальный спектр нейтронов на каждом инструменте в зависимости от проводимых исследований);

- повысить надежность работы системы охлаждения источника за счет резервирования и объединения криогенных гелиевых установок в единую систему (возможность работы на каждое направление замедлителей как отдельно, так и одновременно любой из криогенных установок, а при выходе из строя одной из КГУ не нарушать графика работы ИБР-2 в режиме криогенного замедлителя).

**3. Разработано и внедрено специальное криогенное разъемное соединение** коаксиальных холодных трубопроводов с единой вакуумной рубашкой, отсутствием теплового моста и локального теплопритока, ступеньки или преграды в месте стыковки по ходу движения шариков и среды, не вносящее коррективов в траекторию движения шариков. Основными отличительными особенностями такого устройства являются:

- отсутствие ступеньки исключает дополнительный барьер перед подъемным участком, снижает вероятность дефрагментации шариков и не вносит коррективы в траекторию движения шарика;
- отсутствие теплового моста в месте стыка снижает теплоприток, исключает локальный нагрев в зоне коммутации, обеспечивает равномерный теплоприток по всему транспортному трубопроводу, исключая вероятность затора и неравномерность движения вследствие прилипания шариков и мезитиленовой пыли в месте стыковки;
- позволяет проводить перегрузку замедлителя для проведения ремонта, плановой или аварийной замены в короткое время без применения механических и сварочных работ, что значительно уменьшает действие ионизирующего излучения на обслуживающий и ремонтный персонал.

### **Личное участие автора**

Все результаты, приведенные в работе, получены самим автором или при его непосредственном участии и руководстве. Автор участвовал в постановке задач, предлагал и реализовывал решения, приведенные в диссертации, разрабатывал и создавал экспериментальные прототипы и экспериментальные установки, ставил цели и задачи экспериментов,

обрабатывал и анализировал результаты, формулировал научные выводы, готовил материалы и статьи к публикациям. Автор принимал участие во всех технических и научных совещаниях. При его непосредственном участии создавались и испытывались технические устройства и системы замедлителя. Автор являлся представителем от ОИЯИ при работе с подрядными организациями, принимал решения, контролировал ход работ, являлся связующим звеном между различными подразделениями института и другими организациями, занятыми в реализации проекта. Автор лично проводил теплофизические расчеты головной части замедлителя КЗ 201, разрабатывал схему и подбирал вакуумное и криогенное оборудование комплекса, вводил в эксплуатацию криогенную установку КГУ 700/15, проводил переговоры, задавал режимы работы новой рефрижераторной установки мощностью 1200 Вт при 10 К на заводе в Linde AG Kryotechnik в Швейцарии. При непосредственном участии автора создавались полномасштабные стенды и реальные замедлители КЗ 201 и КЗ 202. Под непосредственным руководством автора на полномасштабном прототипе КЗ 201 проведены исследования и даны заключения (оптимальные параметры работы систем) о применимости загрузки шариков методом пневмотранспортировки в криогенную камеру замедлителя центрального направления (КЗ 201). Лично автором была разработана и модернизирована система охлаждения комплекса замедлителей реактора ИБР-2, обеспечивающая достаточные и более гибкие рамки возможности использования криогенных замедлителей, раскрывающая весь потенциал рабочего вещества, который может работать в широком диапазоне температур, что позволяет на каждом из инструментов получить свой уникальный пиковый спектр нейтронного потока. В рамках разработки системы охлаждения автор лично проводил теплофизические расчеты и экспериментально определял количества тепла, поступающего к системе, выбирал конфигурацию и материалы для опор в криогенных трубопроводах, рассчитывал и разрабатывал тепловые мосты криогенного коллектора. Автором было изобретено, внедрено и запатентовано криогенное разъемное фланцевое соединение для шарикового замедлителя нейтронов, не имеющее теплового моста и, как следствие, локального нагрева в месте стыка, существенной ступеньки, которая приводила бы к дефрагментации шариков и изменению траектории их движения.

### **Апробация диссертационной работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на более чем 15 российских и международных конференциях, семинарах, рабочих и



технических совещаниях. Ценность и значимость работы подтверждается получением автором дипломов, грамот и именных стипендий.

1. Диплом на открытом конкурсе молодежных инновационных проектов в области гуманитарных, естественных и технических наук в государствах – участниках СНГ 2010 г. Проект «Криогенный замедлитель – источник холодных нейтронов для изучения наноструктур».
2. Грамота за высокую научно-практическую ценность доклада на конференции молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» 2014 г. НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала. «Источник холодных нейтронов для реактора ИБР-2. Первые результаты».
3. Почетный Диплом о присуждении специальной премии имени члена-корреспондента АН СССР Федора Львовича Шапиро за работу «Комплекс криогенных замедлителей нейтронов реактора ИБР-2. Статус работ». 2015 г.
4. Диплом за лучшую научную работу VII Российской Молодежной Школы по радиохимии и ядерным технологиям. ФГУП ПО «МАЯК» 2016 г.

#### **Конференции, семинары, рабочие и технические совещания:**

2nd Joint seminar JINR – Romania on neutron physics for investigation of nuclei condensed matter and life science (JSJR). Baia Mare, Romania, 2007г.; конференция молодых ученых и специалистов ОМУС 2009. Дубна 2009г.; ICANS XIX (International Collaboration on Advanced Cold Neutron Sources) March 8-12, 2010 in Grindelwald, Switzerland; «Вакуумная техника и технологии - 2010» 15-17 июня 2010 г. НОУ ИДПО «АТОМПРОФ» г. Санкт-Петербург; 10-я международная «Байкальская Летняя Школа по Физике Элементарных Частиц и Астрофизике» 06-14 июля 2010 г. г. Иркутск; V European conference on neutron scattering (ECNS 2011), 17-22 июля 2011г. г. Прага; 46<sup>th</sup> crystallographic course at Ettore Majorana Centre, Erice, Italy, 2013; Towards Reality in Nanoscale Materials VII Levi, Finland 10-12.02.2014; ICANS XXI (International Collaboration of Advanced Cold Neutron Source), Mito, Japan 28.09-04.10.2014; международная научно-техническая конференция современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ, г. Санкт-Петербург (ИХиБТ НИУ ИТМО) 19-23/05/2015 г; конференция молодых ученых и специалистов «Нарва 2015», ПИЯФ г. Гатчина, 27/06-03/07/2015г.; VI European conference on neutron scattering (ECNS 2015), Saragosa, Spain 29/08-05/09/2015; International Atomic Energy Agency. Coordination meeting. Vienna 2016; Седьмая Российская молодежная

