

## Отчет по теме «Развитие экспериментальной базы для проведения исследований конденсированных сред на пучках ИЯУ ИБР-2» (04-4-1122-2015/2020) за 2018/2020 гг.

В период 2018/20 гг. успешно выполнялись работы, предусмотренные ежегодными проблемно-тематическими планами. Результаты работ отражены в годовых отчетах ЛНФ (<http://flnp.jinr.ru/en/flnp/annual-reports>), докладах директора ЛНФ на ПКК по физике конденсированных сред и Ученом Совете ОИЯИ, а также в докладах сотрудников НЭОКС ИБР-2 на международных и национальных конференциях и в многочисленных журнальных публикациях.

На 46 сессии ПКК по физике конденсированных сред (19-20 июня 2017 г.) был представлен полный отчет по теме за 2015/2017 гг., отчет одобрен ПКК, при этом было отмечено, что намеченные планы успешно выполнены, по всем направлениям исследований и разработок (холодные замедлители; расчеты и моделирование спектрометров; криогенные исследования; детекторы и электроника; системы контроля и управления исполнительными механизмами, оборудованием окружения образца и прерывателями пучков нейтронов; локальная вычислительная сеть и программное обеспечение) получены важные результаты, имеющие ключевое значение для успешной реализации программы развития комплекса спектрометров ИЯУ ИБР-2 и проведения исследований конденсированных сред. Все эти направления включены в Семилетний план развития ОИЯИ на 2017-2023 годы, поэтому было рекомендовано продлить тему и проект на период 2018-2020 гг. Эта рекомендация затем была одобрена 122 сессией Ученого Совета ОИЯИ (18-19 сентября 2017 г.).

Ниже приведены краткие отчеты по основным научным направлениям темы:

### 1. Новый импульсный источник нейтронов ОИЯИ

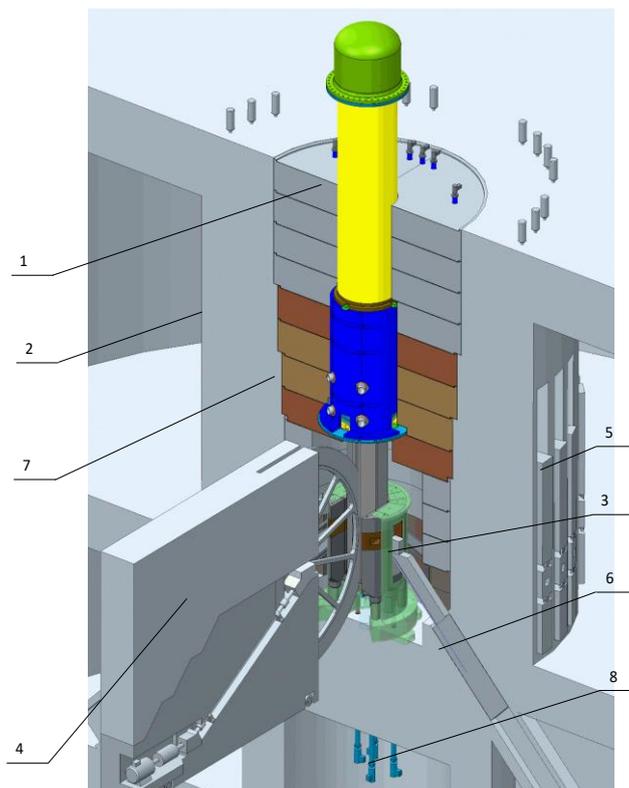
В 2019 году продолжался анализ концептуальных проектов *будущего импульсного источника нейтронов ОИЯИ*. Основная работа велась в Научно-исследовательском и конструкторском институте энерготехники имени Н. А. Доллежала (НИКИЭТ, Москва), а в НЭОКС ЛНФ велись расчетно-исследовательские работы по динамике пульсирующего реактора НЕПТУН и по обоснованию слабого положительного эффекта реактивности при выгорании нептуния (в отличие от сильного отрицательного эффекта в плутониевой зоне). В результате предположение о положительности эффекта реактивности при выгорании нептуния было убедительно подтверждено.

В 2018 году было показано, что пульсирующий реактор (или импульсный реактор периодического действия) предпочтительнее импульсного бустера – он более стабилен в работе и значительно дешевле как при создании, так и в эксплуатации. Именно в этом направлении и рассматривалась в НИКИЭТ концепция нейтронного источника с потоком тепловых нейтронов не менее  $10^{14}$  н/см<sup>2</sup>с. К октябрю 2019 эти работы, проводимые по контракту с ОИЯИ, были завершены, и концепция пульсирующего реактора с ядерным топливом в виде *нитрида нептуния* была признана основой для дальнейшей работы над проектом. На **Рис. 1** показан эскиз реактора НЕПТУН.

В настоящее время к работе над проектом будущего импульсного источника нейтронов ОИЯИ с нептуниевым топливом подключены три ведущих специализированных института РФ: НИКИЭТ, Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара (ВНИИНМ, Москва), Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского (ФЭИ, Обнинск).

Следует подчеркнуть, что пиковый поток тепловых нейтронов до  $5 \cdot 10^{16}$  н/см<sup>2</sup>с, который ожидается в реакторе Нептун, на порядок выше той же величины для наиболее интенсивного европейского источника ESS с мощностью пучка протонов 5 МВт, вводимого в эксплуатацию в ближайшие годы.

В течение 2019 г. было подготовлено научно-методическое обоснование на открытие в ЛНФ новой темы, связанной с разработкой и созданием нового источника нейтронов ОИЯИ.



**Рис. 1.** Реактор НЕПТУН в бетонном массиве: 1 – сосуд реактора; 2 – бетонный массив; 3 – отражатель стационарный; 4 – модулятор реактивности; 5 – шиберы нейтронных пучков; 6 – технологическая часть замедлителя; 7 – защита тепловая; 8 – приводы органов СУЗ.

## 2. Комплекс криогенных замедлителей КЗ-201 и КЗ-202

За отчетный период разработаны, смонтированы и успешно испытаны основные элементы системы управления и контроля холодного замедлителя КЗ-201, включая программное обеспечение, и проведены их испытания на специально созданном стенде, установленном на 3-м пучке ИБР-2. На **рис. 2** показана программа управления и контроля шарикового холодного замедлителя КЗ-201 с новой криогенной системой.

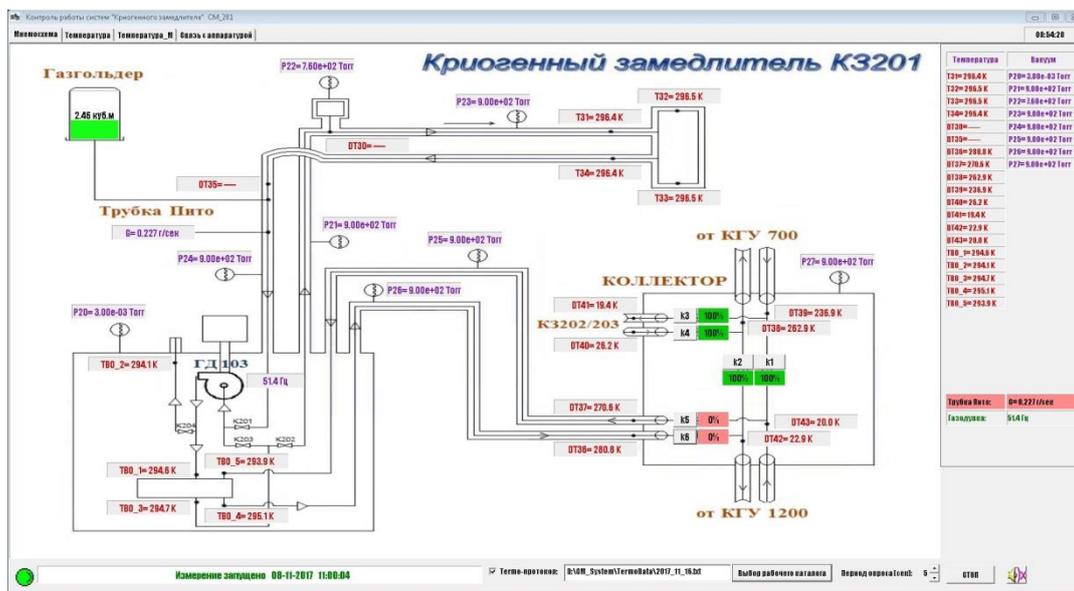


Рис. 2. Программа управления и контроля шарикового холодного замедлителя К3-201.

В рамках текущей модернизации комплекса криогенных замедлителей в 2018-2020 гг. на испытательном стенде К3-201 (3-й пучок ИБР-2) были проведены эксперименты с новым диафрагменным расходомером (ДР), который был смонтирован на трубопроводе отвода транспортирующего газа при помощи вакуумных быстроразъемных соединений на одной линии с расходомером на основе трубки Пито, используемым до настоящего времени для определения расхода гелия в трубопроводе. В ходе испытаний диафрагменный расходомер показал стабильную работу при использовании его в пяти температурных режимах: 293 К, 100 К, 80 К, 60 К и 25 К. Была проведена калибровка показаний ДР при помощи трубки Пито. Показания фиксировали при помощи датчиков дифференциального давления четырех типов: на 25, 100, 250 и 400 Па. В ходе экспериментов было установлено, что наиболее подходящим для стандартных условий работы криогенного замедлителя является датчик дифференциального давления на 250 Па. По результатам работы, для двух криогенных замедлителей К3-201 и К3-202 в качестве устройства для измерения расхода гелия, было решено в дальнейшем использовать диафрагменный расходомер.

