

Объединенный институт ядерных исследований

На правах рукописи

Мухин Константин Александрович

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

Специальность 01.04.01. – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д-р техн. наук Н.Н. Агапов

Дубна 2018 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ХОЛОДНЫХ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ НА РЕАКТОРАХ ЛНФ 24	
1.1 Обзор источников холодных нейтронов в мире	24
1.2 Сравнительная характеристика веществ для холодного замедлителя	25
1.3 Холодные замедлители нейтронов на реакторах ЛНФ	32
1.3.1 Первые замедлители на ИБР и ИБР-30	32
1.3.2 Замедлитель ИБР-2 из твердого метана	34
1.4 Источник холодных нейтронов реактора ИБР-2 на основе дисперсного мезитилена	42
1.5 Выводы по главе 1	45
ГЛАВА 2. ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ (КЗ 202) В НАПРАВЛЕНИИ ПУЧКОВ 7, 8, 10, 11 РЕАКТОРА ИБР-2	47
2.1 Устройство для изготовления и сепарации шариков	47
2.2 Изучение процесса движения шариков в стеклянной и стальной трубах при комнатной температуре	49
2.3 Полномасштабный испытательный стенд комбинированного замедлителя КЗ 202	52
2.3.1 Принципиальная схема стенда	52
2.3.2 Транспортный трубопровод КЗ 202	55
2.4 Результаты опытной эксплуатации комбинированного замедлителя КЗ 202 на физический эксперимент за 6 лет	58
2.5 Выводы по главе 2	61
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ НЕЙТРОНОВ В НАПРАВЛЕНИИ 1, 4, 5, 6, 9 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПУЧКОВ ИБР-2 (КЗ 201)	63
3.1 Этапы работы по созданию КЗ 201	63
3.2 Разработка головной части КЗ 201	65

3.2.1	Выбор конфигурации головной части замедлителя методом компьютерного моделирования	65
3.2.2	Расчет теплопритока к криогенной камере замедлителя КЗ 201	70
3.3	Устройства соединения комбинированного замедлителя КЗ 201 с технологическими системами обеспечения работы комплекса	73
3.4	Моделирование процесса загрузки и движения мезитилено-метаксилоловых шариков на полномасштабном стенде комбинированного замедлителя КЗ 201	86
3.5	Технологическое оборудование, системы управления и контроля параметров работы комбинированных замедлителей	100
3.5.1	Устройство порционной загрузки шариков в трубопровод	101
3.5.2	Датчики дифференциального давления	105
3.5.3	Устройство определения массового расхода гелия в системе второго контура	107
3.5.4	Термометрическое и вакуумное оборудование	108
3.6	Выводы по главе 3	110
ГЛАВА 4. СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ИСТОЧНИКА ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ РЕАКТОРА ИБР-2		113
4.1	Режимы работы источника холодных нейтронов реактора ИБР-2	113
4.2	Система охлаждения комплекса комбинированных замедлителей ИБР-2	115
4.2.1	Система водяного охлаждения замедлителей	115
4.2.2	Криогенная часть системы охлаждения замедлителей до модернизации на основе КГУ 700/15	116
4.2.3	Новая криогенная система охлаждения на основе коллектора и двух рефрижераторных установок	120
4.3	Анализ спектров нейтронного потока на установках РЕМУР и НЕРА, при работе с новой криогенной системой охлаждения	126
4.4	Технология и безопасность	130
4.5	Выводы по главе 4	134

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Нобелевский лауреат Джеймс Чедвик открыл нейтрон в 1932 году [1]. Этим открытием он дал старт новому научному направлению исследования структуры веществ и материалов в различных агрегатных состояниях.

Исследовательские реакторы и источники на основе ускорителей с реакцией spallation генерируют широкий высокоинтенсивный нейтронный спектр, позволяющий проводить исследования нейтронами любых энергий, начиная от быстрых $\sim 2,5$ МэВ и до холодных < 5 мэВ (нейтроны с длиной волны более $4 \text{ \AA}$). Для получения нейтронов низких энергий применяются устройства, называемые замедлителями, в которых в результате многократных столкновений нейтронов с веществом-замедлителем происходит потеря энергии нейтрона. Процесс потери энергии нейтронов в результате столкновений называется термализацией, а устройства – замедлители являются промежуточным звеном между источником нейтронов и экспериментальной установкой.

В процессе развития исследований стали разделять нейтроны на группы в зависимости от их энергий. Нейтроны стали делить на быстрые – 2,5 МэВ и выше, тепловые – 0,025 эВ – 0,005 эВ, холодные – 10^{-4} - $5 \cdot 10^{-3}$ эВ, очень холодные и ультра холодные – $< 10^{-4}$ эВ. Стоит отметить, что эта градация вполне условна и четких границ у групп нет, или правильнее будет сказать, они размыты. Такое разделение не случайно, оно обусловлено энергией нейтронов той или другой энергии, а так же областью применения. Высокоэнергетические нейтроны (быстрые) рождаются в реакторах и ускорителях на основе реакции spallation. Такие нейтроны применяются для исследований радиационной стойкости веществ в различных агрегатных состояниях, а также в специальных окружающих условиях (высокое давление, экстремально высокие или низкие температуры). Радиационные исследования необходимы при проектировании атомных электростанций, создания физического и экспериментального оборудования, работающего в полях ионизирующих излучений [2].

Тепловые нейтроны – нейтроны с длиной волны $\lambda \sim 0,4 - 4 \text{ \AA}$. Получение таких нейтронов не требует создания технологически сложных конструкций и оборудования. Традиционно для замедления нейтронов до «тепловой» области в исследовательских реакторах используют воду при комнатной температуре, циркулирующую в полости камеры замедлителя. На реакторе ИБР-2 для повышения интенсивности выхода тепловых нейтронов используют развитую гребенчатую поверхность замедлителя, обращенную в сторону экспериментальных каналов. Такая гребенчатая поверхность дает выигрыш в потоке нейтронов (G-фактор) по сравнению с плоской поверхностью до 1,4 раза [3]. Исследования, проводимые с помощью нейтронов теплового спектра очень многогранны и разнообразны. Сюда входят исследования в области физики конденсированного вещества, изучение структурных и магнитных свойств в экстремальных условиях (высокого и низкого давления при различных температурах), науки о Земле, химия, материаловедение и биология.

Нейтрон с энергией ниже $5,25 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$ принято называть – холодным нейтроном. При такой энергии длина волны нейтрона становится более $4 \text{ \AA}$. Говоря о холодных или низкоэнергетических нейтронах граница в $4 \text{ \AA}$ еще называется бериллиевой границей. Такое, несколько произвольное, определение связано с тем, что, обычно в качестве фильтра нейтронных пучков используется бериллий. Для нейтронов с $\lambda < 4 \text{ \AA}$ поперечное сечение рассеяния бериллия составляет 6 *барн*, а для более длинных волн брэгговское рассеяние невозможно, и поперечное сечение быстро уменьшается до 0,5 *барн*, если бериллий имеет комнатную температуру, и до 0,05 *барн*, если бериллий охлажден до 100 К. Бериллиевый фильтр толщиной 30 – 50 см при температуре 100 К прозрачен для холодных нейтронов и непрозрачен для тепловых нейтронов с $\lambda < 0,4 \text{ нм}$, следовательно, его можно использовать для удаления из пучка всех нейтронов, идущих из реактора, за исключением холодных [4].

Холодные нейтроны могут проникать сквозь материалы, не оставляя следа и не разрушая исследуемые системы. Такие нейтроны дают детальную микроскопическую картину атомных процессов изучаемого материала. Они

особенно подходят для анализа магнитных наноструктур, органических, и биологических материалов, чувствительных к радиационному излучению. При тестировании лекарственных препаратов с помощью нейтронов можно понять, почему лекарственные препараты с абсолютно одинаковым химическим составом молекул различаются своим действием [5]. Исследования показали, что небольшое изменение пространственного расположения маленькой группы атомов, входящей в молекулу, приводит к радикальному изменению свойств препарата. Получаемая информация служит для улучшения технологии производства препаратов и для создания новых лекарственных средств.

Существует ряд фундаментальных задач, которые можно решить только при помощи «холодных» нейтронов. Проводят исследования взаимодействия нейтронов между собой (изучение возможности существования тетра-нейтронов и иных связанных состояний из одних только нейтронов, изучение возможных нейтрон-антинейтронных осцилляций), с другими веществами, атомами и конгломерациями атомов, определение и поиск электрического дипольного момента нейтрона, который связан с нарушением СР-инвариантности, может косвенно подтвердить или опровергнуть теорию суперсимметрии. Как известно, электрический дипольный момент нейтрона был бы точно равен нулю, если бы имела место инвариантность всех взаимодействий, в которых участвует нейтрон, относительно операции отражения времени. Слабые взаимодействия неинвариантны относительно операции отражения времени. Вследствие этого нейтрон должен был бы обладать электрическим дипольным моментом. До сих пор не поставлена точка в определении времени жизни нейтрона, хотя еще в 1968 в ЛНФ под руководством члена-корреспондента Ф.Л. Шапиро провели эксперимент по удержанию очень медленных нейтронов в сосуде из обычного вещества в течении 300 секунд (нейтронная бутылка) [6].

В настоящее время трудно представить научно-экспериментальный центр, проводящий исследования с помощью нейтронов без источника холодных нейтронов. На всех строящихся высокопоточных источниках

нейтронов European Spallation Source (ESS, Lund, Швеция), HANARO (Тайджон, Южная Корея) [7, 8], реактор ПИК (г. Гатчина, Россия) [9, 10], работают целые группы, проводящие компьютерное моделирование параметров источника холодных нейтронов, оптимизацию его геометрических размеров и пространственного положения относительно генератора нейтронов (активная зона, размножающая или не размножающая мишень). На исследовательском импульсном реакторе ИБР-2 (г. Дубна, Россия) в планах модернизации 2006 года для сохранения конкурентной способности в мире, учитывая направления и тенденции развития мировых исследований с помощью нейтронов различной интенсивности, и как следствие, для расширения спектра возможных экспериментов было принято решение о создании источника холодных нейтронов. С учетом геометрических характеристик активной зоны реактора ИБР-2, расположения технологического оборудования (органов управления, стационарных и подвижных отражателей, откатных защит, систем автоматической защиты и т.д.), размещения экспериментальных выведенных пучков нейтронов для проведения исследований источник должен представлять собой комплекс из 3-х комбинированных замедлителей окружающих, активную зону реактора (Рис. 1) [11].

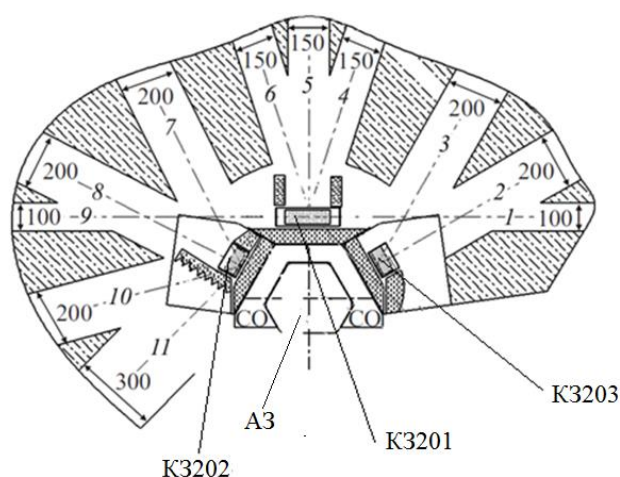


Рисунок 1. Комплекс замедлителей модернизированного реактора ИБР-2. K3201 – комбинированный замедлитель в направлении пучков №№ 1, 4-6, 9; K3202 – комбинированный замедлитель в направлении пучков №№ 7, 8, 10, 11;

КЗ203 – комбинированный замедлитель в направлении пучков №№ 2, 3; АЗ – активная зона реактора, СО – органы управления реактора, 1-11 – нейтронные пучки.

Учитывая широкий круг прикладных и фундаментальных исследований, проводимых на реакторе ИБР-2, целесообразнее было бы создать такой источник, который бы позволял получать оптимальный спектр нейтронов на каждом из физических инструментов. На рисунке 2 представлено распределение потребности экспериментаторов на выведенных пучках по виду нейтронов для исследований. Сочетание водяных камер замедлителя и криогенной камеры позволят получать такой спектр для каждой установки.

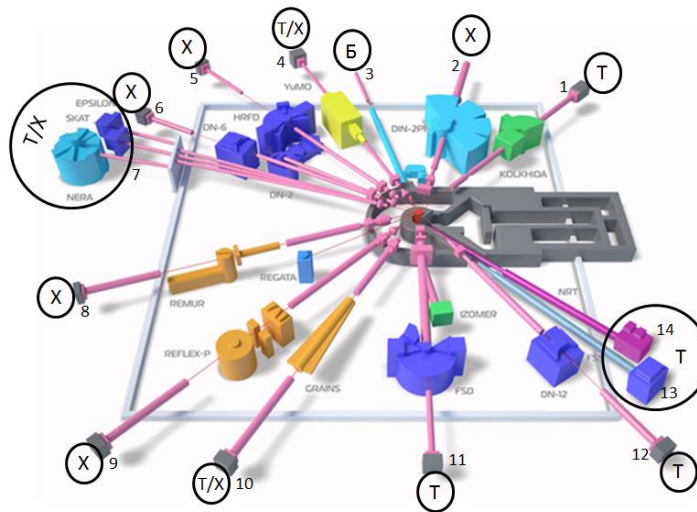


Рисунок 2. Распределение необходимого спектра нейтронов на инструментах выведенных пучков, где X – холодные нейтроны ($\lambda > 4 \text{ \AA}$), T – тепловые нейтроны ($\lambda \sim 4 - 0,6 \text{ \AA}$), Б – смешенный спектр (быстрые 25%, резонансные 25%, тепловые 25%, холодные 25%), T/X – смешенный спектр (тепловые, холодные), λ – длина волны нейтрона.

Как видно из рисунка 1, на поверхность замедлителя центрального направления смотрят оси пучков №№ 1, 4, 5, 6, 9. Для каждого из них пользователи определили необходимый спектр нейтронов. В таблице 1 представлен оптимальный диапазон длин волн нейтронов для каждой из исследовательских установок комбинированного замедлителя центрального направления КЗ 201.

Таблица 1. Оптимальная длина волны нейтронного потока для каждого инструмента центрального замедлителя КЗ 201.

№ п/п	№ пучка	Исследовательская установка	Область применения	Оптимальный энергетический спектр нейтронов (нм)
1	1	КОЛХИДА (спектрометр с поляризованной мишенью)	- ядерная прецессия спина нейтронов - исследование магнитной структуры	0,04 – 0,4
2	4	ЮМО (спектрометр малоуглового рассеяния)	- размер и форма частиц в различных структурах - степень полидисперсности - агрегационное число - фазовые переходы	0,1 – 0,6
3	5	ФДВР (Фурье дифрактометр высокого разрешения)	- прецизионный анализ кристаллической структуры поликристаллов; - анализ микроструктуры кристаллических материалов	0,07 – 1,6
4	6	ДН6 (многоцелевой дифрактометр)	- определение параметров кристаллической и магнитной структуры материалов при воздействии высокого давления	0,12 – 2
5	9	РЕФЛЕКС (спин-эхо малоугловой спектрометр на базе	- определение структурных характеристик тонких пленок и многослойных	0,14 – 1

		рефлектометра с поляризованными нейтронами)	гетеросистем	
--	--	---	--------------	--

Исходя из задач каждого инструмента, представленного в таблице 1, легко увидеть, что все эти установки работают с нейтронами длиной волны от 0,7 – до 20 Å (тепловая и холодная область). В действующем замедлителе ВЗ 304 (гребенчатый водяной замедлитель для пучков 1, 4, 5, 6, 9) нейтроны хорошо термализуются до тепловой области 0,4 – 4 Å, сохраняя высокую плотность потока нейтронов на уровне 10^{14} н/см²·с. В тоже время доля холодных нейтронов ($\lambda > 4$ Å) в этом потоке очень мала и не превышает 10^8 н/см²·с. Такие значения накладывают определённые ограничения на использование исследовательских установок. Основная часть ограничений связана с плохим разрешением (картинкой пиков) в области больших длин волн. Размывание приводит к тому, что становится невозможно отличить один пик от другого. К примеру, на Фурье дифрактометре высокого разрешения ФДВР в области длин волн 0,7 – 4 Å разрешение будет высоким, а уже в области 1 – 16 Å разрешение будет падать за счет наложения пиков. Еще одно важное ограничение, связанное с маленькой плотностью потока, отражается во времени набора статистики и проведении эксперимента, которые могут не укладываться в цикл работы реактора и становятся нецелесообразными на реакторе ИБР-2 из-за длительности их проведения.

Учитывая, в настоящее время, высокий интерес к исследованиям с помощью холодных нейтронов как в фундаментальной, так и в прикладной области, а также необходимость сохранения лидирующих позиций реактора ИБР-2 среди высокопоточных, многоцелевых источников в мире, **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, обеспечивающий гибкий и независимый температурный режим в камерах замедлителей.**

Для достижения цели диссертационной работы следует решить основные задачи:

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 системы 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 работы

- 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.
- На реакторе ИБР-2 внедрена многоконтурная система охлаждения комбинированных замедлителей, позволяющая получить гибкий и независимый температурный режим в каждом замедлителе в одно и тоже время в зависимости от потребности экспериментаторов.

Система предусматривает резервирование рефрижераторных установок в случае выхода одной из них из строя, на время проведения ремонта и т.д.

- Для соединения замедлителя и инженерных систем охлаждения и транспортировки шариков применено новое запатентованное изобретение – криогенное фланцевое разъемное соединение с минимальной ступенькой (для снижения 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.
- На полномасштабном экспериментальном стенде проведено моделирование загрузки шариков мезитилена в камеру замедлителя по трубопроводу сложной геометрии с критическим участком подъема (поворот 100^0 перед участком подъема длиной 4 метра и углом 52^0) 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.

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/с, 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) и обеспечения индивидуальных температур в каждом из замедлителей:

- снижение температуры в камерах замедлителей с 32 К до 22 К при работе в одном направлении и с 60 К до 22 К при работе 2-х замедлителей одновременно. Это позволяет увеличить поток холодных нейтронов на 22% и на 200% соответственно;
- возможность плавного изменения температур в камерах замедлителей от 20 К до 150 К (смещение пика нейтронного спектра в область длинных или коротких длин волн);
- обеспечение индивидуальных независимых температур 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);
- надежность работы системы охлаждения источника холодных нейтронов 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 вносящей корректировок в траекторию движения шариков:

- 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 и исключает локальный нагрев в зоне коммутации и обеспечивает равномерный теплоприток по всему транспортному трубопроводу, исключая вероятность затора и неравномерность движения за счет 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 в получении результатов, изложенных в диссертации.

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 установки и прототипы, ставил цели и задачи экспериментов, обрабатывал и анализировал результаты, формулировал научные выводы, готовил материалы и статьи к публикациям. Автор лично осуществлял разработку и руководил созданием первого (КЗ 202) и второго (КЗ 201) полномасштабных экспериментальных стендов комбинированных замедлителей нейтронов с шариковым заполнением криогенной камеры. На стенде КЗ 202 при его непосредственном участии проводились эксперименты по определению возможности применения метода пневмотранспортировки шариков по геометрически сложному трубопроводу

в криогенную камеру замедлителя, эмпирически определялись физико-технические параметры работы систем замедлителя. Автор руководил работами подрядной организации по монтажу инженерных и криогенных систем реального замедлителя КЗ 202 в зонах спецдопуска реактора ИБР-2, а в последствии эксплуатацией технологических систем замедлителя. При непосредственном участии автора были проведены разработки, испытания и внедрение специального устройства порционного дозирования шариков в транспортный трубопровод, испытанного на 2-х полномасштабных экспериментальных стендах при криогенных температурах. Устройство успешно эксплуатируется в системе замедлителя КЗ 202. Под непосредственным руководством автора на полномасштабном прототипе КЗ 201 проведены исследования и даны заключения (оптимальные параметры работы систем) о возможности загрузки шариков методом пневмотранспортировки в криогенную камеру замедлителя центрального направления (КЗ 201), учитывая индивидуальную геометрию (повороты под углом 90^0 , подъемные участки длиной до 4-х метров под углом до 52^0), расположение инженерных коммуникаций и криогенных трубопроводов относительно активной зоны реактора и зоны подачи шариков в транспортный криогенный трубопровод. Лично автором была разработана система охлаждения комплекса замедлителей реактора ИБР-2, обеспечивающая достаточные и более гибкие рамки возможности использования криогенных замедлителей, раскрывая весь потенциал рабочего вещества, который может работать в широком диапазоне температур, что позволяет на каждом из инструментов получить свой уникальный спектр нейтронного потока. В рамках разработки системы охлаждения автор лично проводил теплофизические расчеты и экспериментально определял количество тепла, поступающего к системе, делал расчеты, 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, имеющее единый вакуумный кожух с остальными частями криогенного трубопровода, что позволяет исключить использование спутниковой трубы и отдельной откачки в месте стыка.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Experimental facility for verification of heat gain into the cryogenic pipeline of a cold moderator for the IBR – 2M research reactor / K.A. Mukhin в соавторстве с M.V. Bulavin, E. N. Kulagin, S.A. Kulikov, V.V. Melikhov, // The second joint seminar Joint Institute for Nuclear Research-Romania on neutron physics for investigations of nuclei, condensed matter and life sciences. – Baia Mare, 2007. – P.27.
2. Определение теплопритоков к трубопроводу мезитиленовых шариков криогенного замедлителя реактора ИБР – 2М / К.А. Мухин в соавторстве с М.В. Булавиным, Е.Н. Кулагиным, С.А. Куликовым, В.В. Мелиховым // Сообщения Объединенного Института Ядерных Исследований. – 2008. – P13-2008-179. – 10 с.
3. Моделирование пневмотранспорта твердых шариков холодного замедлителя нейтронов: распределение скорости и времени движения / К.А. Мухин в соавторстве с М.В. Булавиным, Е.Н. Кулагиным, С.А. Куликовым, Д.Е. Шабалиным, Е.П. Шабалиным // Сообщения Объединенного Института Ядерных Исследований. – 2009. – P13-2009-72. – 16 с.
4. Recent progress in development of the pelletized cold neutron moderators for the IBR-2M reactor / K. Mukhin в соавторстве с A. Kulikov, E. Kulagin, S. Kulikov, D. Shabalin, E. Shabalin, A. Verhoglyadov // 19th meeting on collaboration of advanced neutron sources. – Grindelwald, 2010. – P. 1-8.

5. Conception of the Pelletized Solid Methane Cold Neutron Moderators / K. Mukhin в соавторстве с Ryom Gwang Chol, E. Shabalin // 19th meeting on collaboration of advanced neutron sources. – Grindelwald, 2010. – P. 28-30.
6. Full scale model of pelletized cold neutron moderators for the IBR-2M reactor / K. A. Mukhin в соавторстве с M.V. Bulavin, S. A. Kulikov, V. D. Ananiev, A. A. Belyakov, A. E. Verkhoglyadov, E. N. Kulagin, A. A. Kustov, Fedorov, E. P. Shabalin, D. E. Shabalin // Proceedings of International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS XIX), PSI-Proceedings 10-01, ISSN 1019-6447, TO070. – PSI, Greendelvald. – p. 1-8.
7. Обеспечение доставки рабочего материала к камере-имитатору модели криогенного замедлителя реактора ИБР – 2М. Электроника управления и контроля / К.А. Мухин в соавторстве с В.Д. Ананьевым, А.А. Беляковым, А.А. Богдзелем, М.В. Булавиным, А.Е. Верхоглядковым, Е.Н. Кулагиным, С.А. Куликовым, А.А. Кустовым, А.А. Любимцевым, Т.Б. Петуховой, А.П. Сиротиным, А.Н. Федоровым, Д.Е. Шабалиным, Е.П. Шабалиным, В.К. Широковым // Труды XV–ой научной конференции молодых учёных и специалистов. – Дубна, 2011. – С. 198.
8. Test stand of the technological system of the cryogenic moderator with the control electronics / K.A. Mukhin в соавторстве с S. A. Kulikov, V. D. Ananiev, A. A. Belyakov, A.A. Bogdzel, M.V. Bulavin, A. E. Verkhoglyadov, E. N. Kulagin, A. A. Kustov, A.N. Fedorov, E. P. Shabalin, D. E. Shabalin, T.B. Petukhova, A.P. Sirotnin, V.K. Shirokov // Romanian journal of science and arts. – 2011. – № 3. – P. 339-346.
9. Pelletized Solid Methane Cold Neutron Moderators / K. Mukhin в соавторстве с Ryom Gwang Chol, E. Shabalin // 5th European conference on neutron scattering (ECNS 2011), Journal of Physics: Conference Series Volume 340, ISBN: 978-1-62276-686-4, ISSN: 1742-6588, Prague - p.120-121.
10. Advanced pelletized cold moderators for the IBR-2M research reactor for condensed matter research / K. Mukhin в соавторстве с A. Belyakov, M. Bulavin, S. Kulikov, E. Shabalin, A. Verhoglyadov // Proceedings of International Conference

- of Advanced Neutron Sources, ICANS XX. – Bariloche, Argentina, 2012. – id 341.
11. Первый в мире шариковый холодный замедлитель нейтронов / 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. Сиротиным, А.Н. Федоровым, Д.Е. Шабалиным, Е.П. Шабалиным, В.К. Широковым // Сообщения Объединенного Института Ядерных Исследований. – 2012. – P13-2012-113. – 14 с.
 12. Current status of development advanced pelletized cold moderators for the IBR-2M research reactor / К. Mukhin в соавторстве с А. Beliakov, М. Bulavin, S. Kulikov, E. Shabalin, A. Verhoglyadov // Physics of particles and nuclei, letters. – 2013. – Vol. 10. – №2. – P. 230-235.
 13. 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. Сиротиным, А.Н. Федоровым, Д.Е. Шабалиным, Е.П. Шабалиным, В.К. Широковым // Журнал приборы и техника эксперимента. – 2013. – №1. – С. 128-134.
 14. Пат. 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. Верхоглядным, С.А. Куликовым, А.А. Кустовым, Д.Е. Шабалиным, Е.П. Шабалиным; заявитель и патентообладатель Объединенный институт ядерных исследований. – Опубл. RU БИПМ № 35, 10.09.2013. – С. 2.
 15. 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.

16. 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.
17. Control system of pelletized cold neutron moderator of the IBR-2 reactor / K.A. Mukhin в соавторстве с A.A. 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.
18. Pelletized cold moderator of the IBR-2 reactor: current status and future development / K. Mukhin в соавторстве с V. Ananiev, A. Beliaikov, M. Bulavin, A. Verkhogliadov, E. Kulagin, S. Kulikov, K. Mukhin, E. Shabalin and K. Loktaev // Journal of physics: conference series (ECNS 2015). – 2016. - №746, 012031, p. 6.
19. Combined neutron moderator for the IBR-2 reactor. Project of cold neutron source with moderator with continuous change of pellets in the chamber on the basis of the combined moderator. Cryogenic system for cold moderator complex. Technical device and support for moderators / K. Mukhin в соавторстве с V. Ananiev, A. Beliaikov, A. Kustov, A. Lyubimtsev // Journal of physics: conference series (ECNS 2015). – 2016. - №746, 201500010.
20. Possibility of loading the chamber of the “central” pelletized cold moderator for IBR-2 reactor beams 1, 4–6, and 9 / K.A. Mukhin в соавторстве с A. A. 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.
21. Оптимизация и сравнение вариантов головной части замедлителя «центрального» направления реактора ИБР-2 / Мухин К.А., в соавторстве с Роговым А.Д. // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, № 2(214). С. 152 – 161.

22. 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.

Достоверность работы подтверждается успешной эксплуатацией систем и оборудования комбинированного замедлителя КЗ 202 в направлении экспериментальных пучков №№ 7, 8, 10, 11 установки ИБР-2, получено увеличение нейтронного потока до 22% на спектрометре неупругого рассеяния НЕРА и спектрометре поляризованных нейтронов РЕМУР, физико-техническими параметрами полученными на прототипе КЗ 201. Экспериментально подтверждены данные о работе многоконтурной криогенной системе комплекса замедлителей в соответствии с заявленными.

Ценность работы в рамках научных тем и программ

Научные темы и программы в рамках которых, выполнялась работа:

1. Контракт с МАГАТЭ, CRP F1.20.21 «Создание перспективных источников холодных нейтронов».
2. Государственный контракт по ФЦП № 02.740.11.0533 от «15» марта 2010 г. «Установка – криогенный замедлитель на основе ароматических углеводородов для получения интенсивного потока холодных нейтронов на мощном импульсном исследовательском реакторе ИБР-2М». Шифр 2010-1.1-412-010-007.
3. Научная тема 04-4-1075-2009/2014 «Перспективные разработки и создание оборудования для спектрометров ИБР-2М».
4. Научная тема 04-4-1122-2015/2017 «Развитие экспериментальной базы для проведения исследований конденсированных сред на пучках ИЯУ ИБР-2».
5. Научная тема 04-4-1105-2011/2019 «Развитие исследовательской ядерной установки ИБР-2 с комплексом криогенных замедлителей нейтронов».

Апробация диссертационной работы

Результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях. Ценность проекта неоднократно оценивалась мировым сообществом с присуждением дипломов и грамот:

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 член-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 и семинары:

1. 2nd Joint seminar JINR – Romania on neutron physics for investigation of nuclei condensed matter and life science (JSJR). Baia Mare, Romania, 2007 г.
2. Конференция молодых ученых и специалистов ОМУС 2009. Дубна 2009 г.
3. ICANS XIX (International Collaboration on Advanced Cold Neutron Sources) March 8-12, 2010 in Grindelwald, Switzerland.
4. «Вакуумная техника и технологии - 2010» 15-17 июня 2010 г. НОУ ИДПО «АТОМПРОФ» г. Санкт-Петербург.
5. 10-я международная «Байкальская Летняя Школа по Физике Элементарных Частиц и Астрофизике» 06-14 июля 2010 г. г. Иркутск.
6. V European conference on neutron scattering (ECNS 2011), 17-22 июля 2011 г. г. Прага.

7. 46th crystallographic course at Ettore Majorana Centre, Erice, Italy, 2013.
8. Towards Reality in Nanoscale Materials VII Levi, Finland 10-12.02.2014.
9. ICANS XXI (International Collaboration of Advanced Cold Neutron Source), Mito, Japan 28.09-04.10.2014.
10. Международная научно-технической конференции современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ, г. Санкт-Петербург (ИХиБТ НИУ ИТМО) 19-23/05/2015г.
11. Конференции молодых ученых и специалистов «Нарова 2015», ПИЯФ г. Гатчина, 27/06-03/07/2015г.
12. VI European conference on neutron scattering (ECNS 2015), Saragosa, Spain 29/08-05/09/2015.
13. International Atomic Energy Agency. Coordination meeting. Vienna 2016.
14. Седьмая Российская молодежная школа по радиохимии и ядерным технологиям. МГУ им. Ломоносова г. Кыштым 2016 г.
15. ICANS XXII (International Collaboration of Advanced Cold Neutron Source), Oxford 2017.

Публикации и патенты по теме работы

По теме диссертации опубликовано 22 печатные работы, из них 7 статей в журналах, входящих в перечень ВАК и 2 патента.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из: введения, 4-х глав, заключения, библиографического списка. Полный объем составляет 146 страниц машинописного текста, в том числе 72 рисунка, 6 таблиц, 80 библиографических ссылок.

ГЛАВА 1. ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ХОЛОДНЫХ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ НА РЕАКТОРАХ ЛНФ

1.1 Обзор источников холодных нейтронов в мире

Высокоинтенсивный поток низкоэнергетических нейтронов (менее 5 мэВ) можно получить, применяя специальные устройства, называемые замедлителями. Нейтрон, замедляясь в веществе, испытывает многократные столкновения с атомами вещества, теряя при каждом столкновении часть своей кинетической энергии. Потеря нейтроном доли энергии при упругом соударении (рассматривается как упругое столкновение шаров в классической механике) описывается формулой

$$\xi = \ln \frac{\overline{E_0}}{E} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \left(\frac{A-1}{A+1} \right), \quad (1)$$

где A – массовое число ядра замедляющего вещества, E_0 и E – энергия нейтрона до и после соударения соответственно. Кроме этого, важными параметрами являются средняя длина свободного пробега нейтрона до рассеяния l_s и средняя длина свободного пробега до поглощения l_a . Из формулы (1) видно, что большую долю потери энергии нейтрон испытает на легких ядрах, например водорода до 1/2 за одно соударение. Кроме этого, оптимальное замедляющее вещество должно иметь большое сечение рассеяния (длина свободного пробега до рассеяния l_s должна быть наименьшей), а сечение поглощения маленьким (длина свободного пробега до поглощения l_a наибольшей). Учитывая совокупность этих свойств, можно отметить, что водород и другие водородосодержащие вещества являются наилучшими замедлителями нейтронов.

В настоящее время в мире накоплен большой опыт по созданию и применению криогенных замедлителей на высокопоточных установках, генерирующих нейтроны. Условно можно назвать реакторы или ускорители «первичными» источниками нейтронов, замедлители «вторичными». Источника холодных нейтронов – это сложная научно-техническая установка, при разработке которой следует учитывать множество факторов: надежность

работы, физические параметры, ориентацию по отношению к физическим инструментам, дозовую нагрузку, режим эксплуатации и т.д. Из этого следует, что каждый отдельный источник холодных нейтронов (замедлитель) разрабатывается сугубо индивидуально, учитывая параметры первичного источника и физическое оборудование, для которого создается источник холодных нейтронов (ИХН).

На данный момент на территории Российской Федерации нет ни одного (кроме описанного в работе) действующего источника холодных нейтронов, в то время как в мире их насчитывается более 14 (2 в Германии, 1 в Венгрии, 4 в США, 1 во Франции, 3 в Англии, 2 в Японии, 1 в Австралии). Для выполнения приоритетных и перспективных исследований с нейтронами длина волны которых более 0,4 нм, сохранения передовых позиций среди высокопоточных источников нейтронов в мире на установке ИБР-2 создается источник холодных нейтронов. Этот источник состоит из 3-х замедлителей, окружающих активную зону реактора. Каждый замедлитель включает в себя криогенную камеру и тепловые (водяные) камеры. Такая комбинация позволяет получить спектр нейтронов в широком диапазоне длин волн от 0,6 Å до 16 Å [11].