школа по радиохимии и ядерным технологиям. МГУ им. Ломоносова г. Кыштым 2016 г.; ICANS XXII (International Collaboration of Advanced Cold Neutron Source), Oxford 2017; Technical Meeting on Guidelines for the Establishment and Optimization of Cold Neutron Sources in Research Reactor and Accelerator Facilities, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna 2018.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. В конце каждой главы сформулированы выводы. Полный объем диссертации составляет 146 страниц машинописного текста, в том числе 72 рисунка, 6 таблиц, 80 библиографических ссылок.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** представлена актуальность проводимой работы, обзор мировых источников нейтронов и применяемых на них холодных замедлителей. Кратко представлены свойства нейтрона, наиболее типичные эксперименты и методики, в зависимости от его энергии. Рассматривается структура и геометрия источника холодных нейтронов для ИБР-2 с учетом расположения экспериментальных установок, биологической защиты и технологического оборудования вокруг активной зоны реактора. Показано, что для формирования оптимального спектра нейтронного потока на каждом из физических инструментов, источник должен включать в себя 3 комбинированных замедлителя нейтронов. Каждый замедлитель будет ориентирован на свои экспериментальные установки и иметь тепловые и криогенные камеры. В результате этого на поверхности замедлителя будет формироваться наиболее подходящий и индивидуальный спектр в направлении каждой отдельной физической установки. Показаны оптимальные характеристики нейтронного спектра для инструментов на пучках 1, 4, 5, 6, 9 реактора ИБР-2. По результатам анализа потребности пользователей ИБР-2 и актуальности проводимых исследований, сформулирована цель работы, поставлены задачи, представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность работы, полный список публикаций по теме диссертации, в которых отражены результаты проведенных исследований и технических разработок.

**В первой главе работы** представлен обзор источников холодных нейтронов в мире, а также наиболее часто используемых веществ

замедлителей. Проведен анализ их свойств, наиболее важными из которых являются:

- радиационная стойкость;
- большое сечение рассеяния;
- малое сечение поглощения.

Далее рассматриваются проблемы использования замедляющих веществ и обосновывается выбор мезитилено-метаксилоловой смеси в твердой фазе в форме шариков как наиболее оптимального вещества-замедлителя в качестве рабочего вещества холодного источника реактора ИБР-2.

Для замедления нейтронов до холодной области чаще всего используют жидкий водород, дейтерий, метан в жидкой или твердой фазе, мезитилен, а также другие углеводороды. Замедляясь в веществе, нейтрон при соударении, теряет энергию огромными порциями, возбуждая и расщепляя ядра. После того, как энергия нейтрона становится меньше энергии возбуждения атома, имеет место упругое рассеяние, при котором нейтрон расходует свою энергию на сообщение ядру скорости без изменения его внутреннего состояния. Упрощенно закон потери энергии нейтроном при каждом соударении описывается формулой:  $2A/(A+1)^2$ , где  $A$  – массовое число ядра замедляющего вещества. Из формулы видно, что замедление быстрее всего происходит на легких ядрах (водород, углерод и т.д.).

**Жидкий водород** – радиационно-стойкий материал, не подверженный изменению структуры при облучении. Жидкая фаза непрерывно прокачивается через камеру замедлителя при температуре 20 К, интенсивно снимая тепло. Опасность взрыва не позволяет устанавливать водород на импульсные источники, которые в 40 раз чувствительнее к изменению геометрии, чем стационарные.

Опыт применения замедлителя из **твердого метана** на источниках ИБР-2 и IPNS показали плохую стабильность работы, связанную с низкой радиационной стойкостью метана. Негативные факторы, проявляющиеся при облучении (реакции рекомбинации, накопление радиолитического водорода, накопление продуктов радиолиза с образованием длинных олигомеров), свойственны всем водородосодержащим веществам [2, 4].

Исследования, проведенные в ЛНФ на установках УРАМ и установке JESSICA на реакторе FRM-2 в Германии, показали, что в качестве замедляющего вещества в условиях ИБР-2 подойдет **мезитилен, смешанный в жидкой фазе с метаксилолом в пропорции 3 к 1**. В такой смеси не наблюдались реакции рекомбинации и спонтанного повышения температуры. К тому же, температура плавления смеси 227 К, а кипения

437 К, это позволяет использовать мезитилен в широком интервале температур. Изменение температуры в камере замедлителя позволяет смещать пик спектра нейтронного потока в область больших или меньших длин волн, делая источник «гибким» и многоцелевым. Смесь находится в твердой фазе в форме шариков диаметром 3,5 – 3,9 мм. Дисперсная загрузка криогенной камеры дает ряд преимуществ, основными из которых являются:

- общий объем у криогенной камеры и системы охлаждения, что позволяет не опасаться выходящего при отогреве накопленного радиолитического водорода, который просто распространяется в объем системы, значительно превышающий объем выделяющегося водорода. Вследствие этого, значимого повышения давления в системе не происходит, и можно не опасаться разрушения замедлителя;
- охлаждающий гелий прокачивается непосредственно через криогенную камеру. Это способствует более равномерному охлаждению замедляющего вещества во всем объеме, а значит, стабильному нейтронному потоку (градиент в камере по температуре не превышает 4 К).

В качестве принципиальной схемы работы была взята идея Гюнтера Бауэра о гранулированном замедлителе с постоянно сменяемым веществом в камере [5]. Из-за технологических сложностей полностью реализовать идею Бауэра не удалось.