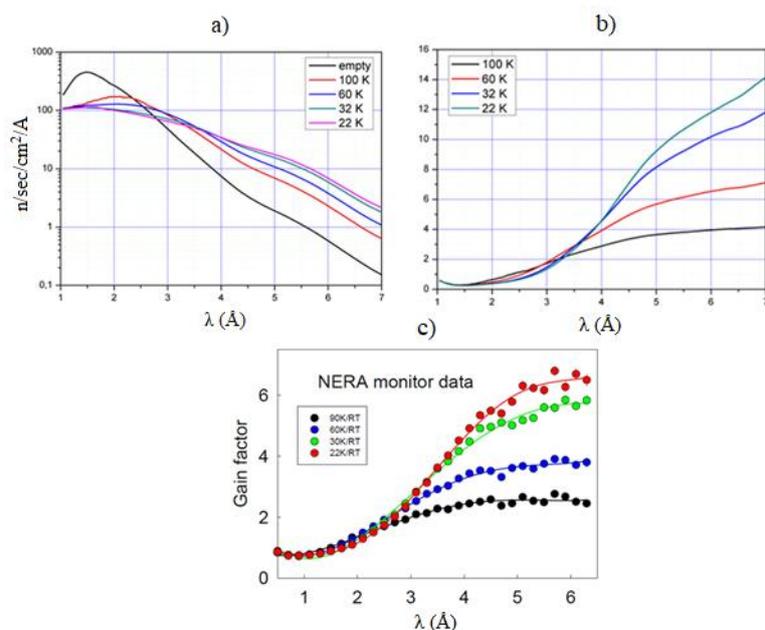
Продолжались экспериментальные работы по испытанию нового метода подсчета замороженных шариков и контроля их движения во время пневмотранспортировки по трубопроводу подвода к камере криогенного замедлителя, основанного на применении оптического датчика, в котором два световода образуют оптический контакт. При прохождении шарика между световодами сигнал прерывается, и программа контроля движения фиксирует это событие. В ходе проведения лабораторных экспериментов на испытательном стенде было установлено, что максимальная погрешность оптического датчика при подсчете стеклянных шариков составляет 7,5%, что позволяет с достаточной точностью определять общее количество шариков, прошедших по участку трубопровода и попавших затем в камеру замедлителя. Полученные в лабораторных условиях данные были использованы при подготовке к проведению испытаний оптического датчика на испытательном стенде криогенного замедлителя К3-201. В рамках самих экспериментов планируется провести две загрузки (~ 20000 шт) замороженных шариков из дозирующего устройства в камеру-имитатор стенда. Предполагается, что в процессе загрузки при помощи оптического датчика будет успешно проведен подсчет количества шариков,двигающихся к камере-имитатору, с погрешностью регистрации не более 8%.

Во время проведения плановых ремонтных работ реактора ИБР-2 планируется установить криогенный замедлитель КЗ-201 на штатное место в направлении пучков №№ 1, 4-6, 9 ИБР-2. После установки замедлителя планируются следующие пуско-наладочные работы: охлаждение трубопроводов подвода/отвода гелия и камеры замедлителя до минимально-возможной температуры (22 К); измерение расхода газа в пневмотранспортном трубопроводе при помощи диафрагменного расходомера при различных температурных режимах; управление криогенными вентилями распределительного коллектора криогенной системы при помощи программного комплекса управления и контроля КЗ-201, тестирование работоспособности самого комплекса. После успешного окончания пуско-наладочных работ будут проведены две пробные загрузки камеры замедлителя у активной зоны реактора замороженными шариками в количестве 1 л каждая с подсчетом шариков при помощи оптического датчика.

В одном из циклов реактора ИБР-2 в 2020 г. будет осуществлена рабочая загрузка камеры замедлителя КЗ-201 на номинальной мощности реактора, равной 1,6 МВт.

Результаты работ по моделированию рабочих параметров разгрузочного устройства шнекового типа для замедлителя КЗ-201 показали, что создание такого устройства на реакторе ИБР-2 с текущими параметрами головной части криогенного замедлителя (расположение радиационной защиты, диаметры трубопроводов, жесткие ограничения по геометрическим размерам оснастки и т.п.) является трудновыполнимой задачей. Было принято решение отложить данный проект для возможной его реализации на новом нейтронном источнике в ЛНФ ОИЯИ, где, с большой долей вероятности, удастся создать более приемлемые условия для создания подобного устройства.

В отчетном периоде 2018-2020 гг. продолжалась штатная эксплуатация криогенного замедлителя КЗ-202, во время которой замедлитель безотказно проработал в течение семи циклов реактора ИБР-2. В общей сложности к концу 2020 г. криогенный замедлитель нейтронов КЗ-202 проработал на физический эксперимент более 4000 ч, из них с новой криогенной системой, в состав которой входят две криогенные установки общей мощностью 1900 Вт, более 1000 ч. Новая криогенная система позволила снизить температуру рабочего вещества в камере замедлителя с 32К до 22К, увеличив плотность потока холодных нейтронов на 15-20%. Экспериментальные зависимости спектра нейтронов и фактора выигрыша плотности потока холодных нейтронов, полученные во время работы холодного замедлителя на физический эксперимент для пучков № 7с (спектрометр НЕРА) и № 8 (спектрометр РЕМУР) ИБР-2 при различных температурах, представлены на **рис. 3**.



**Рис. 3.** Спектр нейтронов (а) и фактор выигрыша (b, c) в плотности потока холодных нейтронов с поверхности холодного замедлителя при различных температурах по отношению к плотности потока холодных нейтронов с поверхности теплового замедлителя на основе воды комнатной температуры. Графики на рисунке а и b получены на спектрометре РЕМУР, на рисунке с – на спектрометре НЕРА.

Анализ полученных результатов показал, что по сравнению с тепловым замедлителем на основе воды комнатной температуры, холодный замедлитель, при температуре 22 К, дает почти в 6 раз больше холодных нейтронов для НЕРА и в 14 раз больше для РЕМУР, что существенно снижает время экспозиции исследуемых объектов, а также погрешность получаемых результатов.

В ходе продолжения работ по исследованию возможности продления времени работы холодного замедлителя на физический эксперимент было установлено, что при мощности реактора 1,8 МВт и проектном времени работы 11 суток или ~520 МВт·час (~160 МГр), динамическая вязкость смеси мезитилена и метаксилола, которая находится в инертной среде гелия, возрастает до ~23 мПа·с (вязкость чистой смеси – 1,15 мПа·с). При таком значении вязкости, облученная расплавленная смесь, довольно быстро и в полном объеме сливается из камеры замедлителя по специальной дренажной системе, а значит, нет необходимости в использовании добавок для снижения вязкости смеси во время облучения. Тем не менее, при любых изменениях мощности реактора, длительности цикла и других важных параметров, этим вопросам следует уделять должное внимание.

Методом газовой хроматографии было определено содержание газообразного радиолитического водорода, образующегося в камере шарикового замедлителя, при работе реактора ИБР-2 в двух режимах: в режиме водяного замедлителя и в режиме криогенного замедлителя. Измерения показали, что максимальная концентрация радиолитического водорода в гелии внутри камеры, а также внутри трубопроводов отвода и подвода гелия доходит до 6,5 %. Такая концентрация водорода является безопасной и не может привести к созданию избыточного давления, образованию гремучей смеси и появлению других, потенциально опасных факторов, способных разрушить камеру замедлителя и привести к аварийной ситуации при работе ИБР-2 на номинальной мощности.

### 3. Изучение радиационной стойкости материалов на установке для радиационных исследований

В 2018-2020 гг. на установке для радиационных исследований ИБР-2 были выполнены следующие работы:

- Проведена модернизация временного хранилища твердых радиоактивных отходов на пучке №3, что позволило улучшить текущую радиационную обстановку.
- Проведена модернизация транспортной системы облучательной установки, которая позволяет перемещать или извлекать образцы прямо во время облучения, тем самым добиваясь коротких времен экспозиции и малых флюенсов нейтронов. Наиболее актуально применение такой системы при облучении различных видов сцинтилляторов.
- Проведена интеграция роботизированного манипулятора в аппаратный комплекс видеонаблюдения и измерения расстояний для дистанционного управления процессами снятия/установки высокоактивных образцов при работе в условиях высоких полей ионизирующего излучения (**рис. 4а**). В месте расположения роботизированного манипулятора установлен локальный дозиметрический комплекс (**рис. 4б**) для автоматического определения дозы во время сеансов облучения. Одним из основных достоинств данной системы является существенное снижение дозовой нагрузки на персонал, а также ускорение процесса перемещения в хранилище высокоактивных образцов после их облучения. Кроме того, для удобства пользователей, облучательная установка была оснащена гибким кабель-каналом для безопасного перемещения кабелей и электронных компонент печатных плат при проведении онлайн измерений во время облучения.



**Рис. 4.** Фотографии роботизированного манипулятора, сделанные при помощи одной из видеокамер аппаратного комплекса видеонаблюдения и измерения расстояний: **а** – пневматический захват манипулятора в момент снятия контейнера с высокоактивным образцом; **б** – измерение дозы локальным дозиметрическим комплексом в момент перед снятием манипулятором контейнера с образцом (мощность дозы на поверхности контейнера в момент снятия  $\sim 78$  мЗв/ч).