1.2 Сравнительная характеристика веществ для холодного замедлителя

Эффективность источника холодных нейтронов в своей основе определяется свойствами материала, используемого в качестве замедляющего вещества. Для замедления нейтронов обычно используют жидкий водород, водяной лед, метан в жидком и газообразном состоянии, мезитилен, пропан и другие водородосодержащие вещества. В настоящее время, на ускорителях по типу реакции spallation, стационарных и импульсных реакторах в мире действует 14 источников холодных нейтронов. Из них 7 в качестве замедляющего вещества используют жидкий орто-пара водород, 3 тяжелую воду, 4 углеводороды (метан, пропан, мезитилен и т.д.).

Рассмотрим группы материалов отдельно и дадим оценку положительным и отрицательным свойствам этих веществ, применяющихся в качестве замедлителей.

Прежде чем переходить к физико-химическим свойствам материала замедлителя, следует отметить значимые факторы, влияющие на выход длинноволновых нейтронов с $\lambda > 4 \text{ \AA}$:

- интенсивность «первичного» источника;
- геометрическая форма замедлителя;
- температура холодного замедлителя;
- расположение замедлителя относительно активной зоны реактора или мишени ускорителя;
- сечение рассеяния и сечение поглощения материала замедлителя.

Учитывая, что замедлитель должен быть эффективным, стабильным, технически надежным, работающим в диапазоне температура от 10 К до 120 К, можно выделить наиболее важные свойства, которыми должен обладать материал холодного замедлителя:

- большое сечение рассеяния и малое сечение поглощения;
- высокая радиационная стойкость;
- диапазон работы в интервале 10 К – 150 К без падения эффективности и скорости изменения внутренней структуры вещества;
- иметь низколежащие ротационные уровни возбуждения молекул;
- хорошая теплопроводность;
- технологичность;
- безопасность эксплуатации.

Водород. В большинстве первых холодных замедлителях, сконструированных на исследовательских реакторах, использовали жидкий водород. Точнее будет сказать: две составные части водорода – орто-водород и пара-водород в смеси. При изменении температуры смесь становится более

насыщенна либо орто-, либо пара-водородом. Так, при температуре около 27°C составная часть из пара-водорода составляет приблизительно 25%, а орто-водородная 75%. При понижении температуры в водороде начинает преобладать пара-водородная составляющая. Стоит отметить, что по выходу холодных нейтронов пара-водород лучше орто-водорода, что определяется разными сечениями рассеяния нейтронов.

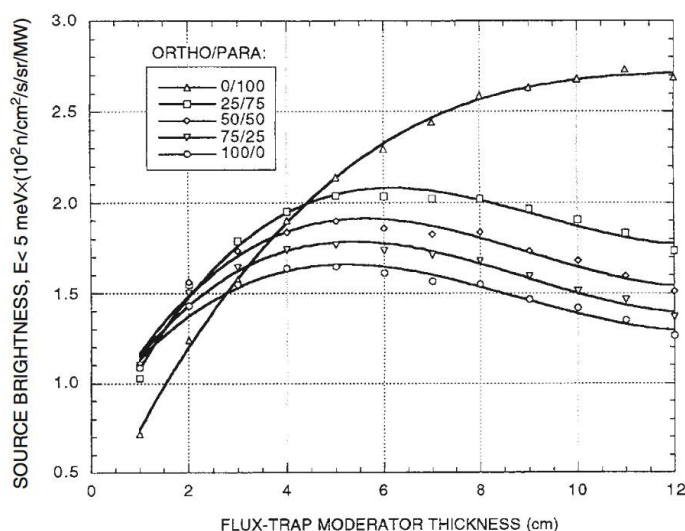


Рисунок 3. Зависимость выхода нейтронов с длиной волны более 4 ангстрем в зависимости от толщины замедлителя в см. и процентного отношения орто/пара фазы жидкого водорода.

Из рисунка 3 следует, что с понижением температуры замедляющего вещества (увеличивая пара составляющую), можно смещать пик нейтронного спектра в область больших длин волн без существенной потери потока [12].

Основным положительным качеством водорода является его стойкость к изменению структуры под действием радиации. Он не подвержен радиолизу с образованием полимерных соединений. Учитывая относительно высокую плотность атомов водорода, его прокачка по контуру дает возможность интенсивно отводить тепло и иметь стабильную температуру в камере замедлителя. Наряду с этим, стоит отметить, что водород имеет и ряд недостатков, которые стали более существенными в последнее время для экспериментаторов, желающих получить гибкий источник (возможность работы в широком диапазоне температур), позволяющий им в зависимости от

эксперимента смещать пик нейтронного спектра в область больших или меньших длин волн. Жидководородные замедлители лишены такой возможности, а их эксплуатация жестко ограничена температурным режимом 14 К – 21 К (температура плавления – кипения). Взрывоопасность также является негативным фактором, что накладывает жесткие ограничения на применение этого материала на импульсных источниках, таких как ИБР-2. Были известны 2 взрыва жидководородного замедлителя на стационарных установках, которые не привели к серьезным последствиям, но выявили потенциальную возможность таких случаев. Учитывая, что импульсные источники в 40 раз чувствительнее к изменению геометрии, чем стационарные установки и реакторы, последствия такой аварии на ИБР-2 могут быть необратимы [13].

Дейтерий. Как и водород дейтерий чаще всего используют в жидкой фазе в температурном диапазоне 18,5 К – 23,5 К (плавление – кипение). Сечение рассеяния в дейтерии меньше, чем в водороде, вследствие чего, толщина замедлителя должна быть больше. Из-за большой толщины формирование максимума потока холодных нейтронов происходит в центральной части замедлителя. Для увеличения фактора выигрыша в дейтериевом замедлителе устанавливают полости с газообразным гелием или дейтерием, что может дать увеличение выигрыша от 1,5 до 2-х раз в зависимости от расположения камеры вокруг источника. В случае, когда по технологическим причинам нет возможности изготовить источник достаточной толщины (объема), для повышения эффективности замедления нейтронов могут применяться водородо-дейтериевые смеси. На источнике FRM-II (Юлих) опытным путем было определено, что наилучшее соотношение водородо-дейтериевого источника для выхода длинноволновых нейтронов получается из смеси 0,5 – 1 части водорода к 9 – 9,5 частям дейтерия.

Переходя к углеводородным материалам, первым стоит отметить **метан**, который может применяться в качестве замедляющего вещества, как в жидком, так и в твёрдом состоянии. Метан в настоящее время, обладает наилучшим

набором свойств для замедления нейтронов. Наличие низколежащих вращательных уровней возбуждения молекул (рис. 4), высокую плотность протонов, позволяет уменьшить длину свободного пробега нейтрона до рассеяния, тем самым сокращается время термолизации (таб. 2) [14, 15, 16]. На установке Jessica (USA) при использовании твердого метана (20 К) выход нейтронов с $\lambda > 4\text{\AA}$ увеличился в более чем в 3,5 раза по сравнению с жидководородным замедлителем [18].

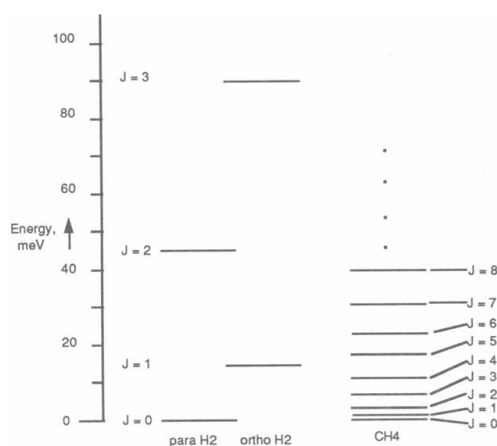


Рисунок 4. Схема расположения энергетических уровней возбуждения (meV) в орто (ortho H₂), пара (para H₂) состоянии водорода и метане (CH₄).

Таблица 2. Значимые физические параметры основных замедляющих материалов.

Название	Химическая формула	Т пл. (К)	Т кип. (К)	Взрывоопасность / токсичность	Плотность протонов (p/см ³ x 10 ²³)
Вода	H ₂ O	273	373	Безопасна / нетоксична	0,61
Водород	H ₂	13,96	20,4	Взрывоопасен / нетоксичен	0,42
Пропан	C ₃ H ₈	85,4	230,9	Взрывоопасен / мало токсичен	0,64
Метан	CH ₄	90,5	111,4	Взрывоопасен / нетоксичен	0,79
Мезитилен	C ₉ H ₁₂	228	438	Безопасен / нетоксичен	0,65

Между тем, метан менее технологичен и надежен в использовании ввиду его слабой радиационной стойкости. Это проявляется в образовании радикалов, длинных олигомеров и накоплении радиолитического водорода, который при повышении температуры замедляющего вещества выше 60 К начинает высвобождаться, создавая давление внутри камеры, которое может привести к разрушению изделия (источник IPNS [17], установка ИБР-2 [13]). Цепные реакции рекомбинации радикалов в результате облучения твердого метана приводят к спонтанному локальному повышению температуры внутри камеры криогенного замедлителя с твердым метаном. Локальные же экзотермические реакции, протекающие внезапно при работе в стационарном режиме (20 К), не прогнозируемо меняют нейтронный спектр с поверхности замедлителя, нарушая работу инструментов на выведенных пучках, ухудшая статистику, смазывая отдельные пики и т.д. Следует отметить, что в результате реакции рекомбинации температура может повышаться до 75 К, чего достаточно для высвобождения связанного водорода, что как отмечалось ранее может привести к избыточному, критическому давлению на стенки камеры замедлителя, а в дальнейшем его разрушению (рис. 5) [13, 19].

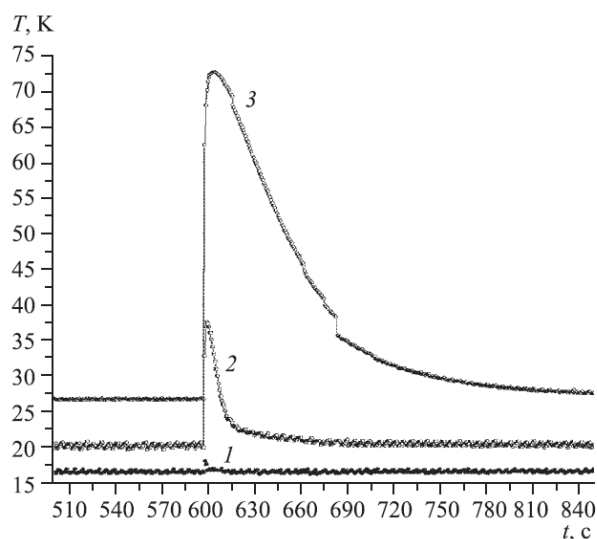


Рисунок 5. Изменение температур вследствие спонтанных реакций рекомбинации в метане (1 – температура охлаждающего гелия, 2 – температура стенки камеры, 3 – температура метана).

Опыт эксплуатации твердометанового замедлителя ИБР-2 показал, что разрушения камеры можно избежать, если в процессе работы периодически откачивать выделяющийся водород из камеры. Но проблему спонтанного повышения температуры решить не удалось. Кроме этого, открылась еще одна проблема – накопление смол и продуктов распада исходного вещества в длинные олигомеры, которые в виде твердого осадка оставались на стенках камеры. Удалить эти продукты реакции со стенок камеры не представлялось возможным. Накопление этих продуктов затрудняло выход нейтронов с поверхности замедлителя (деградация потока к концу цикла работы составляла до 30%), а дальнейшая эксплуатация привела бы к полному закоксовыванию камеры замедлителя [13, 21, 22]. Решением вышеописанных проблем мог бы служить замедлитель на основе дисперсных частиц периодически заменяемых в рабочей камере [20].

Мезитилен – имеет химическую формулу $C_6H_3(CH_3)_3$, представляет собой ароматический углеводород, имеющий три метильные группы (рис. 6), обладающий низколежащими вращательными уровнями возбуждения и обладающий высокой плотностью протонов (таб. 3).

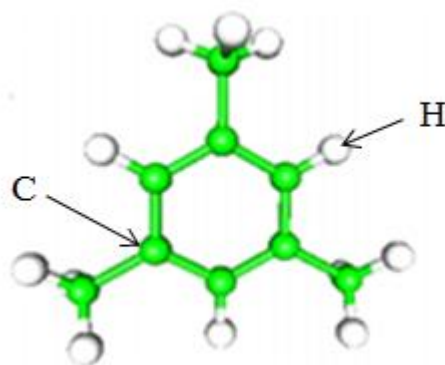


Рисунок 6. Мезитилен – 1,3,4 – триметилбензол. C – атомы углерода, H – атомы водорода.

На ряду с этим, мезитилен имеет довольно высокую радиационную стойкость, широкий диапазон рабочих температур (10 К – 150 К). По выходу низкоэнергитических нейтронов находится между метановым и жидководородным замедлителем (рис. 7) [18].

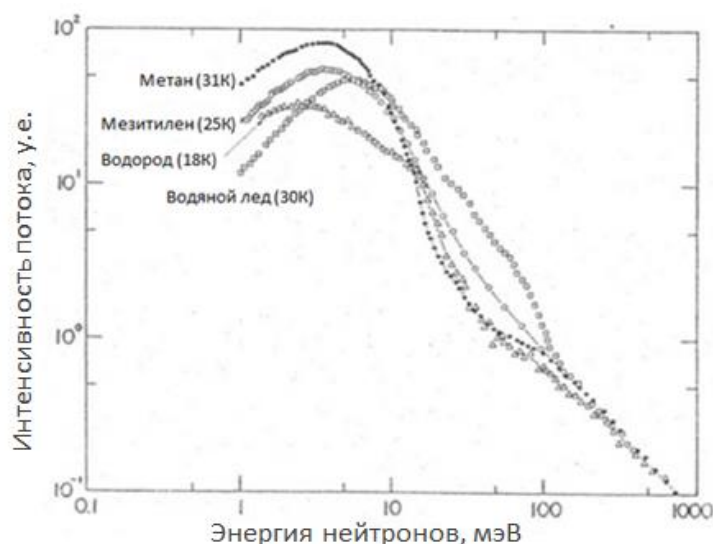


Рисунок 7. Нейтронный спектр с поверхности замедлителя при применении различных веществ – замедлителей.

В работе Гюнтера Бауэра [18] описывается идеальный вариант создания комбинированного холодного источника, где основой бы являлась вариация из твердого метана и водяного льда при температуре (30 К). Такой замедлитель позволил бы получить наиболее универсальный источник нейтронов с высокой интенсивностью. К сожалению, как отмечалось ранее, метан в твердом состоянии не технологичен (при применении в виде цельного куска), как и водяной лед, который обладает всеми теми же недостатками, что и метан. К тому же наблюдаемые реакции рекомбинации разогревали водяной лед до температуры 150 К, что приводило к более интенсивному выходу водорода из структуры и разрушало её.

1.3 Холодные замедлители нейтронов на реакторах ЛНФ

1.3.1 Первые замедлители на ИБР и ИБР-30

С начала 60-х годов XX века ведущие ученые Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка (Шапиро Ф.Л., Голиков В.В., Шкатула А. и др.) предпринимали первые попытки применения холодных замедлителей нейтронов Лаборатории. Первые удачные эксперименты проводили с бериллием, охлаждаемым до температуры жидкого азота, установив его в непосредственной близости от штатного теплового замедлителя на основе парафина и получив, таким образом, четырехкратный выигрыш в потоке

холодных нейтронов. Позднее был разработан холодный замедлитель на основе полиэтилена в виде «пачки» тонких пленок с толстым слоем бериллия, использующегося здесь в качестве отражающего слоя. В итоге, фактор выигрыша такого холодного замедлителя оказался более 12 раз, что связано, во-первых, со снижением температуры нейтронного потока (фактор выигрыша 5 – 6 раз) и, во-вторых, с увеличением количества тепловых нейтронов в полиэтилене, вследствие отражения от бериллия (фактор выигрыша еще 2 раза). Данный замедлитель работал на реакторах ИБР и ИБР-30 в течение нескольких лет. Однако, из-за серьезных проблем с радиационной стойкостью полиэтилена и некоторых других водородосодержащих материалов при проектировании нового реактора ИБР-2 рассматривались различные альтернативы полиэтилену с бериллием. В первую очередь это жидкий водород, концептуальный проект которого был подготовлен Назаровым В.М. и Навроцким А. Однако, испытания предложенного Назаровым гребенчатого замедлителя на основе воды показали, что данный замедлитель проигрывает жидкому водороду всего лишь в 2 раза. Это при том, что разработка жидководородного замедлителя сама по себе подразумевает создание серьезной системы защиты, что довольно сложно и дорого.

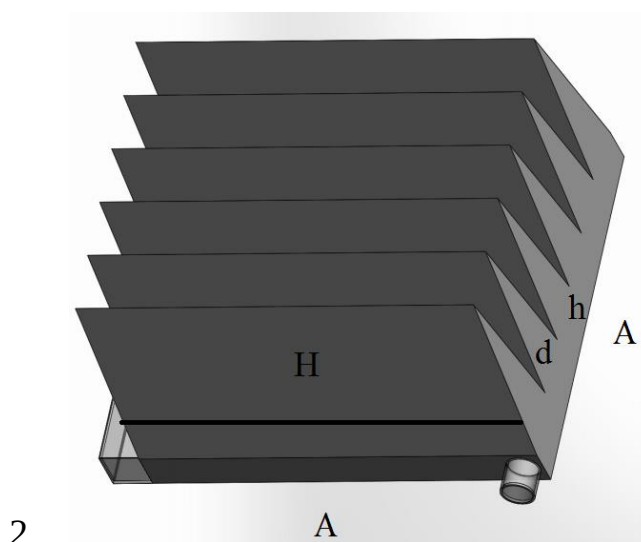


Рисунок 8. 3D модель гребенчатого замедлителя.

Гребенчатый замедлитель, предложенный Назаровым, представляет собой алюминиевый сосуд, заполненный водой или водно-спиртовой смесью

(рис. 8). Сплошной слой воды толщиной h выбирался экспериментально (до 5 см). Высота гребней H составила 10 см и была выбрана таким образом, что общая усредненная толщина замедлителя по воде была не менее 8-10 см [3]. При таком слое воды на глубине 3 см достигается максимальная плотность потока нейтронов. Исследования гребенчатого замедлителя показали, что он в 2-3 раза эффективнее замедлителя с отражателем из бериллия [23]. Полученная из нейтронных спектров зависимость фактора выигрыша показывает, что даже без охлаждения гребенчатый замедлитель увеличивал в 5-6 раз интенсивность холодных нейтронов с его поверхности по сравнению с плоским водяным замедлителем. При охлаждении макета камеры гребенчатого замедлителя до 90 – 100 К [22] было показано, что выход холодных нейтронов увеличивается почти в три раза. Однако при наличии рабочей криогенной системы плотность потока холодных нейтронов оказывается ненамного выше, чем у теплового замедлителя без дополнительных конструкций. После пуска реактора ИБР-2 эффект гребенчатого замедлителя оказался в 2-3 раза ниже ожидаемого – всего около 2, поэтому в ЛНФ вновь был поставлен вопрос о создании холодного замедлителя на основе жидкого водорода. Однако черновыльская катастрофа 1986 г. остро поставила вопрос о безопасности реакторов по всей стране, и о жидководородном замедлителе пришлось на время забыть.

1.3.2 Замедлитель ИБР-2 из твердого метана

Итак, из-за черновыльской катастрофы, вместо жидкого водорода на ИБР-2 было предложено использовать в качестве холодного замедлителя твердый метан – лучший из известных материалов холодных замедлителей по выходу холодных нейтронов. Однако метан имеет очень плохую радиационную стойкость, с чем связаны достаточно серьезные проблемы при эксплуатации холодных замедлителей на его основе (см. гл. 1.2, [13]). При температуре ниже 30 К, в твёрдом облучаемом метане происходит накопление радикалов CH_3 , которые самопроизвольно рекомбинируют уже при их концентрации в материале замедлителя около 1%. Рекомбинация радикалов вызывает быстрое повышения температуры в метане (до $\sim 60\text{K}$ и более). Это приводит к

повышению давления газообразного радиолитического водорода, образующегося под действием облучения, на стенки камеры замедлителя, что существенно ограничивает ресурс работы. Все эти эффекты в конце концов приводят к необходимости периодически (раз в 5-7 часов, поднимать температуру до 70 K) проводить «отжиг» радикалов и водорода, что делает работу замедлителя нестабильной, что в свою очередь негативно отражается на физическом эксперименте и спектрометрах реактора. Несмотря на это, холодные замедлители на основе метана использовались на нейтронных источниках в США [22], Японии и Великобритании [24].

В 1990 году было решено создать подобный холодный замедлитель и на реакторе ИБР-2 в ЛНФ с целью увеличить поток холодных нейтронов с поверхности замедлителя в ~ 20 раз. В 1994 году был спроектирован и установлен первый вариант холодного метанового замедлителя СМ-1 (с гребенчатым пост замедлителем) [25 - 27], камера которого лопнула в процессе отогрева из-за большого количества накопившегося водорода в процессе облучения. Такая же ситуация и в тех же условиях произошла и на источнике IPNS (США) (рис. 9).

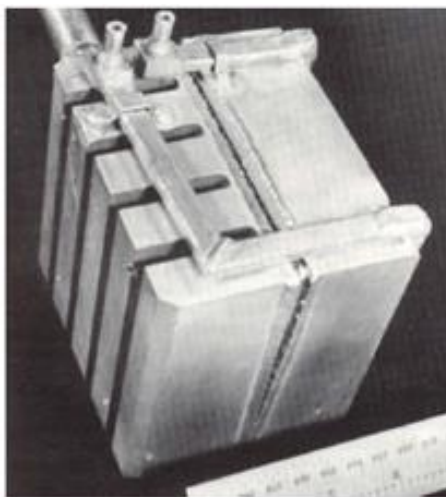


Рисунок. 9. Лопнувшая камера метанового замедлителя на источнике IPNS (США).

В этом же году был спроектирован замедлитель СМ-2 (рис. 10), отличие которого от СМ-1 заключалось в наличии щелевого зазора вблизи одной из стенок камеры, что позволяло бы радиолитическому водороду легче покидать

камеру замедлителя, не создавая избыточного давления на ее стенки [27-30]. Кроме того, добавка 2,5-5% этилена к метану снижала выход водорода $\sim$ в 2 раза, что также существенно облегчало работу с замедлителем. Для сохранения выхода холодных нейтронов был применен охлаждаемый бериллиевый отражатель толщиной 4 см. Метан специальным образом намораживался на одну из стенок камеры. На рисунке 11 показан вертикальный разрез замедлителя СМ-2, с фотографиями стенки для намораживания метана и бериллиевой решетки (рис. 11). Стенка была выполнена с множеством тепловых мостов (иглочек), которые обеспечивали однородность намораживаемого метана, а также способствовали снижению градиента температуры в целом куске в процессе эксплуатации.

Предварительные эксперименты на пучке ИБР-30 с прототипом холодного замедлителя [28] подтвердили увеличение выхода холодных нейтронов в 2 раза при использовании бериллия. Особенностью нового бериллиевого отражателя стало наличие специальных «окон», которые повышали выход тепловых нейтронов.

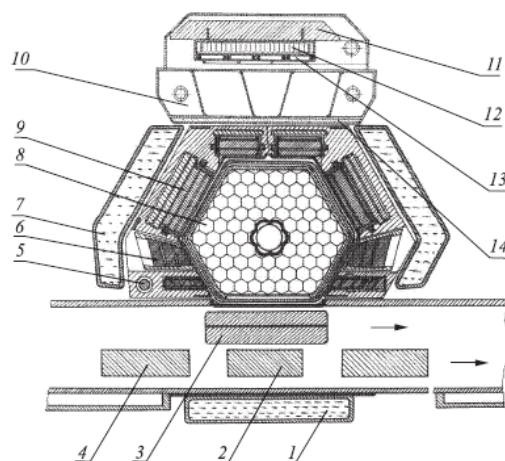


Рисунок. 10. Разрез реактора ИБР-2 с твердометановым замедлителем СМ-2, горизонтальное сечение в масштабе 1:8 [31]. 1,7 – водяные замедлители; 2, 4 – средняя и крайняя лопасти дополнительного подвижного отражателя; 3 – лопасть основного подвижного отражателя (показана конструкция до 2004 г.); 5, 6, 9 – блоки управления в стационарном отражателе; 8 – топливная кассета; 10 – водяной предзамедлитель холодного

замедлителя; 11 – бериллиевый отражатель; 12 – метановая полость холодного замедлителя; 13 – полости охлаждающего гелия; 14 – борный фильтр.



Рисунок 11. Вертикальный разрез метанового замедлителя СМ-2 с фотографиями стенки для намораживания метана и места установки бериллиевой решетки.

В 1999 – 2000 годах замедлитель СМ-2 был успешно испытан при полной мощности ИБР-2. Технологически холодный замедлитель СМ-2 устанавливался вместо одного из трех замедлителей на основе воды в жидкой фазе, которые размещались вокруг стационарного отражателя реактора. Во время работы холодного замедлителя СМ-2 на мощности реактора ИБР-2 плотность потока с поверхности замедлителя составляла $1,2 \cdot 10^{12}$ н/см²/с, что сопоставимо с плотностью потока источников холодных нейтронов в ведущих мировых нейтронных центрах [32].

В процессе эксплуатации замедлителя из твердого метана был проведен 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.

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. 12). 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 волноводах с пропускной способностью $1,5 \text{ \AA}$.

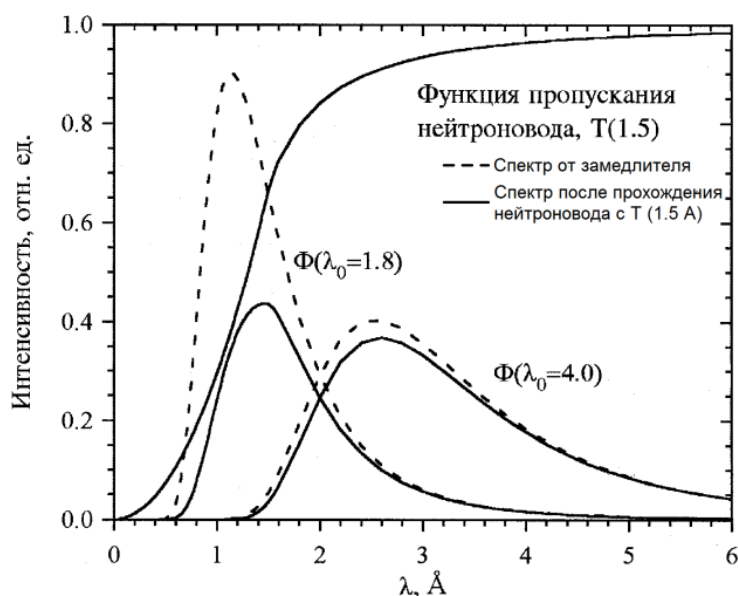


Рисунок 12. Максвелловские спектры нейтронов (пунктирные линии) от замедлителя при $T=300 \text{ K}$ ($\lambda_0=1,8 \text{ \AA}$) и $T=60 \text{ K}$ ($\lambda_0=4,0 \text{ \AA}$) и их измерения (сплошные линии) после прохождения пучка через нейтронный волновод с функцией пропускания $T(\lambda^*=1,5 \text{ \AA})$.

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. 13).

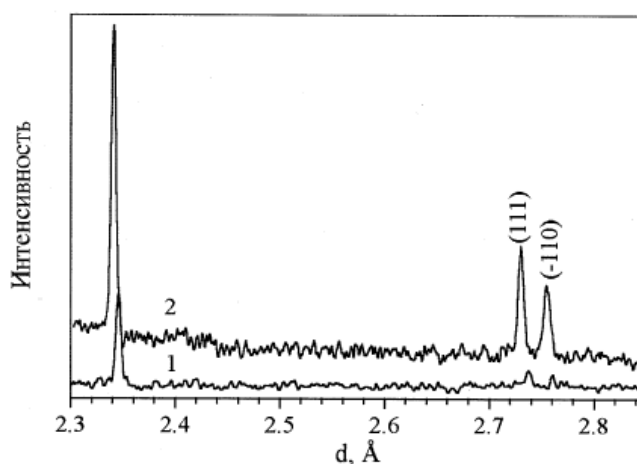


Рисунок 13. Дифракционные спектры $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{MnO}_3$ (температура образца 8 K) в области больших d_{hkl} , измеренные за одинаковое время на гребенчатом замедлителе (кривая 1) и холодном замедлителе при $T=60$ K (кривая 2). Дифракционные пики (111) и (-110) связаны с ферромагнитным упорядочением магнитных моментов Mn.

На рисунке 14 представлена работа по исследованию процесса синтеза сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ (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 , $\text{Y}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$, 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.

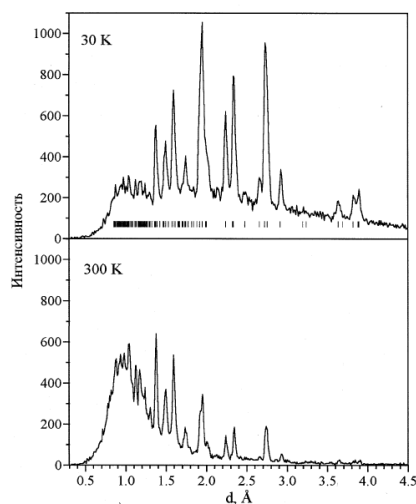


Рисунок 14. Сравнение дифракционных спектров $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$, измеренных при температурах 300 К (внизу) и 30 К (вверху) за 1 минуту. Дифракционные пики, указывающие на наличие сверхстехеометрического кислорода в области 3,5 – 4 Å, практически не видны при работе с тепловым замедлителем.

В тоже время были уточнены и технологические параметры применения метанового замедлителя на ИБР-2. Экспериментально изучались такие параметры как влияние температуры, количество метана в камере замедлителя, времени работы, концентрации поглотителей водорода и процедуры отжига на нейтронно-физические и эксплуатационные свойства холодного замедлителя. Максимальное время работы замедлителя в рамках одного реакторного цикла (11 суток) без смены метана оказалось равным 5 суткам. Несмотря на то, что за это время почти 1/3 метана превратилась в водород, этан, высокомолекулярные углеводороды и т.д., снижения интенсивности холодных нейтронов (т.е. деградации нейтронного потока) установлено не было. Кроме того, скорость образования твердых неудаляемых продуктов (смол и т.п.) радиолитического распада в случае использования твердого замороженного метана в замедлителе СМ-2 составила от $1,5 \cdot 10^{-7}$ г/Дж до $3 \cdot 10^{-7}$ г/Дж, что ниже, чем в случае использования жидкого метана. Несмотря на это замедлитель СМ-2 имел следующие недостатки:

- во-первых, это нестабильность работы, вызванная плохой радиационной стойкостью метана и длительными перерывами (около суток) в работе замедлителя для смены метана, что негативно сказывалось на работе

спектрометров реактора. Из-за этого сужается круг экспериментов, требующих длительных времен экспозиции, например, при изучении биологических материалов или фазовых переходов;

- во-вторых, из-за того, что радиационная нагрузка на метан на ИБР-2 больше (около 0,1 Вт/г), чем, например, на источнике IPNS (США), в 3 раза, высококипящие смолы и углеводороды загрязняют камеру замедлителя СМ-2 заметно быстрее и ресурс ее работы значительно снижается. Так за 1000 ч работы замедлителя СМ-2 его камера загрязнялась бы на 40-50%, что означало бы невозможность дальнейшей эксплуатации замедлителя и необходимость замены такой камеры на новую.

Для продления ресурса, а также для увеличения времени работы замедлителя в рамках одного реакторного цикла, между СМ-2 и реактором устанавливался водяной замедлитель толщиной 9 см, вместо 3 см, достаточных для предварительного замедления нейтронов. Эта неизбежная мера приводила к трехкратному снижению потока холодных нейтронов с поверхности замедлителя.

Принимая во внимание физические улучшения, продемонстрированные на инструментах ИБР-2, мировой интерес к исследованиям при помощи нейтронов с большой длиной волны, была поставлена задача разработать для реактора ИБР-2 холодный замедлитель, который бы в полной мере отвечал следующим требованиям:

- стабильная и продолжительная работа (не менее 10 суток) в больших радиационных полях (около 0,5 кГр/с) с ресурсом работы не менее 10000 часов (не менее 10 лет);
- возможность работать в широком диапазоне температур.

Эксперименты, проведенные в 2002 году на установке УРАМ-2 [12] (пучок №3 ИБР-2), по исследованию радиационных эффектов в водородосодержащих соединениях показали, что среди всех материалов, которые потенциально могут быть использованы в качестве холодных

замедлителей, ароматический углеводород мезитилен в смеси с метаксилолом является наилучшим вариантом для источников нейтронов малой и средней интенсивности, в то числе и на реакторе ИБР-2.

Использование материалов с хорошей радиационной стойкостью, таких как мезитилен, может дать не только стабильность температуры (отсутствие спонтанного саморазогрева вещества) и, как следствие, стабильность нейтронного потока, но и позволит увеличить выход холодных нейтронов с поверхности замедлителя за счет его приближения к активной зоне реактора (уменьшение слоя теплового замедлителя на основе воды). Температура плавления мезитилена 227 К, что дает возможность устанавливать температурный режим в криогенной камере замедлителя в широком диапазоне. Это, в свою очередь, позволит смещать пик нейтронного спектра в область больших или меньших длин волн в зависимости от потребностей экспериментаторов.

1.4 Источник холодных нейтронов реактора ИБР-2 на основе дисперсного мезитилена

Идею применения замедляющего вещества в твердой фазе в форме гранул предложил еще в 1986 году Г. Бауер. Принцип работы такого замедлителя заключался в непрерывной смене шариков в камере замедлителя (рис. 15).