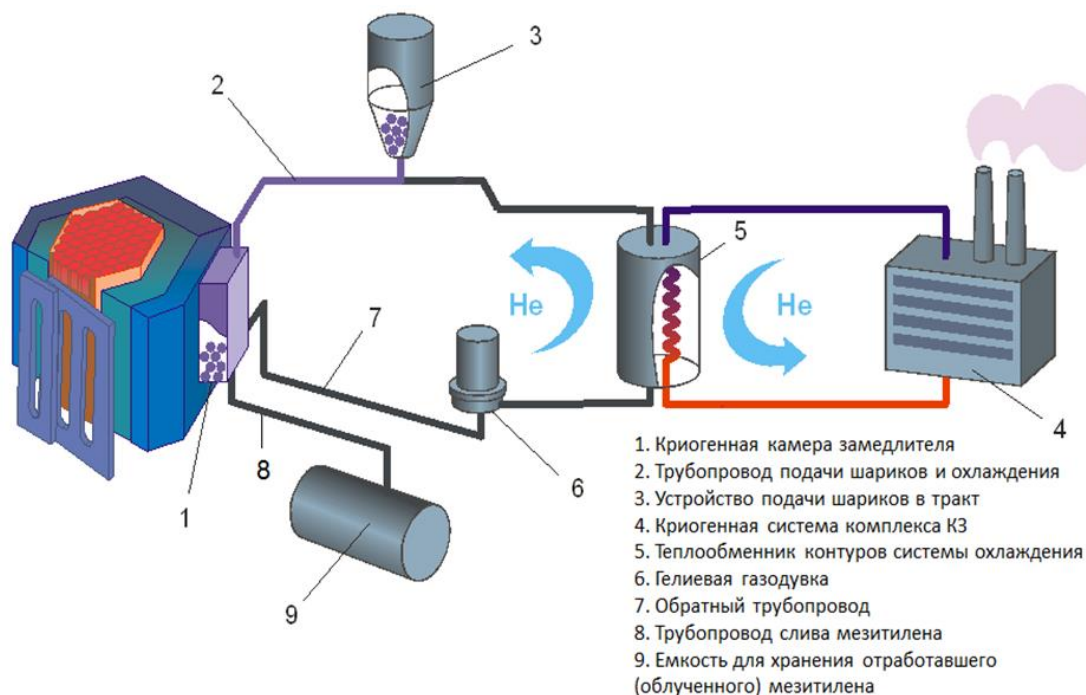


Рисунок 1. Принципиальная схема работы источника холодных нейтронов установки ИБР-2 на основе дисперсного мезитилена.

Она была адаптирована под ИБР-2 и отличается тем, что шарики под действием циркулирующего гелия загружаются в камеру одновременно на весь реакторный цикл, а после этого удаляются в жидкой фазе в специальный объем, система вакуумируется от остаточных паров мезитилена, и источник снова готов к работе (рис 1) [6].

**Вторая глава** посвящена созданию первой очереди дисперсного источника нейтронов на основе мезитилена для реактора ИБР-2, лабораторных и полномасштабных опытах по изучению движения единичного макроскопического сферического объекта в трубопроводе под действием гелия, созданию специального устройства генерации шариков и криогенного транспортного трубопровода с естественной компенсацией линейных размеров при изменении температур.

Первый вопрос, возникающий перед создателем дисперсного источника, – как массово изготавливать шарики правильной формы и калиброванного размера. Этот вопрос решен созданием устройства с капельницами и отдельными сотами для формирования шарика. Жидкая смесь заливается в верхнюю часть устройства, а формирование шарика происходит в индивидуальных сотах с жидким азотом. Шарики за счет сил поверхностного натяжения получают правильную форму. Для отсеивания шариков, выходящих за габариты 3,5 – 3,9 мм, в объеме устройства установлены 2 сетки с ячейками 4 мм (верхняя) и 3,4 мм (нижняя). Таким образом, внутри остаются шарики нужного размера.

Отсутствие теоретических и экспериментальных данных о таких свойствах твердого мезитилена, как адгезионные, трибологические и упруго-пластинчатые, не позволяли ответить на вопрос о возможности загрузки шарика по сложному трубопроводу в камеру. Кроме того, была не ясна траектория движения шарика в трубе при криогенных температурах, влияние шероховатости поверхности, зависимость скорости шарика от скорости и плотности транспортирующего газа.

Данные о распределении скоростей и траектория движения шарика в зависимости от скорости газа были получены на лабораторных стендах при комнатной температуре с использованием стеклянных шариков, а в качестве транспортного газа выступал азот при комнатной температуре, близкий по своим свойствам к гелию при 20 К. Опыты показали, что разброс скоростей может достигать 50%, а шероховатость или препятствие в трубе загрузки размером 200-300 микрон приводят к потере скорости до 20%. В связи с этим, определить точные параметры загрузки без полномасштабных испытаний при рабочих температурах не удастся. Для этих целей был

разработан полномасштабный стенд, повторяющий загрузочную трассу первого замедлителя КЗ 202. Принцип работы стенда не отличался от описанного в главе 1 и включал в себя устройства и оборудование, которое в последствии использовалось на реальном замедлителе. Стенд был подключен по временной схеме к криогенной установке ХГУ 500/10. Это позволяло работать при криогенных температурах, имитируя различные режимы работы замедлителя. На стенде также были испытаны специальные криогенные трубопроводы со скользящими опарами, без сильфонных узлов с естественной компенсацией изменения линейных размеров. Эти трубопроводы были разработаны для уменьшения количества стыков и шероховатостей внутри трубы. Итогами работы на стенде стало определение параметров, обеспечивающих стабильную загрузку замедляющего вещества в геометрии трубопровода КЗ 202.

В 2012 году первая очередь источника холодных нейтронов ИБР-2 (комбинированный замедлитель (КЗ 202) на основе дисперсного мезитилена) была введена в опытную эксплуатацию. В настоящее время этот замедлитель отработал более 3300 часов на мощности реактора 2 МВт. За это время нарушений, аварий или остановок зафиксировано не было. Эксперименты, проведенные на установках РЕМУР (пучок № 8) и СКАТ (пучок № 76) показали выигрыш в потоке холодных нейтронов более чем в 4 раза, а возможности установок существенно расширились. Фактор выигрыша в потоке холодных нейтронов на поверхности КЗ 202 по сравнению с водяным предзамедлителем вырос в 12 раз. При этом сохранилась возможность работать в режиме водяного замедлителя, получая повышенный поток тепловых нейтронов.