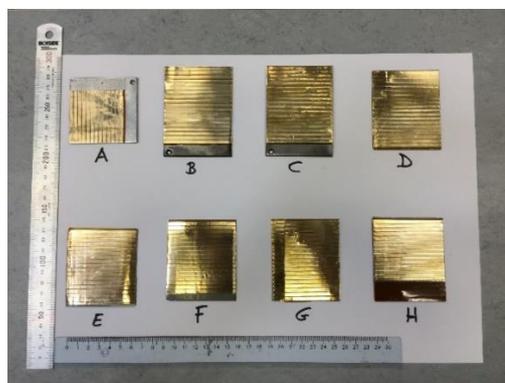
- Совместно с ЛФВЭ ОИЯИ, Академией наук Республики Узбекистан и УрФУ (г. Екатеринбург) продолжаются исследования природы радиационных дефектов в образцах топазов и некоторых других минералов после облучения (**рис. 5а**).
- Совместно с Лабораторией магнитных сенсоров Национального университета «Львовская политехника» продолжались исследования радиационной стойкости

магнитных сенсоров (3D-датчиков Холла) на основе графена в рамках международных проектов по созданию токамаков ITER и DEMO.

- Совместно с ГК «Росатом» и АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» продолжалось изучение нейтронно-физических характеристик диверторных мониторов нейтронного потока на основе ионизационных камер деления урана (прототипы №1 ИКД КНТ 30-5 и ИКД КНТ 30-8). По специальным программам работ проведены облучения обеих камер на реакторе ИБР-2. По вновь разработанным программам и методикам испытаний проведены эксперименты по облучению новых прототипов шестиканальной системы регистрации вместе с детекторными узлами в условиях интенсивных нейтронных потоков.
- Совместно с БГТУ Республики Беларусь изучалась радиационная стойкость и изменение физических свойств после облучения новых перспективных материалов нейтроноводов.
- Совместно с МИФИ продолжались работы по изучению радиационной деградации наногетероструктур на основе AlGaAs/GaAs.
- Совместно с Институтом ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан изучалось влияние нейтронного излучения на структуру и некоторые свойства реакторных сплавов АМГ-2 и САВ1.
- Совместно с научно-исследовательским центром European Spallation Source с группой детекторов и группой нейтронных прерывателей проводятся работы по облучению материалов детекторов (печатных плат на основе каптона) и нейтронных прерывателей на основе карбида бора (рис. 5b).
- Совместно с ЛЯП и ЛФВЭ ОИЯИ проводилось облучение образцов кремниевых сцинтилляторов и электронных компонент печатных плат с целью изучения их электрофизических свойств под воздействием радиации (рис. 5с).



a



b



c



d

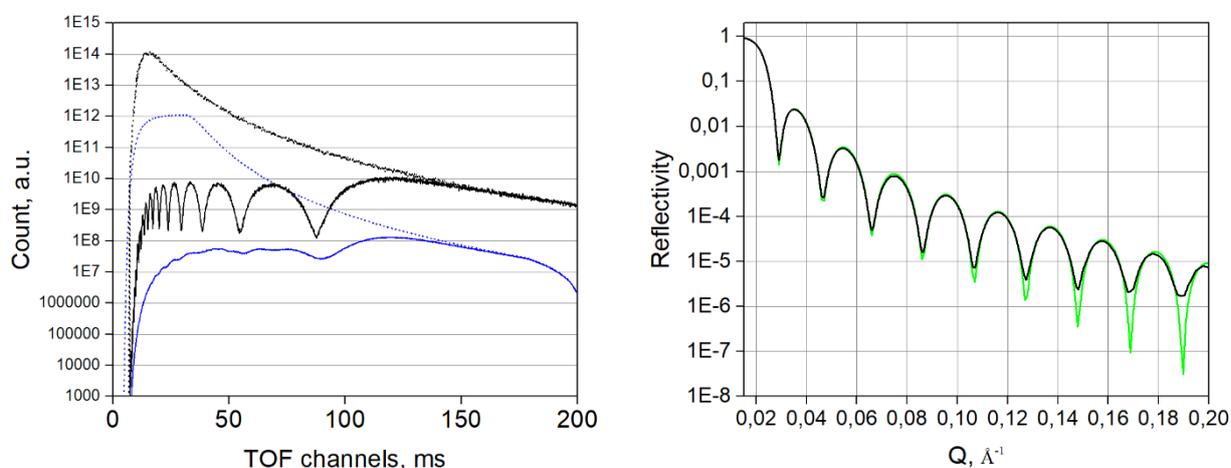
**Рис. 5.** Образцы после облучения на 3-м пучке реактора ИБР-2: **a** – топазы после облучения и отжига, **b** – материалы детекторов, **c** – электронные компоненты печатных плат, **d** – фрагменты останков членов царской семьи Ивана IV (Грозного).

- Совместно с ФГБУК «Государственный историко-культурный музей-заповедник «Московский Кремль» проводятся работы по изучению изотопного состава останков членов царской семьи Ивана IV (Грозного) методом нейтронно-активационного анализа (НАА) с целью установления или подтверждения причин их гибели (**Рис. 5 d**).
- Совместно с Институтом археологии Российской академии наук начаты работы по изучению элементного состава древней керамики, найденной при раскопках в регионе Волжской Булгарии, методом НАА, который позволяет не только датировать культурные слои, а значит и содержащиеся в них артефакты из иных материалов (остатки построек и сооружений), но и получать массу иной важной информации о технологии ее изготовления, культурных импульсах, перемещениях населения и т.п.

#### 4. Моделирование нейтронных инструментов

В отчетный период продолжалась разработка и поддержка модулей программы моделирования нейтронных спектрометров и экспериментов для комплекса VITESS (Virtual Instrument Tool for European Spallation Source). В ЛНФ была разработана почти половина всех модулей VITESS, в частности, практически полностью реализованы задачи по моделированию нейтронных инструментов с поляризованными нейтронами. Можно сказать, что моделирование, расчеты и оптимизация параметров тех или иных узлов установок по программам VITESS проводились почти для всех спектрометров ИБР-2, результаты этих работ содержатся в ежегодных отчетах и публикациях.

Самые свежие результаты были получены в работе, в которой с помощью программного пакета VITESS проведена оценка влияния фона на реакторе ИБР-2 на данные рефлектометрических измерений. Для этой цели была смоделирована работа импульсного источника с характеристиками близкими реактору ИБР-2. Проведенное моделирование показало, что при одинаковом спектре нейтронов в пучке и подложке, запаздывающие нейтроны начинают сглаживать кривые зеркального отражения только при достаточно высоких переданных импульсах. Существенного вклада в рабочие области рефлектометров на ИБР-2 данный эффект не вносит (**Рис.6**). Методические работы по исследованию фоновой обстановки на других спектрометрах будут продолжены в рамках новой темы.



**Рис. 6.** Слева: TOF-спектры прямого и отраженного пучков для двух источников по отдельности. Синий – запаздывающие нейтроны, черный - нейтроны из импульсного источника. Пунктирной

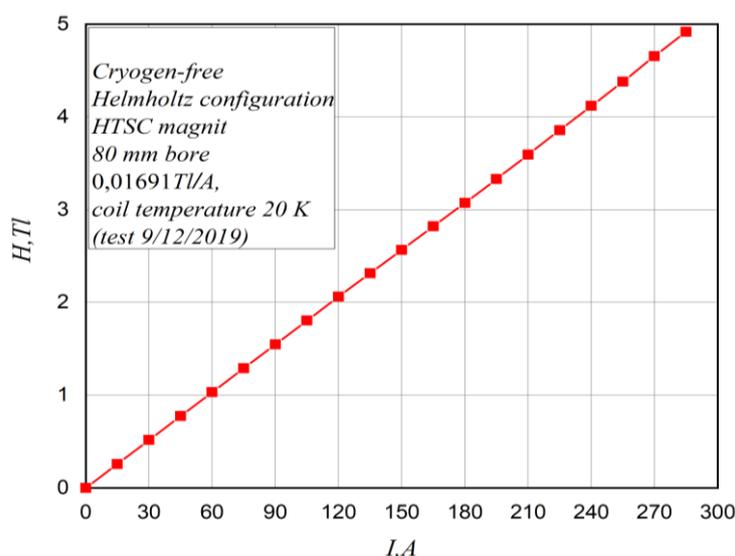
линии соответствуют прямые пучки, сплошной – отраженные от образца. Справа: кривые отражения без (зелёный) и с источником фона (черный).

## 5. Криогеника и вакуумные системы.

По данному разделу отчета выполнялся проект *"Разработка ДТМ - системы окружения образца для дифрактометра ДН-12 на ИЯУ ИБР-2"*, целью которого является создание горизонтально-вертикального криостата для температурных и магнитных исследований конденсированных сред на спектрометре ДН-12. Проект выполняется совместно с Национальным институтом исследований и электротехники ICPE-SA, Бухарест, Румыния. В целом проект успешно завешается в текущем году и на данной сессии ПКК будет представлен отчет по проекту в виде отдельного доклада. В настоящее время проводятся тестовые испытания магнита. Здесь мы покажем только общий вид магнита (**рис. 7**) и зависимость магнитного поля от величины введенного в катушки магнита электрического тока (**рис. 8**).



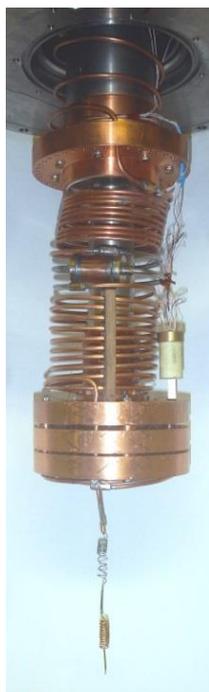
**Рис. 7.** ВТСП магнит и токовводы.