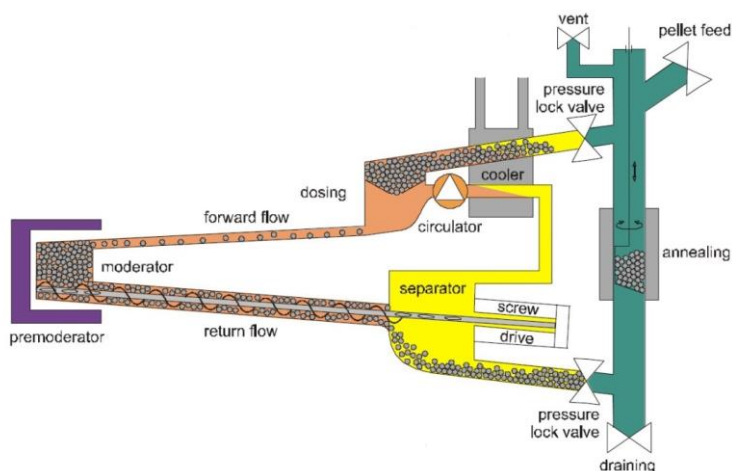


Рисунок 15. Принципиальная схема работы замедлителя Г. Бауэра с постоянной сменой метановых гранул в камере.

Такой замедлитель обладает рядом преимуществ, и его можно считать практически идеальным вариантом. Во-первых, гранулированный замедлитель легче охлаждать, прокачивая хладагент непосредственно через гранулы, обеспечивая тем самым наиболее равномерное распределение температуры в объеме криогенной камеры. Во-вторых, выгрузка гранул в твердой фазе позволяет исключить негативное воздействие облучения на исходное вещество. В этом случае загазовывания камеры и отложения продуктов радиолиза на стенках не происходит, а все физико-химические процессы будут проходить при отогреве в специальной емкости. Таким образом, Gunter Bauer предложил в своем роде уникальный «вечный» замедлитель. Конечно, такая конструкция имеет ряд особенностей и сложностей в изготовлении и эксплуатации. Главными вопросами при разработке такого источника являются вопросы изготовления гранул, подбор оборудования для циркуляции гелия, особенности пневмотранспортировки по трубопроводу сложной геометрии, выгрузка шариков из камеры замедлителя и т.д. Возможно из-за того, что до сих пор не удалось решить ряд этих вопросов источника холодных нейтронов, в том виде, как его описывал Bauer не существует.

Учитывая все преимущества применения замедляющего вещества в виде гранул или шариков на установке ИБР-2, было решено создать источник холодных нейтронов, в котором в качестве замедляющего вещества выбрали мезитилен в смеси с метаксилолом в твердой фазе в форме шариков. Сам по себе мезитилен – это ароматический углеводород (1, 3, 5-триметилбензол) с химической формулой C_9H_{12} . Как отмечалось в части 1.2 настоящей работы, мезитилен, по выходу холодных нейтронов, проигрывает метану, но существенно выигрывает по радиационной стойкости, а учитывая дозовые нагрузки ИБР-2, за счет уменьшения слоя водяного предзамедлителя становится сравним с метаном по выходу холодных нейтронов. К сожалению, учитывая особенности конструкции ИБР-2, физическое и инженерное оборудование, а также то, что замедлители создавались на уже работающем источнике в зонах спецдопуска с имеющейся биологической защитой, идею

Бауэра в полной мере реализовать не удалось. Принципиальная схема работы замедлителя установки ИБР-2 представлена на рисунке 16. Система охлаждения разделена на 2 контура: рефрижераторный и контур загрузки. Хладагентом и транспортировочной средой в обоих контурах является газообразный гелий. Гелий в контурах не смешивается и не имеет прямого контакта, а холодопередача (теплопередача) происходит в трубчатом теплообменнике (5). Первый контур охлаждения включает в себя рефрижераторную установку (4), систему распределения гелия между замедлителями, криогенные вентили, различное термометрическое и вакуумное оборудование (на принципиальной схеме рисунка 16 не указано). Во втором контуре сосредоточено непосредственно оборудование загрузки (3), гелиевая газодувка (6), обеспечивающая циркуляцию гелия с заданной скоростью, криогенная камера замедлителя (1), пневмотрубопровод подачи шариков (2), обратный трубопровод охлаждения (7), трубопровод слива отработанного мезитилена (8) и емкость для хранения отработанного мезитилена (9).

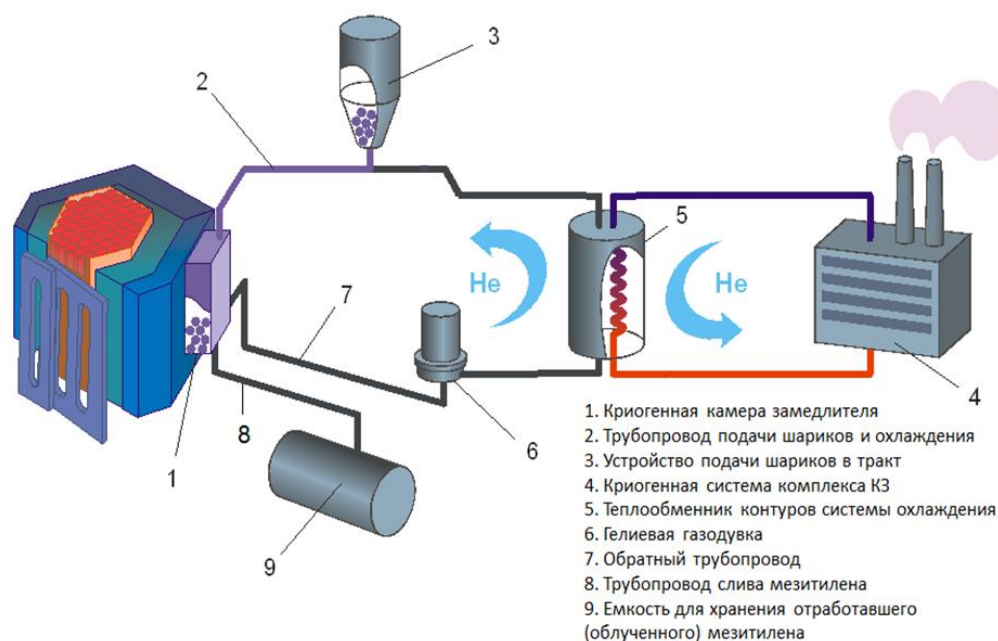


Рисунок 16. Принципиальная схема работы источника холодных нейтронов установки ИБР-2 на основе дисперсного мезитилена.

Перед началом работы ИБР-2 на физический эксперимент в режиме криогенного замедлителя температура в обоих контурах устанавливается в пределах 80 – 100 К, шарики загружаются в устройство подачи (3), после чего, они последовательно со средней скоростью 1,5 – 1,8 шарика в секунду подаются в пневмотракт (2), где подхватываются циркулирующим гелием и доставляются в криогенную камеру замедлителя (1). После окончания цикла работы ИБР-2 (~ 260 часов) на физический эксперимент температура в контурах поднимается до комнатной. При этом мезитилен плавится в камере (1) и в жидкой фазе по трубопроводу (8) удаляется в специальный объем для хранения (9), располагающийся в кольцевом коридоре ИБР-2. Затем второй контур откачивается химически стойким форвакуумным насосом до 10^{-1} Торр в течение 10 часов. При откачке из системы удаляются остаточные пары мезитилена и продукты радиолиза, система заполняется гелием. Источник холодных нейтронов снова готов к работе.

1.5 Выводы по главе 1

В главе 1 проведено сравнение свойств веществ-замедлителей, которые чаще всего применяются на высокопоточных источниках нейтронов, описаны замедлители в то или иное время работавшие на реакторах ЛНФ и возможные варианты замедлителя с постоянно сменяющимся веществом в криогенной камере замедлителя.

1. Учитывая режим работы, радиационные поля реактора ИБР-2, физические установки и оборудование окружающие активную зону, по совокупности свойств в качестве замедляющего вещества был выбран мезитилен в смеси с метаксилолом (1/3) в твердой фазе в форме шариков.
2. Принципом работы стала адаптированная под ИБР-2 идея Гюнтера Бауэра. Камера замедлителя заполнялась шариками смеси диаметром 3,5 – 3,9 мм по трассе потоком циркулирующего гелия на весь реакторный цикл (11 суток).

3. Дисперсный замедлитель на основе мезитилена дает существенные преимущества: широкий диапазон рабочих температур (20 – 150 K), равномерное охлаждение камеры замедлителя за счет прокачки хладагента непосредственно через камеру замедлителя, отсутствие локального подъема температуры в результате реакций рекомбинаций. Все это позволяет получить стабильный спектр нейтронного потока, а также смещать его в область больших или меньших длин волн за счет температурного коэффициента.

ГЛАВА 2. ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ (КЗ 202) В НАПРАВЛЕНИИ ПУЧКОВ 7, 8, 10, 11 РЕАКТОРА ИБР-2

2.1 Устройство для изготовления и сепарации шариков

Первый вопрос встающий, перед тем как принять концепцию дисперсного источника – это как сделать шарики нужного размера и достаточно правильной формы. В случае применения мезитилена как замедляющего вещества вопрос решился довольно просто из-за температур перехода в различные агрегатные состояния. Удачное сочетание температуры плавления 227 К и кипения 437 К позволяло замораживать шарики в жидком азоте, а при комнатной температуре находиться мезитилену в жидкой фазе. При таких параметрах удобно оперировать веществом, переводя его из жидкого состояния в твердое. Шарик смеси мезитилена с м-ксилолом формировался на поверхности жидкого азота, куда попадал в виде жидкости из специальной капельницы определённого калибра. Капля жидкого вещества, имея меньшую плотность, находилась на поверхности азота, удерживаемая восходящими парами, а после формирования твердой оболочки её плотность увеличивалась и сформированный шарик тонул. В результате экспериментов было замечено, что шарики на поверхности до перехода в твердое агрегатное состояние могут слипаться в случае контакта.

Устройство приготовления шариков представляет собой криостат, изолированный от наружного пространства пенопластовой накладкой и вакуумной рубашкой. Внутри расположены цилиндры (соты 19 штук) для формирования каждого шарика в отдельном объеме и исключения слипания шариков. Крышка представляет собой емкость, куда наливают мезитилено-м-ксилоловую смесь. В основании крышки установлены капельницы по количеству «сот» в криостате. Капельницы имеют возможность изменять диаметры отверстия, что позволяет регулировать скорость образования капли и соответственно минимизировать разброс диаметров шарика при генерации. В результате изготовления шарики получаются диаметром 3,5 – 4 мм. Скорость изготовления шариков составляет около 80 шариков в минуту. В зависимости

от конфигурации криогенной камеры для полной загрузки требуется от 27 000 до 32 000 шариков. На рисунке 17 показаны верхняя крышка с капельницами и индивидуальными сотами – хранилищами шариков (а), общий вид устройства генерации шариков (б).

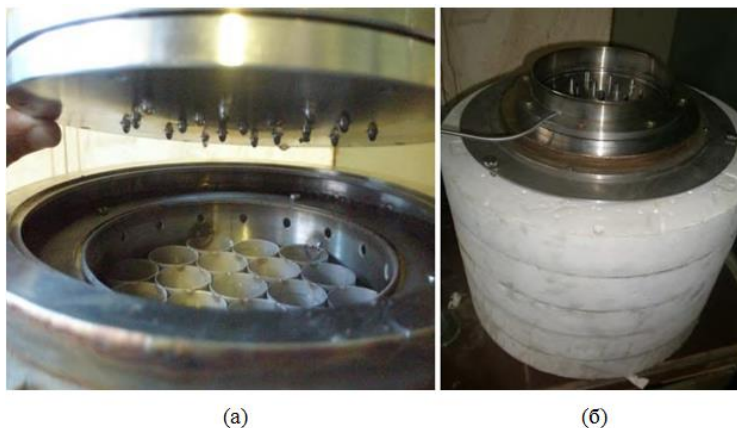


Рисунок 17. Устройство для приготовления шариков мезитилена в смеси с м-ксилолом: крышка с регулируемыми капельницами и индивидуальными сотами (а); общий вид генератора шариков (б).

Для отбора шариков требуемого диаметра в основании генератора был установлен сепаратор. Он представлял собой два цилиндра разных диаметров с сетками различного калибра. Первая сетка с размером ячейки 4,2 мм, а вторая с ячейкой 3,4 мм. Таким образом, мезитиленовые шарики большего диаметра и большие фрагменты задерживались первой решеткой, а мелкие осколки просеивались на дно через вторую решетку, на которой задерживались лишь шарики необходимого диаметра 3,5 – 4 мм. После подготовки шариков верхняя сетка, удалялась, а откалиброванные шарики продолжали храниться на второй сетке в жидком азоте. Далее вместе с жидким азотом шарики пересыпались в мерную емкость и отправлялись на хранение в сосуд Дьюара (рис. 18).



Рисунок 18. Готовые просеянные шарики в азоте перед загрузкой

2.2 Изучение процесса движения шариков в стеклянной и стальной трубках при комнатной температуре

Вторым определяющим вопросом возможности создания дисперсного замедлителя является задача загрузки фрагментарного замедляющего вещества (в данном случае шариков) в камеру замедлителя. Как отмечалось ранее, транспортная линия доставки шариков от места загрузки до камеры замедлителя имеет индивидуальную конфигурацию для каждого отдельно взятого замедлителя ИБР-2. Это обусловлено тем, что трасса загрузки проходит через уже имеющуюся систему биологической защиты в контролируемой зоне и зоне спецдопуска реактора, огибает установленное физическое оборудование (коллиматоры, прерыватели и т.д.). Длина одной трассы составляет около 25 метров. Сложность решения проблемы транспортировки шариков при криогенных температурах состояла в отсутствии теоретических и экспериментальных данных об адгезионных, упругопластинчатых и трибологических свойствах мезитилена в твердой и аморфной фазах. Кроме того, подробно в литературе не рассматривался процесс движения одиночного шарика в гладкой цилиндрической трубе диаметром в 4 раза больше диаметра шарика с учетом трения качения, скольжения. Отклонение от сферической формы на траекторию движения шарика также изучено не было. В литературе полностью отсутствовала информация о закономерности движения группы шариков в потоке гелия с учетом механических свойств мезитилена на поворотах, подъемных участках, влияния шероховатостей, преград и теплопритоков внутри пневмотрассы на траекторию движения.

Первым шагом в изучении пневмотранспортировки мезитиленовых шариков было создание модели прямого участка трубопровода длиной 3,6 метра выполненного из стекла. Шарика были тоже выполнены из стекла. По трубопроводу шарика двигались в потоке газообразного азота. Основной задачей этого эксперимента было детально рассмотреть траекторию движения шарика в трубе, а также понять зависимость скорость – ускорение шариков от скорости потока газа. Схема установки представлена на рисунке 19.

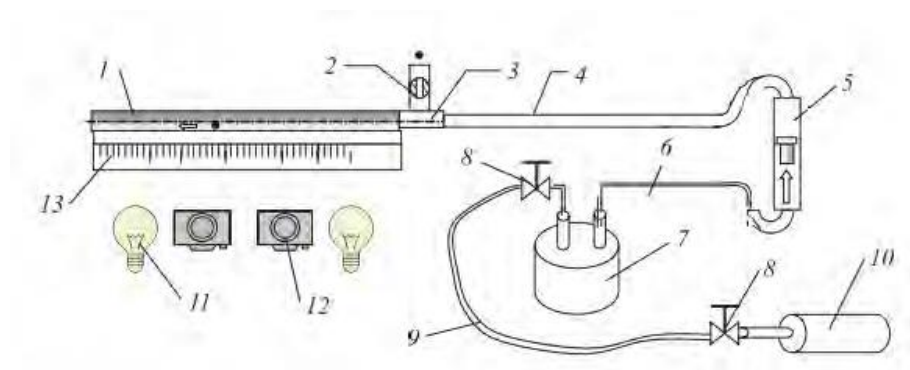


Рисунок 19. Упрощенная схема стенда для измерения параметров движения шарика в стеклянной трубе в потоке газа: 1 – стеклянная трубка диаметром 17,3 мм и длиной – 3,6 м; 2,3 – шлюз загрузки шарика с шаровым вентилем; 4 – гибкий участок подающего газопровода с малым давлением, диаметром 14 мм и длиной 5 м; 5 – расходомер; 6 – участок газопровода с большим гидравлическим сопротивлением; 7 – накопительная емкость объемом 63 л (совместно с нагрузкой 6 служит фильтром колебаний расхода газа); 8 – редукторы, понижающие расход; 9 – участок подающего газопровода большого давления (около 10 бар); 10 – баллон со сжатым воздухом (до 60 бар); 11 – осветительные прожекторы; 12 – видеокамера; 13 – измерительная линейка

В результате экспериментов со стеклянной трубой были получены базовые данные о распределении скоростей шариков, коэффициенты сопротивления покоящегося шарика, траектории движения шарика. Координата шарика по оси x определялась путем одновременной съемки 2-мя цифровыми фотокамерами с частотой 30 кадров в секунду. За время эксперимента было получено и обработано более 3000 снимков. В результате обработки видеоклипов было обнаружено, что шарики в процессе движения меняют своё пространственное положение как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, ударяясь о стенки трубы. Следует отметить, что практически во всем диапазоне скоростей движение шарика нерегулярно и погрешность в измерениях от шарика к шарiku может достигать 40 – 50%. Было обнаружено, что наличие шероховатости внутренней стенки трубы приводит к скачкам

шарика и, как следствие, потере скорости (при соударении с барьером 200 – 300 микрон потеря скорости составляет до 20%) [33].

Следующим этапом было изучение движения шариков на наклонном участке, который в случае КЗ 202 составлял 30^0 длиной 0,5 м. Для изучения возможности подъема шарика на эту высоту был собран лабораторный макет уже из трубы стали 12Х18Н10Т, имеющий наклонный участок, после которого устанавливалась стеклянная труба и по секундомеру засекалось время за которое шарик преодолевал расстояние от места загрузки до начала стеклянной трубки. Принципиальная схема эксперимента представлена на рисунках 20 (а) и 20 (б). По результатам измерений были получены распределения скоростей и времени движения стеклянных шариков диаметром 5 мм и осколков различного размера по прямой и наклонной трубе внутренним диаметром 16 мм при разном расходе газа. Установлено, что минимальная скорость газа для подъема шарика на заданную высоту 0,5 м под углом 30^0 должна составлять 11,4 м/с. При движении 2-х шариков один за другим (6 пусков по 2 шарика) при скорости газа выше 8,2 м/с подъем преодолевали только пять пар, из шестой пары, выпущенной со скоростью газа 7,4 м/с, подъем преодолел только один шарик. В случае одновременного пуска 3-х шариков при скорости 7,4 м/с, наклонный участок проходил только один шарик, 2 других выдувались только при скорости 16 м/с, что в 1,41 раза больше чем требуется для подъема одиночного шарика. Это значит, что сила, необходимая для подъема 2-х шариков должна быть в 2 раза больше в случае, если шарики не касаются друг друга. В противном случае следует увеличивать скорость, компенсируя силу трения между шариками. Следует также учитывать, что на подъеме нижний шарик будет периодически догонять и толкать верхний шарик. Вследствие этого верхний шарик движется быстрее нижнего. Более подробно процесс движения шарика в круглой трубе в лабораторных условиях и при комнатной температуре описан в работах [34].

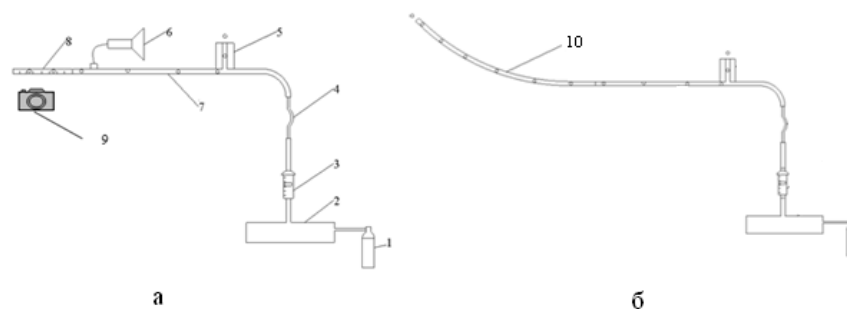


Рисунок 20. Экспериментальная установка с прямым (а) и наклонным (б) участком стальной трубы: 1 - баллон со сжатым азотом, 2 - промежуточный баллон, 3 - поплавковый расходомер, 4 - узкий трубопровод, 5 – загрузочное устройство, 6 - осциллограф с пьезокристаллом, 7 - прямой участок стальной трубы, 8 - стеклянная труба, 9 - лампы, 10 - участок подъема стальной трубы

2.3 Полномасштабный испытательный стенд комбинированного замедлителя КЗ 202

2.3.1 Принципиальная схема стенда

Теоретические расчеты и экспериментальные исследования на лабораторных стендах позволили определить такие параметры, как зависимость скорости шарика от скорости газа, разброс скоростей шариков на выходе из прямых и наклонных участков трубопровода, зависимость ускорения шарика от его начальной скорости, массовый расход газа для подъема шарика по короткому наклонному участку и т.д. Однако, эти данные нельзя было напрямую коррелировать с траекторией движения шарика в реальном трубопроводе сложной конфигурации при криогенных температурах. Во-первых, по прежнему отсутствовали знания о физических свойствах мезитилено-м-килоловой смеси, влияющие на движение шарика (адгезионные свойства шарик-шарик, труба-шарик; трибологические, коэффициенты трения, скольжения и т.д.). Во-вторых, на лабораторных стендах не было возможности моделировать полный процесс движения шарика по сложному трубопроводу. Не были известны значения потери скорости шарика на поворотах, влияние угла поворота, их количество на траекторию движения шарика, его охрупчивание и дефрагментацию. Анализируя полученные данные, стало ясно,

что без полномасштабных испытаний и моделирования загрузки на стенде, полностью повторяющем в пространстве конфигурацию реального трубопровода подачи шариков, работающего при криогенных температурах, определить возможность загрузки и отработать методику загрузки будет невозможно.

Учитывая сложность процесса транспортировки шариков, было принято решение создать стенд, повторяющий конфигурацию и размеры реального трубопровода подачи шариков [35-38], работающего при криогенных температурах. Целью экспериментов на этом стенде стало моделирование процесса загрузки и движения шариков в реальных условиях при криогенных температурах. Кроме этого, на стенде предполагалось провести испытания устройства для подачи шариков в трубопровод, датчиков движения шариков, устройства определяющего массовый расход газа в системе. Также предполагалось определить оптимальные физико-технические параметры работы устройств и среды для загрузки шариков без их существенного разрушения и образования заторов при транспортировке в криогенную камеру замедлителя.

Принципиальная схема полномасштабного стенда представлена на рисунке 21.

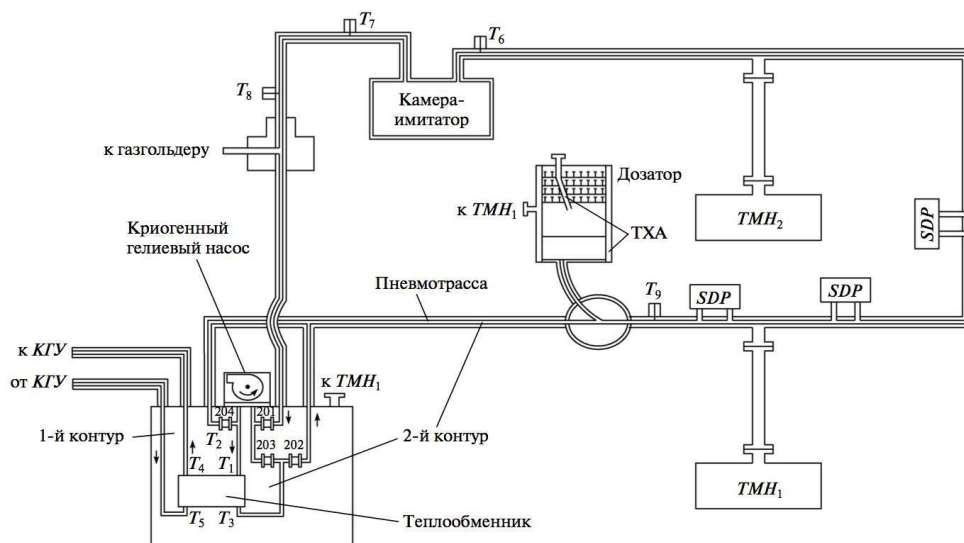


Рисунок 21. Принципиальная схема стенда замедлителя КЗ 202, работающего при криогенных температурах, где (ТМН – фланцы для

подключения турбомолекулярных вакуумных насосов; SDP – датчики дифференциального давления DXLdp; TXA – термопреобразователь хромель-алюмелевый; T – резистивные датчики температуры TBO; вентили 201–204 регулируют движение гелия в криостате).

Стенд представляет собой замкнутую криогенную петлю, в которую интегрировано устройство подачи шариков в трубопровод, датчики дифференциального давления SDP перед наклонным участком и после него, термометрическое оборудование, порт подпитки системы из газгольдера и камеру имитатор. Охлаждение стенда производится путем теплопередачи в трубчатом теплообменнике между контуром холодильной установки (рефрижераторный контур) и стендом (контур охлаждения и загрузки). В теплообменник приходит холодный гелий от холодильной гелиевой установки ХГУ 500. Это поршневой детандерный агрегат холодильной мощностью 500 Вт при 10 К. Температура в обоих контурах устанавливается на уровне 80 – 85 К. После этого шарики помещаются в устройство обеспечивающее порционную подачу в транспортный трубопровод. Попадая в трубопровод, шарики подхватываются потоком газообразного гелия, циркулирующего в контуре загрузки и доставляются в камеру – имитатор. Для заполнения камеры – имитатора КЗ 202 необходимо загрузить 27 000 шариков, этот процесс, как было установлено экспериментально, занимает около 5-6 часов. Основные параметры, обеспечивающие загрузку шариков без их разрушения, слипания или образования заторов следующие:

- массовый расход газа в контуре загрузки 1,5 – 1,8 г/с (шарики преодолевают подъем 30° на участке 500 мм);
- температура в контуре 80 – 85 К (азот, попадающий при загрузке шариков, не конденсируется и его можно отогнать методом продувки);
- скорость подачи шариков в трубопровод в среднем около 1,3 – 1,5 ш/с (шарики не догоняют друг друга и не образуют большие группы, приводящие к заторам);

- скорость шариков 1,5 – 3 м/с (шарики не разрушаются при соударении между собой и стенками трубопровода) [37, 38].

2.3.2 Транспортный трубопровод КЗ 202

Транспортный трубопровод стенда был выполнен полностью идентично трубопроводу, примененному на реальном замедлителе КЗ 202. Длина составила 25 метров. Сам трубопровод представляет собой коаксиальный холодный трубопровод с вакуумной рубашкой и многослойной изоляцией по внутренней трубе. Конструктивно замкнутый контур трубопровода условно можно разделить на 2 участка. Один из участков – это обычный коаксиальный криогенный трубопровод с многослойной изоляцией и межтрубным вакуумом не хуже чем $5 \cdot 10^{-5}$ Торр, диаметром внутреннего трубопровода 32 мм, кожухового 76 мм, разработанный и изготовленный «НПО ГЕЛИЙМАШ». Так выполнен участок обратного потока от камеры замедлителя до теплообменника. Другой участок – это участок транспортного трубопровода, по которому шарики доставляются в камеру замедлителя, разработанный КБ ЛНФ с группой № 2 МТО ЛНФ и изготовленный ОАО «НПО АТОМ». Сложная конфигурация трубопровода в пространстве, а также наличие требований по шероховатости поверхности внутреннего трубопровода, стыковки частей, могут внести корректировку в движение шариков, вплоть до образования заторов или полного разрушения шариков. Поэтому требовалось сконструировать специальный коаксиальный трубопровод без сильфонных узлов с естественной компенсацией на сжатие при охлаждении. Внутренний диаметр транспортного трубопровода 16 мм – это в 4 больше диаметра шарика, что позволяет даже группе шариков двигаться на любых участках без естественных заторов (рис. 22) [39].

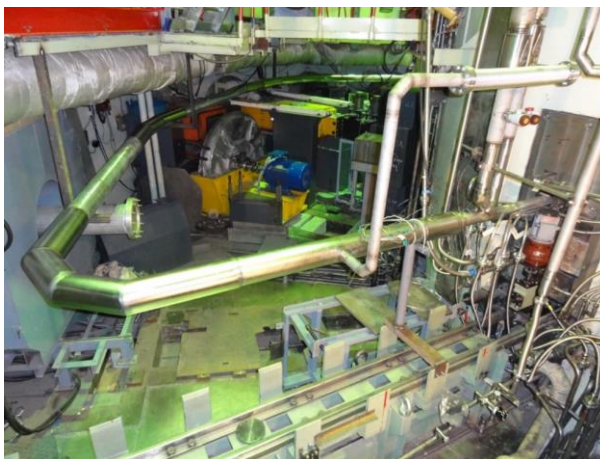


Рисунок 22. Трубопровод транспортировки шариков в КЗ 202 диаметром 130 мм в зоне спецдопуска.

Конструктивной особенностью транспортного трубопровода стало наличие специальных скользящих опор, которые были выполнены в форме колец разных диаметров, соединяющихся между собой тепловым мостом ячеистой конструкции (рис. 23).

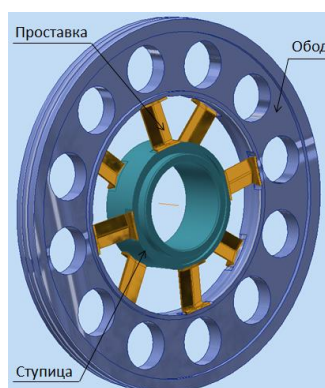


Рисунок 23. Скользящая опора транспортного криогенного трубопровода КЗ 202.

При этом пришлось сделать кожуховый трубопровод существенно большего диаметра (130 мм). За счет этого удалось компенсировать изменение геометрических размеров на поворотах. Для минимизации теплопритоков и свободного перемещения опоры ступичная часть точно приварена к внутреннему трубопроводу. Проставки соединяют обод и часть ступицы. При этом ступица выполнена таким, образом, что обод может свободно вращаться вокруг ступицы при перемещении внутреннего трубопровода вследствие изменения линейных размеров, вызванных перепадом температур. Такая

конструкция позволила обеспечить смещение трубопровода в заданных направлениях без нагрузки на растяжение и разрыв. Сам трубопровод транспортировки шариков разбит на 3 участка, на концах которых применены опоры, жестко фиксирующие внутренний и кожуховый трубопроводы. Для минимизации теплопритока по опоре контакт внутреннего трубопровода с кожуховым был выполнен в виде разветвленной поверхности – набора горизонтальных параллельных пластин, выполняющих роль теплового моста (рис. 24). Фиксация внутреннего трубопровода необходима для центрации отдельных участков при сборке. Каждый свариваемый участок транспортного трубопровода начинается с конической формы с последующим расширением на 0,2 мм по ходу движения шариков. Такая конструкция предотвращает разрушение шарика вследствие соударения с выступами сопрягаемых частей трубопровода. Наличие сложных опор, их фиксация непосредственно к внутреннему трубопроводу и прямой контакт с кожуховой трубой привели к повышенному теплопритоку, составившему порядка 3 – 3,5 Вт/м.

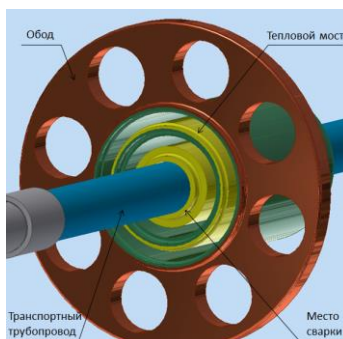


Рисунок 24. Опора, фиксирующая внутренний транспортный трубопровод КЗ 202, относительно кожухового на концах сопрягаемых участков.

Многослойная изоляция выполнялась двумя разными комбинациями материалов с учетом дозовой нагрузки ионизирующего излучения. Так в контролируемой зоне, где доза ионизирующего излучения не может превышать 5 мЗв/год, экранирующая изоляция выполнялась с переменным чередованием из пленки ПЭТ КДА и двумя слоями бумаги синтетической низкотемпературной СНТ-10, которые наносились методом непрерывной

винтовой намотки с перекрытием витков 30%. В зоне спецдопуска (200 мЗв/год) в качестве слоев экранирующей изоляции используют алюминиевую фольгу АД1, чередующуюся в качестве дистанционирующего слоя со стеклобумагой БмД-к, нанесенную методом непрерывной винтовой намотки с 20 – 30% перекрытием. Плотность намотки обоих вариантов составила 24 слоя на 10 мм. Такие трубопроводы прошли свои испытания на полномасштабном стенде КЗ 202 и в последствии были установлены на действующий комбинированный замедлитель в направлении экспериментальных пучков 7, 8, 10, 11.

2.4 Результат опытной эксплуатации комбинированного замедлителя КЗ 202 на физический эксперимент за 6 лет

Комбинированный замедлитель нейтронов КЗ 202 для пучков 7, 8, 10, 11 был введен в опытную эксплуатацию в 2012 году. Замедлитель может работать в двух штатных режимах:

- в режиме криогенного замедлителя. При этом криогенная камера заполнена шариками мезитилено-м-ксилоловой смеси с температурой 30 К;
- в режиме водяного замедлителя – когда криогенная камера пуста, а в качестве замедлителя выступает предзамедлитель с циркулирующей водой при температуре 300 К.

Эти режимы позволяют в зависимости от проводимого эксперимента, работая в режиме криогенного замедлителя, получать больше нейтронов с длиной волны более 4 Å, а работая в режиме водяного замедлителя с длиной волны от 0,6 до 4 Å. Но стоит отметить, что источник получается «узконаправленным», т.е. гибкости и плавного смещения нейтронного спектра добиться нельзя.

В настоящее время проведено более 25 циклов работы реактора ИБР-2 в режиме криогенного замедлителя. В течении этого времени были уточнены физико-технические параметры работы замедлителя, факторы выигрыша нейтронного потока в области холодных нейтронов на различных

экспериментальных установках. Определена максимальная длительность работы замедлителя в криогенном режиме.

С вводом в эксплуатацию КЗ 202 на спектрометрах появилась возможность получать оптимальный спектр нейтронного потока и работать одновременно с тепловым и холодным нейтронным спектром. Это удалось достигнуть за счет конфигурации головной части замедлителя, включающей в себя тепловые (гребенчатые) камеры, охлаждаемые водой при температуре 300 К и криогенную камеру, заполненную мезитиленовыми шариками при температуре 30 К (рис. 25).