**В главе номер три** автор описывает этапы создания комбинированного замедлителя КЗ 201 в направлении экспериментальных пучков 1, 4, 5, 6, 9, начиная от выбора геометрии головной части замедлителя и заканчивая рабочими чертежами с привязкой к месту установки. Следует отметить, что создание такого замедлителя подразумевает несколько этапов (не обязательно в том порядке как описано в работе, часть этапов может идти параллельно):

- разработка оптимальной с точки зрения нейтронно-физических и технологических параметров модели головной части замедлителя;
- экспериментальное определение возможности применения технологии пневмозагрузки камеры замедлителя с оптимизацией параметров работы систем в различных режимах;

- разработка и применимость технологического и криогенного оборудования, учитывая геометрические особенности пневмосистемы и расположение замедлителя относительно зоны реактора;
- создание рабочего проекта и передача КД на предприятие – изготовитель, приемка, тестовая эксплуатация, разрешение Ростехнадзора, ввод в промышленную эксплуатацию.

Зная оптимальный спектр нейтронного потока для каждой из физических установок, чьи пучки смотрят на поверхность КЗ 201 (КОЛХИДА пучок № 1, ЮМО пучок № 4, ФДВР пучок № 5, ДНБ пучок № 6, РЕФЛЕКС пучок № 9) из 5 вариантов выбран первый вариант (рис. 2). Этот вариант сочетает в себе оптимальные нейтронно-физические свойства и технологическую возможность изготовления и эксплуатации. Головная часть замедлителя представляет собой «слоеный пирог», состоящий из (от зоны реактора) экранирующего слоя карбида бора толщиной 10 мм, водяного предзамедлителя толщиной 40 мм, вакуумной полости в которой располагается криогенная камера с засыпкой из мезитилено-метаксилоловой смеси толщиной 40 мм, фокусирующей рамки водяного постзамедлителя и водяную рамку со стороны первого пучка для формирования в его направлении спектра тепловых нейтронов.

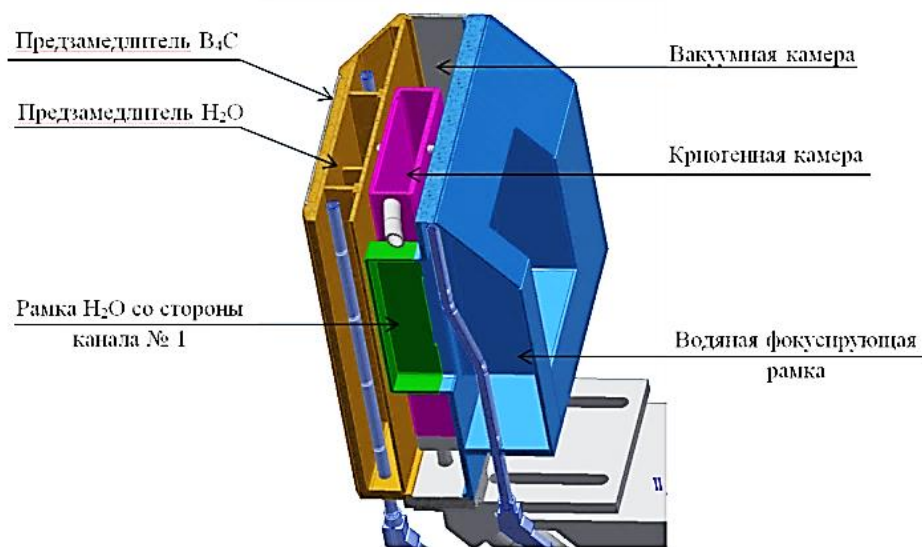


Рисунок 2. Головная часть комбинированного замедлителя в направлении экспериментальных пучков 1, 4, 5, 6, 9 в сечении 3/4 сбоку и сверху.

Такая конфигурация головной части позволяет получить расчетное значение в выигрыше длинноволновых нейтронов до 9 раз по сравнению с ныне действующим водяным гребенчатым замедлителем. В таблице представлены факторы выигрыша в нейтронном потоке по энергиям на каждом пучке. Факторы выигрыша были рассчитаны методом Монте-Карло

(программа MCNP) с использованием дискретных констант из библиотеки ENDF – В/VII [7].

Таблица. Фактор выигрыша нейтронного потока на экспериментальных каналах 1, 4, 5, 6, 9 варианта № 1 головной части КЗ 201 по сравнению с гребенчатым водяным замедлителем ВЗ 304.

| Диапазон группы нейтронов (Å) | Фактор выигрыша (проигрыша) |           |           |           |           |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                               | Канал № 1                   | Канал № 4 | Канал № 5 | Канал № 6 | Канал № 9 |
| 6 – 9                         | 2,5                         | 5,74      | 7,11      | 6,9       | 8,83      |
| 4 – 6                         | 1,3                         | 4,8       | 5,95      | 5,2       | 6,55      |
| 0,6 – 4                       | 1,4                         | 0,84      | 0,97      | 0,83      | 2,44      |

Учитывая, что криогенная камера находится на расстоянии 5 мм от водяных полостей замедлителя, а также имеет контакт с ними через опоры была опасность, что вода будет намораживаться на стенки камер вследствие теплопередачи за счет контактов, диффузии остаточных газов и лучистого теплопритока. Для определения теплопритока был проведен теплофизический расчет. Расчет показал, что общий теплоприток к криогенной камере по тепловым мостам (2 сферические опоры в верхней части камеры, 2 втулки в нижней части и сильфонный узел слива отработанной смеси) составит не более 4,2 Вт, а общий градиент температуры в камере с учетом сопротивления движения охлаждающего газа через засыпку рабочего вещества составил не более 4 К. Полный теплоприток к камере замедлителя, учитывающий диффузию остаточных газов, лучистый теплоприток и тепло, получаемое за счет ядерного нагрева, составит 160 К. Такие значения позволили не опасаться замерзания циркулирующей воды на стенках камер пред- и постзамедлителя.