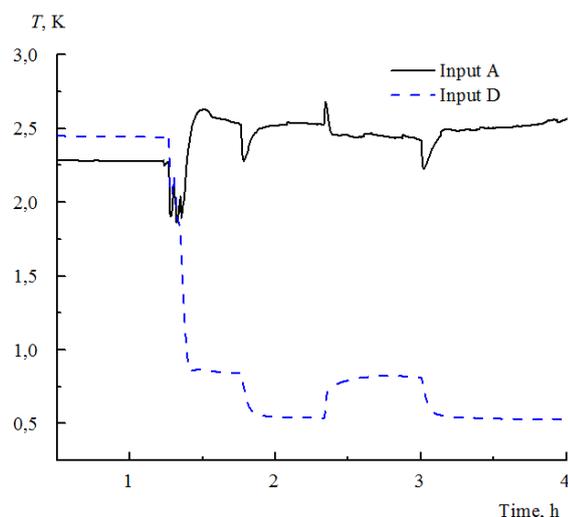
**Рис. 8.** Величина магнитного поля в зависимости от величины введенного в катушки магнита электрического тока (строгая линейность характеристики указывает на отсутствие признаков деградации ВТСП ленты).

Криостат является системой, зависящей только от источника электрического питания. Система охлаждения компрессоров криокулеров и источника питания сверхпроводящего магнита, является автономной, построена на замкнутой циркуляции воды. В течение 2020 года в летнее время во время технологического перерыва в работе реактора, а также в осенний период 2020 года планируется инсталляция криостата магнита на дифрактометре ДН-12.

Выполнены разработки проточных криостатов на базе криокулеров замкнутого цикла. В частности, разработан рефрижератор с откачкой  $^3\text{He}/^4\text{He}$  на базе криокулера замкнутого цикла с проточной системой теплообменников, на **рис. 9** показана его фотография. Конструктивно рефрижератор представляет собой колонку теплообменников, расположенную на холодной головке криокулера. Эта колонка погружается в вертикальную герметичную шахту диаметром 150 мм, изготовленную из тонкостенной нержавеющей стали. На нижнем конце шахты располагается испаритель для приема жидкого  $^3\text{He}$  или  $^4\text{He}$ . В режиме ожижения  $^4\text{He}$  получена производительность 1.6 Вт при 4.2 К, а в режиме рефрижератора  $^4\text{He}$  температура составила 1.4 К. В режиме рефрижератора  $^3\text{He}$  с непрерывной откачкой и конденсацией получена температура 0.78 К. В разовом режиме, с нулевой скоростью конденсации, с  $^3\text{He}$  достигнута температура 0.52К. На **рис. 10** представлен график температуры испарителя рефрижератора в зависимости от времени в непрерывном и разовом режимах, а также температура второй ступени холодной головки криокулера.

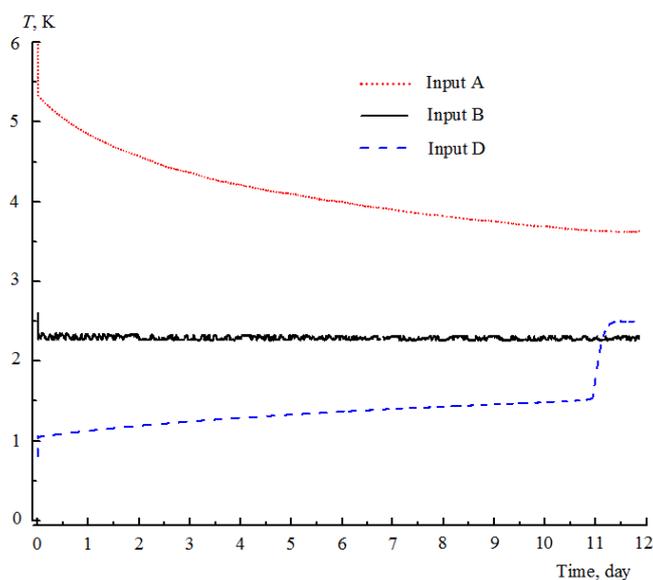


**Рис. 9.** Рефрижератор с проточной системой теплообменников.



**Рис. 10.** Переход от непрерывного режима к разовому и обратно (температура испарителя меняется от 0,78 К до 0,52 К). Input A - температура второй ступени криокулера. Input D - температура испарителя.

Осуществлен режим с нулевой скоростью внешней откачки  $^3\text{He}$ , в котором время удержания температуры с положительным постоянным дрейфом  $1,5 \cdot 10^{-3}$  К/час в диапазоне температур 1.05-1.5 К составляет 11 суток (рис. 11) и измерена холодопроизводительность рефрижератора  $^3\text{He}$ .



**Рис. 11.** Режим с нулевой внешней скоростью откачки: температура испарителя медленно возрастает от 1,05 К до 1,5 К в интервале 0 – 11 дней, затем резко возрастает до 2,7 К и стабилизируется на этом уровне (Input A - температура теплообменников Input B - температура второй ступени криокулера. Input D - температура испарителя).

В связи с разработкой криостата с магнитом с горизонтальной загрузкой образца через шахту было необходимо изучить величину теплопритока за счет теплообмена газа в криостате с горизонтальной загрузкой. Для этого был изготовлен криостат на базе GM-криокулера. Этот криостат имеет вертикальную трубку из нержавеющей стали, которая присоединена ко второй ступени криокулера посредством медного теплового моста.

Трубка заполнялась газообразным гелием, а криостат устанавливался в нескольких положениях путем вращения в диапазоне 0-180 градусов относительно вертикальной оси. В ходе эксперимента измерялась температура концов теплового моста. Экспериментально показано, что тепловой поток, обусловленный теплообменным газом, незначителен в любом положении криостата. В этой работе были получены экспериментальные данные, необходимые для проектирования спектрометров, в которых шахтные криостаты располагаются в любой пространственной ориентации.

Выполнена модернизация шахтного криостата с диаметром шахты 80 мм установки НЕРА. В криостате использовался криокулер на импульсных трубках, что обуславливалось его эксплуатацией только в вертикальной ориентации согласно конфигурации спектрометра НЕРА. Была произведена замена отработавшей плановый срок холодной головки криокулера на холодную головку GM типа. Были проведены эксперименты по проверке работоспособности криостата, которые показали возможность его работы как в вертикальном, так и в горизонтальном положении, практически с той же финальной температурой 4.5 К.

Было установлено и введено в эксплуатацию новое азотное оборудование для экспериментального зала №1 и корпуса 117/2, а также проведена модернизация вакуумных систем нейтроноводов на 7, 9 и 10 каналах.

## 6. Детекторы и электроника

В ЛНФ в рамках обсуждаемой темы было создано несколько типов нейтронных детекторов на основе многопроволочных пропорциональных камер с газовым наполнением  $^3\text{He}+\text{CF}_4$ , предназначенных как для оснащения вновь создаваемых спектрометров ИБР-2 (например, ГРЭЙНС, ДН-6, RTD), так и для совершенствования детекторных систем на действующих установках (ФДВР, РЕМУР, РЕФЛЕКС, ДН-12 и др.). К их числу относятся:

- **Двухкоординатный мониторный позиционно-чувствительный детектор (ПЧД)** с низким ослаблением входного пучка (размеры чувствительной области детектора –  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ , координатное разрешение  $\sim 4 \times 4 \text{ мм}^2$ ); детектор используется для измерения профиля пучков нейтронов на каналах ИБР-2.
- **Однокоординатный ПЧД** (размеры чувствительной области детектора –  $200 \times 80 \text{ мм}^2$ ; координатное разрешение  $\sim 2 \text{ мм}$ ; эффективность для тепловых нейтронов ( $2 \text{ \AA}$ ) – более 60%; такие детекторы установлены на спектрометрах ФДВР и РЕФЛЕКС, а также поставлены в ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РНЦ «Курчатовский институт», Москва и Филиал НИФХИ, Обнинск).
- **Двухкоординатный ПЧД** (размеры чувствительной области –  $200 \times 200 \text{ мм}^2$ , координатное разрешение  $\sim 2 \times 2,3 \text{ мм}^2$ ; эффективность  $\sim 65\%$ , такие детекторы установлены на спектрометрах ИБР-2 – РЕФЛЕКС, ГРЕЙНС и RTD, а также используются в составе оборудования криогенного замедлителя для контроля заполнения камеры шариками мезитилена, мониторинг осуществляется путем получения нейтронного образа камеры замедлителя на двухкоординатном ПЧД методом «камера-обскура»). Детекторы этого типа поставлены в ИЯИ, Троицк, РНЦ «Курчатовский институт» и четыре детектора – в ИЯФ, Ржеж, Чехия. Общий вид 1D и 2D детекторов показан на **Рис. 12а, б**.

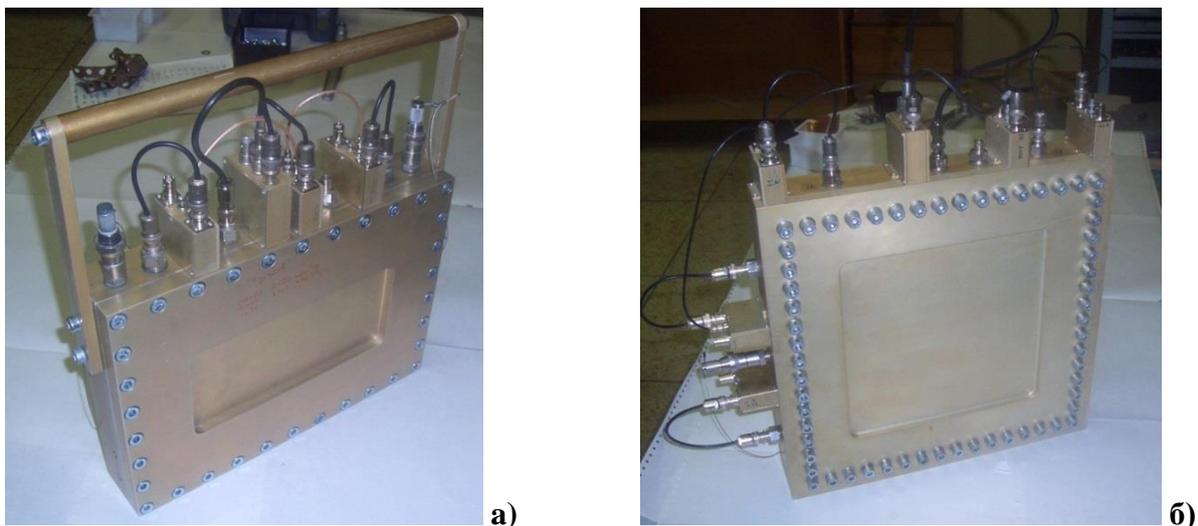


Рис. 12. Однокоординатный (а) и двухкоординатный (б) ПЧД.