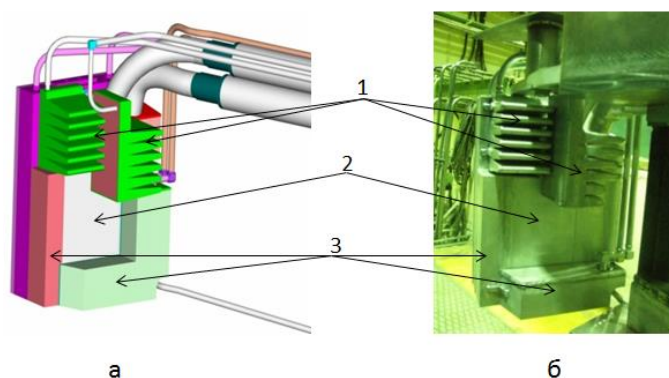


Рисунок 25. Головная часть комбинированного замедлителя КЗ 202, а) трехмерная модель, б) фотография головной части, где 1 – гребенчатые водяные камеры с температурным режимом 300 К; 2 – место расположения криогенной камеры с температурным режимом 30 К; 3 – плоские водяные постзамедлители с температурным режимом 300 К.

Замедлитель устанавливается в непосредственной близости от активной зоны реактора, при этом водяной предзамедлитель имеет классификационное обозначение ЗН по НП-033-11, другими словами может влиять на реактивность реактора. Для контроля за основными параметрами работы системы замедлителя была разработана специальная программа визуализации данных (рис. 26) [40, 41]. С помощью этой программы в режиме on-line контролируются следующие параметры:

- вакуум в межтрубном пространстве;
- температуры в различных точках системы;

- обороты газодувки;
- массовый расход гелия в системе;
- объем гелия в газгольдере.

Данные, полученные в результате работы, записываются и хранятся. Это позволяет проследить за динамикой изменения, проводя анализ протекания процесса при необходимости.

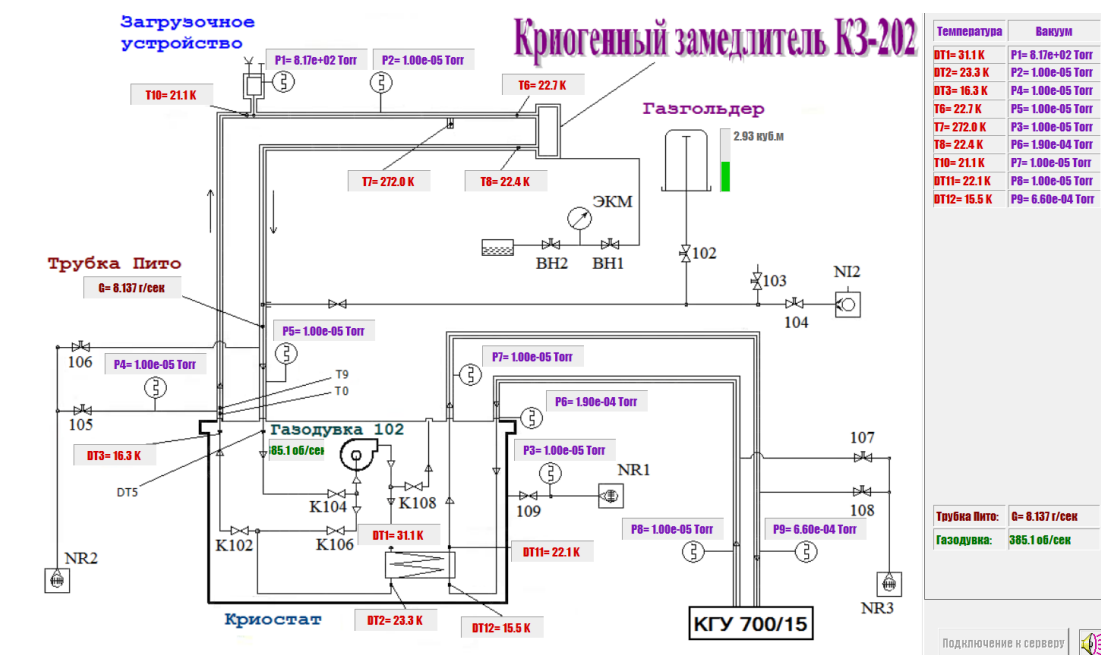


Рисунок 26. Окно программы контроля за параметрами замедлителя КЗ 202.

На установке РЕМУР (пучок № 8) и установке СКАТ (пучок № 7б) за время эксплуатации КЗ 202 был проведен цикл экспериментов, направленных на уточнение улучшений количественных и качественных параметров физических установок при использовании комбинированного замедлителя КЗ 202. К примеру, на спектрометре поляризованных нейтронов РЕМУР была продемонстрирована возможность расщепления микропучка без применения анализа поляризации, что сократило 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 $16 \text{ \AA}$. Такое увеличение интенсивности не только сократило время проведения экспериментов от 4 до 10 раз, но и

обеспечило десятикратное улучшение качества получаемых данных за счет роста фактора сигнал/фон.

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 [44 – 46].

2.5 Выводы по главе 2

Основные выводы второй главы диссертационной работы следующие:

1. Разработано устройство генерации и сепарации шариков из смеси мезитилена и метаксилола. Формирование шариков происходит в отдельных ячейках – это препятствует их слипанию на стадии формирования и затвердевания. Устройство позволяет регулировать частоту генерации шариков и их размер. Оптимальная производительность составляет 80 шариков в минуту.
2. На лабораторных стендах детально изучена траектория движения шариков, зависимость скорости шарика от скорости транспортирующего газа, влияние шероховатостей и подъемов на характеристики движения. Установлено, что шарик, движущийся вторым догоняет первый шарик, придавая ему дополнительный импульс.
3. Установлено, что разброс скоростей шариков достаточно велик (до 50%), поэтому, в каждом конкретном случае, при разработке дисперсного замедлителя со сложной пневмотрассой необходимо проводить полномасштабные испытания при криогенных температурах, определяя и подбирая оптимальные параметры работы

оборудования и физическо-технические характеристики гелия. Для разработки методики загрузки шариков создан полномасштабный стенд КЗ 202, на котором были уточнены параметры загрузки, при которых шарики не слипаются, не разрушаются, и не образуются заторы.

4. Разработан специальный транспортный трубопровод для замедлителя КЗ 202, который не имеет сильфонных узлов. Компенсация линейных изменений размеров трубопровода (при охлаждении и нагреве) происходит за счет естественного движения внутреннего трубопровода на поворотах. Для исключения возникновения напряжений были сконструированы специальные «скользящие» опоры, не имеющие жесткой фиксации. Это позволило внутреннему трубопроводу двигаться внутри кожухового трубопровода. Внутренний трубопровод был разбит на 3 участка, каждый из которых при стыковке имел конусную часть, исключаящую ступеньку по ходу движения шарика.
5. В 2012 году первая очередь источника холодных нейтронов ИБР-2 (комбинированный замедлитель КЗ 202) введен в опытную эксплуатацию на физический эксперимент. Параметры и методика загрузки, полученные на полномасштабном стенде, были подтверждены и выразились в стабильной работе замедлителя. За период с 2012 по 2018 год, было проведено более 25 циклов работы реактора в режиме криогенного замедлителя (2500 часов). 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 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.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ НЕЙТРОНОВ В НАПРАВЛЕНИИ 1, 4, 5, 6, 9 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПУЧКОВ ИБР-2 (КЗ 201)

3.1 Этапы работы по созданию КЗ 201

Как отмечалось в главе 1, важным параметром современных исследовательских нейтронных источников является гибкость использования. Источник должен быть «ярким», иметь широкий комплекс экспериментального оборудования (рефлектометры, дифрактометры, спектрометры и т.д., оснащенные современным набором дополнительных устройств, обеспечивающих возможность исследования образцов не только в нормальных, но и в экстремальных условиях), обеспечивать каждого конкретного пользователя индивидуальным и оптимальным спектром нейтронного потока. Для решения этой задачи на реакторе ИБР-2 создается комплекс комбинированных замедлителей нейтронов, позволяющих получить оптимальный спектр (высокий поток нейтронов в необходимой области) на каждом из инструментов.

В главе 3 будут описаны 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 работы;
- 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.

Замедляющим веществом в комбинированном замедлителе КЗ 201 в соответствии с проектом должна быть смесь мезитилена и метаксилола в пропорции 3 к 1 соответственно в твердой фазе в форме шариков диаметром 3,5-3,9 мм. С одной стороны, применение того же материала, как и в замедлителе КЗ 202, описанного в главе 2 пункте 4 настоящей работы, дает возможность не проводить новые исследования в области создания шариков, радиационной стойкости в полях ИБР-2, часть технологического оборудования (дозатор, измеритель массового расхода) уже разработаны и изучены. Но с другой стороны, принципиальные конструктивные отличия, экспериментальные установки, другое расположение замедлителя в пространстве относительно активной зоны реактора, зона перегрузки и назначение замедлителя не позволяют коррелировать полученные данные о траектории движения, распределении скоростей, дефрагментации шариков при движении по другой пневмотрассе на КЗ 201. Поэтому для определения возможности применения дисперсного мезитилена в комбинированном замедлителе 201 был проведен целый цикл исследовательских и технико-физических работ, разработано специальное оборудование и отработана методика загрузки шариков.

Сам замедлитель КЗ 201 (рис. 27) представляет собой сборку включающую в себя:

- головную часть замедлителя для формирования пучка нейтронного потока в направлении физических установок на каналах 1, 4, 5, 6, 9;
- юстировочную опору, позволяющую, с точностью до 2-3 мм, установить головную часть относительно стационарных отражателей активной зоны реактора и 2-х других замедлителей;
- блок биологической защиты, который является буфером от прямого прострела нейтронного пучка в зону перегрузки замедлителя;

- блок инженерных коммуникаций, соединяющий замедлитель и системы охлаждения, вакуумирования, загрузки, слива, сброса водорода, термометрическое оборудование.

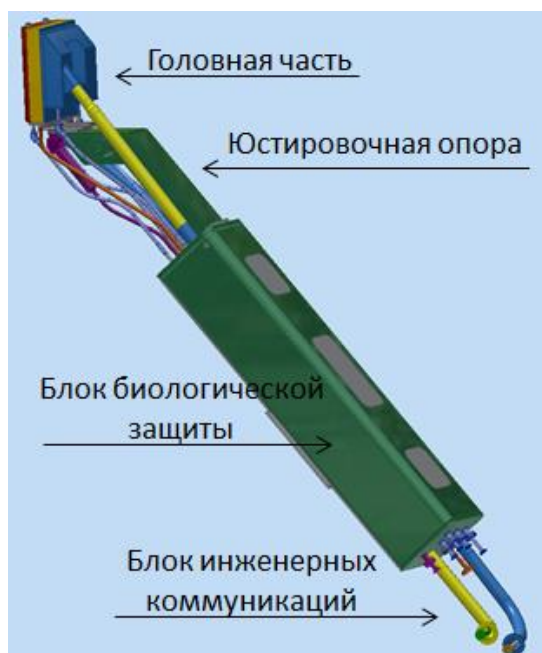


Рисунок 27. Рабочая модель комбинированного замедлителя (КЗ 201) для пучков 1, 4, 5, 6, 9.

3.2 Разработка головной части КЗ 201

3.2.1 Выбор конфигурации головной части замедлителя методом компьютерного моделирования

Разработка и создание геометрии головной части замедлителя КЗ 201 с оптимальными нейтронно-физическими характеристиками, с учетом технологической возможности изготовления и безопасной эксплуатации проводилась методом компьютерного моделирования. Были проанализированы и уточнены параметры спектра, наиболее удовлетворяющие проводимым на выведенных пучках нейтронов экспериментам. Как видно из рисунков 1 и 2, таблицы 1 на поверхность замедлителя КЗ 201 смотрят оси пучков 1, 4, 5, 6, 9. При этом, для всех установок кроме пучка № 1 оптимальный нейтронный спектр лежит в диапазоне от 2 до 10 Å. Для установки с поляризованной мишенью КОЛХИДА (пучок № 1) востребованными являются нейтроны с длиной волны от 0,4 до 4 Å (тепловая область) [47-52].

Для оптимизации спектрального потока для каждого инструмента рассматривались различные варианты головной части замедлителя (рис.28, 29).

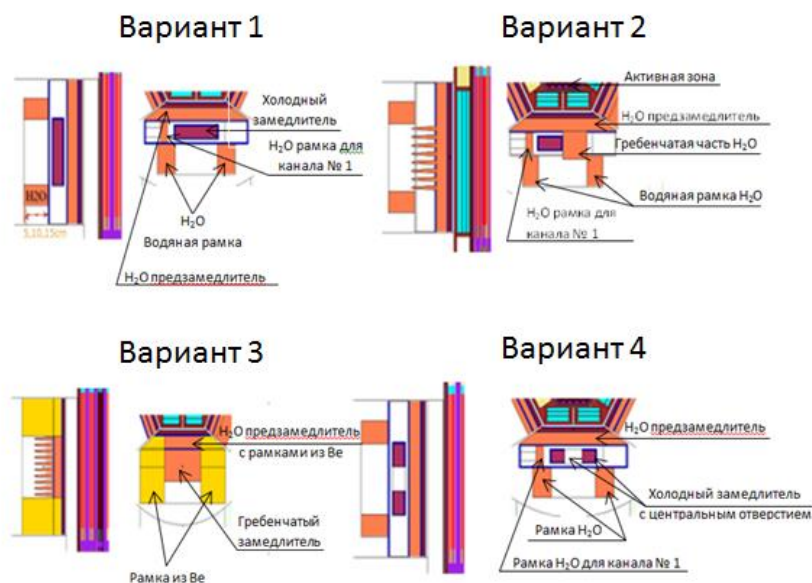


Рисунок 28. Варианты 1 – 4 головной части замедлителя КЗ 201 в горизонтальном разрезе – справа, вертикальном разрезе – слева.

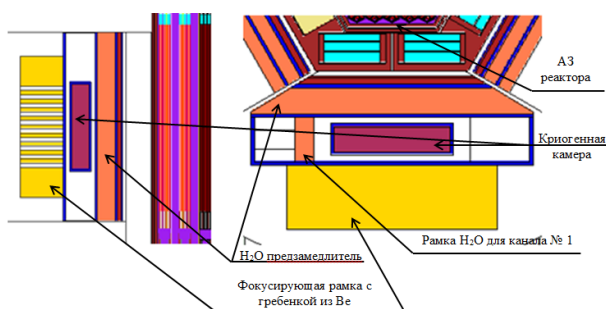


Рисунок 29. Вариант 5 головной части замедлителя КЗ 201 в разрезе горизонтальном – справа и вертикальном – слева, с криогенной камерой при $T=20\text{ K}$ в центре, водяной полостью при $T=300\text{ K}$ со стороны экспериментального пучка № 1, фокусирующей рамкой и гребенкой из бериллия при $T=100\text{ K}$.

Как видно из рисунка 28, 29 варианты 1, 2, 4, 5 являются комбинацией из теплых (с циркулирующей водой при температуре 300 K) и холодных (криогенная камера с замедляющим веществом при температуре 20 – 100 K) частей. Рассмотрим эти варианты более подробно:

- вариант 1 – представляет собой «слоеный пирог» по горизонтали, который включает в себя (от зоны реактора):

- экранирующий слой с засыпкой из карбида бора (B_4C), толщиной 10 мм;
- предзамедлитель водяной с циркулирующим дистиллятом, толщиной 40 мм;
- криогенную камеру толщиной 40 мм и объемом 1,9 л, помещенную в вакуумную полость;
- фокусирующие водяные рамки с циркулирующим дистиллятом толщиной 150 мм, вокруг криогенной камеры;
- водяную камеру 27 мм на 50 мм в направлении пучка № 1, для формирования теплового спектра;
- вариант 2 – отличается уменьшенной в ширину криогенной камерой и дополнен смещенной к центру водяной камерой с циркулирующим дистиллятом со стороны пучка № 9, для формирования пика спектра нейтронов в области 0,6 – 5 Å. Отличия в размерах криогенной камеры и дополнительной, водяной камеры представлены ниже:
 - криогенная камера ширина 85, толщина 40 мм;
 - водяная камера со стороны 9-ого пучка имеет ширину 80 мм, толщину 45 мм;
- вариант 4 имеет отверстие 5 мм в центре криогенной камеры для смещения пика спектра в область более коротких длин волн (усреднения спектра);
- вариант 5 – отличается от варианта 1 тем, что в качестве фокусирующей рамки тут применяется отражатель из бериллия, окружающий криогенную камеру, а в области камеры (со стороны пучков) из бериллия выполнена решетка для увеличения выхода холодных нейтронов. Отражатель и решетка при этом охлаждаются до температуры 100 К и имеют толщину 100 мм;
- отдельно стоит отметить вариант 3, который представляет собой комбинацию из водяного гребенчатого замедлителя (Т 300 К), окруженного фокусирующей рамкой из бериллия (Т 300 К). Такой вариант наиболее прост и дешев в исполнении. Это связано с тем, что не

требуется охлаждать замедляющее вещество до криогенных температур и существенно менять имеющуюся инфраструктуру.

Все представленные варианты были смоделированы и детально обчислены методом Монте-Карло (программа MCNP) с использованием дискретных констант из библиотеки ENDF – В/VII [53-56]. Варианты сравнивались с водяным, действующим в настоящее время, замедлителем гребенчатого типа, с циркулирующим дистиллятом в камере замедлителя. В таблице 3 представлены значения коэффициента выигрыша (Gain factor) каждого из вариантов в различных диапазонах длин волн нейтронов.

Таблица 3. Коэффициенты выигрыша для групп нейтронов (по длине волны) в различных вариантах головной части комбинированного замедлителя в сравнении с гребенчатым замедлителем.

Группа нейтронов (Å)	Фактор выигрыша				
	Вариант 1 (с центральной криог. камерой)	Вариант 2 (со смещенной водяной и криог. камерой)	Вариант 3 (водяная гребенка и бериллий)	Вариант 4 (с отверстием в криог. камере)	Вариант 5 (с бериллиевым отражателем и гребенкой)
∞ - 8	9,57	4,40	2,17	8,53	10,85
8 - 4	5,73	2,73	1,46	4,45	6,31
4 - 2	1,43	1,05	1,41	1,26	1,01

*данные представленные в таблице 3 получены в оси пучка № 5, находящейся перпендикулярно центральной части поверхности замедлителя.

Как видно из таблицы 3, все варианты дают повышенный выход нейтронов в областях больших длин волн (холодные нейтроны). Особенно выделяются **вариант 1** (с криогенной камерой, охлажденной до температуры 20 К и фокусирующей рамкой из воды при температуре 300 К) и **вариант 5** (с криогенной камерой в центре при температуре 20 К и фокусирующей рамкой и гребенчатой частью из бериллия при температуре 100 К), которые дают наибольший (из представленных вариантов) выигрыш для холодных нейтронов

в диапазоне энергий от 4 Å до ∞ . При этом вариант 1 является наиболее сбалансированным с точки зрения нейтронно-физических и технологических характеристик (дополнительно необходимо охлаждать решетку из бериллия). Учитывая, что формирование спектра нейтронов в направлении пучка № 1 происходит в водяной вставке, имеющей одинаковую и оптимальную для данных условий форму, средний выигрыш по сравнению с водяным, гребенчатым замедлителем для нейтронов с длиной волны от 0,6 до 4 Å составит 1,4 раза. В таблице 4 приведены данные по фактору выигрыша (проигрыша) в потоке нейтронов для 3-х групп нейтронов различной длины волны для каждого из физических инструментов на пучках 1, 4, 5, 6, 9.

Таблица 4. 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

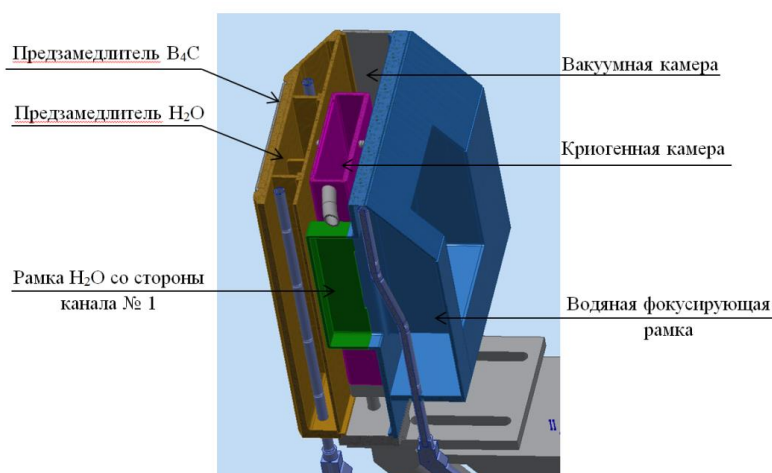


Рисунок 30. Головная часть комбинированного замедлителя в направлении экспериментальных пучков 1, 4, 5, 6, 9 в сечении 3/4 сбоку и сверху.

Таким образом, по совокупности нейтронно-физических, технологических и эксплуатационных характеристик, в направлении экспериментальных пучков 1, 4, 5, 6, 9 был выбран вариант 1 головной части замедлителя КЗ 201 «центрального» направления. На рисунке 30 показана 3D модель головной части, а на рисунке 27 сама сборка комбинированного замедлителя КЗ 201. На их основе была разработана исполнительная документация и рабочие чертежи замедлителя.

3.2.2 Расчет теплопритока к криогенной камере замедлителя КЗ 201

Расчет теплопритоков к камере необходим для создания криогенной системы, подбора оборудования, оценки рисков наступления аварийных ситуаций и безопасной эксплуатации замедлителя вблизи активной зоны реактора.

Под теплопритоком здесь понимается количество тепла, поступающее извне в криогенную камеру через вакуумный объем и несущие элементы конструкции. В вакуумном объеме находится разряженный гелий с давлением 10^{-5} мм. рт. ст. (0,001 Па). Рассчитаем теплоприток, поступающий в камеру за счет диффузии остаточных газов.

$$Q_{\text{газ}} = q_{\text{газ ост.}} + q_{\text{изл.}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{газ ост.}}$ – теплоприток за счет диффузии остаточных газов, $q_{\text{изл.}}$ – теплоприток за счет излучения.

Теплоприток за счет диффузии остаточных газов будем считать по формуле (2);

$$q_{\text{газ}} = 2435 * A_{\text{пр}} * \frac{k+1}{k-1} * p * \frac{(T_1 - T_2)}{\sqrt{M_{\text{воз}} * T_1}} * S_{\text{пов}}, \quad (2)$$

где $A_{\text{пр}}$ – приведённый коэффициент аккомодации, $k = 1,67$ – показатель адиабаты молекул теплоты в вакууме, $p = 10^{-5}$ мм.рт.ст – давление в вакуумном пространстве, $T_1 = 300 \text{ K}$ и $T_2 = 20 \text{ K}$ – температура стенки кожуха и вакуумной камеры соответственно, $M_{\text{воз}} = 29 \text{ г/моль}$ – молярная масса гелия, $S_{\text{пов}} = 0,2 \text{ м}^2$ – площадь поверхности камеры. Значения коэффициента аккомодации A лежат в диапазоне от 0 до 1. Расчетным путем определить его невозможно.

Обычно для оценок используют среднее значение $A = 0,5$. Максимальное значение $A = 1$ консервативно завышает теплоприток, но маловероятно. В нашем случае мы примем приведенный коэффициент аккомодации $A_{np} = 1$. Длина свободного пробега молекулы больше, чем зазор между камерой и кожухом, поэтому в вакуумном пространстве устанавливается молекулярный режим переноса тепла. В реальности при вакууме в кожуховом пространстве 10^{-5} мм.рт.ст., теплоприток по остаточным газам будет пренебрежимо мал. В нашем случае он составит $q_{газ} = 0,06 \text{ Вт}$. При первом заполнении в кожуховом зазоре будет воздушная среда, в последующем, по режиму эксплуатации – гелий, что увеличит теплоприток в 1,75 раз до $0,1 \text{ Вт}$.

Теплоприток за счет излучения.

Для вычисления теплопритока за счет излучения будем пользоваться формулой (3):

$$q_{изл} = 5,77 E_{чер} * \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] * S_{пов}, \quad (3)$$

где $E_{чер}$ – приведенная степень черноты, $T_1 = 300 \text{ К}$ и $T_2 = 20 \text{ К}$ – температура стенки кожуха и вакуумной камеры соответственно, $S_{пов} = 0,2 \text{ м}^2$ – площадь поверхности камеры. Приведённую степень черноты найдем по формуле (4)

$$E_{чер} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{S_{камеры}}{S_{кож}} * \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)}, \quad (4)$$

где $\varepsilon = 0,09$ – степень черноты алюминиевого листа, $S_{камеры} = 0,2 \text{ м}^2$ – площадь поверхности камеры, $S_{кожуха} = 0,52 \text{ м}^2$ – площадь поверхности кожуха. Отсюда приведенная степень черноты $E_{чер} = 0,06$. Таким образом, теплоприток за счет излучения составляет $q_{изл} = 5,6 \text{ Вт}$ [58].

Теплоприток по тепловым мостам.

В верхней части криогенной камеры имеются два дистанционирующие элемента в виде полых штифтов со скругленными торцами. Из-за термических деформаций возможно касание одного из них со стенкой вакуумной камеры. Площадь пятна контакта f_k зависит от усилия прижатия P

$$f_k = P / \sigma_{0,2}, \quad (5)$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала ($\sigma_{0,2} = 120$ МПа при средней температуре 160 К). Для оценок принимается усилие прижатия $P = 1$ Н. При малой величине f_k по сравнению с площадью сечения контактирующих деталей термическое сопротивление контакта определяется по формуле:

$$\mathfrak{R}_k = (2 r_k \lambda)^{-1}, \quad (6)$$

где r_k – радиус пятна контакта, λ – теплопроводность материала ($\lambda = 105$ Вт/(м К) при средней температуре 160 К). Вычисления дают $r_k = 0,05$ мм, $\mathfrak{R}_k = 92$ К/Вт, и при разности температур $300 - 20 = 280$ К теплоприток составляет $Q_{um} = 3,0$ Вт. При изменении усилия прижатия P величина Q_{um} будет меняться пропорционально $\sqrt{P}$.

Криогенная камера внизу опирается на две втулки длиной $L = 28$ мм и сечением $\varnothing 17 \times 0,3$ мм (площадь сечения по металлу обеих втулок $f_{сеч} = 31,5$ мм²). Перепад температур на втулках $\Delta T = 300 - 40 = 260$ К. Материал втулок – сталь 12X18H10T, теплопроводность при средней температуре 180 К $\lambda = 12$ Вт/(м К). Без учета термического сопротивления контакта по торцам – т.е. с завышением – теплоприток через обе втулки.

$$Q_{gm} = f_{сеч} \lambda \Delta T / L = 3,7 \text{ Вт} \quad (7)$$

Снизу к криогенной камере через сильфон крепится трубопровод для слива мезитилена. Размеры сечения трубопровода $\varnothing 14 \times 1$ мм (площадь сечения по металлу $f_{сеч} = 40,8$ мм²), длина в пределах вакуумного объема вместе с сильфоном $L = 275$ мм. За пределами этой длины трубопровод омывается воздухом с температурой 35°C (308 К). Консервативно принимается, что внизу на конце вакуумного объема трубопровод имеет температуру воздуха, а вверху – на стыке с толстостенным патрубком – температуру дна вакуумной камеры, т.е. 40 К. Тепло через сильфон идет двумя параллельными путями: через подвижное сочленение (труба в трубе) и по гофрам – по металлу и через гелий. Термическое сопротивление контакта в подвижном сочленении принимается равным нулю, а сопротивление на втором пути, как показывают консервативные оценки, приблизительно равно термическому сопротивлению

трубопровода на длине сиффона (40 мм). Таким образом, по сопротивлению сиффон эквивалентен трубопроводу длиной $40/2 = 20$ мм, и суммарная термическая проводимость равна проводимости трубопровода длиной $L = 275 - 40 + 20 = 255$ мм. Материал трубопровода – сталь 12X18H10T, при средней температуре 170 К $\lambda = 12$ Вт/(м·К). Теплоприток, определяемый по формуле (7), составляет 0,5 Вт. Суммарный теплоприток в криогенную камеру составляет:

$$\underline{\Sigma Q_n = 0,1 + 5,6 + 3,7 + 0,5 = 9,9 \text{ Вт}} \quad (8)$$

В результате расчетов и определения тепловыделения в камере в процессе облучения нейтронами замедляющего материала, за счет течения экзотермических реакций опытным путем на примере КЗ 202 можно сказать, что полный поток, который необходимо отводить от криогенной камеры замедлителя (без учета трубопроводов и конструктивных элементов системы охлаждения и загрузки) составит 160 Вт, всего лишь 10 Вт из них – это конструкционные теплопритоки к камере [59-63].

3.3 Устройства соединения комбинированного замедлителя КЗ 201 с технологическими системами обеспечения работы комплекса

Замедлитель нейтронов в направлении экспериментальных пучков 1, 4, 5, 6, 9 традиционно для ИБР-2 выполнял не только свою прямую роль – формирование спектра нейтронов на физических установках, но и сам был объектом исследования. Для использования потока холодных нейтронов и расширения потенциала физических установок в ряде случаев необходимо проводить глубокую модернизацию не только самих установок, но и нейтронных трубопроводов, проводить настройку коллиматоров и прерывателей. Это довольно длительный и дорогостоящий процесс. К тому же, есть эксперименты, в которых будет предпочтительнее пользоваться тепловыми нейтронами, используя при этом гребенчатый водяной замедлитель при температуре 300 К [64, 65]. Пространственное расположение замедлителя относительно активной зоны реактора, помещение перегрузки и сервисного обслуживания позволяют проводить замену замедлителя и его обслуживание, разрабатывать и испытывать новые замедлители в случае необходимости (рис. 31). Примером

этому служит то, как в 1994 – 2000 года вместо штатного водяного замедлителя был установлен криогенный замедлитель СМ-1, а после него СМ-2. Позднее, ввиду нестабильной работы криогенных замедлителей, они были заменены на штатный гребенчатый [25-30].

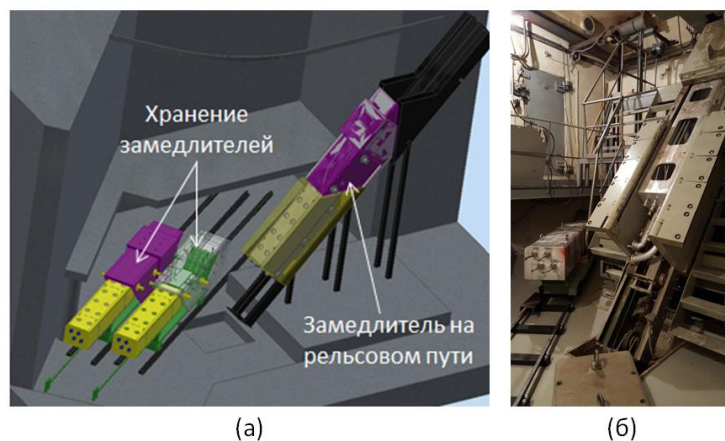


Рисунок 31. Зона хранения и перегрузки замедлителей: а – сервисное положение замедлителя, б – фотография КЗ 201 на подвижной тележке внутри блоков стационарной защиты во время первой примерки.

Находясь в сервисном положении (рис. 31) замедлитель по рельсовому пути поднимается в каньон биологической защиты, выполненный по наружному размеру защитного блока замедлителя с небольшими допусками. После подъема замедлителя в рабочее положение зона прострела закрывается шибером. Такая установка позволяет снизить прямой прострел нейтронного потока в помещение перегрузки и минимизировать активацию находящегося там оборудования. В результате, в рабочем положении есть доступ только к хвосту замедлителя и инженерным коммуникациям, выходящим из блока (рис 32). На рисунке 32 показан хвост гребенчатого водяного замедлителя, установленный в каньон в рабочее положение. Замедлитель подключен к системе циркуляции воды, которая является замедляющим веществом. На хвосте блока есть вход и выход воды предзамедлителя (расход воды 22 л/мин), вход и выход воды гребенчатой части (расход воды 22 л/мин). Подключение произведено гофрированными металлическими шлангами, а в качестве соединения используются быстросъемные фланцы KF 25 с центрирующим кольцом и витоновым уплотнением. Применение быстросъемных фланцев

позволяет существенно сократить время соединения – разъединения замедлителя, тем самым минимизировав радиационную нагрузку на обслуживающий персонал, которая, в месте стыковки, находится в пределах 50 мЗв/час.



Рисунок 32. Рабочее положение замедлителя в каньоне, шибер открыт.

Блок биологической защиты замедлителя на торцах имеет размеры 440 мм в ширину и 370 мм в высоту. Показанный на рисунке 32 хвост водяного замедлителя имеет на своем торце 4 подключения трубопроводов, которые не выходят за габариты блока. Необходимость вписаться в габариты блока вызвана, тем, что при перегрузке, замедлитель двигается в каньоне стационарной защиты, как показано на рисунке 31 (б), и в случае если коммутирующие трубопроводы будут выдаваться за габариты защитного блока, перегрузка замедлителя будет невозможна. Учитывая, что головная часть комбинированного замедлителя КЗ 201 включает в себя 2 водяные полости, криогенную камеру, вакуумную рубашку, трубопровод слива мезитилена, а также хромель-алюмелевые датчики температуры, хвостовой торец блока выглядит как показано на рисунке 33. Технологические трубопроводы располагаются очень компактно, а для экономии места, трубопроводом для откачки вакуума в рубашке замедлителя являются кожухи криогенных трубопроводов подачи шариков и обратного потока гелия.

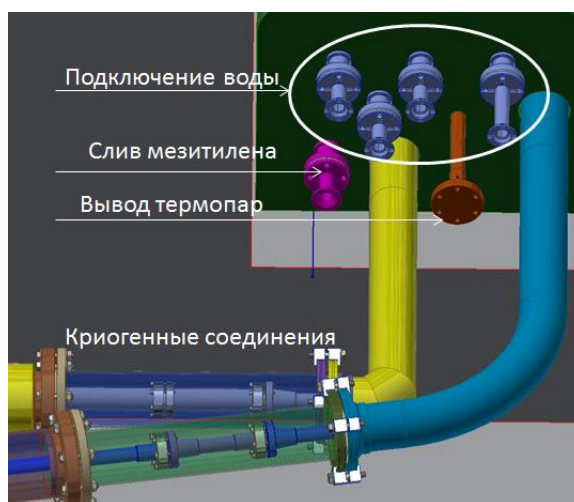


Рисунок 33. Расположение технологических коммуникаций на торцевой поверхности защитного блока комбинированного замедлителя КЗ 201.