Следующим пунктом главы 3 является разработка средств соединения замедлителя с инфраструктурой систем охлаждения и транспортировки. Для обеспечения штатной работы криогенного замедлителя он должен иметь 2 входа и 2 выхода циркулирующей воды, полости пред- и постзамедлителя, слив отработанной рабочей смеси из криогенной камеры, трубопровод вывода датчиков температуры, криогенные трубопроводы подачи и охлаждения шариков, обратный трубопровод охлаждения (рис. 3).



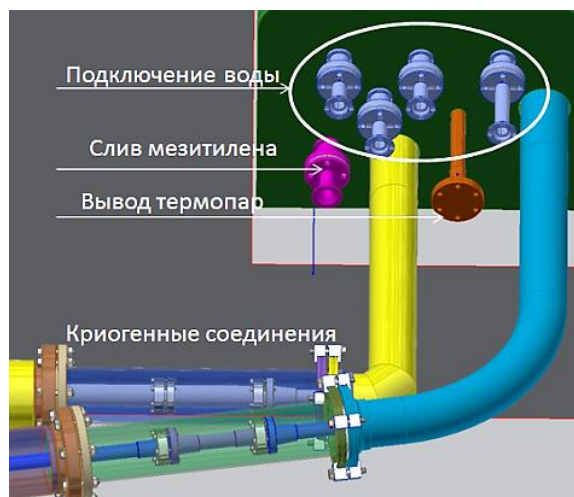


Рисунок 3. Расположение технологических коммуникаций на торцевой поверхности защитного блока комбинированного замедлителя КЗ 201.

Подключение воды и слив мезитилена производится гибкими сильфонными шлангами. Для вывода термодпар разработан способ, при котором между двух фланцев зажимали резиновое уплотнение (на каждом фланце своё), а между ними в установленных местах пропускали тело термодпары. Такое соединение обеспечивало герметичность по гелию и не разрушало термодпары в местах вывода. Больше всего вопросов возникало при подключении криогенных трубопроводов подачи шариков и обратного потока. Учитывая исследования, приведенные в главе 2 и зная, что любая ступенька приводит к существенной потере скорости шарика, а соединения находятся перед длинным участком подъема, известные соединения как байонетные или штыковые не подходили по ряду параметров.

***Существенными из них являются:***

- локальный теплоприток в месте стыка, который мог привести к прилипанию мезитиленовой пыли или осколков шариков;
- изменение диаметров (т.е. ступеньки) в местах сопряжения (разрушение шариков или затор);
- наличие гибкого участка для проведения стыковки или разборки соединения.

Для обеспечения стабильного режима загрузки шариков, а также возможности оперативно произвести перегрузку замедлителя без применения сварочных и отрезных работ, было разработано, испытано, внедрено и запатентовано специальное криогенное фланцевое разъемное соединение для шарикового холодного замедлителя нейтронов.

***Его отличительные особенности:***

- отсутствие локального теплопритока в месте стыка;
- отсутствие ступеньки по ходу движения шарика;

- компактность и простота конструкции и сборки [8].

Устройство работает по принципу телескопической сборки. Кожуховая труба соединения входит в кожуховую трубу подводящей магистрали, при этом, открывается съемный участок внутреннего трубопровода. За счет свободного перемещения внутреннего трубопровода съемный участок вынимается. Соединение разобрано, можно приступать к демонтажу замедлителя со штатного места. Сборка производится в обратном порядке (рис. 4).



Рисунок 4. Рабочая модель криогенного фланцевого соединения для шарикового замедлителя нейтронов.

Соединение испытано на системе охлаждения комплекса замедлителей. Ими соединено оборудование системы, рефрижераторные установки, коллектор и теплообменники. Испытания проводились при температуре от 300 К до 10 К с циклическим изменением температуры. В результате испытаний неплотностей, запотеваний и обмерзаний в месте стыковки не наблюдалось. Простота конструкции позволяет изготовить такие соединения без применения специального оборудования. Сборка – разборка соединений КЗ 201 проводится в зоне специального допуска и занимает не более 15 минут. Это существенно снижает радиационную нагрузку на обслуживающий персонал.

Для КЗ 201 была выбрана схема работы как и для КЗ 202. Уже были известны свойства мезитилена, характер его движения, разброс скоростей, физические свойства в твердой фазе, влияние радиационной нагрузки в полях ионизирующего излучения ИБР-2. Однако большой разброс скоростей шариков от средней величины, отсутствие данных о возможности преодоления затяжных подъемов, другое расположение замедлителя в пространстве относительно активной зоны реактора, зоны перегрузки и назначение замедлителя не позволяют коррелировать полученные данные о траектории движения, распределении скоростей, дефрагментации шариков при движении по пневмотрассе КЗ 201. Для выяснения возможности применения метода транспортировки шариков потоком холодного гелия с

учетом конфигурации трубопровода и определения оптимальных параметров работы систем и физических свойств среды, позволяющих загрузить шарики без их существенной дефрагментации, слипания и заторов за время не более 6 часов, был разработан и создан полномасштабный стенд комбинированного замедлителя КЗ 201 (рис. 5). На стенде проводилось моделирование режима загрузки, разрабатывалась методика действий персонала при наступлении аварийных и предаварийных ситуаций по устранению неисправностей и безопасной эксплуатации. На этом стенде было проведено моделирование режима загрузки шариков, определены оптимальные параметры работы устройств и физические свойства среды, при которых шарики не будут разрушаться, слипаться и смогут преодолеть протяженный подъем без затора. Отработана методика отгонки азота из системы для предотвращения его конденсации и затвердевания в теплообменнике и, как следствие, закупорки системы охлаждения.



Рисунок 5. Полномасштабный стенд комбинированного замедлителя КЗ 201 в масштабе 1:1, где 1 – камера-имитатор в вакуумном кожухе, 2 – наклонный участок, повторяющий проход в блоке биологической защиты, 3 – теплообменник с двумя газодувками, 4 – устройство порционной подачи шариков.