В указанных ПЧД сигнал с анода используется в качестве стартового импульса, а считывание координатной информации осуществляется с катодов с помощью линий задержки. Для съёма и накопления данных с ПЧД в ЛНФ разработаны унифицированные программируемые блоки De-Li-DAQ 1 (создан совместно с HZB, Берлин) и De-Li-DAQ 2D.

- **Многосекционный кольцевой детектор** тепловых нейтронов для исследования дифракции на микрообразцах в аксиальной геометрии на дифрактометре ДН-6 [3]. Детектор состоит из 16 секций, находящихся в общем газовом объеме. Каждая из секций, в свою очередь, разделена на 6 ячеек вдоль образующей цилиндрической поверхности, общее количество измерительных каналов детектора равно 96. Сигналы с отдельных ячеек снимаются с независимых анодных нитей, которые находятся в геометрических центрах ячеек. Зарядочувствительные предусилители располагаются вблизи нитей внутри газового объема детектора. Индивидуальный съём информации с каждой ячейки обеспечивает необходимую гибкость при настройке и юстировке детектора. Детектор не имеет аналогов в мире и обеспечивает одинаковую эффективность регистрации для всех детекторных элементов.

- В 2018 г. на дифрактометре реального времени RTD введен в эксплуатацию новый **кольцевой секционированный детектор (рис. 13)**, предназначенный для малоугловых исследований. Отличие данного детектора от известных кольцевых детекторов состоит в возможности одновременного определения угловой и радиальной координаты зарегистрированных нейтронов. Благодаря своей оригинальной конструкции, детектор является подходящим инструментом для любых исследований, в которых наблюдается угловая и/или осевая анизотропия рассеяния тепловых нейтронов. Авторами предложенной конструкции подана заявка на изобретение (RU 2018108597) «Газонаполненный детектор для измерения малоуглового рассеяния тепловых нейтронов».



**Рис. 13.** Фотография кольцевого секционированного детектора на стенде.

Конструктивно детектор разделён на 9 независимых эквидистантных коаксиальных колец. Катоды каждого из колец разделены на 16 секторов, образуя 144 независимых детекторных элемента. Съём сигналов производится с анодных нитей (общие для каждого отдельного кольца) и с каждого из 16-ти катодов. Для устранения влияния импульсных наводок и снижения уровня электронных шумов предусилители детекторных элементов размещены внутри газового объема.

Цифровая электроника сбора и накопления данных с описанных выше кольцевых детекторов базируется на разработанных в ЛНФ унифицированных блоках МРД и включает в себя 5 блоков 32-канальных дискриминаторов и контроллер МРД-32.

Все описанные выше детекторы по своим параметрам не уступают мировым аналогам и достаточно широко внедрены в практику как в ЛНФ, так и в других научных центрах стран-участниц ОИЯИ. До последнего времени при изготовлении и сборке детекторов возникали определенные проблемы, связанные с малыми размерами и недостаточно высоким классом чистого производственного помещения (ЧПП), однако в конце 2018 г. были завершены работы по созданию и вводу в эксплуатацию нового помещения (**рис. 14**), которое находится в корпусе 119 ЛНФ и имеет в своем составе две чистые зоны: тамбур и рабочую зону. В тамбуре производится монтаж и очистка деталей детекторов, там же располагается раздевалка для захода в рабочую зону. В рабочей зоне выполняются намотка и мойка электродов детекторов, а также их сборка. Общая площадь помещения составляет 44,7 м<sup>2</sup>, площадь рабочей зоны 29,8 м<sup>2</sup>. В помещении поддерживается избыточное давление, постоянная температура и влажность воздуха, производится очистка воздуха от аэрозольных частиц и удаление взвешенных частиц. Чистота воздуха в тамбуре соответствует классу ИСО7, в рабочей зоне - классу ИСО6 по ГОСТ ИСО 14644-1-2002. Основные работы по созданию ЧПП были выполнены по контракту специалистами ООО «ИТТ».



**Рис. 14.** Работа в чистом производственном помещении.

Создание чистого производственного помещения в ЛНФ позволяет значительно сократить время, необходимое для сборки нейтронных детекторов, и, что особенно важно, повысить качество сборки, а также выполнять другие виды работы, требующих особой чистоты. Вводится в эксплуатацию новое оборудование: ультразвуковая ванна для очистки рамок ПЧД, новый станок для намотки рамок многопроволочных газовых детекторов. Станок для намотки позволит значительно ускорить изготовление рамок и сократить время создания газовых детекторов.

Проведены исследования возможности применения аддитивных технологий при создании нейтронных детекторов. Приобретены и введены в эксплуатацию 3Д принтер RAISE 3D Plus, работающий по принципу послойного наплавления материала (FDM), и стереолитографический (SLA) фотополимерный 3Д принтер Flashforge Hunter. С помощью этих принтеров были изготовлены позиционирующие элементы детекторных модулей для спектрометра НЕРА и ряд вспомогательных приспособлений.

По направлению создания *газовых детекторов* в 2019 году выполнен большой объём работ, связанных с модернизацией детекторной системы спектрометра НЕРА. Были рассчитаны и изготовлены различные варианты детектирующих модулей, отличающихся количеством счетчиков в сборке. Модули состоят из пропорциональных гелиевых счетчиков Гелий-18/200-8.0 фирмы «КОНСЕНСУС» (п.г.т. Запрудня, Московская обл.), аналогичных счетчикам СНМ-18. Разработаны варианты модулей из 3-х, 4-х, и 5-ти счетчиков (**рис. 15**). Проведено моделирование эффективности модулей с помощью программного пакета GEANT 4 (ЦЕРН). На основании результатов моделирования выбраны варианты модулей, наилучшим образом подходящие для использования на спектрометре НЕРА. Изготовлено несколько модулей, сняты счетные характеристики и измерена их эффективность с лабораторным источником нейтронов и на спектрометре НЕРА. По результатам испытаний в качестве рабочего выбран вариант из 5 счетчиков. Изготовлены, собраны и проверены новые модули счетчиков вместе с электроникой для обоих плеч детекторной системы НЕРА. Элементы крепления счетчиков в новых модулях изготовлены на 3Д принтере. В настоящее время новая детекторная система спектрометра НЕРА полностью введена в эксплуатацию.



**Рис. 15.** Варианты детекторных модулей спектрометра НЕРА в сборе с предусилителем и защитой.

Изготовлен, протестирован и сдан в эксплуатацию комплект 2Д ПЧД для дифрактометра ФДВР.

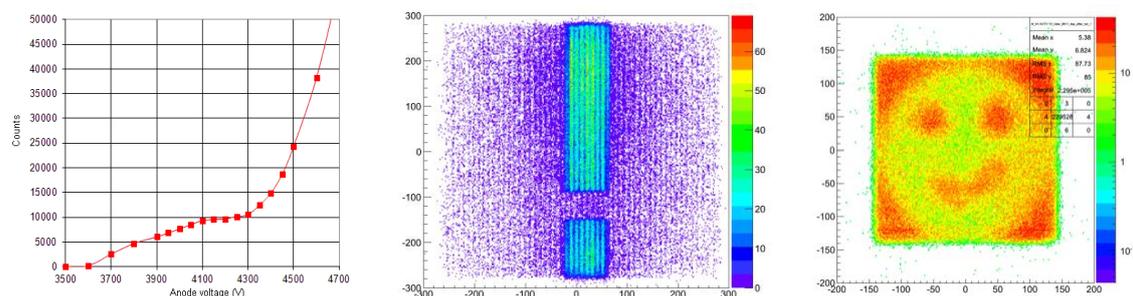
Разработан тестовый перезаряжаемый счетчик для проверки газовой смеси детекторов нейтронов. Два таких счетчика, предназначенных для измерения амплитудных спектров при различных давлениях и составах газовой смеси, изготовлены в ООО «КОНСЕНСУС».

Совместно с Государственным университетом «Дубна» проводятся работы по созданию конвертеров нейтронов на основе карбида бора, обогащенного изотопом  $^{10}\text{B}$ . Разработана уникальная технология нанесения тонкого слоя карбида бора на алюминиевую подложку большой площади методом магнетронного напыления. Получены первые образцы напыленных пленок (**рис. 16**). Результаты работы планируется использовать при разработке нейтронных детекторов, в первую очередь, нейтронных мониторов. Основные результаты работ доложены на соответствующих научных конференциях и семинарах, ведется подготовка публикаций.