При подключении технологических коммуникаций, сложностей с подключением водяных камер не возникло, и было принято решение использовать уже проверенные, быстросъемные, фланцевые соединения KF 25 с витоновым уплотнением. Система слива и хранения отработанной смеси мезитилена и м-ксилола будет соединена с трубопроводом слива таким же быстросъемным соединением KF25 с коротким гибким сильфонным участком.

Соединение криогенных трубопроводов с системой загрузки и охлаждения. Применение гибких участков, сильфонных узлов, перегибов на криогенном трубопроводе подачи шариков было недопустимо, т.к. это могло привести к существенному изменению траектории движения шариков, затору или их полному разрушению. Учитывая высокие требования к качеству криогенного соединения трубопровода, подающего шарики, результаты экспериментов на лабораторных стендах [33-34], полномасштабных стендах КЗ 202 [37-38] и КЗ 201 [66], опыт эксплуатации КЗ 202 [40-43], особенности конструкции защитного блока и системы перегрузки для соединений замедлителя с инженерными коммуникациями системы охлаждения и загрузки были сформулированы следующие требования:

- 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 300 К до 20 К;
- локальный теплоприток в месте стыковки не допускается.

Поэтому, известные криогенные разъемные соединения, такие как байонетные или штыковые соединения [67-69], нам не подходили. Рисунок 34 иллюстрирует наиболее часто используемое штыковое быстроразъемное соединение для транспортировки криогенных жидкостей и газов. Рисунок взят из презентации G. Perinić [70, 71].

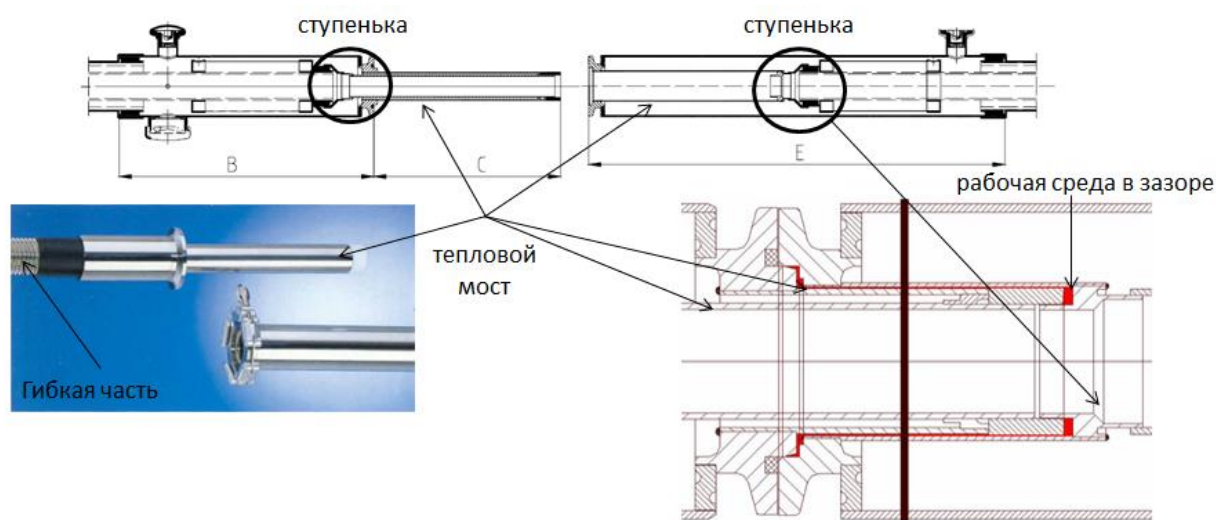


Рисунок 34. Быстроразъемное криогенное соединение штыкового типа с гибкой сильфонной частью для выполнения монтажа (демонтажа).

В нашем случае (доставка шариков в камеру замедлителя методом пневмотранспортировки) такое соединение не подходит по ряду недостатков. Главные недостатки связаны с конструкцией этого соединения. Как известно основной вклад в теплоприток к изолированным криогенным системам с экранно-вакуумной изоляцией вносится за счет:

- диффузии остаточных газов;

- теплопритока за счет излучения;
- контактного теплопритока по опорам, подвесам и тепловым мостам.

Любое штыковое соединение имеет локальный теплоприток за счет необходимости соединить кожуховую трубу с внутренним трубопроводом, по которому движется хладагент. Для уменьшения теплопритока в таких соединениях используют двойную тонкостенную трубку – являющуюся штыком, на торце которого обычно закрепляют фторопластовую прокладку-уплотнение. Применение такой схемы соединения приводит к тому, что рабочая (транспортируемая) среда диффундирует в имеющийся зазор между сопрягаемыми частями штыкового соединения (рис. 34). Рабочая среда находится там под тем же давлением, что и в транспортном трубопроводе. Это приводит к локальному повышению теплопритока за счет остаточных газов и контакта кожухового и внутреннего трубопровода. Уменьшение теплопритока в таком соединении напрямую зависит от длины штыка (*размер «С» на рисунке 34*). Чем он длиннее, тем теплоприток меньше. В нашем случае мы ограничены размером блока и максимальная длина штыкового соединения будет не более 150 мм. Кроме этого, конструкция штыкового соединения не предусматривает экранной изоляции. Таким образом, в месте стыковки будет наблюдаться повышенный приток тепла извне, что может привести к существенному локальному нагреву. Незначительное разрушение шариков с образованием мелких осколков и пыли может происходить при транспортировке шариков до камеры замедлителя, в устройстве подачи при перемешивании за счет трения между диском, стенками устройства и самими шарикам. Эти осколки циркулируют по системе охлаждения и загрузки вместе с газообразным гелием, только часть из них задерживается в сетчатом фильтре. Опытным путем на полномасштабном стенде КЗ 202 было установлено, что шарики из мезитилена при температуре 150 К начинают прилипать друг к другу, а также к стенкам трубопровода, образуя заторы и наросты (рис. 35). Есть высокая вероятность того, что мелкие частицы и пыль будут прилипать в месте локального нагрева (место стыка), образуя преграду для дальнейшего движения шариков. Второй

негативный фактор для нашего случая – это наличие гибкого участка, необходимого для соединения разъединения устройства. Наличие такого участка приведет к существенной потере скорости шарика перед подъемом и дополнительному разрушению. Шарик будет догонять друг друга и формироваться в большие группы, а как показывают исследования, это приведет к затору [33-34].



Рисунок 35. Шарик прилип к рассеивателю имитатора камеры на полномасштабном стенде КЗ 202 при температуре в камере 150 К.

Третьим отрицательным, для нашего случая, фактором, будет изменение диаметров штыкового соединения, которые обеспечивают сопряжение частей и необходимы для герметизации места соединения. В представленном на рисунке 34 соединении эти места указаны как «ступенька». Такое изменение диаметра критично, и вызовет существенное снижение скорости, частичное разрушение шариков и затор, тем более что оно находится против движения шарика. Из работы [72] известно, что преграда размером 200 - 300 микрон приводит к потере скорости шарика на 20% – это означает, что шарик будет догонять друг друга, образуя в месте преграды большую группу, которая впоследствии с большой вероятностью образует затор и не сможет поднять по наклонному участку транспортный трубопровод.

Принимая во внимание требования, сформулированные к разъёмному криогенному соединению в начале главы 3 пункт 3, и риски применения уже известных соединений, автором было разработано и запатентовано специальное

криогенное разъемное соединение (рис. 36) [73]. Соединение имеет следующие отличительные особенности:

- сдвижной участок кожухового трубопровода обеспечивает единую вакуумную рубашку, отсутствуют тепловые мосты. В собранном виде представляет собой обычный участок кожуховой трубы с идентичными теплофизическими характеристиками, исключая теплопередачу и локальный нагрев части внутреннего трубопровода и транспортируемого вещества и шариков в месте стыка;
- применение телескопической системы сборки обеспечивает доступ к стыковой части внутреннего трубопровода, что делает трубопровод быстросборным;
- уплотнение центрирующим кольцом с пластичной прокладкой со стороны меньшего диаметра позволяет при монтаже в положении «закрыто» провести центровку сопрягаемых частей соединения, исключая возможность их перекоса относительно друг друга и обеспечивая герметичность соединения по всей площади поверхности сопряжения;
- соединение внутренних трубопроводов происходит встык, что позволяет не использовать гибкий участок. При этом не происходит изменение диаметров трубопровода. В результате чего траектория движения шарика в месте соединения будет идентична траектории движения в транспортном трубопроводе;
- единая вакуумная рубашка позволяет не тянуть дополнительную вакуумную трубу и проводить откачку кожухового трубопровода одним вакуумным постом;
- соединение компактное, имеет простую конструкцию и может быть изготовлено с применением стандартных трубопроводов и фланцевых соединений.

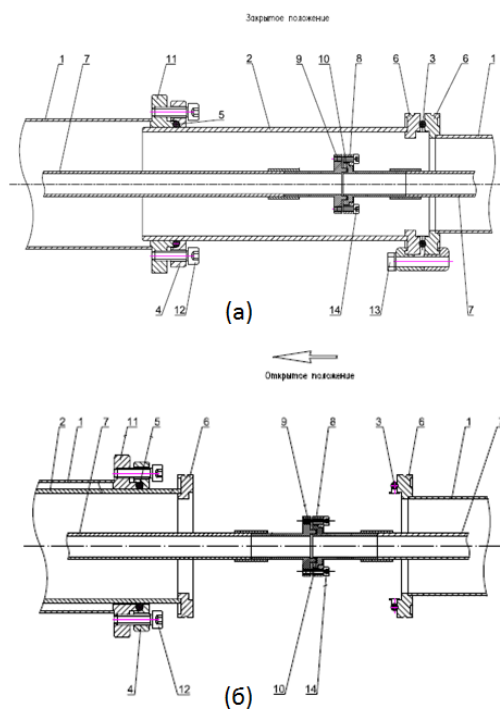


Рисунок 36. Специальное криогенное фланцевое соединение для шарикового замедлителя а – закрытое положение, б – открытое положение, где 1 – стационарные участки кожухового трубопровода; 2 – сдвижной участок кожухового трубопровода; 3 – центрирующее кольцо с пластичной прокладкой; 4 – прижимной фланец с возможностью вращения вокруг оси трубопровода; 5 – кольцевое уплотнение с памятью формы; 6 – фланец стандарта ISO; 7 – стационарные участки внутреннего трубопровода; 8 – фланец внутреннего трубопровода с возможностью вращения вокруг своей оси; 9 – стандартный фланец внутреннего трубопровода; 10 – деформируемая прокладка; 11 – стандартный фланец кожуховой трубы; 12 – крепежный элемент кожуховой трубы со стороны большего диаметра – болт с внутренней головкой; 13 – крепежный элемент фланца стандарта ISO со стороны меньшего диаметра – трубуцина; 14 – крепежный элемент внутреннего трубопровода – болт с внутренней резьбой.

Криогенное разъемное соединение для шарикового холодного замедлителя нейтронов работает следующим образом.

При необходимости монтажа-демонтажа замедлителя со штатного места для замены замедлителя на водяной или криогенный, ремонта или проведения

профилактических работ необходимо поднять температуру в системе шарикового криогенного замедлителя до температуры окружающего воздуха (~ 300 K) путем отключения криогенной гелиевой установки. После этого, для разъединения криогенных трубопроводов замедлителя от подводящего и отводящего криогенных трубопроводов требуется заполнить «вакуумную рубашку» трубопровода воздухом (или азотом), вывернуть крепежные элементы (болты) (12), соединяющие стандартный фланец кожуховой трубы (11) и прижимной фланец (4), ослабить и снять крепежные элементы (струбцины) (13), соединяющие фланцы стандарта ISO (6), сдвинуть вращающийся фланец (4) и кольцевой уплотняющий элемент (5) на подвижной участок кожухового трубопровода (2), сдвинуть вдоль оси трубопровода подвижную часть кожухового трубопровода (2) с центрирующего кольца с пластичной прокладкой (3) в сторону стационарной кожуховой трубы большего диаметра (1) по принципу телескопической сборки, освободив достаточно пространства для доступа к фланцевому соединению внутренних трубопроводов. Снять экранную изоляцию внутреннего трубопровода, вывернуть болты (14) вращающегося фланца внутреннего трубопровода (8) за счет компенсации степени свободы движения внутреннего трубопровода (7), разъединить фланцы (8 и 9) стационарных участков трубопровода (7). Соединение разобрано. Сборку изделия проводить в обратном порядке. В качестве деформируемой прокладки (10) применена прокладка из индия. При необходимости заменить индиевую прокладку (10) требуется удалить использованную. Для уплотнения фланцевого соединения внутреннего трубопровода могут использоваться различные деформируемые прокладки, применяемые в криогенной технике (индий, медь, фторопласт и др.) [73].

Описанное криогенное разъемное фланцевое соединение работает в составе комплекса холодного шарикового замедлителя нейтронов исследовательского реактора ИБР-2 (рис. 37). Оно может применяться и на промышленных объектах для транспортировки веществ при криогенных температурах в любом агрегатном состоянии. Такое соединение обеспечивает

равномерный теплоприток по всей длине криогенного трубопровода, исключая локальный нагрев мест стыка, за счет единой вакуумной рубашки, экранно-вакуумной изоляции стыкуемых внутренних трубопроводов, герметичного соединения внутренних трубопроводов, без потерь транспортируемого вещества в местах сопряжения элементов стыка. Сдвижной участок позволяет исключить использование тепловых мостов с внутренней трубой в месте стыка, обеспечив цельное вакуумное пространство со стационарным кожуховым трубопроводом. Это позволяет использовать для соединения те же вакуумные агрегаты, что и для стационарного кожухового трубопровода, снижая затраты на приобретение отдельного оборудования.

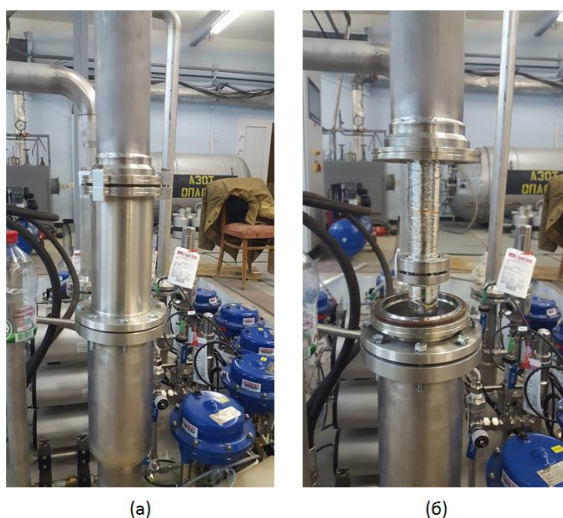


Рисунок 37. Фотография криогенного фланцевого разъемного соединения на трубопроводе подающего и обратного потока рефрижератора Linde AG 1200/10 – криогенный коллектор, где (а) – соединение в закрытом положении (вакуумный сдвижной кожух надвинут); (б) – открытое положение (вакуумный сдвижной кожух опущен, с внутреннего фланца снята многослойная изоляция).

Испытания соединений проходили на криогенных трубопроводах системы охлаждения. Ими были соединены все криогенные трубопроводы оборудования системы охлаждения комплекса замедлителей ИБР-2 (рис. 38). 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. Кроме этого, проводились циклические испытания, когда температура с 300 К понижалась до 90 К с выдержкой 6 часов (температура загрузки шариков), далее до температуры 60 К с выдержкой 2 часа, опускалась до 10 К с выдержкой 10 суток, затем проводился подъем до 90 К с выдержкой 2 часа и подъем до 300 К. С июля 2018 года было проведено всего 5 циклов такого захолаживания, 2 из которых имитировали работу реактора в режиме криогенного замедлителя и 3 на работающем на физический эксперимент замедлителе КЗ 202. В результате испытаний запотеваний, неплотностей, натекании во внутренний объем и потерь вакуума замечено не было.

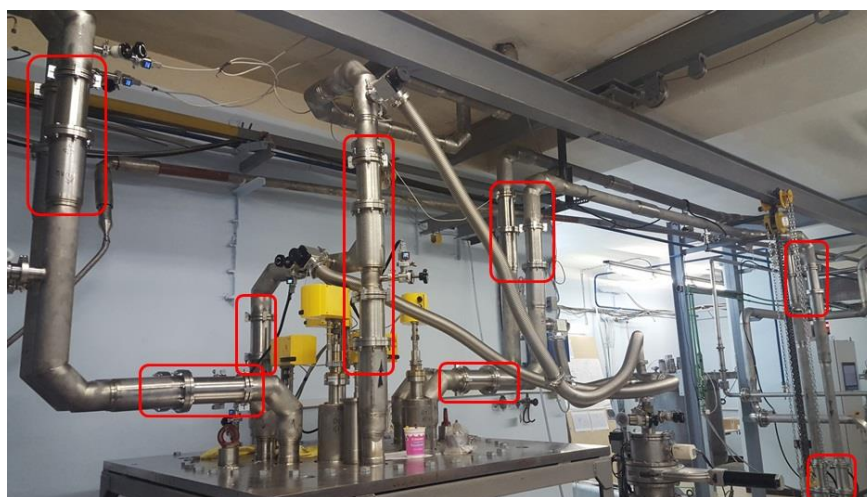


Рисунок 38. Применение разъемных соединений (выделены рамками) на участках криогенных трубопроводов, соединяющих оборудование системы охлаждения замедлителей ИБР-2 на примере соединения рефрижераторов КГУ 700 и КГУ 1200 с коллектором.

Вывод термометрии.

Для обеспечения контроля за безопасной работой замедлителя в различных режимах, а также для оценки физических свойств замедляющего вещества и влияния температуры на спектр нейтронного потока в головной части замедлителя КЗ 201 установлено 4 датчика контроля температуры. Датчики представляют собой кабельные термоэлектрические преобразователи

КТАХС (хромель-алюмель), 2 из которых установлены непосредственно на криогенной камере, и по одному на подводящем и отводящем трубопроводах. Преобразователи выполнены в герметичном защитном кожухе определённой длины. На торце выводы проводов. Одной из дополнительных задач в работе является коммутация выводов термопар с вторичными приборами. Для вывода из защитного блока замедлителя 4-х преобразователей было принято решение использовать 2 фланца, имеющих пластичную прокладку на каждом, между ними зажать кожухи вывода преобразователей (рис. 39)

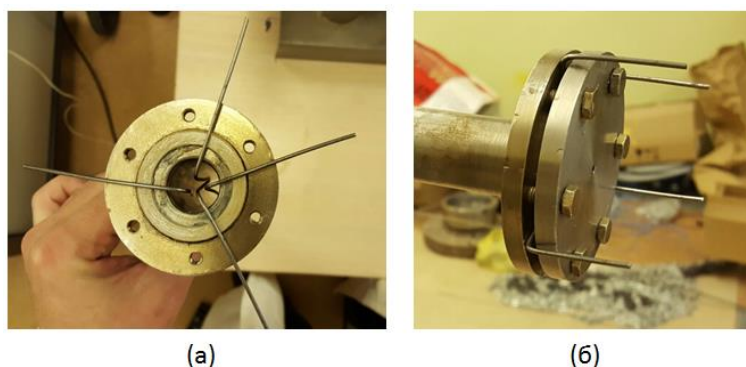


Рисунок 39. Имитатор устройства вывода термоэлектрических преобразователей из защитного блока замедлителей через трубопровод, где (а) – расположение термопар при сборке; (б) – устройство в собранном виде.

Испытание на герметичность фланцевого соединения ввода термопар криогенного замедлителя проводилось методом обдува гелием. Фланцевое соединение с установленным датчиком типа MKS MicroPirani 925 было подключено непосредственно на вход гелиевого течеискателя (рис. 40).

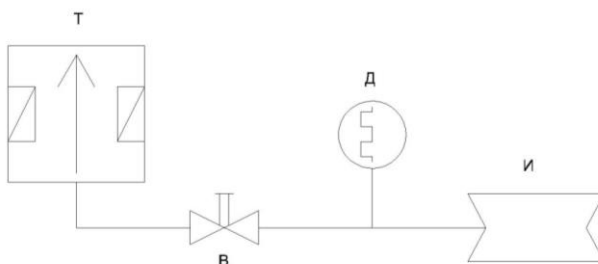


Рисунок 40. Схема испытательного стенда устройства вывода термопар, где Т – гелиевый течеискатель; В – угловой вентиль марки KF 25 НТС; Д – вакуумметр MKS 925; И – вакуумная камера.

В результате проведения испытаний выявлено, что узел ввода термопар герметичен. При вакууме $6,5 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст., в испытываемом изделии методом обдува фоновые показания течеискателя не изменились. Узел ввода термопар было рекомендовано использовать для установки на криогенный замедлитель (рис. 41).



Рисунок 41. Общий вид испытательного стенда.

3.4 Моделирование процесса загрузки и движения замороженных шариков на полномасштабном стенде комбинированного замедлителя КЗ 201

В результате исследований пневмотранспортировки шариков по круглому трубопроводу при комнатной и криогенных температурах, проведенных на лабораторных стендах и полномасштабном стенде КЗ 202, получены данные о разбросе скоростей шарика в зависимости от скорости и плотности газа, коэффициенты сопротивления покоя шарика, зависимости ускорения шарика от скорости, скорость газа для подъема шарика на угол 30% при длине наклонного участка до 0,5 м. Однако, ввиду того, что во всех полученных данных имеются большие отклонения от эксперимента к эксперименту, унифицировать данные и применять их для любого сложного трубопровода подачи шариков невозможно. Корреляция данных возможна только в том случае, если сам трубопровод транспортировки шариков будет геометрически более простым, чем тот, на котором уже были определены оптимальные характеристики работы оборудования и физические параметры среды для загрузки шариков. Трубопровод подачи шариков в криогенную камеру КЗ 201 имеет более сложную пространственную геометрию, чем уже эксплуатирующийся

трубопровод подачи шариков в криогенную камеру КЗ 202 (рис. 42). Из рисунка видно, что замедлители КЗ 202 и КЗ 203 располагаются в одной плоскости, КЗ 201 подъезжает снизу, как описано в главе 3. п. 3 настоящей работы. Пневмотрасса КЗ 202 имеет всего один подъемный участок, огибающий нейтроновод пучка № 4, длиной 0,5 метра с углом наклона 30° , а после него постоянный уклон в 2° в сторону камеры замедлителя. Такая конструкция обеспечивает разницу скоростей шариков, что исключает образование больших групп шариков и возникновение заторов даже при прекращении циркуляции гелия. Все имеющиеся в трубопроводе шарики, под действием силы тяжести будут доставлены в криогенную камеру замедлителя.

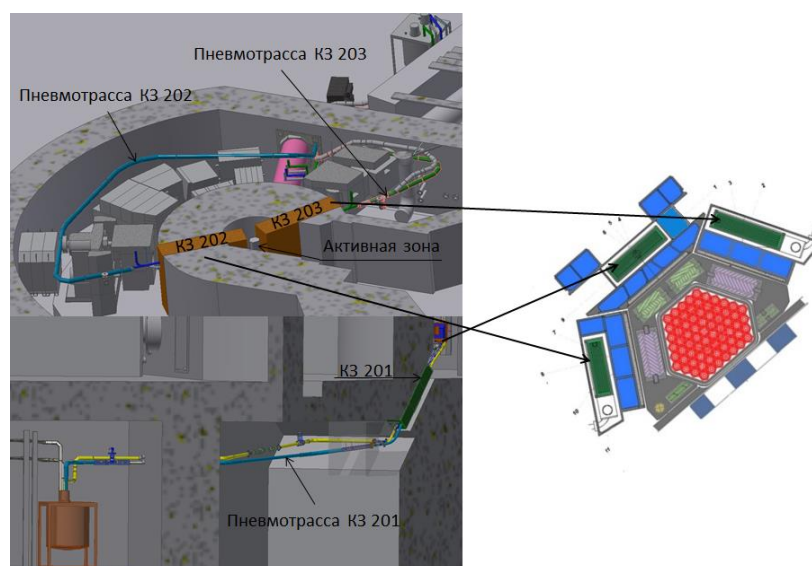


Рисунок 42. Общая схема пространственного расположения замедлителей вокруг активной зоны реактора.

Совсем другая ситуация складывается в отношении пневмотрассы КЗ 201, которая, учитывая пространственное положение замедлителя, инфраструктуру реактора и помещение перегрузки, после прохода через биологическую защиту (стену) имеет меняющийся уклон против движения шарика на протяжении всего пути. Шарикам, чтобы добраться до криогенной камеры замедлителя от устройства порционного дозирования, необходимо пройти прямой участок длиной 3 м, совершить поворот на угол 135° , после чего начинается первый подъемный участок длиной 3,7 м и углом подъема 3° . Затем еще поворот на 96° и подъем длиной 1,9 м с углом 8° . Особо сложным участком следует считать

участок на входе в блок биологической защиты замедлителя. В этом месте находится соединение замедлителя с трубопроводом подачи шариков, поворот на 100^0 , сопряженный с подъемным участком внутри блока (рис. 43). Угол подъемного участка 50^0 , длина составляет 3 метра. Внутри защитного блока имеется изгиб на 135^0 (рис. 44). Все трубопроводы внутри блока (водяные, криогенные, слив мезитилена и т.д.) имеют такой изгиб, который выполняет защитную функцию от прямого прострела нейтронного потока при работе реактора на мощности и необходим по требованию радиационной безопасности. Т.к. для теоретического описания процесса движения метиленового шарика недостаточно данных, а испытанная конфигурация не имела похожих участков трассы, была высокая вероятность, что в месте входа в блок шарики будут существенно терять скорость при столкновении на повороте, разрушаться, что приведет к образованию группы шариков в одном месте. При этом подъемная сила циркулирующего гелия будет недостаточна для подъема одиночного шарика, и тем более группы шариков, что приведет к образованию затора. При этом, методика пневмотранспортировки замедляющего вещества в камеру замедлителя будет неприменима для конфигурации трассы КЗ 201.

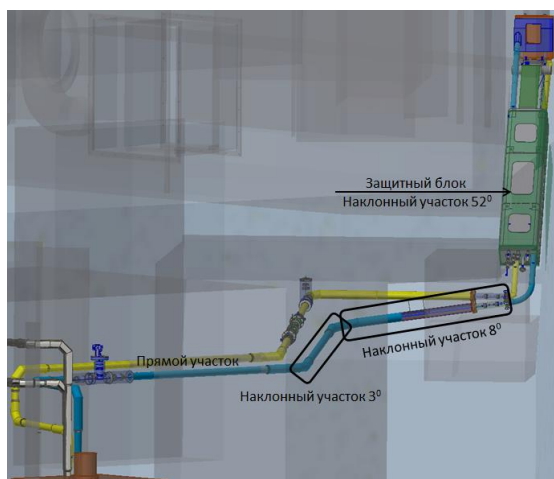


Рисунок 43. 3D модель пространственного расположения криогенных трубопроводов подачи шариков и обратного потока, с блоком биологической защиты.

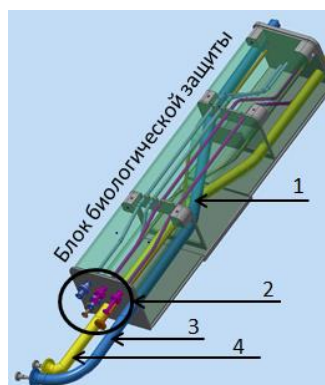


Рисунок 44. Блок биологической защиты КЗ 201, где 1 – изгиб трубопровода от прямого прострела нейтронного потока; 2 – инженерные коммуникации подключения воды, слива мезитилена, вывода ТХА; 3 – криогенный трубопровод подачи шариков; 4 – криогенный трубопровод обратного потока.

Для того, что бы исключить риск возникновения заторов из-за сложности геометрии пневмотрассы, и обоснования возможности применения принципа доставки рабочего вещества в криогенную камеру комбинированного замедлителя КЗ 201 методом пневмотранспортировки по сложному трубопроводу с крутым участком наклона, сопряженным с поворотом, определения оптимальных физико-технических параметров работы устройств и среды, для доставки шариков в камеру без заторов и их существенной дефрагментации был создан полномасштабный стенд КЗ 201. Стенд оснащался устройством порционной подачи шариков в трубопровод, датчиками контроля заторов и движения шариков, системой подпитки гелия, выброса водорода, анализатора массового расхода газа, термометрическим оборудованием на базе датчиков сопротивления (ДТ). В соответствии со сформулированными требованиями были проведены эксперименты по моделированию режима загрузки замедляющего материала в твердой фазе в форме шариков 3,5 – 4 мм в криогенную камеру КЗ 201. Далее представлена методика проведения экспериментов и принцип работы стенда [74].

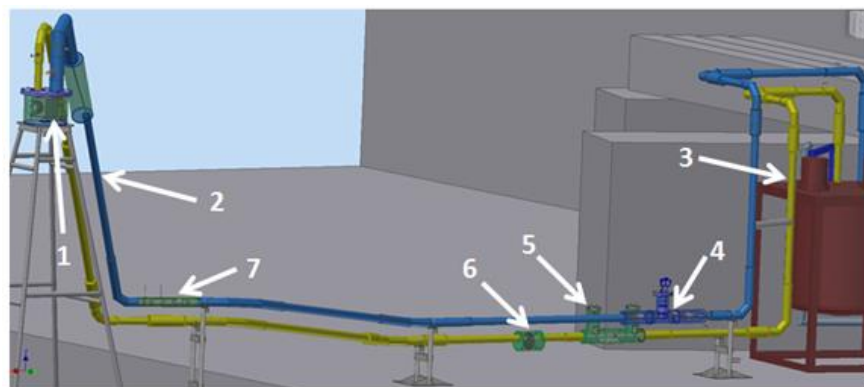
Принцип работы полномасштабного стенда КЗ 201.

Полномасштабный стенд комбинированного замедлителя КЗ 201 был собран и установлен в экспериментальном зале реактора ИБР-2 на пучке № 3

(рис. 45). Примечательно, что пользуясь опытом, который был приобретен при разработке и монтаже стенда и замедлителя КЗ 202, в этот раз все узлы стенда включая криогенные трубопроводы, были разработаны, изготовлены и смонтированы силами подразделений ЛНФ (опытные мастерские, КБ, группа № 2 МТО ЛНФ) без привлечения сторонних и порядных организаций (рис. 46). Стенд выполнен в масштабе 1:1, полностью повторяет конфигурацию и пространственное расположение трубопроводов, включает в себя все узлы и агрегаты, которые будут в последствии установлены на реальном замедлителе КЗ 201. Принцип работы стенда идентичен описанному принципу работы замедлителя на основе дисперсного мезитилена в части 4, главы 1.



(a)



(б)

Рисунок 45. Полномасштабный стенд комбинированного замедлителя КЗ 201 в масштабе 1:1: (а) – фотография, (б) – рабочая 3D модель, где 1 – камера имитатор в вакуумном кожухе, 2 – наклонный участок повторяющий проход в блоке биологической защиты, 3 – теплообменник с 2мя газодувками, 4 –

устройство порционной подачи шариков, 5 – устройство контроля массового расхода (трубка Пито-Прандтля), 6 – фильтр, 7 – дифференциальные датчики движения шариков.

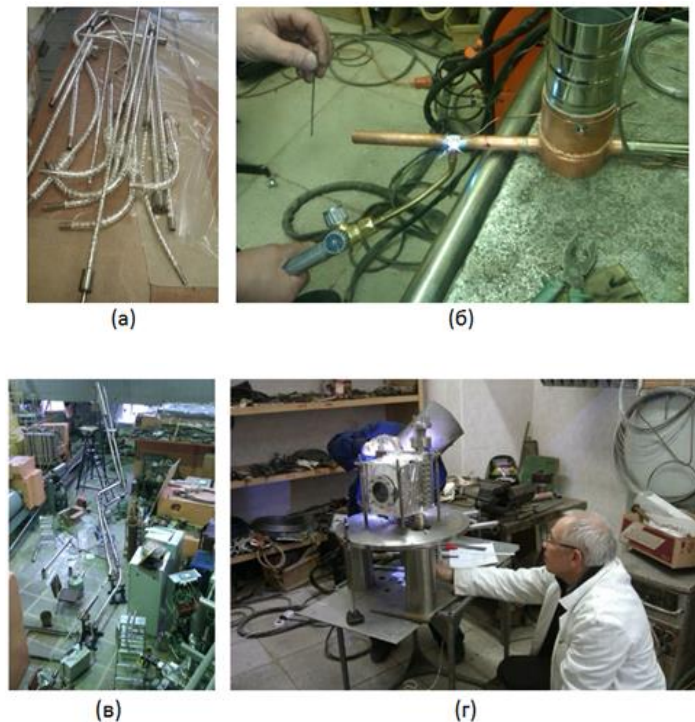


Рисунок 46. Процесс изготовления полномасштабного стенда КЗ 201, где на фотографии (а) – внутренние трубопроводы с многослойной изоляцией и сильфонными узлами, (б) – внутренняя часть устройства порционной подачи шариков (припаивается термопара), (в) – стенд на стадии сборки, (г) – сборка имитатора камеры замедлителя на сварочном участке (слева-направо Одинокоев С.А., Любимцев А.А.).

Полномасштабный стенд КЗ 201 работает по замкнутому контуру через теплообменник, который охлаждается криогенной гелиевой системой комплекса замедлителей ИБР-2. Поток охлаждающего гелия от рефрижераторных установок и циркулирующий гелий в системе стенда не смешивается, а теплопередача происходит в трубчатом медном теплообменнике. Таким образом, для более легкого понимания, следует разделить систему охлаждения на контуры: первый контур и вся система охлаждения комплекса замедлителей до теплообменников, а второй контур – это контур транспортировки шариков и замедлителей. На рисунке 47

представлена схема полномасштабного стенда КЗ 201 и замедлителя КЗ 202, из которой видно, что охлаждение от криогенной системы происходит в общем теплообменнике, и распределяется на стенд и на замедлитель.