***Основными полученными параметрами для стабильной загрузки стали:***

- температура в контуре загрузки 80 – 100 К;
- массовый расход газа 1,6 – 3 г/с, такой расход обеспечивает скорость шариков от 2,3 до 3,2 м/с (это, с одной стороны, позволяет шарикам преодолевать подъем без затора, а, с другой стороны – не слишком высокая, чтобы шарики разбивались при многократных соударениях со стенками трубы;
- оптимальная периодичность подачи шариков в трубопровод составила 1,5 – 1,8 ш/с (шарики не догоняют друг друга на

поворотах и подъемных участках, не образуют больших групп, способных привести к затору), а полная загрузка камеры (30 000 шариков) не превышает 6 часов.

Таким образом, теперь известны параметры работы устройств и среды для загрузки сферических объектов ( $d = 3,5 - 3,9$  мм в трубе 16 мм) потоком холодного гелия по геометрически сложной трассе КЗ 201 длиной до 25 метров с изменяемыми углами подъема на протяжении 20 метров, включающими предельный угол  $52^{\circ}$  на протяжении 4 метров, сопряженный с поворотом на  $100^{\circ}$  перед подъемом и изгибом внутри защитного блока [9]. Кроме этого, удалось выяснить предельные температуры работы мезитиленового замедлителя, которые ограничивались по верхней границе 150 К в криогенной камере. Это ограничение было найдено экспериментально и связано со слипанием шариков между собой и с конструктивными элементами системы охлаждения при температуре 160 К [10, 12].

**Четвертая глава посвящена** созданию системы охлаждения комплекса замедлителей ИБР-2 и устройствам безопасной эксплуатации источника, испытаниям и исследованиям зависимости выхода холодных нейтронов с поверхности комбинированного замедлителя КЗ 202 от температуры внутри криогенной камеры.

Система охлаждения комбинированных замедлителей нейтронов реактора ИБР-2 состоит из двух частей. Первая часть – это водяное охлаждение камер пред- и постзамедлителя. Охлаждение производится непрерывно циркулирующей водой, причем вход и выход воды в камерах организован таким образом, что даже в случае прорыва или опорожнения подводящих и отводящих трубопроводов камеры останутся заполнены водой.

Все источники холодных нейтронов работают при температурах 100 К и ниже. Это связано с температурным коэффициентом, вклад которого в выход холодных нейтронов может достигать 5-6 раз. Поэтому вторая часть системы охлаждения – это криогенная система охлаждения камер с замедляющим веществом. Результаты опытной эксплуатации КЗ 202 показали слабые места имеющейся криогенной системы: большие теплопритоки, отсутствие резервирования рефрижераторной установки, маленький диапазон рабочих температур и недостаточная холодильная мощность. Все это приводило к тому, что минимально достижимая температура в камере КЗ 202 при работе реактора на мощности ограничивалась 32 К. С вводом в эксплуатацию полномасштабного стенда КЗ 201 было проведено одновременное захолаживание систем КЗ 202 и стенда

КЗ 201, имитирующее работу на 2 замедлителя одновременно. Эксперимент показал, что минимально достижимая температура в камерах составляет 60 К и 76 К соответственно. Расчетные данные потоков проводились при температуре в камере 20 К. Таким образом, обеспечить проектные температуры источника не удавалось, потеря в потоке длинноволновых нейтронов могла составить до двух раз. Отсутствие резервирования могло привести к тому, что при выходе рефрижератора из строя обеспечить работу реактора в режиме холодного замедлителя было невозможно. Перенастройка спектрометров на холодные или тепловые нейтроны – долгий и трудоемкий процесс, поэтому обеспечение работы реактора в соответствии с графиком является важнейшей задачей. Учитывая это, а также особенности расположения экспериментальных установок реактора ИБР-2, которое предполагает формирование различного спектра нейронного потока с поверхности замедлителя, были сформулированы следующие требования к новой системе охлаждения:

- температура в камерах замедлителя при одновременном захолаживании не выше 20 К;
- плавное изменение температур в камере замедлителя в пределах от 20 до 150 К;
- получение индивидуальных температур в каждом замедлителе;
- резервирование криогенных установок.

Следуя требованиям, сформулированным выше, была создана и введена в опытную эксплуатацию новая криогенная система охлаждения источника холодных нейтронов ИБР-2. Блок-схема криогенной системы представлена на рисунке 6. В основу новой криогенной системы вошли: 2 рефрижераторные установки (существующая КГУ 700/15 и новый рефрижератор производства фирмы Linde Kryotechnik мощностью 1200 Вт при 10 К), криогенный коллектор, 2 теплообменника с одной и двумя газодувками, вакуумное и термометрическое оборудование. Центральной композицией установки стал криогенный коллектор-распределитель. Благодаря его созданию удалось объединить рефрижераторные установки в единую систему. Коллектор позволяет распределять потоки холодного гелия от рефрижераторов в направлении того или другого замедлителя, а в случае необходимости объединить мощности двух установок. При этом появилась возможность резервирования установок, и при выходе одной из них в ремонт или сервисное обслуживание график работы реактора ИБР-2 и обязательства перед пользователями нарушаться не будут.