**Рис. 16.** Образец напылённой пленки  $V_4C$  на алюминиевую подложку (толщина пленки в центральной части 2 мкм).

Завершены испытания прототипа ПЧД на основе многопроволочной пропорциональной камеры с конвертером из  $V_4C$ , обогащенного изотопом  $^{10}B$  (рис. 17). Конвертер изготовлен в рамках совместных работ с Линчёпёнгским университетом и ESS (Лунд, Швеция). Получено координатное разрешение прибора 0,9 мм по координате перпендикулярной аноду, что в два раза лучше разрешения существующих газовых ПЧД. Толщина слоя конвертера прототипа составляет 0,5 микрона, тем самым при работе по методу времени пролета можно добиться улучшения точности определения времени регистрации нейтрона не менее, чем на порядок по сравнению с обычными газовыми счетчиками. При испытаниях прототип с твердым конвертером из  $V_4C$  показал хорошую стабильность работы в прямом нейтронном пучке, что важно для нейтронных позиционно-чувствительных мониторов прямого потока.



**Рис. 17.** Счетная характеристика при заполнении 2000 мб  $CF_4$  (слева). Прямой пучок канала №13 ИБР-2, с кадмиевой пластинкой 1см. Цена деления канала 0,194 мм. (середина). Спектр от рассеянного пучка нейтронов, перекрытого кадмиевой маской. Цена деления канала 0,388 мм. (справа).

Разработан и изготавливается 2Д ПЧД монитор для измерения интенсивности и пространственного распределения нейтронных пучков на реакторе ИБР-2. В качестве конвертера нейтронов в мониторе используется тонкий слой  $V_4C$ . Измерение характеристик прибора, в том числе оценка абсолютной эффективности монитора к

тепловым нейтронам в зависимости от их энергии, планируется провести во время осеннего цикла 2020 года на реакторе ИБР-2.

Собран один из шестнадцати модулей 45-градусного кольцевого детектора спектрометра ДН-6 (рис. 18), состоящий из 6-ти счетчиков Гелий-13/90. Отработана методика заливки компаундом высоковольтных выводов нейтронных счетчиков, что позволило уменьшить токи утечки до 4 нА. Изготовлены и настроены блоки 96-ти каналов аналоговой электроники. В состав одного канала входит зарядо-чувствительный предусилитель, усилитель-формирователь и фильтр высоковольтного питания. Электроника для шести каналов размещена в одном модуле.



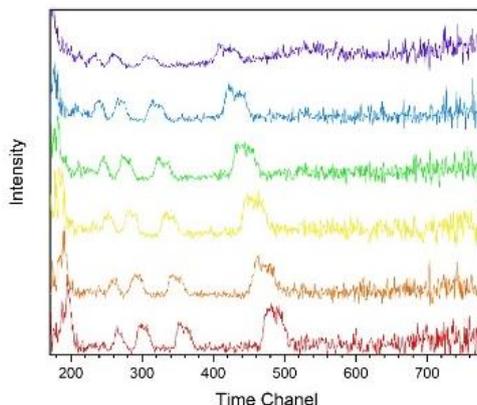
Рис. 18. Модуль 45-градусного кольцевого детектора спектрометра ДН-6.

Проведены предварительные испытания на стенде с нейтронным источником. Измерены амплитудные спектры и счетные характеристики. На основе полученных данных выбраны рабочее напряжение и пороги дискриминаторов. Изготовлена и настроена система накопления данных, состоящая из трех 32-канальных блоков дискриминаторов и цифрового блока MPD-32 (рис. 19). Это позволило увеличить общее число каналов DAQ спектрометра ДН-6 до 288.



Рис. 19. 96-канальная система накопления данных для спектрометра ДН-6.

Были проведены измерения на пучке нейтронов спектрометра ДН-6, полученные ТОФ- спектры показаны на **рис. 20**.



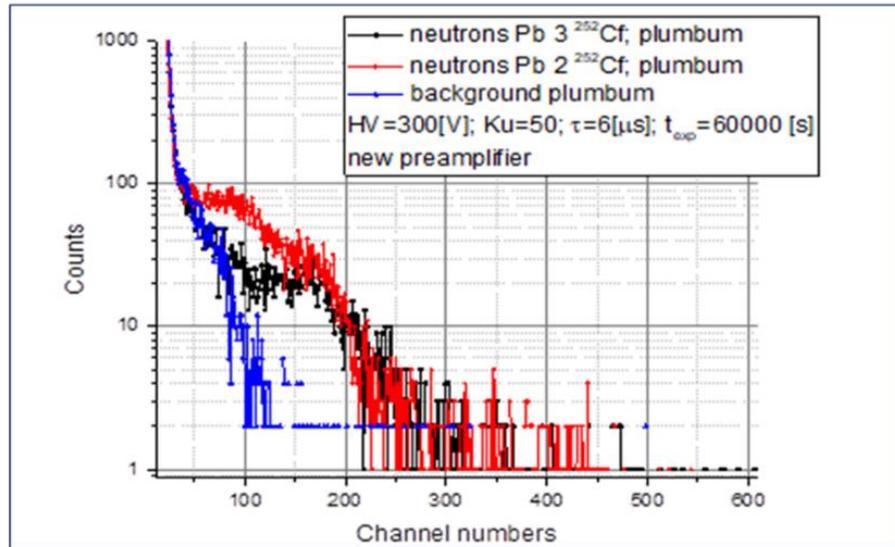
**Рис. 20.** ТОФ спектры с одного модуля 45-градусного кольцевого детектора.

В 2019 году выполнен ряд экспериментов по регистрации нейтронов с помощью новых *полупроводниковых кристаллов* на основе  $\text{LiInSe}_2$ , чувствительных к тепловым нейтронам. Измерения проводились с кристаллами размером  $5 \times 5 \times 1,5 \text{ mm}^3$  (**рис. 21**) и  $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ .



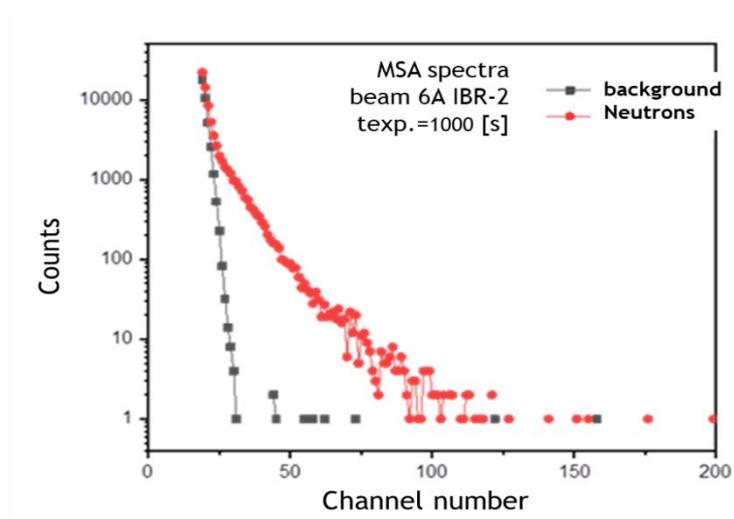
**Рис. 21.** Кристалл  $\text{LiInSe}_2$  ( $5 \times 5 \times 1,5 \text{ mm}^3$ ).

Для измерений использовался лабораторный источник нейтронов  $^{252}\text{Cf}$  (активность  $6,3 \times 10^5 \text{ н/с}$ ), который размещался на расстоянии 5 см от детектора в полиэтиленовом замедлителе. Был измерен ток утечки и выбрано оптимальное рабочее напряжение для детектирования нейтронов. Регистрация спектров осуществлялась многоканальным анализатором фирмы Amptek. Результаты измерений приведены на **рис. 22**.

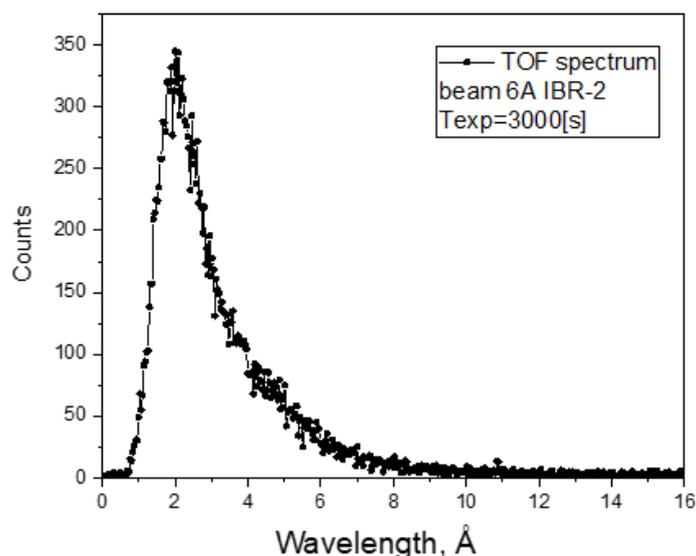


**Рис. 22.** Амплитудные спектры нейтронов, полученные с источником  $^{252}\text{Cf}$  (высокое напряжение  $H_V=300\text{В}$ , время формирования сигнала  $\tau = 6$  мкс, коэффициент усиления  $K_U = 50$ , время измерения  $t_{\text{exp}} = 60\,000$  с, защита от гамма-излучения – пластина свинца толщиной 0,5 см).