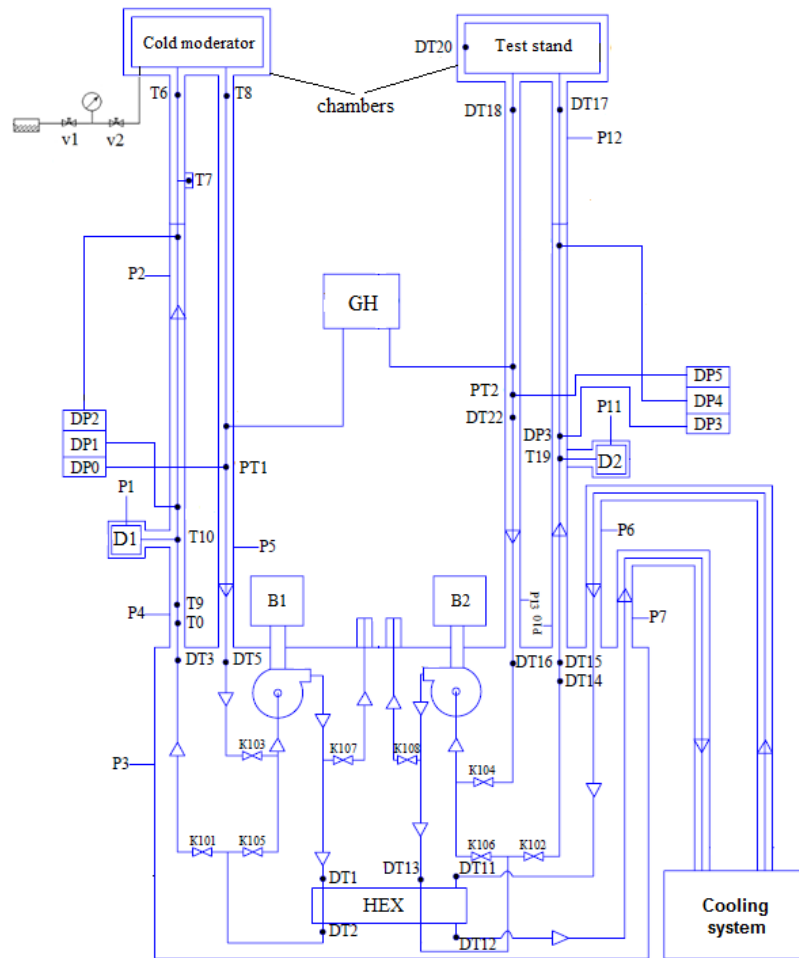


Рисунок 47. Технологическая схема испытательного стенда «КЗ201» и замедлителя «КЗ202» с двумя газодувками, общим теплообменником и системой охлаждения замедлителей. DT – датчики температуры, термодиоды DT670, T – радиационно-стойкие термпары типа TXA, P – вакуумные датчики MicroPirani MKS 901 и MKS925, Cooling system – система охлаждения, B1 и B2 – газодувки, D1 и D2 – дозирующие устройства, DP – датчики дифференциального давления типа DXLdp, v1 и v2 – вентили для слива отработанной смеси мезитилена и метаксилола, GH – газгольдер, HEX – теплообменник.

В состав стенда КЗ 201 входят: трубопроводы транспортировки шариков и обратного потока гелия; газодувка (BNHeP-30-01 фирмы Barber Nicols

(США)), установленная на крышке теплообменника и обеспечивающая циркуляцию гелия в системе (на схеме В1, В2); устройство порционной загрузки шариков (D1, D2); датчики контроля заторов и движения шариков (датчики дифференциального давления DP 1 – 4); устройство контроля массового расхода газа в контуре (трубка Пито – Прандтля – DP 0, DP 5); датчики вакуума в межтрубном пространстве (MKS 925 – P); датчики давления во внутреннем трубопроводе (MKS 901P); датчики контроля за температурой (ДТ – термодиоды, ТХА – радиационно-стойкие термопары хромель-алюмель); газгольдер для подпитки системы при охлаждении и сброса гелия при отопреве (GH)(рис. 47).

Полная длина стенда от теплообменника до камеры и обратно около 48 метров, при этом длина транспортного трубопровода от дозатора до камеры 17 метров. В зависимости от назначения диаметр внутреннего трубопровода на стенде и в реальном замедлителе КЗ 201 имеет 2 типа размеров. Трубопровод от теплообменника до устройства загрузки и трубопровод обратного потока от камеры до теплообменника выполнен из цельнотянутой, бесшовной трубы 36*2 мм, трубопровод по которому транспортируются шарики от устройства загрузки до камеры замедлителя 20*2 мм. Такая разница объясняется характеристиками газодувки и необходимостью с одной стороны создать напор в транспортной трубе, а с другой получить наименьшее сопротивление в трубе обратного потока для наилучшего охлаждения и меньшего сопротивления в системе. Для снижения теплопритока за счет диффузии остаточных газов в межтрубном пространстве вакуум поддерживается не хуже чем 10^{-5} Торр; для снижения теплопритока за счет излучения на внутренний трубопровод наматывается многослойная изоляция из пленки ПЭТ-КДА и низкотемпературной синтетической бумаги СНТ – 10 или алюминиевой фольги АД1 и стеклобумаги БмД-К – в зоне специального допуска (дозовая нагрузка может превысить 200 мЗв). Намотка производилась непрерывно с перекрытием 20-30%, плотностью 20 слоев на 10 мм. Опоры трубопровода состоят из 2-х полуколец, на которых закреплены по 2 полых тонкостенных цилиндра из

нержавеющей стали 12Х18Н10Т путем точечной сварки. На концах цилиндра установлены сферические контакты из фторопласта. Такая сборка коаксиального криогенного трубопровода дает средний (экспериментальный) теплоприток на сложном трубопроводе с учетом изгибов и поворотов не более 1,2 Вт/м, что ниже среднего теплопритока к системам замедлителя КЗ 202 более, чем в 3 раза (4 Вт/м).

Методика проведения эксперимента по моделированию режима загрузки шариков в камеру-имитатор.

Запускается гелиевая газодувка, обеспечивающая циркуляцию в контуре загрузки. Система и трубопроводы первого и второго контура охлаждается до температуры 80 – 100 К. После достижения этих температур начинается процесс транспортировки шариков в камеру замедлителя потоком гелия. Во время загрузки азот в жидком состоянии может попадать в трубопроводы и узлы системы через загрузочное устройство при помещении в него шариков. Оценить количество попадающего с шариками азота не представляется возможным. В случае попадания большого количества жидкого азота в систему загрузки и понижении температуры ниже 77 К, азот будет конденсироваться и может произойти закупорка, вследствие чего, циркуляция гелия прекратиться. Это приведет к образованию затора из шариков, прекращению охлаждения и, как следствие, подъему температуры и расплавлению шариков. Стоит отметить, что т.к. системы 1-ого и 2-ого контуров не смешиваются и попадания азота в первый контур (система охлаждения комплекса замедлителей) невозможно, наиболее вероятное место конденсации жидкого азота (место закупорки) – это теплообменник. Такая ситуация возникала 2 раза на первом стенде КЗ 202 и один раз при загрузке замедлителя КЗ 202 уже в режиме опытной эксплуатации. Для исключения таких ситуаций была разработана методика отгонки азота из системы после загрузки. Обязательным условием загрузки шариков является температурный режим во всех узлах системы выше 78 К (выше температуры кипения азота). Это позволяет азоту находится в системе в состоянии газа и циркулировать вместе с потоком гелия. После помещения шариков в

загрузочное устройство следует провести продувку, пока по прибору АГ 0012 (газоанализатор) установившееся значение не станет выше 102 у.е., но не менее 10 минут. Продувка осуществляется гелием через клапан подпитки на обратном трубопроводе (подача гелия из газгольдера) через ловушки, залитые жидким азотом, который выпускается через клапан, находящийся на крышке дозатора. Таким образом, происходит частичная замена гелия с примесью азота на «чистый» гелий. После очистки системы от примесей азота включается двигатель устройства порционного дозирования шариков (рис. 48). Шарики последовательно небольшими порциями попадают в транспортный трубопровод, где подхватываются потоком циркулирующего гелия и доставляются в имитатор камеры замедлителя. В ходе моделирования режима загрузки шариков в камеру замедлителя на полномасштабном стенде КЗ 201 было определено, что оптимальная скорость подачи шариков в транспортный трубопровод составляет в среднем 1,8 ш/с. Такая скорость обеспечивает стабильную загрузку без заторов и дефрагментации шариков. Полная загрузка камеры замедлителя рабочим веществом происходит в 3 этапа порциями по 350 мл – в каждой. Экспериментально было установлено, что 350 мл, наиболее оптимальный объем единовременного заполнения для перемешивания и регулярности подачи шариков в пневмотракт. Каждый этап загрузки занимает от 1,5 до 2 часов с учетом продувки после каждого заполнения загрузочного устройства.

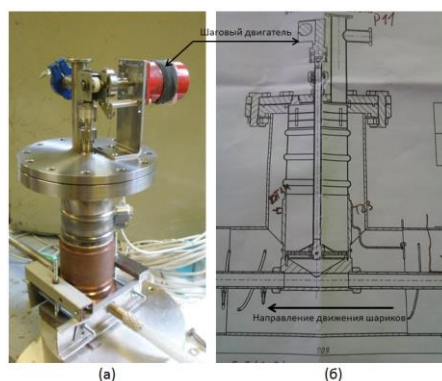


Рисунок 48. Устройство порционной подачи шариков в трубопровод (дозатор), где (а) – фотография дозатора на пневмостенде без изоляции и вакуумного кожуха; (б) – рабочий чертеж дозатора на сборочном чертеже.

Имитатор камеры представляет собой параллелепипед с габаритными размерами 184x173x183 мм, помещенный в вакуумный кожух, выполненный в виде цилиндра диаметром 425 мм и высотой 286 мм. Для анализа распределения шариков внутри замедлителя, изменения их геометрической формы, возможного разрушения и появления осколков во время загрузки, конструкция имитатора предполагает возможность наблюдения внутрь камеры из вне. Для этого, было установлено 3 кварцевых стекла – первое в вакуумном кожухе, второе на имитаторе камеры и третье внутри камеры, представляющее собой одну из стенок камеры замедлителя (рис. 49). Также на дне камеры установлена решетка, на которой задерживаются шарики, и рассеиватель, установленный непосредственно после трубопровода подачи шариков, (рис. 49 (б)), благодаря которому шарики равномерно распределяются в объеме камеры. Для того, чтобы загрузить полную камеру КЗ 201, необходимо доставить около 32 000 шариков с плотностью засыпки 0,6. Полная загрузка занимает порядка 6 часов с учетом продувки.

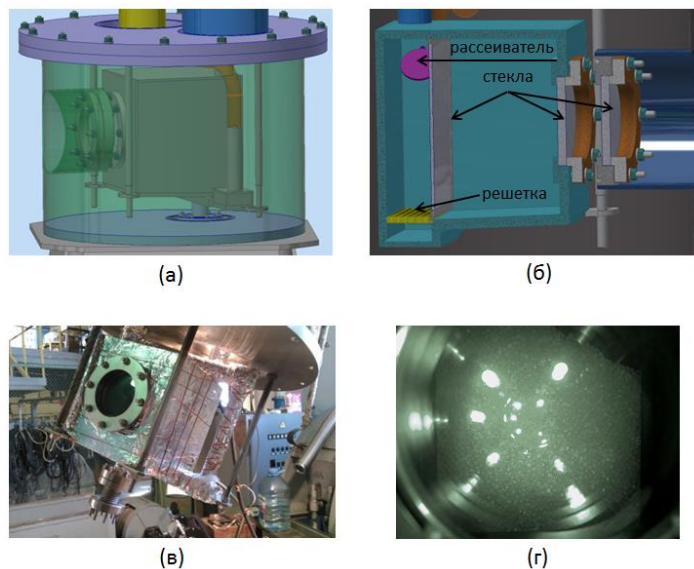


Рисунок 49. Камера-имитатор, где (а) – 3D модель камеры в кожухе; (б) – 3D модель камеры с кварцевыми стёклами, решеткой и рассеивателем; (в) – имитатор камеры в изоляции перед установкой в кожух; (г) – полная камера шариков после загрузки, вид в камеру извне (300 K в 80 K через стекла).

На процесс движения шариков по трубопроводу и загрузке их в камеру влияет множество процессов. При эксплуатации реального замедлителя понять

доставлены ли шарики в камеру можно только после начала работы реактора на мощности от 400 кВт. Определение происходит методом «камеры-обскура». Это предполагает снятие двумерной картины распределения спектра нейтронного потока по внешней вертикальной плоскости камеры замедлителя позиционно-чувствительным детектором (ПЧД) [40, 42]. Примером такого определения служит рисунок 50, на котором хорошо видно, что в случае заполнения камеры рабочим веществом – замедлителем (справа) нижняя часть камеры приобретает более холодный оттенок, а пустая камера (слева), в верхней части заметно наличие гребенчатого водяного замедлителя.

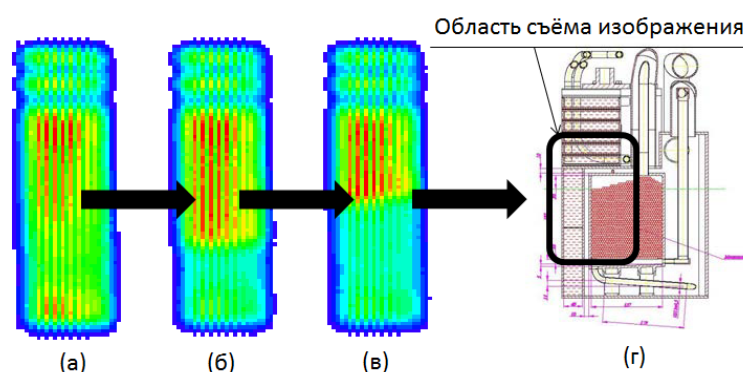


Рисунок 50. Изображения на ПЧД камеры комбинированного замедлителя КЗ 202 при различном заполнении замедляющим веществом: (а) – пустая камера; (б) – камера заполнена на 2/3; (в) – камера заполнена полностью; (г) – видимая часть камеры отмечена прямоугольником.

Другим способом определения заполнения камеры является проведение пользователями эксперимента, и уже после обработки результатов экспериментов на образце будет ясно, нейтроны какой интенсивности преобладали. И если первый способ (получение картинки ПЧД) это скорее разовое явление, необходимое при работе замедлителя в опытной эксплуатации, то второй способ просто недопустим. Это связано с тем, что экспериментаторы настраивают своё оборудование в соответствии со спектром и интенсивностью нейтронного потока, и в случае пустой камеры в криогенном режиме все полученные результаты не могут быть приняты к обработке. Как следствие – потеря реакторного времени. К тому же, оба эти способа непригодны ввиду длительности получения результата, и в случае

возникновения затора шариков оперативно остановить загрузку и устранить затор путем увеличением скорости потока гелия не удастся.

Учитывая необходимость отслеживания движения шариков по транспортному трубопроводу в режиме онлайн был применен метод изменения давления при прохождении шарика (рис. 47, датчики обозначены как DP). Дифференциальные датчики представляют собой 2 трубки, впаянные в транспортный трубопровод. При прохождении шариков происходит изменение давления перед шариком и после него, которое регистрируется вторичными приборами DXLdp, преобразующими это изменение в электрический сигнал, выводящийся в окно программы на мониторе.

Определение массового расхода гелия при циркуляции в контуре загрузки выполняется трубкой Пито-Прандтля. Этот важный параметр определяет: во-первых – возможность начать загрузку шариков, а во-вторых – прекращение циркуляции гелия в системе. Массовый расход вычисляется по формуле (9) и может меняться в зависимости от оборотов газодувки и температуры гелия в системе от 0,5 г/сек при 300 К, до 10 г/с при 25 К. Для конфигурации трубопровода замедлителя КЗ 201 на полномасштабном стенде было определено, что шарики преодолевают подъем на всех участках, при этом они не разрушаются, не возникает заторов, а загрузка идет штатным образом в течение 5 – 6 часов при массовом расходе гелия от 1,6 до 3 г/сек.

$$Q = v_{He} \rho \pi R^2, \quad (9)$$

где $v_{He} = 11$ м/с – скорость потока гелия; $\rho = 54/T_{He}$ в кг/м³, T_{He} – температура гелия; $R = 8$ мм – радиус трубопровода.

Анализ результатов моделирования загрузки шариков на полномасштабном стенде комбинированного замедлителя КЗ 201.

Основной задачей моделирования режима загрузки на полномасштабном стенде комбинированного замедлителя КЗ 201 было доказательство возможности применения метода пневмотранспортировки рабочего вещества в криогенную камеру замедлителя с учетом геометрического расположения в пространстве узлов и трубопроводов системы загрузки и охлаждения. При

этом, было необходимо проверить работоспособность устройств контроля движения шариков и определения затора, систем контроля и визуализации параметров, определить оптимальную скорость движения шариков и массовый расход гелия в системе для подъема шариков по критическому углу наклона 52^0 внутри блока биологической защиты замедлителя без образования затора. Требовалось подобрать оптимальные физико-технические характеристики работы устройств и среды для доставки шариков в камеру без их существенной дефрагментации, разрушения и заторов.

На испытательном стенде было проведено 5 полных загрузок камеры-имитатора за время около 5-6 часов, была доказана возможность транспортировки шариков до камеры потоком циркулирующего гелия, создаваемого газодувкой. Оптимальные параметры, которые обеспечивают стабильную загрузку шариков, без возникновения заторов, разрушения и слипания шариков приведены в таблице 5.

Таблица 5. Параметры работы оборудования и устройств, физические характеристики гелия для загрузки шариков мезитилено-метаксилоловой смеси диаметром 3,5 – 3,9 мм методом пневмотранспортировки в криогенную камеру замедлителя КЗ 201.

Регулируемый параметр	Допустимое значение
Температура от КГС	81К
Температура второй петли КГС (КЗ201)	81 – 100К
Температура в загрузочном устройстве	83 – 85К
Температура в камере	85 – 100К
Расход гелия второй петли КГС	1,6 – 3 г/с
Обороты газодувки	375 об/с

Скорость подачи шариков в тракт	1,5 – 1,8 ш/с
Давление во второй петле	800 Торр
Параметры работы дозатора скорость вращения диска/шаг/угол	1 оборот в минуту / 0,5 с / 3,6°
Скорость шариков в трубе	2,3 – 3,2 м/с
Время продувки между загрузками	10 мин
Общее время загрузки	~ 6 ч

3.5 Технологическое оборудование, системы управления и контроля параметров работы комбинированных замедлителей

Под технологическим оборудованием и системой управления и контроля подразумеваются механические устройства и узлы, интегрированные или установленные в системе охлаждения и транспортировки шариков к камере замедлителя, а также вторичное оборудование, преобразующее полученные данные в электрический сигнал, выведенный на мнемосхему замедлителей. Устройства и системы контроля параметров работы замедлителей включают в себя:

- устройство порционного дозирования шариков в транспортный трубопровод;
- датчики дифференциального давления, регистрирующие прохождения шариков и образование затора;
- устройство определения массового расхода гелия в системе второго контура;
- термометрическое и вакуумное оборудование.

3.5.1 Устройство порционной загрузки шариков в трубопровод

Учитывая полученные экспериментальные данные по движению шарика на лабораторных макетах, постулатом для разработки устройства подачи шариков в транспортный тракт стал закон – регулярная, строго последовательная (по одному), с возможностью менять скорость, подача шариков.

Первое, испытанное устройство подачи представляло собой цилиндр с азотной и вакуумной рубашками, для обеспечения низких температур (80-100 К) внутри устройства. Это была самостоятельная конструкция с внутренним объемом 1,5 л, закреплённая через шаровой клапан к разгонному участку подачи шариков (рис. 51). В основании устройства устанавливался диск с 28 отверстиями диаметром 4,5 мм. Диск приводился в движение шаговым двигателем, установленным на крышке устройства подачи (дозатора). Диск соединен с двигателем через полый шток. При вращении отверстие диска совпадало с отверстием наклонного участка и шарик попадал в разгонный участок транспортного трубопровода. Для исключения возможности попадания нескольких шариков одновременно над местом размещения наклонного участка установлен отсекаТЕЛЬ, выполненный в виде пластины (рис. 52).

Устройство загрузки установлено и испытано на полномасштабном стенде КЗ 202 при криогенных температурах. В процессе испытаний были выявлены существенные недостатки такой конструкции дозирующего устройства. Шарики мезитилена разрушались при перемешивании и подаче в тракт. Это происходило в результате их попадания между диском и отсекаТЕЛЕМ, отверстием диска и отверстием наклонного участка трубопровода подачи.

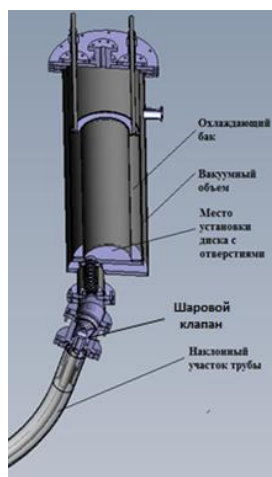


Рисунок 51. Вертикальный разрез первого устройства подачи шариков с разгонным участком.



Рисунок 52. Внутренняя часть дозатора – вид сверху на диск и отсекатель.

Мезитиленовая пыль и мелкие осколки шариков попадали между дном дозатора и диском, в результате чего происходило заклинивание диска. В результате чего процесс загрузки прекращался. Была сделана попытка предотвратить разрушение шариков путем замены диска с отверстиями на диск с 2-мя прорезями (рис. 53) и удалением отсекаателя. К сожалению, эти меры не принесли желаемого результата. Шарики стали разрушаться меньше, но существенно процесс не изменился. Диск также продолжало заклинивать спустя 30 минут после начала вращения.

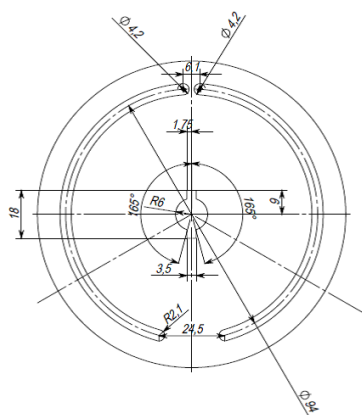


Рисунок 53. Модернизированный диск первого дозатора с прорезями 4,2 мм вместо отверстий.

Еще одним негативным фактором было наличие локального теплопритока в месте стыковки устройства загрузки с наклонным участком пневмотракта. Из-за ограниченной циркуляции гелия в наклонном участке создавался гелиевый «карман», и достаточного охлаждения не происходило. К тому же фланец стыковки дозатора с пневмотрактом был выполнен без надлежащего теплового моста ввиду большой массы конструкции. И теплоприток по этому фланцу был достаточно велик. Было замечено, что эти два фактора приводили к тому, что мезитиленовая пыль и мелкие осколки попросту прилипали к стенкам наклонного участка, в особенности в районе стыковочного фланца. Это приводило к образованию нароста, вследствие которого шарики не могли проходить дальше в пневмотракт. Попытки установить на наружную часть фланца охлаждающие баки, заполняемые жидким азотом, результатов не дали.

Учитывая неудовлетворительную работу устройства загрузки, от такой конструкции пришлось отказаться.

Второе устройство подачи шариков (дозатор) имело принципиальные конструктивные отличия от первого устройства, и было интегрировано в общую систему вакуумирования и охлаждения. Конструкция нового дозатора представлена на рисунке 54.

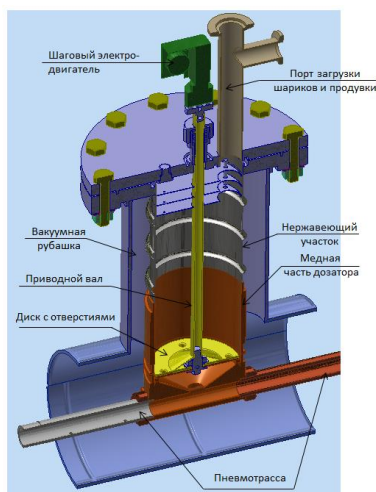


Рисунок 54. 3D модель второго устройства подачи шариков в вертикальном разрезе. Движение шариков справа – налево.

Дозатор представляет собой цилиндр, нижняя часть которого, для уменьшения температурного градиента по объему дозатора, выполнена из толстостенной меди, а верхняя часть из тонкостенной нержавеющей стали с ребрами жесткости. Для контроля температуры внутри дозатора на подводящей трубке и нижней части цилиндра устанавливались хромель-алюмелевые термопары. В основании дозатора устанавливался диск с четырьмя отверстиями диаметром 4,2 мм. Само основание было выполнено в форме конуса для попадания шарика непосредственно в тракт. Диск приводится в движение шаговым двигателем. Объем дозатора уменьшен до 0,5 л, а сама загрузка проводится в 3 этапа по 350 мм шариков за один раз. Экспериментально установлено, что перемешивание шариков, а также их равномерная подача обеспечиваются при работе двигателя в шаговом режиме. Другими словами, при движении диска в прерывистом режиме за счет разных коэффициентов трения шарик-шарик, шарик-стенка, шарик-диск, обеспечивается наиболее равномерное перемешивание и подача шариков в транспортный трубопровод. Изменением единичного угла поворота диска и частотой вращения можно менять среднюю скорость подачи шариков в тракт. Оптимизацией конструкции устройства подачи, его интеграцией в общую систему охлаждения удалось добиться низкого градиента температуры по объему, при этом разница температур не превышает 4 К. Второй дозатор был испытан на полномасштабном стенде КЗ 202, КЗ 201 и в настоящее время

эксплуатируется в составе комбинированного замедлителя КЗ 202 (рис. 55). За время экспериментов и эксплуатации было проведено более 60-ти загрузок, в ходе которых нареканий на работу устройства замечено не было.



Рисунок 55. Устройство порционной подачи шариков, интегрированное в систему охлаждения КЗ 202.

3.5.2 Датчики дифференциального давления

Датчики дифференциального давления предназначены для определения прохождения шарика в трубопроводе и выявления заторов в случае их возникновения. Методика регистрации движения шариков основана на измерении разности статистических давлений циркулирующего гелия на концах измеряемого промежутка при прохождении шарика (рис. 56).

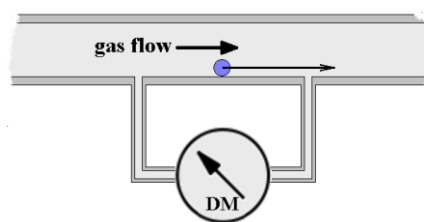


Рисунок 56. Методика регистрации проходящего шарика в потоке газа, где DM – датчик дифференциального давления.

Технологически система регистрации представляет собой 2 трубки с проходным сечением 1,5 мм, впаянные в трубопровод транспортировки шариков на расстоянии 270 мм друг от друга. Вторичные датчики регистрации изменения дифференциального давления DXLdp – это 2 датчика мембранного

типа фирмы Ashcroft (США) с диапазоном измерения 0 – 25 Па, погрешностью 0,5%, временем отклика 10 мс. Датчики установлены в 2-х местах – непосредственно после устройства подачи шариков в трубопровод (рис. 57) и перед блоком биологической защиты и участком подъема в 52°.

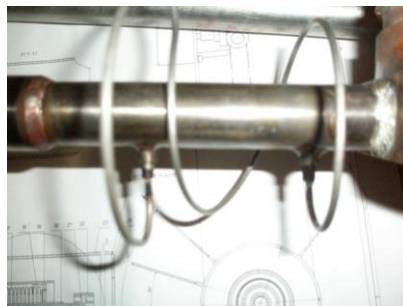


Рисунок 57. Трубки системы регистрации прохождения шариков, установленные после дозатора.

Сигнал об изменении давления поступает через АЦП LA-20USB на ПК и обрабатывается программой «Balls movement control». При регистрации сигнала в первой точке (непосредственно после дозатора), где скорость шарика еще мала и не превышает 1 м/с, фиксируется как положительный длинный импульс (50 мс) перед шариком по ходу его движения, так и отрицательный, короткий (10 мс) импульс низкого давления за шариком амплитудой 0,2 отн.ед (рис. 58). К сожалению, данным способом невозможно подсчитать точное количество проходящих шариков, но определить, что сам процесс загрузки идет, и шарики двигаются по трубопроводу труда не составляет.

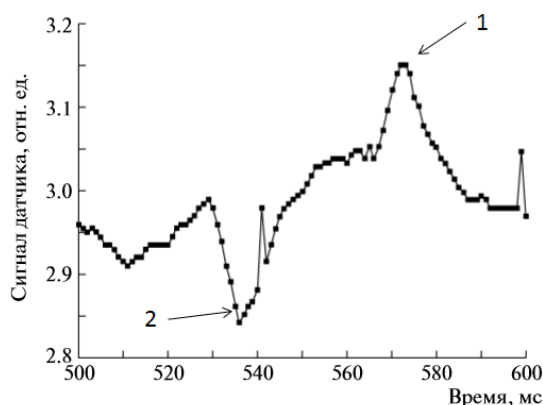


Рисунок 58. Регистрация прохождения шарика по амплитуде сигнала от DXLdp, где 1 – фиксация увеличения давления перед шариком, 2 – после прохождения шарика.

Определение затора фиксируется небольшим повышением давления и равномерным сигналом, изменяющимся в пределах 0,05 отн. ед., вызванным флуктуациями газа. В случае затора необходимо остановить вращение диска дозатора и кратковременно повысить обороты газодувки до устранения затора. Если повышением оборотов «продуть» затор не удалось, следует понизить температуру, увеличив плотность гелия, что выражается в изменении массового расхода гелия.

3.5.3 Устройство определения массового расхода гелия в системе второго контура

Регистрация массового расхода чрезвычайно важна, т.к. является **единственным** параметром определения закупорки системы охлаждения 2-го контура и прекращения циркуляции гелия. Программа работает в режиме *on-line* и позволяет оператору в короткий промежуток времени определить возникновение «пробки» и предпринять меры по её устранению. Косвенные способы определения (повышение температуры в системе 2-го контура) имеют существенно большее время отклика и не могут быть использованы в режиме эксплуатации замедлителя на мощности реактора.

В качестве первичного прибора определения расхода в трубе была выбрана классическая трубка Пито – Прандтля (рис. 59). Это комбинация из трубки Пито и напорной трубки для измерения статистического давления

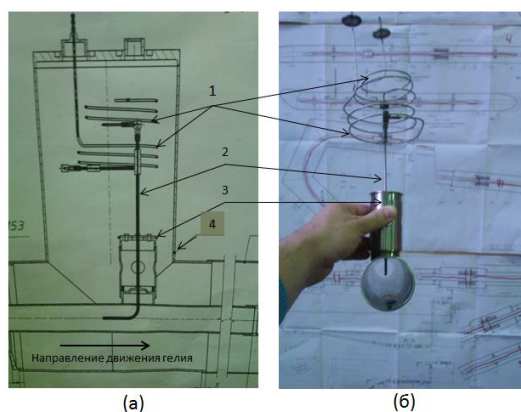


Рисунок 59. Узел трубки Пито – Прандтля, интегрированной в обратный трубопровод системы охлаждения комплекса КЗ; (а) – рабочий чертеж, (б) – готовый узел без вакуумного кожуха и изоляции, где 1 –

тепловой мост, 2 – трубка Пито – Прандтля; 3 – узел центрирующий трубку внутри трубопровода; 4 – вакуумный кожух (а).

потока. В центре трубки имеется одно отверстие, направленное против движения потока для измерения полного давления и несколько отверстий по окружности вдоль поверхности трубки на некотором расстоянии от её центр для измерения статического давления. Разница этих давлений является, согласно закону Бернулли, динамическим давлением (рис. 60). В этом случае установившееся, в трубке, динамическое давление равно:

$$P_d = \varepsilon \frac{\rho V_0^2}{2}, \quad (10)$$

где, ρ – плотность среды, ε – коэффициент местного сопротивления, V_0^2 – скорость набегающего потока [75-79].

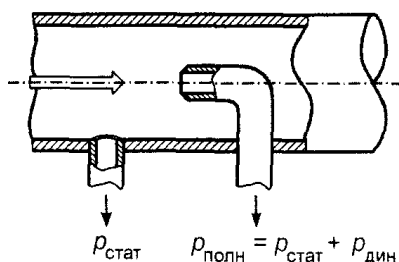


Рисунок 60. Принципиальная схема работы трубки Пито – Прандтля.

Отсюда, зная скорость потока, легко вычислить массовый расход газа в трубе заданного диаметра по формуле 10. Подробный расчет представлен в главе 3, пункте 4 настоящей работы.

Вторичным прибором, преобразующим аналоговые данные в электрический сигнал, является мембранный датчик дифференциального давления DXLdp, аналогичный тем, которые применялись для определения движения шариков и затора, рассмотренные в главе 3, пункте 5.2 настоящей работы. Отличие состоит в диапазоне измерений датчика, который для случая определения массового расхода составляет от 0 до 100 Па, а время отклика 200 мс.

3.5.4 Термометрическое и вакуумное оборудование

Для контроля температуры в системе комбинированного замедлителя используют 2 типа датчиков – ТХА (хромель – алюмелевые термопары) и DT

670 (термодиоды). Применение разных типов датчиков объясняется радиационной нагрузкой. Так вблизи активной зоны реактора (на подводящем и отводящем гелий трубопроводе головной части замедлителя), где радиационная нагрузка превышает 200 мЗв/ч, устанавливаются ТХА, а уже в контролируемой зоне (устройство порционной подачи шариков, внутри теплообменника и коллектора и т.д.) установлены датчики типа DT 670. Диапазон измеряемых температур составляет от 10 К до 300 К. Принцип работы DT 670 основан на изменении сопротивления при повышении (понижении) температуры. Датчики подключаются по 4-х проводной схеме, где по 2-м проводам подается постоянный ток, а с двух других снимается напряжение пропорциональное измеряемой величине (сопротивлению датчика). Вторичным прибором регистрации напряжения выступает 8-ми канальный измеритель аналоговых сигналов ТМ 5103. Этот измеритель связан с ПК по интерфейсу RS 232 или RS 485, что позволяет использовать снимаемые им данные на удалении. Оператор может следить и контролировать температурный режим с рабочего места.

Данные с хромель-алюмелевых термопар ТХА снимаются по 4-х проводной схеме и преобразовываются мультиметром «Kethly», после чего передаются на ПК в виде цифровых сигналов.

Вакуумное оборудование.