Блок-схема криогенных замедлителей реактора  
реактора ИБР-2

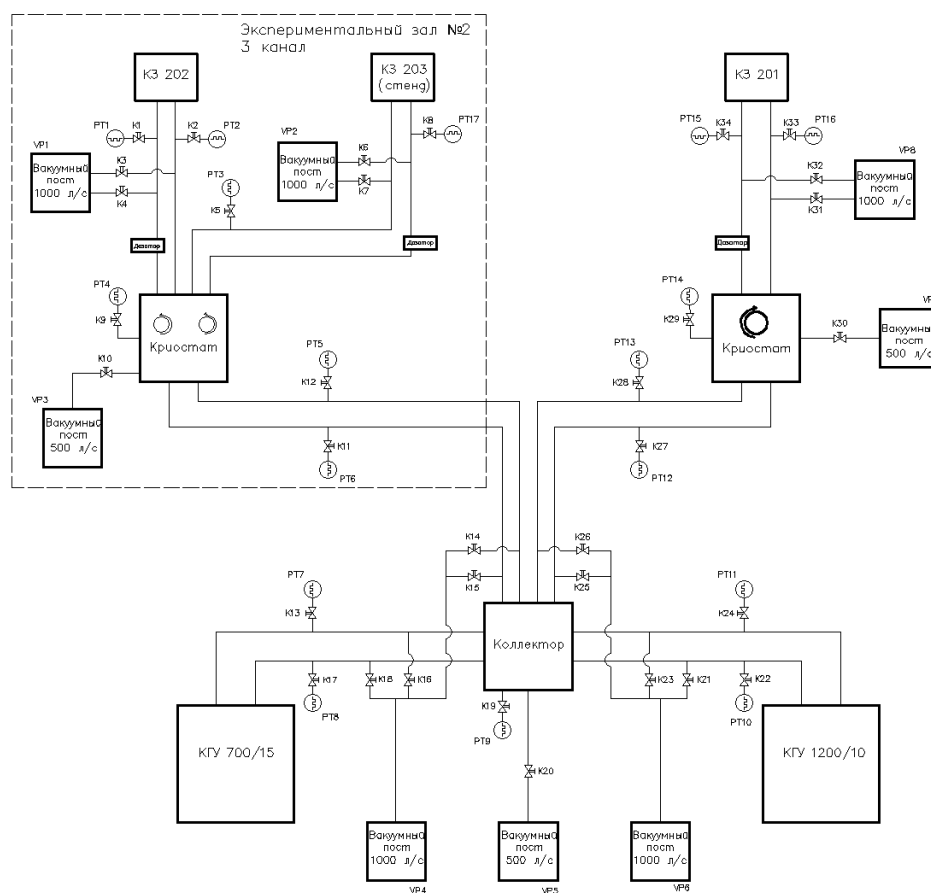
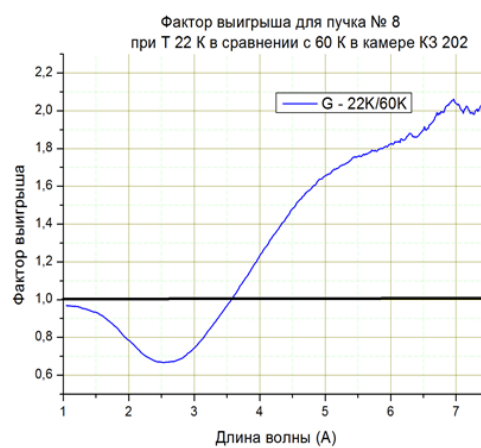


Рисунок 6. Блок-схема криогенной системы источника холодных нейтронов ИБР-2, где PT1-PT16 – мановакуумметры; V1-V33 – ручные сильфонные вентили; VP1-VP8 – турбомолекулярные посты различной производительности.

Оптимизация режимов работы новой системы охлаждения позволила плавно менять температуру замедляющего вещества в камере в диапазоне от 20 К до 150 К. Изменение температуры приводит к смещению пика спектра нейтронного потока в область больших и меньших длин волн в зависимости от потребности экспериментатора в том или другом исследовании. Это делает источник более «гибким» и привлекательным (ориентированным на пользователя), позволяя подбирать максимум нейтронов именно в том диапазоне волн, который будет оптимален для установки в конкретном случае. К тому же, в результате создания новой криогенной системы охлаждения удалось понизить температуру в камерах замедлителей до 22 К как при работе в одном направлении (охлаждение камеры КЗ 202), так и в двух направлениях одновременно (КЗ 202 и стенд 201). Фактор выигрыша от понижения температуры представлен на рисунке 7 и составляет 22% (при снижении температуры с 32 К до 22 К) и 200% (с 60 К до 22 К) соответственно.



(a)



(б)

Рисунок 7. Фактор выигрыша интенсивности нейтронов в холодной области при понижении температуры в камере замедлителя, где (а) – сравнение старой (32К) и новой (22К) криогенных систем при работе КЗ 202 на мощности реактора 2 МВт; (б) – сравнение старой (60К) и новой (22К) криогенных систем при работе на 2 направления КЗ 202 и стенд КЗ 201 одновременно.

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), времяпролетном спектрометре с обратной геометрией НЕРА (пучок № 7с) (рис. 8). Из рисунка видно, что понижение температуры до 22 К дало фактор выигрыша в потоке холодных нейтронов до 15 раз для РЕМУР и до 6,2 раза на установке НЕРА.

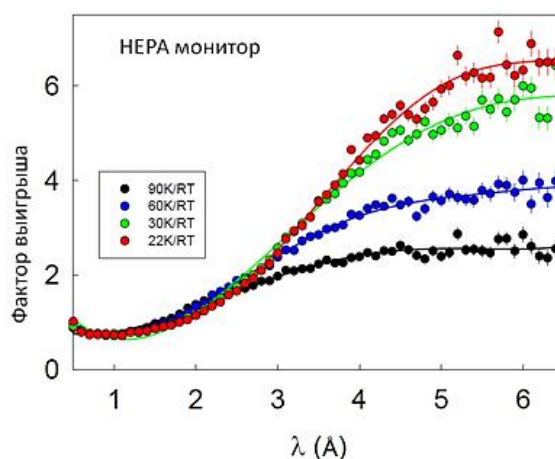
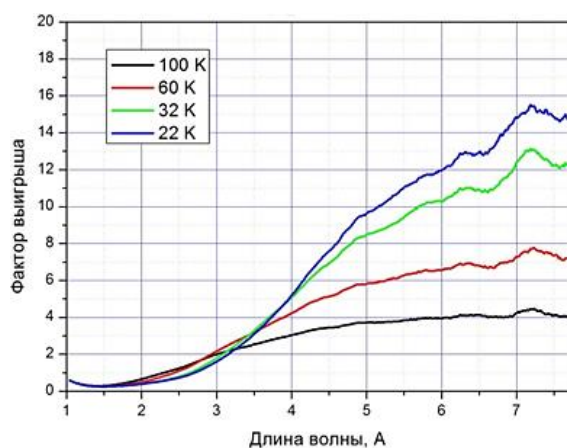