Испытания детектора проводились также на дифрактометре реального времени (канал ба реактора ИБР-2), в этом случае для накопления спектров использовалась штатная система сбора данных на базе блоков MPD-240. Результаты измерений приведены на **рис. 23.** и **рис. 24.**



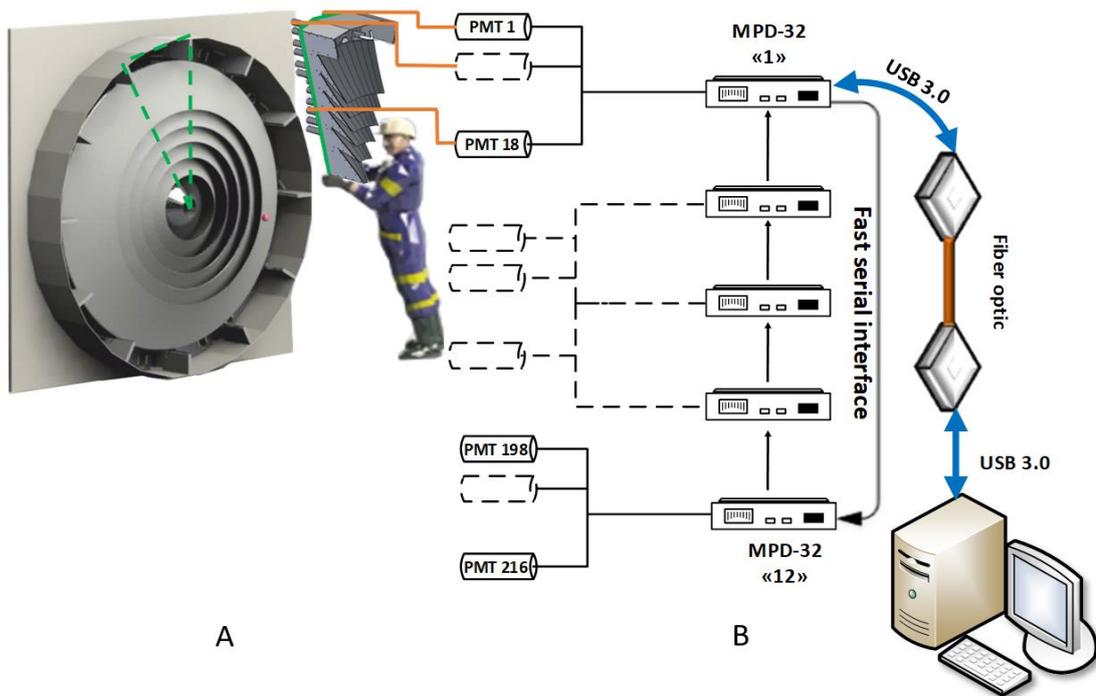
**Рис. 23.** Амплитудный спектр с кристалла  $\text{LiInSe}_2$ , измеренный в прямом пучке ба ИБР-2 (напряжение - 300В, время измерения - 1000 с).



**Рис. 24.** Спектр времени пролета, измеренный в течение 3000 с, (рисунок демонстрирует Максвелловское распределение потока нейтронов в зависимости от длины волны).

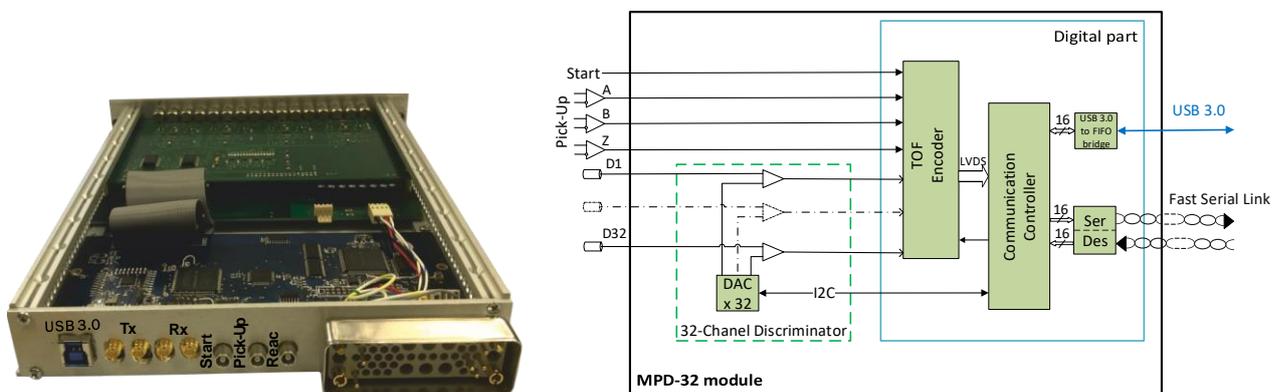
В рамках работ по созданию новой системы сбора и накопления данных с многодетекторных систем на основе ПЧД выполнена модернизация firmware DAQ-системы DeLiDAQ-2, разработан ряд компонентов программного обеспечения и проведены сравнительные испытания трех используемых на спектрометрах ИБР-2 систем сбора и накопления данных: DeLiDAQ-1, DeLiDAQ-2 и система на базе диджитайзера N6730 с firmware DPP-PSD производства CAEN. Анализ результатов измерений, проведенных на спектрометрах REFLEX и GRAINS, показал, что при типичных рабочих нагрузках имеется хорошее совпадение результатов всех трех систем, а также, что качество времяпролетных спектров зависит не от средней, а от пиковой загрузки во входном потоке. Проведенный анализ позволил определить границы и условия применимости трех систем сбора и сделать адекватный выбор электроники для времяпролетных измерений с позиционно-чувствительными детекторами тепловых нейтронов с линией задержки. На основании проведенного анализа можно рекомендовать DeLiDAQ-2 для высоко-поточных измерений, систему на базе дигитайзера CAEN N6730 – для измерений с высокой точностью, а устаревшие DeLiDAQ-1 в ближайшее время заменить на одну из двух вышеназванных систем.

Основные работы в направлении *сцинтилляционных детекторов* велись по проекту «*Разработка широкоапертурного детектора обратного рассеяния (ДОР) для дифрактометра ФДВР*», ожидаемыми результатами которого являются разработка конструкции, изготовление механических узлов и создание одного сектора детектора (из двенадцати) вместе с электроникой и программным обеспечением, а также проведение его испытаний на стенде. В настоящее время завершены конструкторские работы, чертежи механических деталей элементов конструкции детектора передаются для изготовления в НПО АТОМ, ведется изготовление элементов оснастки для создания элементов детектора, завершена закупка основного оборудования и расходных материалов. Масштабная модель детектора ДОР показана на **рис. 25А**, а на **рис. 25В** приведена архитектура системы сбора и накопления данных с одного из 12 сегментов детектора (сегмент выделен зеленым цветом).



**Рис. 25.** Масштабная модель детектора ДОР (А) и архитектура системы сбора и накопления данных (В).

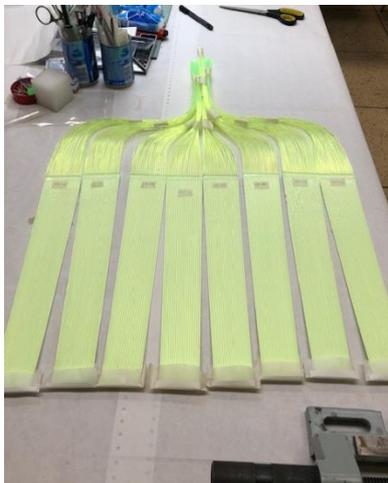
В соответствии с планом-графиком проекта продолжалась разработка электроники и программного обеспечения системы сбора данных для детектора ДОР. С учётом результатов, полученных при отладке макетного варианта блока сбора данных на базе MPD32, включающего 32-канальный дискриминатор, временной кодировщик, гигабитный трансивер и интерфейс USB3.0, разработан рабочий вариант документации и изготовлены опытные образцы плат и блоков, получивших название MPD32-USB3 (**рис. 26**).



**Рис. 26.** Блок сбора и накопления данных MPD32-USB3 (слева - опытный образец, справа – блок-схема).

Архитектура и характеристики разработанной системы сбора и накопления данных удовлетворяют проектным требованиям. Изготовленные модули сейчас используются для отладки протокола передачи данных и разработки программных драйверов. Протокол связи предусматривает адресную пакетную передачу данных и команд в мультимодульной системе с общим USB3 интерфейсом. По проекту ДОР на ПКК будет представлен отдельный отчет.

Завершается изготовление элементов 14 плоскостей детектора АСТРА–М. На фото (рис. 27) показан комплект подготовленных к монтажу детектирующих элементов для одной из плоскостей детектора. Все изготовленные элементы протестированы на испытательном стенде. Проведены исследования и выполнены подготовительные работы, позволяющие провести комплексное тестирование детектора АСТРА–М на 13-м канале ИБР-2 перед установкой детектора на его штатное место в составе дифрактометра ФСД в конце 2020 года.



**Рис. 27.** Комплект элементов детектора АСТРА–М.

Выполнен ряд методических исследований и разработок, в частности, изготовлены основные элементы и завершается сборка прототипа сцинтилляционного годоскопа для его использования в качестве двухкоординатного детектора нейтронов большой площади (до 1 м<sup>3</sup>) для малоугловых экспериментов, а также выполнено исследование сигналов со сцинтилляционных счётчиков тепловых нейтронов и предложен метод повышения нагрузочной способности таких счётчиков.

Сформирован и обучен коллектив сотрудников (лаборанты, механики, инженеры – всего 8 человек), достаточный для выполнения задач по массовому изготовлению сцинтилляционных детекторов нейтронов, что особенно важно для успешного выполнения работ по новой теме и новому проекту по созданию полномасштабного детектора ДОР для дифрактометра ФДВР и ряда других работ.