Контроль за вакуумом в кожуховом пространстве осуществляется при помощи широкодиапазонных датчиков MKS 925 с дисплеем. Принцип работы такого датчика основан на изменении конвективной теплопроводности в сочетании с сенсором MicroPirani. Такая комбинация позволяет проводить измерения в диапазоне от 10^{-5} Торр до атмосферного давления. Для связи с ПК используется интерфейс RS 485, а для визуального контроля при обходе оператором оборудования имеется дисплей, отображающий данные в режиме онлайн. Датчики имеют возможность установить границы измеряемых величин, и при повышении давления в вакуумном пространстве выше заданного подается сигнал оператору и запускается высоковакуумный пост, привязанный к конкретному участку или оборудованию.

Для получения в кожухах трубопроводов, теплообменников, коллекторе и блоков охлаждения гелия рефрижераторов давления не более 10^{-4} Торр (рабочее давление) используются высоковакуумные турбомолекулярные посты различной мощности от 400 до 1000 л/с по азоту. Основой таких постов служит турбина на магнитных или керамических подшипниках, а в качестве насоса, создающего форвакуум, используются спиральные насосы ISP мощностью от 250 до 500 л/мин. В системах комбинированных замедлителей используются посты японского производства фирмы «Shimadzu» и австрийской фирмы «Leybold».

3.6 Выводы по главе 3

В главе 3 рассмотрены основные этапы создания 2-ой очереди источника холодных нейтронов – комбинированного замедлителя КЗ 201 для экспериментальных пучков 1, 4, 5, 6, 9 ИЯУ ИБР-2.

1. Проведено компьютерное моделирование различных вариантов головной части замедлителя КЗ 201. В результате сравнения по нейтронно-физическим и эксплуатационным характеристикам был выбран вариант с центральным расположением криогенной камеры, водяной камеры для пучка № 1, водяной фокусирующей рамки постзамедлителя (рис 30). Такая конфигурация головной части обеспечивает повышенный выход нейтронов в области холодных нейтронов ($\lambda \approx 4 - 9 \text{ \AA}$) для пучков 4, 5, 6, 9 до 9 раз, а для пучка № 1 выигрыш в области тепловых нейтронов ($\lambda \approx 0,6 - 4 \text{ \AA}$) до 1,4 раза.
2. Комбинированный замедлитель КЗ 201 имеет возможность работать в 2-х режимах:
 - в режиме водяного замедлителя, когда криогенная камера и вакуумный кожух заполняются гелием при небольшом избыточном давлении (50 Торр) для отвода тепла при работе реактора на мощности. В этом случае замедление нейтронов происходит в водяной камере предзамедлителя, и пик спектра нейтронного потока смещается в область нейтронов с короткой длиной волны (тепловые);

- в режиме криогенного замедлителя камера заполняется рабочим веществом (смесь мезитилена с метаксилолом) в твердом агрегатном состоянии в форме шариков диаметром 3,5 – 3,9 мм и охлаждается потоком циркулирующего гелия. Рабочие температуры при этом от 10 до 100 К. В этом случае нейтроны замедляются и в криогенной камере, а пик нейтронного потока смещается в область длины волны 4 – 7 Å.
3. Учитывая пространственное положение замедлителя относительно активной зоны реактора, рабочее вещество в форме шариков и требования по чистоте поверхности внутреннего трубопровода, отсутствие ступенек по ходу движения шарика в месте стыковки, а также возможность перегрузки замедлителя с заменой его на водяной **разработано, испытано, запатентовано и внедрено специальное разъёмное криогенное соединение**, удовлетворяющее всем ограничениям и требованиям к нему. Соединение имеет теплоприток на уровне всего трубопровода 1,3 Вт/м, не имеет теплового моста и контакта с кожуховой частью, не имеет стыка и изменения диаметра сопрягаемых трубопроводов по ходу движения шарика и поэтому не вносит коррективы в траекторию его движения. Соединение имеет легко сборно-разборную конструкцию и позволяет проводить оперативную замену замедлителя в случае необходимости без применения механических машин и сварки. Сокращение времени перегрузки замедлителя существенно снижает дозовую нагрузку на эксплуатирующий и ремонтный персонал.
4. **Доказана возможность применения метода пневмотранспортировки шариков в камеру замедлителя КЗ 201.** Эксперименты проводились на полномасштабном стенде, полностью повторяющем пространственную геометрию трубопроводов охлаждения и транспортировки шариков с учетом расположения камеры замедлителя КЗ 201 относительно активной зоны реактора. Было проведено 5 полных загрузок камеры при температуре 80 – 100 К, продолжительность каждой из которых заняла от

5 до 6 часов. Определены оптимальные параметры работы устройств и физические параметры среды для доставки шариков в камеру без заторов, слипания и существенной дефрагментации в процессе загрузки и транспортировки по сложному трубопроводу с критическим углом подъема 52° :

- температура в петле загрузки от 80 до 100 К. Это позволит проводить продувку системы и удалить азот, попадающий в систему вместе с шариками;
- массовый расход гелия в системе от 1,6 до 3 г/с, обеспечивает подъем шариков по наклонному участку (52°) внутри защитного блока замедлителя без заторов во всех точках системы;
- скорость шариков ограничена на уровне 2,3 – 3,2 м/с при такой скорости сила удара о стенки трубопровода мала, это приводит к сохранению целостности шарика и предотвращает его дефрагментацию на крупные и мелкие фракции.
- подача шариков в трубопровод со скоростью 1,5 – 1,8 м/с позволяет исключить образование больших групп шариков за счет их равномерного распределения по трубопроводу и, как следствие, отсутствию заторов на участках подъема и поворотах.

Таким образом, все подготовительные и предварительные работы, разработки и эксперименты по моделированию были выполнены, полный комплект чертежей был передан на завод изготовитель ОАО «НПО АТОМ». К 15/05/2018 году (момент написания этой части работы), замедлитель КЗ 201 был изготовлен и прошел первую примерку возле активной зоны реактора. После этого, будет проведена заливка блока замедлителя бетоном, проверка на прочность и герметичность, установка на штатное место, и начнется тестовая эксплуатация.

ГЛАВА 4. СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ИСТОЧНИКА ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ РЕАКТОРА ИБР-2

Стоит отметить, что без источника с высокой холодильной мощностью (рефрижераторная установка, вакуумное и криогенное оборудование) практически невозможно создать высокопоточный источник холодных нейтронов на таких физических установках, как реакторы и ускорители. Это связано с большими тепловыделениями в результате радиационного нагрева, а также количеством используемого оборудования (вентили, выводы термометрического оборудования) и металлоконструкций (трубопроводов, фильтров и т.д.), которые необходимо охлаждать. Учитывая это, система охлаждения является одной из основных систем источника холодных нейтронов.

4.1 Режимы работы источника холодных нейтронов реактора ИБР-2

Источник холодных нейтронов реактора ИБР-2 состоит из 3-х комбинированных замедлителей, окружающих активную зону реактора. Каждый замедлитель может работать в 2-х основных режимах:

- в режиме криогенного замедлителя;
- в режиме водяного замедлителя.

При работе замедлителя в водяном режиме происходит прокачка воды (дистиллята) через полости предзамедлителя и постзамедлителя с расходом для КЗ 201 и КЗ 203 21,7 л/мин, при давлении 0,18 МПа, а для КЗ 202 с расходом 10,7 л/мин при том же давлении. В этом режиме рабочим веществом замедлителя является циркулирующая вода, в которой происходит снижение энергии нейтронов до 0,025 эВ, при этом криогенная камера и вакуумная рубашка заполняются гелием с давлением 800 Торр. Причиной заполнения гелием является увеличение теплопроводности и отвод тепла с элементов конструкции замедлителя при отсутствии охлаждения за счет криогенной установки в водяном режиме работы.

Криогенный режим работы замедлителя предусматривает прокачку гелия при температуре от 20 до 100 К непосредственно через криогенную

камеру и рабочее вещество замедлителя. В этом случае нейтроны от реактора проходят термализацию в рабочем веществе при криогенной температуре (устанавливается по требованию экспериментатора). Массовый расход гелия, циркулирующего в системе замедлителя, составляет от 1,5 до 11 г/с. Это позволяет проводить теплосъем в камере замедлителя и обеспечивать стабильную и однородную (в пределах 4 К) температуру по всему объему криогенной камеры замедлителя. Также при работе замедлителя в криогенном режиме сохраняется циркуляция воды (дистиллята) в предзамедлителе и постзамедлителе.

Учитывая, что на поверхность каждого замедлителя ИБР-2 ориентировано от 2-х до 5-ти экспериментальных каналов с различными физическими установками, требовалось создать систему охлаждения, которая бы обеспечивала гибкий режим работы замедлителей. Под «гибкостью» здесь понимается возможность смещать пик спектра нейтронного потока в область больших или меньших длин волн в зависимости от конкретного эксперимента. Этого можно добиться, меняя температуру замедляющего вещества в криогенной камере [80]. Отсюда были сформулированы следующие основные свойства системы охлаждения.

Система охлаждения должна обеспечивать:

- 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);
- индивидуальную температуру в каждом из замедлителей.

4.2 Система охлаждения комплекса комбинированных замедлителей ИБР-2

4.2.1 Система водяного охлаждения замедлителей

Как отмечалось ранее, комбинированные замедлители реактора ИБР-2 могут работать в двух режимах, один из которых – режим водяного замедлителя. Вода (дистиллят) циркулирует в полостях предзамедлителя и постзамедлителя с различным давлением и расходом (зависит от замедлителя и объемов полостей). Эта циркуляция обеспечивает не только термализацию нейтронов до тепловой области, но и безопасность эксплуатации замедлителей. При помощи воды осуществляется теплосъем с элементов конструкции головной части замедлителя.

Водяная полость предзамедлителей представляет собой плоскую камеру, состоящую из одной или нескольких секций в зависимости от конструкции конкретного замедлителя. Геометрическая форма и конструкция постзамедлителей различается и зависит от реальной геометрии и осей экспериментальных каналов, «смотрящих» на поверхность замедлителя. Для обеспечения теплосъема и безопасной эксплуатации циркуляция воды в них производится постоянно, независимо от выбранного режима работы замедлителя, даже в режиме ожидания реактора на нулевой мощности. Подача и отвод воды (в) из полостей пред и постзамедлителя организованы таким образом, что исключают опорожнение камер в случае разрыва или разгерметизации трубопроводов подачи и отвода воды. В качестве конструкционного материала головной части замедлителя используется алюминиевый сплав АМгЗ. Выбор материала обусловлен следующими факторами:

- нейтронно-физические характеристики материала (малое сечение поглощения нейтронов);
- материал находится в списке приложения 9 правил (ПНАЭГ Г-7-008-89), и допустим для использования при конструировании ИЯУ и элементов к ним;

- большим объемом данных по физико-механическим свойствам материала под действием температур и давлений в широком диапазоне;
- низкой наведенной активностью под действием ионизирующего излучения.

4.2.2 Криогенная часть системы охлаждения замедлителей до модернизации на основе КГУ 700/15

Изначально криогенная часть системы охлаждения замедлителей базировалась на криогенной гелиевой установке КГУ 700/15 производства ОАО «НПО Гелиймаш», теплообменнике для замедлителя КЗ 202 и самого замедлителя. Для обеспечения вакуума в межтрубном пространстве коаксиальных криогенных трубопроводов, а также в вакуумной рубашке теплообменника, блока очистки и блока охлаждения гелия криогенной установки КГУ 700/15 используются вакуумные турбомолекулярные посты различной мощности (от 500 л/с до 1000 л/с). На рисунке 61 показана принципиальная схема работы криогенной системы замедлителя КЗ 202 с теплообменником на 2 газодувки, включающая вакуумное и термометрическое оборудование.

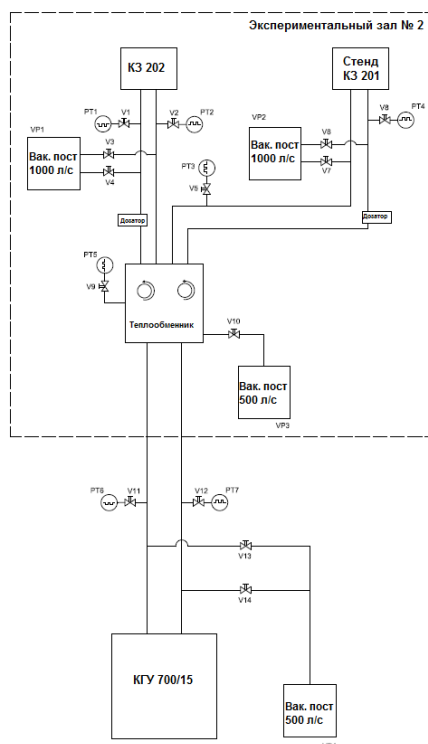


Рисунок 61. Принципиальная схема криогенной системы КЗ 202 и стэнда КЗ 201, где КГУ 700/15 – криогенная гелиевая установка мощностью 700 Вт

при 15 К; VP1-VP4 – высоковакуумные посты; PT1-PT7 – вакуумметры MKS 952; V1-V14 – вакуумные ручные вентили с сильфонным уплотнением.

Криогенная гелиевая установка КГУ 700/15 – турбодетандерная установка с холодильной мощностью 700 Вт при температуре 15 К. Расход гелия составляет 34 г/с, который обеспечивает компрессор фирмы KAESER DSD 202.

Установка работает на принципе расширения гелия, проходящего через рабочие колеса детандерных агрегатов, с отдачей внешней работы. Детандеры выполнены в вертикальном исполнении с задним газовым и передним масляным подшипниками. Основным недостатком этих детандеров являлась их ненадёжность работы в переходных режимах и передавливание масла из переднего подшипника в газовую полость. С первым недостатком удалось справиться, оптимизировав время выдержки турбин на оборотах, предшествующих дисбалансу, а также более точной балансировке на испытательном стенде. Вторая проблема была решена путем установки на магистрали отвода газа охлаждаемой емкости для улавливания и хранения паров масла. Кроме того, была разработана система визуализации данных установки (рис. 62 б), в которую вошли показания оборотов детандеров в графическом режиме, запись аварийных и предаварийных состояний в журнал событий. Масляный насос турбодетандерного агрегата выполнен в шестеренчатом исполнении и работает с уровнем шума превышающем 100 дБ, что не позволяет оператору находиться в помещении постоянно. Поэтому разработка и внедрение программного обеспечения по визуализации основных параметров работы КГУ 700/15 с выводом на ПК позволило перенести пульт контроля в смежное помещение (помещение оператора), что в свою очередь снизило нагрузку на персонал, работающий на установке в сменном режиме и, как следствие, риск ошибки оператора от переутомления.

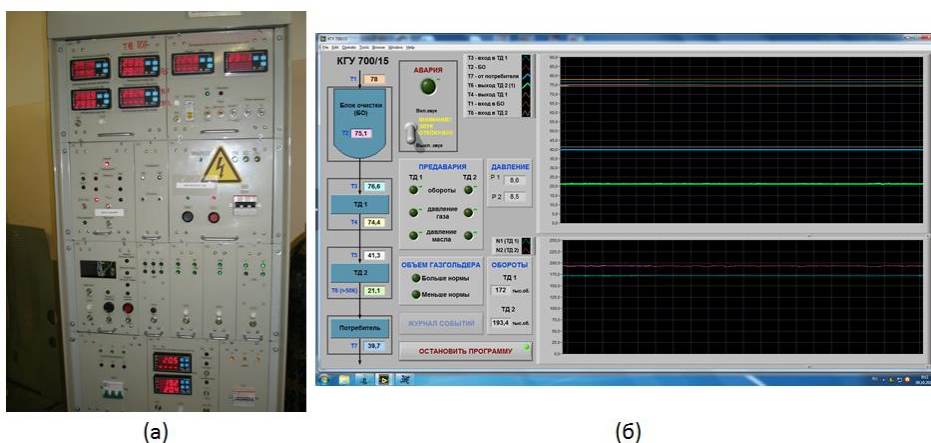


Рисунок 62. а – щит управления и контроля КГУ 700/15, который поставлялся с криогенной установкой; б – программа контроля и визуализации данных, разработанная конечным пользователем и установленная на ПК.

Заводом изготовителем заложено 2 режима работы установки:

- режим № 1 – температура на потребителя 15 К;
- режим № 2 – температура на потребителя 58 К.

При работе в **режиме № 1** устанавливается два турбинных модуля в турбодетандерный агрегат. Гелий, проходя через рабочие кольца первой турбины расширяется (давление падает с 10 до 5 ати), а температура понижается с 80 К до 72 К. Далее гелий проходит теплообменник № 2 и турбину № 2, после которой давление понижается уже до 0,5 ати, а гелий при этом охлаждается до 15 К и подается потребителю. Если необходимо получить температуру замедляющего вещества в камере на уровне 70 К, необходимо перевести установку в **режим № 2**. При этом, вторая турбина детандерного агрегата демонтируется, а на её места устанавливается заглушка. Гелий проходит через первую турбину, расширяясь до давления 0,5 ати, а температура снижается до 58 К. Такая схема работы установки не позволяет гибко использовать весь потенциал рабочего вещества. Для перехода от одного режима к другому необходимо полностью останавливать и отеплять установку, проводить замену турбинных модулей. Таким образом, установка может работать либо на 58 К, либо на 15 К на потребителя в течение рабочего цикла. Установка не предусматривает плавного регулирования температуры.

Учитывая, что в режиме загрузки замедлителя температура в контуре должна быть на уровне 80 – 100 К (около 6 – 8 часов), после чего КГУ выводится на стационарный режим работы 15 К, было создано и интегрировано в управляющую систему криогенной установки устройство, позволяющее поддерживать температуру на выходе к потребителю в пределах 60 – 80 К. Это позволило в режиме № 1 получить стабильную температурную полку на повышенной температуре, производить загрузку шариков в камеру замедлителя, а затем выходить на стационарный режим работы 15 К без остановки и смены турбинных модулей. К сожалению, режим работы установки на температуре 60 – 80 К не является базовым и может длиться не более 10 часов. По истечении этого времени начинает развиваться процесс недорекуперации (обмерзание трубопровода обратного потока гелия), турбины входят в резонанс и обороты начинают «плавать». Это связано с процессами захолаживания и размерами диффузоров рабочих колец детандеров. Такие процессы могут привести к диффузионной сварке с телом модуля и выходу турбины из строя. На установке КГУ 700/15 была проведена модернизация, которая позволила снизить нагрузку на оператора в течение цикла работы, установлена система, позволяющая плавно менять мощность имитатора и тем самым температуру в системе замедлителя, все же криогенная система охлаждения сохранила следующие существенные недостатки:

- холодильная мощность установки ограничена 600 Вт при температуре 20 К на потребителя (в камере замедлителя наименьшая температура 30 К (расчетная 20 К), что снижает поток холодных нейтронов по сравнению с расчетной на 25% при работе в одном направлении, а при работе в 2 направлениях температура в камерах не опускается ниже 60 К, что приводит к потере в нейтронном потоке в 2 раза);
- система не имеет возможности регулирования температурного режима в камере замедлителя (от 20 до 150 К) на весь цикл работы реактора, что не дает использовать весь потенциал мезитилена и

адаптировать наиболее оптимально замедлитель под нужды экспериментаторов;

- система не предусматривает возможности получать индивидуальные температуры в каждом из замедлителей, обеспечивая каждое из направлений уникальным нейтронным спектром;
- не предусмотрено резервирование криогенных установок. При выходе установки в ремонт или сервисное обслуживание нет возможности обеспечить цикл работы реактора в режиме криогенного замедлителя.

Несмотря на это, результаты опытной эксплуатации комбинированного замедлителя КЗ 202 показали, что нейтронный поток в области $7 \text{ \AA}$ вырос в 12 раз, а рабочее вещество мезитилен имеет хорошую радиационную стойкость, обеспечивается стабильная работа замедлителя на протяжении всего цикла работы реактора (260 часов). Деградация нейтронного потока в конце цикла не превышает 10%. Все это позволило продолжить работу над источником холодных нейтронов ИБР-2 и начать реализовывать вторую очередь проекта – комбинированный замедлитель центрального направления для пучков 1, 4, 5, 6, 9. Учитывая, что тепловая нагрузка на систему охлаждения источника возрастет, было решено провести модернизацию криогенной части, учитывая все вышеперечисленные недостатки существующей системы.

4.2.3 Новая криогенная система охлаждения на основе коллектора и двух рефрижераторных установок

Учитывая опыт эксплуатации криогенной системы на основе КГУ 700/15, режимы работы источника холодных нейтронов и свойства рабочего вещества замедлителя, а так же тепловую нагрузку на контуры охлаждения были сформулированы следующие требования к новой криогенной системе:

- температура в камерах замедлителя при одновременном захолаживании не выше 20 K;
- плавное изменение температур в камере замедлителя в пределах от 20 до 150 K;
- 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 63. 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.

Блок-схема криогенных замедлителей реактора
реактора ИБР-2

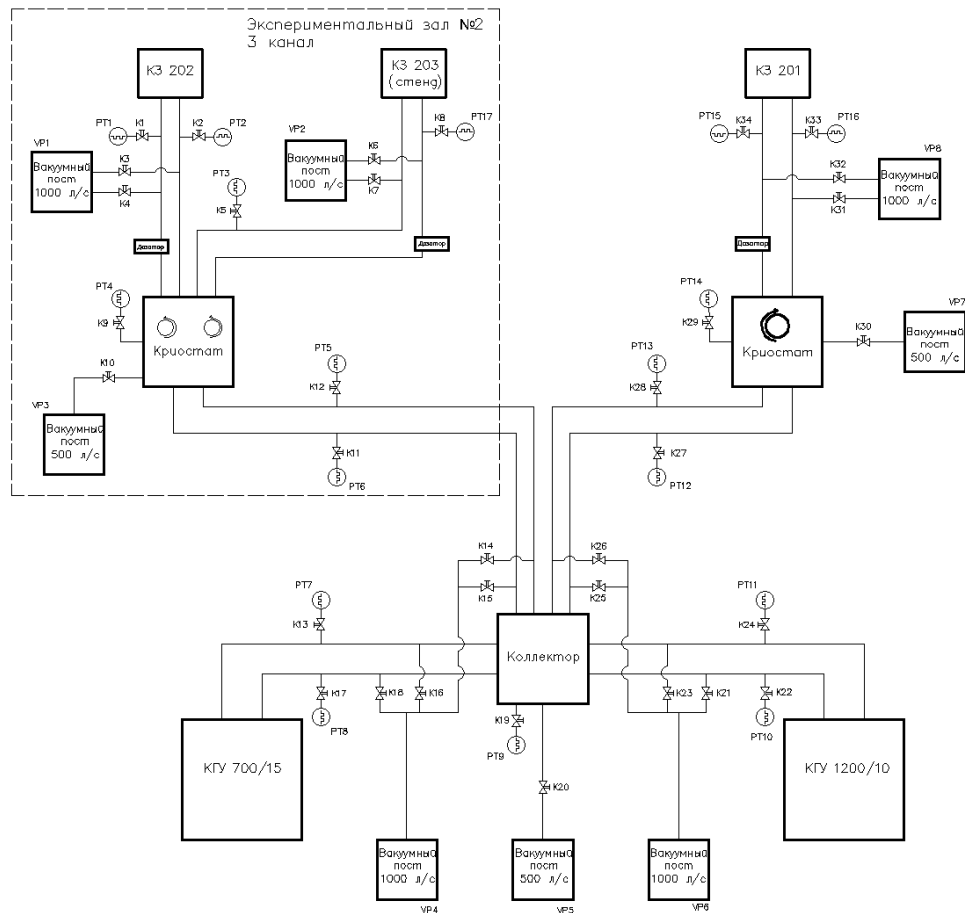


Рисунок 63. Блок-схема криогенной системы источника холодных нейтронов ИБР-2, где PT1-PT16 – мановакуумметры; V1-V33 – ручные сильфонные вентили; VP1-VP8 – турбомолекулярные посты различной производительности.

Рефрижераторная установка КГУ 1200/10 представляет собой холодильную установку мощностью 1200 Вт при 10К производства фирмы Linde Kryotechnik. В состав установки входят:

- блок охлаждения с двумя теплообменниками и турбинными модулями;
- модуль очистки гелия от примесей;
- мультикомпонентный газоанализатор проверяющий чистоту гелия по парам воды, масла, азота и углеводородов до уровня 0,01 vpm;
- компрессор KAESER DSD 238 с водяным охлаждением, обеспечивающий массовый расход гелия на уровне 40,7 г/с;
- щит управления и контроля за установкой;
- переносной компьютер ПК с программным обеспечением для управления установкой дистанционно;
- буферная емкость для подпитки и закачки гелия;
- система охлаждения компрессора и турбинных модулей (разработана и выполнена заказчиком).

При работе КГУ 1200/10 гелий из буферной емкости поступает на вход в компрессор, где сжимается до 12 ати, после чего попадает в систему очистки и анализа гелия. После того, как значение примесей в гелии станет меньше, чем 10 объемных долей на миллион (vpm), можно подавать гелий на турбины. Принцип работы рефрижератора аналогичен и КГУ 700/15. Расширяясь, гелий совершает работу с отдачей энергии и, соответственно, охлаждается. Холодильная мощность установки зависит от температуры обратного и прямого потока гелия. Отличительной особенностью установки является возможность регулировать температуру подачи гелия в диапазоне от 10 К до 120 К непосредственно в процессе работы, без остановок и замены турбинных модулей. Это стало возможно за счет установки дросселирующих криогенных вентилей и нагревателя обратного потока гелия, заведомо большей мощности. Кроме того, автоматически регулируются обороты турбин в зависимости от

режима работы установки. Программное обеспечение выполнено с учетом предупреждения аварийных ситуаций и, при ошибке оператора или аварийном отключении электроэнергии, управляющего газа и т.д., перекрывает турбинные модули, сохраняя их целостность и обеспечивая плавную остановку за счет небольших емкостей аварийного хранения гелия. Установке не требуется жидкий азот в качестве предварительного хладагента для охлаждения составных частей установки и гелия до 80 К. После оптимизации управляющих параметров рефрижератора установка работает в автоматическом режиме, и задачей оператора является лишь наблюдение за корректностью работы инфраструктурного оборудования (система водяного охлаждения, система подачи управляющего газа). Надежность работы рефрижератора как основного элемента криогенной системы источника холодных нейтронов повышает надежность работы всей системы замедлителей в целом. На рисунке 64 показан снимок с экрана оператора системы контроля параметров и управления установкой.

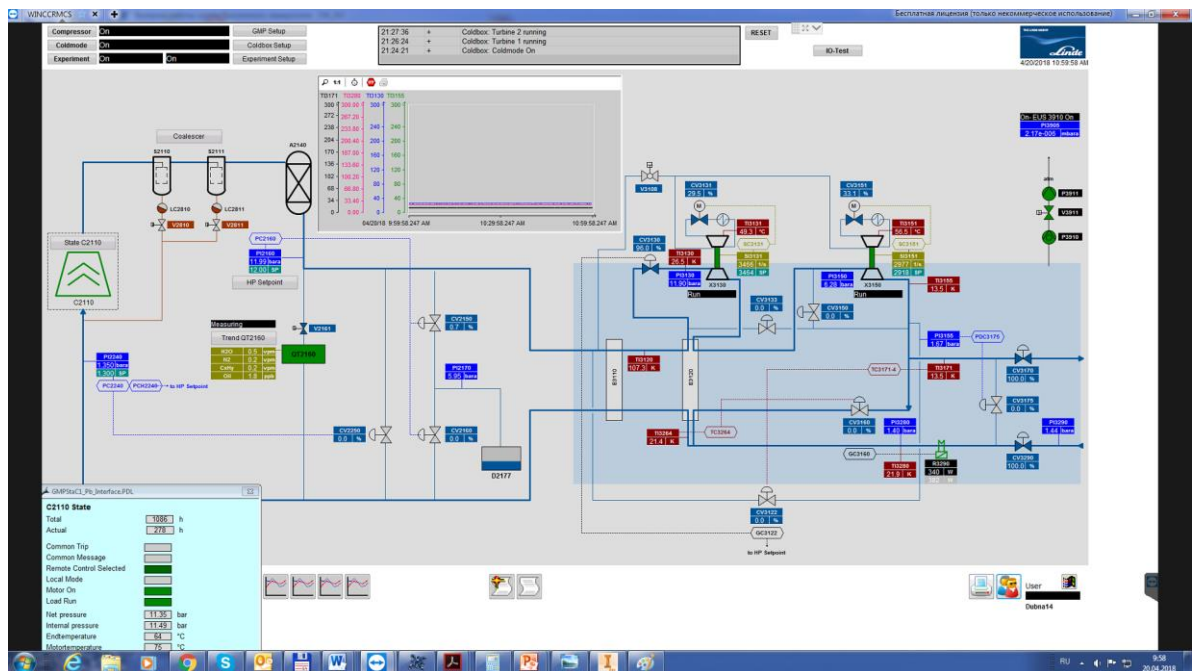


Рисунок 64. Программа контроля и управления параметрами работы установки оператором.

Таблица 6. Параметры рефрижератора КГУ 1200/10.

Параметр	Режим работы	
	10 К	80 К
Мощность (Вт)	1320	3000
Температура на потребителя (К)	≤ 10	≤ 80
Давление на потребителя (ати)	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
Давление на всасывании компрессора (ати)	12	10
Температура после потребителя (К)	~ 40	~ 110
Расход гелия (г/с)	40,7	
Давление управляющего газа (ати)	6 – 10	6 – 10
Скорость оборотов турбинных модулей макс. (об/мин)	330600	330600

Криогенный коллектор – устройство, объединяющее рефрижераторные установки и позволяющее распределять потоки гелия в заданном направлении с требуемым расходом. Коллектор включает в себя блок холодных вентилях, термометрическое оборудование, систему электропривода и управления. В качестве запорно-регулирующей арматуры применены вентили с электрическим приводом, нормально закрытые. Логарифмическая шкала открытия (закрытия) вентиля позволяет проводить тонкую регулировку проходного сечения и точно дозировать поток гелия в том или ином направлении (рис. 65). Высота теплового моста 1000 мм.



Рисунок 65. Криогенный вентиль фирмы «STOHR» с электроприводом, примененный в коллекторе для распределения гелия.

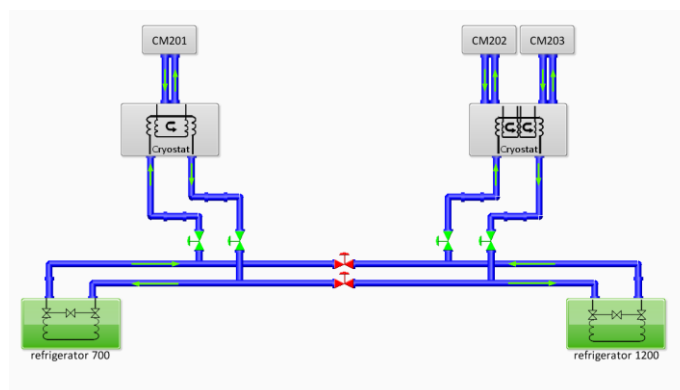


Рисунок 66. Упрощенная схема распределения потоков гелия через коллектор в криогенной системе охлаждения источника холодных нейтронов реактора ИБР-2.

Из рисунка 63, 66 видно, что коллектор является центральной композицией криогенной системы охлаждения источника холодных нейтронов, объединяя КГУ 1200/10 и КГУ 700/15 в единую систему с общей холодильной мощностью 1900 Вт и возможностью резервирования установок. Распределение потоков гелия в коллекторе позволяет получать в каждом из замедлителей индивидуальный температурный режим. Коллектор представляет собой стальную плиту, на которую установлены вентили, выполнена развязка трубопроводов, установлено термометрическое оборудование, и все это закрыто вакуумным кожухом (рис. 67). Вакуум во внутренней полости коллектора поддерживается на уровне 10^{-5} Торр. Для компенсации линейных расширений, на каждом трубопроводе установлены сильфонные узлы закрытого типа.



Рисунок 67. Коллектор в сборе.

Теплообменник. Как описывалось в главе 1, схема работы источника холодных нейтронов ИБР-2 предполагает двухконтурную систему охлаждения, где потоки от криогенной гелиевой системы не смешиваются с потоком гелия циркулирующего через камеру замедлителя. Теплообменник выполнен из медных трубочек навитых, «косичкой» между собой, а теплопередача происходит в результате контакта между ними. Потоки гелия в петлях двигаются навстречу друг другу. Циркуляция в криогенной системе происходит за счет работы рефрижераторных установок, а в петле замедлителей за счет работы газодувки фирмы «Barber Nichols» (рис. 68).



Рисунок 68. Теплообменник с 2-мя газодувками на канале № 3 для КЗ 202 и стенда КЗ 201.

4.3 Анализ спектров нейтронного потока на установках РЕМУР и НЕРА, при работе с новой криогенной системой охлаждения

В июле 2017 года в режим опытной эксплуатации была введена новая криогенная система охлаждения источника холодных нейтронов ИБР-2. В этой части главы под физическими улучшениями понимается фактор выигрыша нейтронного потока в области холодных нейтронов. Нетрудно понять, что фактически происходит «переброска» нейтронов в область с большой длиной волны. Увеличение потока ведет к ускорению набора статистики, и с одной

стороны приводит к уменьшению погрешности измерений, а с другой уменьшению времени, затраченного на каждый отдельный эксперимент, т.е. за реакторный цикл можно провести больше исследований. Увеличение интенсивности ведет к улучшению разрешающей способности спектрометров и дифрактометров, появляется возможность различать пики в длинноволновой области, наблюдать за процессами синтеза вещества в режиме онлайн и т.д.

Создание новой криогенной системы охлаждения повлекло за собой частичную замену коаксиальных криогенных трубопроводов. Изначально это были трубопроводы производства ОАО «НПО Гелиймаш». Но в процессе их эксплуатации был выявлен ряд недостатков, как самих трубопроводов, так и их монтажа. Дело в том, что исполнение трубопроводов таково, что зазор между кожуховым трубопроводом и многослойной изоляцией внутреннего трубопровода довольно мал и составляет не более 10 мм при плотной намотке. В реальных условиях монтажа получалось, что в местах стыка и подмотки изоляции зазор уменьшался до 1-5 мм. Такая же ситуация происходила и на поворотах. Уменьшение вакуумного зазора приводило к повышению теплопритока за счет пристенных скачков. Кроме того, опоры внутреннего трубопровода были выполнены в виде кольца с полыми цилиндрами, контакт металл-металл тоже давал повышенный теплоприток. После модернизации были частично заменены трубопроводы подвода и отвода гелия от (к) КГУ 700 до (от) коллектора, от (до) теплообменника до коллектора, и созданы трубопроводы от КГУ 1200/10 до коллектора. Новые трубопроводы были спроектированы в КБ и группе № 2 ЛНФ, изготовлены и смонтированы группой № 2 ЛНФ. Учитывая недостатки трубопроводов «Гелиймаш», зазор межтрубного пространства увеличили до 15 мм, а опоры были доработаны и выполнены из 2-х типов материалов. Для надежной фиксации оставили цилиндрические втулки, на которые одели сферические наконечники из фторопласта, что позволило уменьшить пятно контакта и снизить коэффициент теплопроводности. Этими изменениями удалось снизить реальный (не расчетный) теплоприток с 3 – 4 Вт/м, до 1,2 Вт/м трубопровода в среднем.