Рисунок 8. Вклад температурного эффекта на выход холодных нейтронов на установке РЕМУР – слева и установке НЕРА – справа.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. **Впервые разработан и изготовлен** комбинированный замедлитель нейтронов в направлении пучков 1, 4, 5, 6, 9 на основе дисперсного мезитилена, повышающий выход длинноволновых нейтронов до 9 раз и тепловых (для канала № 1) до 1,4 раз.
2. В результате **экспериментального моделирования** на полномасштабном стенде КЗ 201 **детально изучена возможность загрузки** шариков мезитилена в камеру замедлителя **методом пневмотранспортировки** и **найденны оптимальные физико-технические параметры** работы устройств и среды с учетом конфигурации пневмотрассы КЗ 201 для доставки шариков без заторов, разрушения и слипания.
3. **Впервые разработано и применено** специальное криогенное фланцевое разъемное соединение, соединяющее замедлитель и инженерные коммуникации пневмотрассы и системы охлаждения, не имеющее локального теплопритока, ступеньки или преграды по ходу движения шарика. Соединение является быстросъемным, что существенно сокращает время на перегрузку замедлителя, вследствие чего снижается дозовая нагрузка на обслуживающий персонал.
4. **Впервые создана система охлаждения комплекса замедлителей**, обеспечивающая независимый температурный режим в каждом замедлителе, позволяющая выбрать режим работы в диапазоне от 20 К до 150 К. Достигнуты проектные температурные параметры в камере замедлителя на уровне 22 К, что повысило выход длинноволновых нейтронов до 22%, при работе на одном замедлителе и на 200% при работе на двух замедлителях одновременно. На установках РЕМУР и НЕРА ИБР-2 экспериментально установлено, что при температуре замедлителя 22 К поток холодных нейтронов увеличивается в 15 раз и в 6,2 раза соответственно.



### 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. Дифракционные исследования на реакторе ИБР-2 с использованием холодного замедлителя / Балагуров А.М. и др. // Сообщение ОИЯИ РЗ-2000-220, г. Дубна, 2000 г.
3. Эффективный замедлитель нейтронов для импульсных источников нейтронов / Гундорин Н.А. Назаров В.М. // Сообщения Объединенный институт ядерных исследований. РЗ-80-721, г. Дубна, 1980 г.
4. Belyakov A. A. et al. Solid methane cold moderator at the IBR-2 reactor // J. Neutron Res. 1996. V. 3. P. 209-221
5. Bauer G. S. Pulsed neutron source cold moderators concept, design and engineering // Proc. International Workshop on Cold Neutron Sources, Argonne, USA, 1997. – pp. 27-41.
6. Патент 2492538 Российская Федерация, МПК G 21 К 001/00. Шариковый холодный замедлитель нейтронов [Текст] / К.А. Мухин в соавторстве с В.Д. Ананьевым, А.А. Беляковым, М.В. Булавиным, А.Е. Верхоглядовым, С.А. Куликовым, А.А. Кустовым, Д.Е. Шабалиным, Е.П. Шабалиным; заявитель и патентообладатель Объединенный институт ядерных исследований. – Оpubл. RU БИПМ № 35, 10.09.2013. – С. 2.
7. 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.
8. 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.
9. Possibility of loading the chamber of the “central” pelletized cold moderator for IBR–2 reactor beams 1, 4–6, and 9 / К.А. Mukhin в соавторстве с А. А. Belyakov, M. V. Bulavin, A. E. Verkhoglyadov, V. A. Skuratov, I. A. Smelyansky, S. A. Kulikov, A. A. Kustov, A. A. Lyubimtsev, A. P. Sirotin, V. K. Shirokov and T. B. Petukhova // Physics of particles and nuclei letters. – 2016. – Vol. 13, №6. – pp. 774-781.
10. Test stand of the technological system of the cryogenic moderator with the control electronics / K. Mukhin [et al.] // Romanian journal of science and arts. – 2011. – № 3. – P. 339-346.

11. Current status of development advanced pelletized cold moderators for the IBR-2M research reactor / K. Mukhin в соавторстве с A. Belyakov, M. Bulavin, S. Kulikov, E. Shabalin, A. Verhoglyadov // *Physics of particles and nuclei, letters*. – 2013. – Vol. 10. – №2. – P. 230-235.
12. Испытательный стенд шарикового криогенного замедлителя нейтронов реактора ИБР-2 / К.А. Мухин в соавторстве с В.Д. Ананьевым, А.А. Беляковым, А.А. Богдзелем, М.В. Булавиным, А.Е. Верхоглядным, Е.Н. Кулагиным, С.А. Куликовым, А.А. Кустовым, А.А. Любимцевым, Т.Б. Петуховой, А.П. Сиротиним, А.Н. Федоровым, Д.Е. Шабалиным, Е.П. Шабалиным, В.К. Широковым // *Журнал приборы и техника эксперимента*. – 2013. – №1. – С. 128-134.
13. Холодный замедлитель нейтронов на модернизированном реакторе ИБР-2 / К.А. Мухин в соавторстве с В.Д. Ананьевым, А.А. Беляковым, М.В. Булавиным, А.Е. Верхоглядным, С.А. Куликовым, Е.П. Шабалиным // *Журнал технической физики*. – 2014. – Т. 84, №2. – С. 131-134.
14. The world's first pelletized cold neutron moderator at a neutron scattering facility / K.A. Mukhin в соавторстве с V. D. Ananiev, A. A. Belyakov, M.V. Bulavin, A. E. Verkhoglyadov, E. N. Kulagin, S.A. Kulicov, A. A. Kustov, E. P. Shabalin, D. E. Shabalin, T.B. Petukhova, A.P. Sirotin, V.K. Shirokov// *Nuclear instruments and methods in physics* – 2014. – Vol. 320. – P. 70-74.
15. Control system of pelletized cold neutron moderator of the IBR-2 reactor / К.А. Mukhin в соавторстве с А.А. Belyakov, M.V. Bulavin, A.N. Chernikov, A. Churakov, S. A. Kulikov, E. Litvinenko, A. Petrenko, A. E. Verkhoglyadov, E. N. Kulagin, K. A. Mukhin, E. P. Shabalin, T.B. Petukhova, A.P. Sirotin, V.K. Shirokov // *Physics of particles and nuclei letters*. – 2015. – Vol. 12, №6. – P. 773-777.