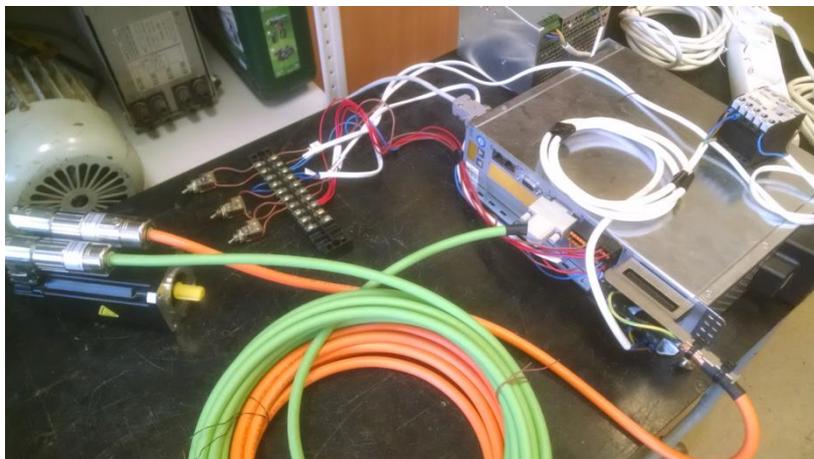
## **7. Системы контроля и управления исполнительными механизмами, оборудованием окружения образца и прерывателями спектрометров**

В состав систем управления прерывателями на спектрометрах ГРЕЙНС и РЕФЛЕКС вместо контроллеров СС-10 включены контроллеры СС-3U в конструктиве 3U, которые подключаются к компьютеру по интерфейсу RS232 и обеспечивают контроль прерывателя из программы управления экспериментом. Питание контроллера осуществляется от сетевого адаптера +5В, что позволяет отказаться от применения в системах управления прерывателями устаревших и громоздких крейтов КАМАК, которые использовались ранее для размещения контроллеров СС-10 и их электропитания. В дальнейшем планируется замена контроллеров СС-10 и на других спектрометрах.

Двухдисковый прерыватель вместе с системой управления для спектрометра ГРЕЙНС изготовлен и поставлен в ОИЯИ фирмой MIRROTRON Ltd (Будапешт, Венгрия), в настоящее время всё оборудование находится в кольцевом коридоре реактора.

Монтажные и пуско-наладочные работы будут выполняться совместно с венгерскими специалистами.

Для моделирования работы фурье-прерывателя и исследования его характеристик создан специальный стенд «двигатель – сервоусилитель», который имитирует работу реального прерывателя (**рис. 28**).



**Рис. 28.** Стенд «двигатель – сервоусилитель».

Продолжена модернизация *систем регулирования температуры*. Выполнены монтаж и ввод в эксплуатацию регулируемого источника питания 160В\*4А на 5-м канале ИБР-2. Усилитель постоянного тока EA-PS-160-04 управляется от контроллеров LS325 напряжением 0÷10В и выдает на нагревательный элемент ток 0÷4А, при этом напряжение может достигать 160В. Диапазон величин указанных параметров делает усилитель пригодным для управления всеми используемыми на спектрометрах ИБР-2 нагревательными элементами, как в криогенных головках, так и в воздушных «печках».

В состав спектрометров включен ряд новых *исполнительных механизмов*, в частности:

- на ФДВР и ФСД установлены диафрагмы «JJ X-RAY» 60x120мм для коллимации нейтронного пучка (**рис. 29**);
- для РЕМУР в отделе НЭОНИКС разработано устройство юстировки образца, управляемое четырьмя исполнительными механизмами.

В обоих случаях потребовалось соответствующее увеличение числа каналов управления по линии RS485.



**Рис. 29.** Диафрагма «JJ X-RAY» на дифрактометре ФСД.

На облучательной установке ведется «обучение» робота-манипулятора и расширение спектра выполняемых им задач, выполнена также доработка оснастки с учётом особенностей использования робота.

Расширены возможности интерфейса системы управления клапанами замедлителя КЗ-202 и увеличено количество дистанционно управляемых клапанов в системе с учётом её дальнейшего развития. Планируется проектирование аналогичной системы для КЗ-201.

Проведена ревизия и модернизация сигналов стартов на спектрометрах реактора ИБР-2.

На спектрометрах, установленных на 5, 6а, 6б и 11-м каналах ИБР-2 выполнена модернизация кабельных каналов: в зонах спецдопуска кабели уложены проволочные лотки, а в экспериментальных домиках сигнальные кабели уложены в пластиковые кабельные каналы. Аналогичные работы будут продолжены в будущем году на других спектрометрах.

## **8. Программное обеспечение спектрометров и сетевая инфраструктура ЛНФ**

Развитие комплекса Sonix+ продолжено как по запросам пользователей, так и в целях совершенствования внутренней структуры комплекса на основе языка Python версии 3 и графического каркаса (framework) Qt5. Эта версия включает также связь с сервисом WebSonix и автоматическое сохранение измеренных данных в центральном репозитории (хранилище данных) ЛНФ. Новый вариант комплекса установлен на спектрометрах Ремур, Дин2ПИ, ФСД, Скат, Нера и Грейнс.

Подготовлены модули для подключения новых устройств (контроллеров температуры типа LakeShore, нового Фурье прерывателя, джитайзера CAEN N6730, DelIDAQ2 и проч.), усовершенствованы программы связи с хранилищем, библиотека системных скриптов. Усовершенствована структура комплекса. В рамках развития Sonix+ для рефлектометров значительно модифицирована программа юстировки ICE (рис. 30).

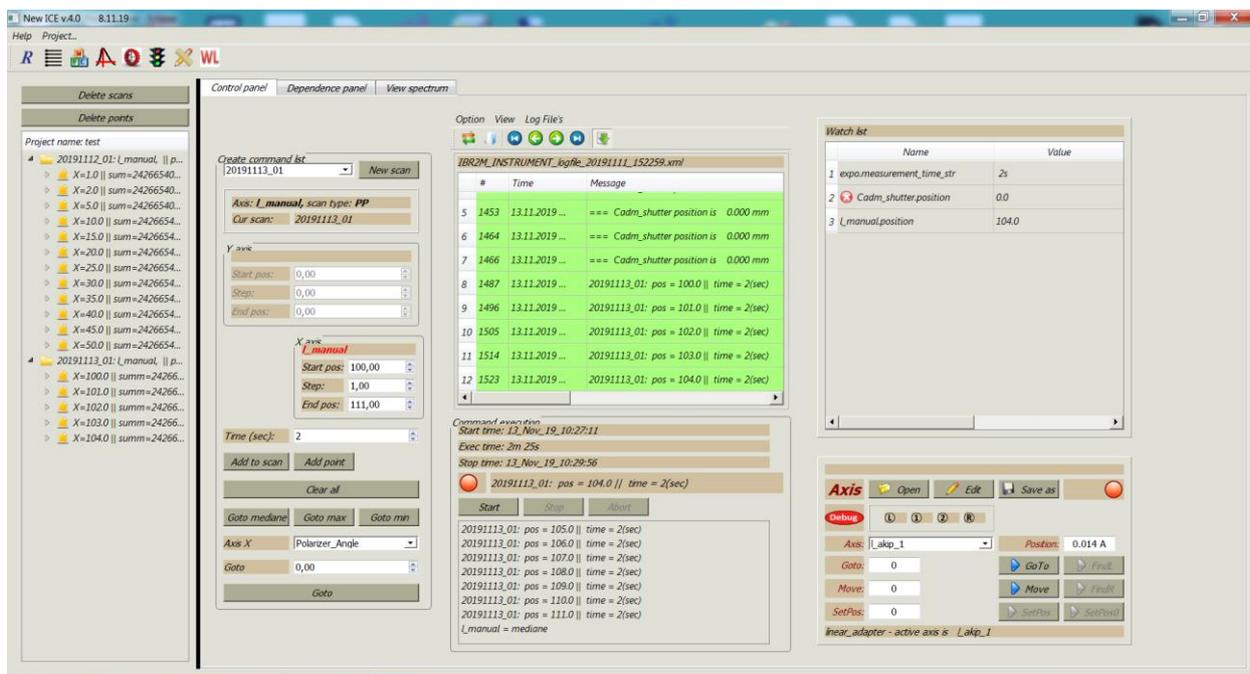


Рис. 30. Пользовательский интерфейс программы ICE версии 4.0.

Разработана программа Vot для оперативного информирования пользователей о ходе измерений по электронной почте и мессенджеру Telegram, которая внедрена на спектрометре ФСД.

Продолжена отладка программного интерфейса для DAQ-контроллеров на основе интерфейса USB-3.

Разработана, реализована и внедрена концепция центрального хранилища (репозитория) экспериментальных данных для спектрометров ИЯУ ИБР-2. Усовершенствован пользовательский интерфейс системы Journal для работы с данными непосредственно в репозитории.

Разработана и внедрена программа контроля и управления вентилями и электромагнитными клапанами криогенного замедлителя КЗ-202.

Введены в эксплуатацию новые почтовые серверы ЛНФ. Завершена модернизация сети Wi-Fi в корп. 119 и корп. 42А. Для повышения пропускной способности сети ЛНФ до 100 Гб/с введен в строй центральный маршрутизатор CISCO Catalyst 9500-32С, к которому в 2020 году через трансиверы будут подключены здания 42, 42а, 117 и 119. Работы по модернизации внутренней сети Лаборатории будут проводиться по согласованным с ЛИТ планам.

\*\*\*

За время выполнения работ по теме опубликовано 75 работ и около 60 докладов на Международных и Российских конференциях. Три цикла работ, выполненных по теме, удостоены премий на конкурсах научных работ ОИЯИ (2 вторых премии и 1 поощрительная). Защищены 1 докторская (Куликов С.А.) и 1 кандидатская (Булавин М.В.) диссертации; 1 кандидатская диссертация подготовлена к защите (Черников А.Н.). В работах по теме заняты 2 доктора и 8 кандидатов наук.