В 2017 году в 8 цикле, в 2018 году в 2-ом и 4-ом цикле работы реактора ИБР-2 на физический эксперимент в режиме криогенного замедлителя КЗ 202 провели ряд исследований, нацеленных на выявление изменения спектра нейтронного потока и его зависимости от температуры. Ввод в опытную эксплуатацию новой криогенной системы с распределением потоков гелия (коллектор) дал возможность получить новые данные о зависимости спектра нейтронного потока от температуры на замедлителе первой очереди КЗ 202. Эксперимент проводился при работе одной КГУ 1200/10 в 2-х режимах:

- работа КЗ 202 на физический эксперимент, мощность реактора 2 МВт;
- работа на КЗ 202 без мощности реактора и одновременно на полномасштабный стенд КЗ 201.

В результате проведенных экспериментов удалось выяснить, что использование новой криогенной системы позволило:

- понизить температуру в камере замедлителя КЗ 202 на 10 К с 32 К до 22 К при работе реактора ИБР-2 на мощности 2 МВт;
- при работе на 2 направления одновременно (КЗ 202 и стенд КЗ 201) понизить температуру на 38 К (с 60 К в каждой камере до 22 К в каждой камере).

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. 69), времяпролетном спектрометре с обратной геометрией НЕРА (пучок № 7с) (рис. 70). 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 (рис. 71 а). Сравнение проводилось с предзамедлителем, когда криогенная камера пустая. Далее, камера заполнялась замедляющим веществом, и проводились измерения спектра при разных температурах. Если захлаживать и работать на 2 направления одновременно (КЗ 202 и КЗ 201), то новая криогенная система (с КГУ 1200) по сравнению со старой (с КГУ 700)

даст понижение температуры с 60 К в камерах замедлителей до 22 К. Выигрыш в области холодных нейтронов составит до 200% (рис. 71 б). 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.). При применении старой криогенной системы достигнуть температуры 22 К в камерах замедлителей не удавалось.

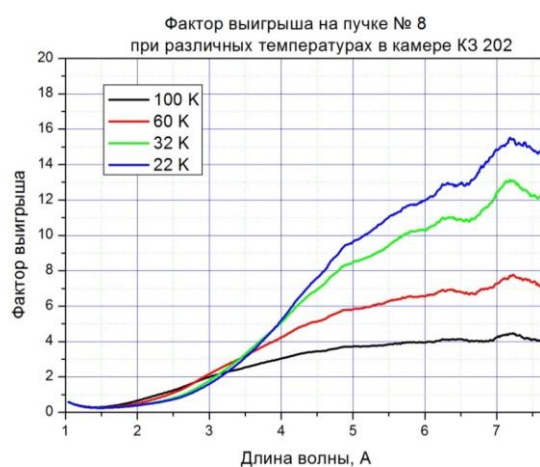


Рисунок 69. Фактор выигрыша в сравнении с предзамедлителем при разных температурах в камере K3 202 на установке РЕМУР.

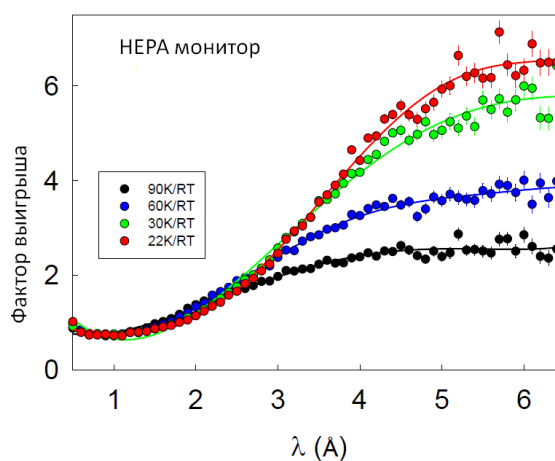


Рисунок 70. Фактор выигрыша в сравнении с предзамедлителем при разных температурах в камере K3 202 на установке HEPA.

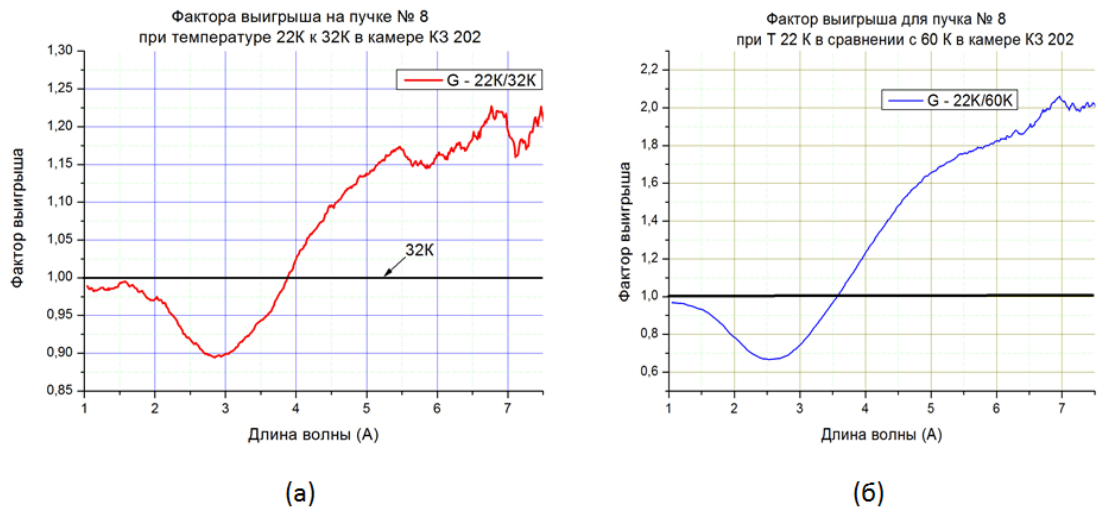


Рисунок 71. Фактор выигрыша интенсивности нейтронов в холодной области при понижении температуры в камере замедлителя, где (а) – сравнение старой (32K) и новой криогенных систем (22K) при работе КЗ 202 на мощности реактора 2 МВт; (б) – сравнение старой (60K) и новой (22K) криогенных систем при работе на 2 направления КЗ 202 и стенд КЗ 201 одновременно.

4.4 Технология и безопасность

Создание источника холодных нейтронов на реакторах – чрезвычайно сложная и ответственная работа. Это связано с вопросами безопасности ядерной установки, т.к. для получения высокой плотности потока нейтронов замедлители располагают в непосредственной близости от активной зоны реактора или вообще вводят внутрь зоны в специальных каналах. В случае ИБР-2 замедлители устанавливаются в 5 – 7 мм от стационарных отражателей, за которыми располагается активная зона ИБР-2. Кроме того стоит учитывать, что ИБР-2 – импульсный источник, который в 40 раз чувствительнее к изменению геометрии, чем стационарные реакторы, и любая авария или разгерметизация может привести к негативным последствиям вплоть до полного разрушения. Именно поэтому академик Илья Михайлович Франк, который в то время был директором ЛНФ, своим решением запретил создание водородного источника холодных нейтронов на ИБР-2. И хотя мезитилен не является взрывоопасным веществом, все равно водяная часть предзамедлителей

попадает под действие правил ПНАЭ Г-7-008-89 и классифицируется по классу безопасности 3Н. С точки зрения безопасной эксплуатации источника холодных нейтронов были рассмотрены 2 варианта негативных событий:

- прекращение циркуляции воды (по датчику протока) в полости предзамедлителя и постзамедлителя влечет за собой сброс аварийной защиты через 15 секунд. Эта мера обусловлена тем, что температура стенки замедлителя не должна превышать 150°C ;
- режим прекращения охлаждения (циркуляции гелия в петле замедлителя) камеры замедлителя при работе в криогенном режиме. В этом случае персоналу дается 40 минут на устранение неполадок и восстановление циркуляции гелия (пока температура в криогенной камере не достигла 120 К). Если охлаждение восстановить не удалось, оператор криогенного участка сообщает начальнику смены ИБР-2 о неполадках и дает команду на плавное снижение мощности реактора в штатном режиме.

Аварийная система сброса избыточного давления.

Кроме аварийных режимов, влекущих за собой снижение мощности реактора, которые контролируются оператором, есть физические процессы притекающие в рабочем веществе под действием ионизирующего излучения. Основная опасность – это выделение водорода. В настоящее время точной оценки объема выделяемого водорода в камере замедлителя нет. Оценочные расчеты показывают, что к концу цикла его выделяется не более 20 литров. Учитывая, что объем всей системы 150 литров, а с учетом газгольдера, который всегда соединен с объемом 6150 литров опасности разрушения камеры замедлителя нет. Водород просто распределяется по всему объему петли замедлителя и циркулирует вместе с гелием. Теоретически возможна его конденсация и намораживание в теплообменнике при понижении температуры до 14 К. В этом случае производится подъем температуры до 20 К и продувка системы из газгольдера в течении 10 минут. Схема работы замедлителя КЗ 202 представлена на рисунке 72 и включает в себя аварийную систему сброса

давления, систему охлаждения, систему откачки внутреннего трубопровода, систему слива мезитилена и т.д. Для сброса избыточного давления в системе замедлителя для безопасности предусмотрен клапан аварийного сброса газа (КП), срабатывающий при избыточном давлении 0,4 АТИ. Клапан соединен в свою очередь с аварийной магистралью сброса в атмосферу. Эта мера позволяет избежать разрушения камеры замедлителя и элементов системы в случае повышения давления вследствие нарушения эксплуатационных режимов замедлителя и выделения водорода из рабочего вещества.

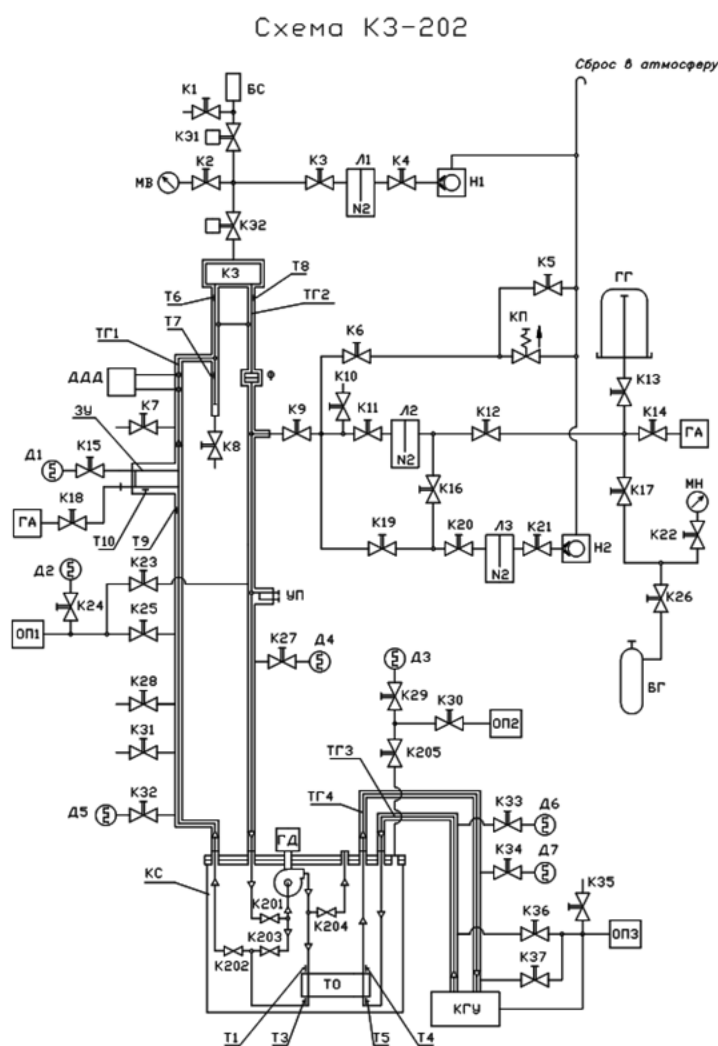


Рисунок 72. Принципиальная схема работы КЗ 202, где БС – бак для слива жидкого мезитилена, БГ – баллон со сжатым гелием, ГА – газоанализатор, ГГ – газгольдер, ГД – газодувка, Д1-Д7 – вакуумметры, ДДД – датчик дифференциального давления, ЗУ – загрузочное устройство, К1-К22, вакуумные клапаны с ручным приводом, К23-К36 – шиберы вакуумные с ручным

приводом, K201-K205 – клапаны криостата с ручным приводом, K3 – криогенный замедлитель, КП – клапан предохранительный, КС – криогенный теплообменник, КЭ1, КЭ2 – клапан вакуумный с электроприводом, КГУ – криогенная гелиевая установка, Л1-Л3 – ловушка азотная, МВ – мановакуумметр электрический, МН – манометр, Н1 – вакуумный химический насос, Н2 – вакуумный спиральный насос, ОП1-ОП3 – откачной пост, Т1, Т2-Т10 – термopapa, ТО – теплообменник, ТГ1 – трубопровод коаксиальный для подвода гелия и шариков в камеру замедлителя, ТГ2-ТГ4 – криогенные коаксиальные трубопроводы, УП – узел Пито, Ф – фильтр.

Система откачки и заполнения гелием петли замедлителя.

После того, как цикл работы в режиме криогенного замедлителя на физический эксперимент закончен, криогенная система останавливается, а температура в системе поднимается до комнатной. В этот момент происходит плавление мезитилена в криогенной камере, и он в жидком виде самотеком удаляется в специальный бак (БС). В результате радиационных эффектов и превращений часть мезитиленовой смеси может оставаться на стенках камеры, кроме того мезитиленовая пыль (в следствии разрушения шариков в процессе доставки и выхода водорода) может распространяться по всей системе трубопроводов, оседать на фильтре, теплообменнике и т.д. Для того, чтобы откачать остатки мезитилена и его паров из системы применяется химически стойкий форвакуумный насос Н1. Контроль за откачкой производится по мановакууметру ЭКМ снабженному электро-контактом, замыкающимся на уровне $1 \cdot 10^{-1}$ Торр. При достижении заданного вакуума на панели оператора загорается зеленая лампа, после чего оператор закрывает электрический клапан КЭ2 и выключает насос Н1. Далее откачка производится через азотные ловушки Л2, Л3 спиральным безмасляным насосом Н2. Первичная откачка химически стойким насосом обусловлена агрессивностью смеси мезитилена и метаксилола. Заполнение системы замедлителя гелием после откачки происходит из газгольдера ГГ через азотную ловушку Л2.

Замедлитель КЗ 202 введен в опытную эксплуатацию в 2012 году. За это время было проведено более 10 циклов работы реактора ИБР-2 на физический эксперимент в режиме криогенного замедлителя, а общая наработка составила 2500 часов. При этом отказов, предаварийных и аварийных ситуаций не наблюдалось. Это дает возможность считать концепцию источника холодных нейтронов на основе дисперсного мезитилена вполне успешной и надежной.

4.5 Выводы по главе 4

В главе 4 рассматривались вопросы системы охлаждения источника холодных нейтронов реактора ИБР-2, проводился анализ зависимости нейтронного спектра от температуры на физических установках, а также улучшения, которые удалось достигнуть, создав новую криогенную систему. Часть главы была посвящена оборудованию, которое применяется в системе замедлителей. Кроме того были рассмотрены вопросы безопасной эксплуатации источника.

К основным выводам стоит отнести следующее:

1. Была проведена реконструкция системы охлаждения источника холодных нейтронов. Новая криогенная часть системы охлаждения базируется теперь на двух рефрижераторных установках КГУ 700/15 (старая) и КГУ 1200/10 (новая производства Linde Kryotechnik). Эти холодильные установки объединены коллектором, который является центральной композицией системы. Коллектор объединяет установки, позволяя использовать всю холодильную мощность при необходимости, а также распределяет потоки гелия, обеспечивая независимый и индивидуальный режим в каждом из замедлителей. Кроме того, объединение установок в коллекторе обеспечивает их резервирование, и при выводе одной из них в ремонт или сервисное обслуживание, остается возможность работать на физический эксперимент в криогенном режиме, выполняя свои обязательства перед пользователями.

2. Реконструкция системы позволила снизить температуру в камерах замедлителей. При работе в одном направлении минимально возможная температура в камере замедлителя составила 22 К, в то время как до реконструкции этот показатель был 32 К. Учитывая ввод в эксплуатацию второй очереди источника холодных нейтронов, а именно комбинированного замедлителя КЗ 201, были проведены эксперименты по определению минимально возможной температуры в камерах замедлителей при работе в два направления одновременно одной рефрижераторной установкой КГУ 1200/10 (КГУ 700/15 в это время находилась в резерве). Эксперименты показали, что по сравнению со старой криогенной системой температуру в камерах удалось снизить с 60 К до 22 К в каждой камере.
3. Был проведен анализ зависимости спектра нейтронного потока от температуры замедляющего вещества в камере замедлителя, а также фактора выигрыша нейтронного потока при разных температурах. Исследования, проводившиеся на спектрометре поляризованных нейтронов РЕМУР и времяпролетном спектрометре с обратной геометрией НЕРА, показали, что понижении температуры до 22 К позволило увеличить поток холодных нейтронов до 22 % при работе в одном направлении и до 200% при работе на 2 направления одновременно.
4. Определены предельные параметры безопасной работы замедлителя, основные неполадки, время, за которое есть возможность их устранить без сброса мощности реактора. Разработан план действий оператора в случае предаварийных и аварийных ситуаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы подробно рассматривались вопросы создания источника холодных нейтронов на реакторе ИБР-2. Источник представляет собой 3 комбинированных замедлителя нейтронов, окружающих активную зону реактора. В замедлителях формируется спектр нейтронного потока, необходимый для проведения исследований на выведенных пучках. Каждый из замедлителей оптимизирован под определённые физические установки, оси пучков которых смотрят на поверхность головной части замедлителя. По основным задачам, поставленным в работе для достижения цели, сделаны следующие заключения:

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 **найден 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 коммутирующее 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 два замедлителя 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.

Итогом работы является создание и эксплуатация надежного, высокопоточного дисперсного источника холодных нейтронов на реакторе ИБР-2. Разработанные устройства и методики позволяют использовать весь потенциал рабочего вещества и пространственное расположение замедлителей, делая источник гибким и адаптируемым к проведению широкого круга экспериментов с максимальной эффективностью. Расширение возможностей исследовательских установок позволяет сохранять ИБР-2 лидирующие позиции в мире в области нейтронных исследований. Следует отметить, что в настоящее время, единственным источником холодных нейтронов в России является именно разработанный в ЛНФ источник на основе дисперсного мезитилена, по принципу работы не имеющий аналогов в мире.

Автор выражает благодарность Лаборатории нейтронной физики, отдельно группе № 2 МТО ЛНФ. Автор считает приятной обязанностью поблагодарить своего научного руководителя Николая Николаевича Агапова, коллегу и друга Максима Булавина. За поддержку, консультации и объективные замечания автор благодарит лично: А.А. Беякова, А.В. Виноградова, С.А. Куликова, А.А. Кустова, Н.А. Волкова, В.Н. Швецова, А.А. Любимцева, В.Д. Ананьева, И.А. Смелянского, В.А. Скуратова, И.М. Кондрашова, В.Г. Графова, Е.Г. Милькевича, С.А. Одинокова, Е.С. Куракину.

Автор бесконечно благодарен своим родителям, Мухиной Марине Васильевне и Мухину Александру Анатольевичу, за моральную поддержку и всестороннее участие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ракобольская И.В. / Ядерная физика // М.: Издательство Московского университета, 1971. - 296 с.
2. Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники». Серия «Обеспечение безопасности АЭС»: сб.ст. / сост. В.А. Мохов, А.С. Зубченко. – Подольск: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2014. - 128 с.
3. Гундорин Н.А. Эффективный замедлитель нейтронов для импульсных источников нейтронов / Гундорин Н.А. Назаров В.М. // Сообщения Объединенный институт ядерных исследований. P3-80-721, г. Дубна, 1980г.
4. Hughes D. J., Schwartz R. B. / Rept. – BiNL – 325. – 1958.
5. Kelberg E.A. Properties of the Iron Nanoparticles in Mesoporous Silica Studied by SANS. // Physica B. – 2004, V. – 350. – E305 – 308.
6. А.В. Стрелков. Первая бутылка с нейтронами и все, что этому предшествовало / А.В. Стрелков // Еженедельник «Дубна». – 2007. – № 23.
7. Y.-J. Kim. "HANARO Cold Neutron Research Facility Project" // Proc. UCN-CNS 4th Workshop – PNPI., 2003.
8. Myong-Seop Kim, Jungwoon Choi & al. "Measurement of Void Fraction in Hydrogen Moderator Used for Moderator Cell of HANARO Cold Neutron Source" // Proceedings of the 11th Meeting of the International Group on Research Reactors (IGORR 2007) – Lion, France, 2007.
9. Алтарев И.С. Универсальный источник холодных и ультрахолодных нейтронов на реакторе ПИК / К.А. Коноплев, В.А. Митюхляев, А.П. Серебров, А.А. Захаров // Препринт ПИЯФ-1704, 1991. Л., 35 с.
10. Серебров А.П. Источник холодных и ультрахолодных нейтронов в вертикальном канале реактора ПИК [электронный ресурс], – Режим доступа: <http://nrd.pnpi.spb.ru/sbornik/sbornik.page7.htm>, свободный.
11. Shabalin, E.P. Complex of neutron moderators for the IBR-2M reactor / E.P. Shabalin, S.A. Kulikov // Proceedings of 17th meeting of the international collaboration on advanced neutron sources (ICANS-XVII). – New Mexico, 2005.

12. Watanabe N. Neutronics of pulsed spallation neutron sources // Reports on Progress in Physics, 66, pp. 339–381, 2003
13. Шабалин Е.П. Холодные замедлители нейтронов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2005. – Т. 36. – вып. 6. – стр. 1424 -1444.
14. Natkaniec I. Comparison of Neutron Scattering and Radiation Properties of Methane and Water Ices with Methyl Derivatives of Benzene at Low Temperatures // 17th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, ICANS-XVII, USA, 2006. – LA-UR-06-3904, Vol. II, pp.519-529.
15. 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.
16. Breant P. The ORPHEE Reactor current status and proposed enhancement of experimental capabilities. IAEA Document XA041609. 28 pages, 1997 [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/36/023/36023806.pdf>) свободный.
17. Carpenter J.M. // IPNS Progress Report 1985-1986. Argonne National Laboratory, 1986. – pp. 8-10.
18. Barnert-Wiemer H. Conceptual Design a Cold Methane Moderator System for the European Spallation Source (ESS). // ISSN 0944-2952 report Forschungszentrum Julich GmbH Zentralabteilung Technologie.
19. Shabalin E. P. et al. URAM-2 Cryogenic irradiation facility // JINR Commun. E13-2002-143. Dubna, 2002. 10 p.
20. Bauer G.S. Solid Cold Moderators for High Power Neutron Sources // International Workshop on UCNS, 2003. – St. Petersburg.
21. Solid methane cold moderator for the IBR-2 reactor / A.A. Beliakov [et al.] // Proceedings of the international workshop on cold moderators for pulsed neutron sources. – Argonne, 1997. – P. 73-78.

22. Carpenter, J. Cold moderator for pulsed neutron sources / J. Carpenter // Proceedings of the Los Alamos Neutron Science Center. – Los-Alamos, 1990. – P. 131-153.
23. Ананьев В.Д. и др. ОИЯИ, 1969. – 13 – А 395, Дубна.
24. Ikeda S. et al. Cold neutron moderator at KENS-I // Proc. of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources (ICANS-IX), PSI, Villigen, Sept. 22-26, 1986. V. II. P. 18-26.
25. Beljakov A. A. et al. First experience of cold moderator operation and solid methane irradiation at the IBR-2 pulsed reactor // Proc. of the 16th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources (ICANS-XII), Abingdon, May 1993. RAL Report 94-025. V. II. P. T144-155.
26. Shabalin E. P. et al. Solid methane cold moderator at the IBR-2 reactor: test operation at 2 MW // Proc. of the Second Intern. Meeting on Pulsed Advanced Neutron Sources (PANS-II), Dubna, June 14-17, 1994. Dubna, 1995.
27. Belyakov A. A. et al. Solid methane cold moderator at the IBR-2 reactor // J. Neutron Res. 1996. V. 3. P. 209-221.
28. Belyakov A. A. et al. Solid methane cold moderator at the IBR-2 reactor // J. Neutron Res. 1996. V. 3. P. 209-221. 6. Belyakov A. A. et al. Solid methane cold moderator for the IBR-2 reactor // Proc. of the Intern. Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, Argonne, Illinois, USA, Sept. 29–Oct. 2, 1997. OECD Brochure, 1998. P. 73-78.
29. Shabalin E. P., Belyakov A. A. Solid methane cold moderator for the IBR-2 reactor: present status // Proc. of the German-Russian User Meeting Condensed Matter Physics with Neutrons at IBR-2, Dubna, April 2-4, 1998. Dubna, 1998. P. 25-32.
30. Belyakov 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,.

31. Shabalin E. P. et al. URAM-2 Cryogenic irradiation facility. JINR Commun. E13-2002-143. Dubna, 2002. 10 p.
32. Холодный замедлитель нейтронов на основе ароматических углеводородов / Шабалин Е.П., Куликов С.А. // Сообщение ОИЯИ P13-2004-73. Дубна, 2004. 12 с.
33. О пневмотранспортировке твердых шариков холодного замедлителя нейтронов / О.Г. Бузыкин, А.В. Казаков, Е.Н. Кулагин, С.А. Куликов, Д.Е. Шабалин, Е.П. Шабалин // Сообщение ОИЯИ, P13-2008-116, 2008
34. Моделирование пневмотранспорта твердых шариков холодного замедлителя нейтронов: распределение скорости и времени движения / К.А. Мухин [и др.] // Сообщение ОИЯИ, P13-2009-72, 16, 2009.
35. Mukhin K. Recent progress in development of the pelletized cold neutron moderators for the IBR-2M reactor / K. Mukhin [et al.] // 19th meeting on collaboration of advanced neutron sources. – Grindelwald, 2010. – P. 1-8.
36. Mukhin K. Current status of development advanced pelletized cold moderators for the IBR-2M research reactor / K. Mukhin [et al.] // Physics of particles and nuclei, letters. – 2013. – Vol. 10. – №2. – P. 230-235.
37. Мухин К.А. Испытательный стенд шарикового криогенного замедлителя нейтронов реактора ИБР-2 / К.А. Мухин [и др.] // Журнал приборы и техника эксперимента. – 2013. – №1. – С. 128-134.
38. 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.
39. Mukhin K. Conception of the Pelletized Solid Methane Cold Neutron Moderators / K. Mukhin K. [et al.] // 19th meeting on collaboration of advanced neutron sources. – Grindelwald, 2010. – P.
40. Control system of pelletized cold neutron moderator of the IBR-2 reactor / К.А. Мухин 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.
41. Холодный замедлитель нейтронов на модернизированном реакторе ИБР-2 / К.А. Мухин в соавторстве с В.Д. Ананьевым, А.А. Беяковым, М.В. Булавиным, А.Е. Верхоглядным, С.А. Куликовым, Е.П. Шабалиным // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, №2. – С. 131-134.
 42. The world's first pelletized cold neutron moderator at a neutron scattering facility / К.А. 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.
 43. Пат. 2492538 Российская Федерация, МПК G 21 K 001/00. Шариковый холодный замедлитель нейтронов [Текст] / К.А. Мухин в соавторстве с В.Д. Ананьевым, А.А. Беяковым, М.В. Булавиным, А.Е. Верхоглядным, 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.
 44. Использование криогенного замедлителя на нейтронном рефлектометре РЕМУР / С. В. Кожевников [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – №1, с. 5-14.
 45. 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
 46. Vasin, R.N. Elastic anisotropy modeling of Kimmeridge shale / R.N. Vasin [et al.] // Journal of geophysical research: solid earth. – 2013. – Vol. 118. – P. 3931-3956.
 47. Научные установки реактора ИБР-2 [Электронный ресурс], – <http://flnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2/instruments> – электронный ресурс со свободным доступом.

48. КОЛХИДА [Электронный ресурс], – <http://flnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2/instruments/kolkhida> – электронный ресурс со свободным доступом.
49. ЮМО [Электронный ресурс], – <http://flnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2/instruments/yumo> – электронный ресурс со свободным доступом.
50. ФДВР [Электронный ресурс], – <http://flnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2/instruments/hrfd> – электронный ресурс со свободным доступом.
51. ДН-6 [Электронный ресурс], – <http://flnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2/instruments/dn-6> – электронный ресурс со свободным доступом.
52. РЕФЛЕКС [Электронный ресурс], – <http://flnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2/instruments/reflex> – электронный ресурс со свободным доступом.
53. Chadwick M.B. ENDF/B-VII.1 nuclear data for science and technology: Cross sections, covariances, fission product yields and decay data / M.B. Chadwick, M.Herman, P. Oblozinsky, et al. // Nuclear Data Sheets, 112(12):2887-2996 (2011).
54. Granada J.R. Neutron cross section of cryogenic materials: A synthetic kernels for molecular solids, Proc. FZJ, FZJ, Juelich, Germany, 11-9-2002.
55. Nünighoff K.N. Investigation of the Neutronic Performance of Advanced Cold Moderators and Validation of New Evaluated $S(\alpha, \beta)$ Neutron Scattering Kernels / K. Nünighoff, N. Bayer, W. Bernnar, S. Koulikov at al. // In: Proceedings of 16th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, May 12 – 15, 2003, Düsseldorf-Neuss, Germany. Edit. G. Mank, H. Conrad, Vol. II, 883-89.
56. Nunighoff K.N. Experimental investigations of advanced cold moderators at JESSICA at COSY-Jülich and comparison with MCNPX simulations “AccApp'03” / K. Nunighoff, W. Bernnat, V. Bollini, A. Bubak, H. Conrad, D. Filges, F.Goldenbaum, J.Keinert, S. Koulikov, B.Lensing, et al. // Sixth International Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology, Accelerator Applications in a Nuclear Renaissance, 2003. – Page 804-809, Published by ANS, ISBN: 0-89448-676-4, San Diego, California.

57. 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.
58. Тепловой расчет [Электронный ресурс], – <https://vunivere.ru/work40115/page2> – электронный ресурс свободного доступа.
59. Солнцев Ю.П., Степанов Г.А. Материалы в криогенной технике // Машиностроение ЛО, 1982.
60. Лыков А.В. Тепломассообмен. // Справочник. М., Энергия, 1978.
61. Теория тепломассообмена. / Под ред. А.И. Леонтьева. М. // Высшая школа, 1979.
62. Излучательные свойства твердых материалов / Справочник, под ред. А.Е. Шейндлина. // М., Энергия, 1974.
63. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А. Контактный теплообмен. // Госэнергоиздат, 1963.
64. Для чего нужны нейтроны / В.Ф. Ежов, В.В. Федоров // типография ПИЯФ РАН, 2007. – Гатчина.
65. О возможности исследований с очень холодными нейтронами на импульсных источниках / Ю.Н. Покотиловский // журнал Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т 15, № 1 (213). С 66-67.
66. 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, М. V. Bulavin, А. Е. Verkhoglyadov, V. А. Skuratov, I. А. Smelyansky, S. А. Kulikov, А. А. Kustov, А. А. Lyubimtsev, А. Р. Sirotin, V. К. Shirokov and Т. В. Petukhova // Physics of particles and nuclei letters. – 2016. – Vol. 13, №6. – pp. 774-781.
67. Микулин Е.И. / Криогенная техника // М., «Машиностроение», 1969, стр. 272.
68. Фастовский Г.Д. / Криогенная техника // М., «Энергия», 1967, стр. 416.

69. Григорьев В.А., Крохин Ю.И. / Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники // Учебное пособие для вузов. – М., «Энергоиздат», 1982, стр. 312.
70. Introduction to Cryogenic Engineering / G. Perinic, G. Vandoni, T. Niinikoski // 5 day cryogenic course, CERN, 5-9.12.2005.
71. Introduction to Cryogenic Engineering [Электронный ресурс], – <http://www.slac.stanford.edu/econf/C0605091/present/CERN.PDF> – электронный ресурс свободного доступа.
72. To theory of pneumotransport of beads of cold neutron moderator of the IBR-2 reactor / M.V. Bulavin в соавторстве с A.V. Kazakov and E.P. Shabalin // Physics of particles and nuclei letters. – 2017. – Vol. 14, №3. – 520–532.
23. 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. – Опубл. RU Бюл. № 11, 16.04.2018. – С. 12.
73. Mukhin K.A. Possibility of loading the chamber of the “central” pelletized cold moderator for IBR–2 reactor beams 1, 4–6, and 9 / Mukhin K.A. at al. // Physics of particles and nuclei letters. – 2016. – Vol. 13, №6. – pp. 774-781.
74. Трубка Прандтля [Электронный ресурс], – https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%80%D1%83%D0%B1%D0%BA%D0%B0_%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D1%82%D0%BB%D1%8F – электронный ресурс свободного доступа.
75. Альфред Х. Основные законы физики // ФИЗМАТГИЗ 1959. – С. 284.
76. Савельев И.В. Курс общей физики. Книга 1 // М. Наука. Физматлит. 1998. – С. 336.
77. Малков М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков // 3-е издание, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 432.

78. Дейч М.Е. Техническая газодинамика // Изд. 2-е, переработ. М. – Л. Госэнергоиздат, 1961. – 675 с.
79. Mukhin K.A. Cold neutron source for IBR-2 reactor on pelletized mezetilene beads // International Seminar On Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-26). – Xian', China, 2018.
80. ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок // Энергоатомиздат, М., 1990.