

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРОВ ИБР-2

В 2013 г. работы по теме велись в нескольких направлениях, связанных с созданием и модернизацией оборудования, электронных систем сбора и накопления данных, а также информационно-вычислительной инфраструктуры комплекса спектрометров исследовательской ядерной установки (ИЯУ) ИБР-2.

Холодный замедлитель.

В январе 2013 г. в последнем и самом длительном цикле работы замедлителя на мощности реактора 2 МВт проводились исследования по программе пуска криогенного замедлителя КЗ-202. Всего за период пуска осуществлено шесть циклов работы КЗ со свежими загрузками шариков замороженной смеси мезитилена и *m*-ксилола; длительность циклов составляла от нескольких часов до 178 часов (наработка реактора до 350 МВт-часов). График циклов выглядел следующим образом:

9-11 июля 2012 г, мощность реактора до 0.4 МВт (дальнейшие циклы – до 2 МВт);

26- 28 сентября: 2,2 суток, 100 МВт-часов;

3-9 октября: 5,6 суток, 250 МВт-часов;

27 ноября - 4 декабря: 5,5 суток, 250 МВт-часов;

13-21 декабря: 6,7 суток, 305 МВт-часов (загрузка 1/3 камеры);

22-30 января 2013: 7,3 суток, 350 МВт-часов.

В третьем и четвертом квартале 2013 г. было проведено ещё три цикла работы ИБР-2 в режиме холодного замедлителя на физический эксперимент на пучках 7,8,10 и 11, продолжительностью непрерывной работы до 7.3 суток.

В результате анализа работы КЗ-202 в указанных циклах были получены однозначные ответы на основные вопросы, важные для обеспечения эффективной и длительной работы замедлителя:

- Время загрузки шариков в камеру замедлителя – минимум 4 часа (по проекту допускалось 8-10 часов). Загрузка проходит без заторов и без заметной дефрагментации шариков при расходе газа 1.2-1.5 г/сек и температуре 80-85 К.
- Гидравлическое сопротивление контура и параметры газодувки обеспечивают расход гелия 6 г/сек (по проекту 7 г/сек).
- Криорефрижератор КГУ-700/15 обеспечивает охлаждение шариков в камере КЗ-202 при мощности реактора 2 МВт до средней температуры 32 - 33 К (проектное значение – 23-25 К).
- Фактор увеличения потока холодных нейтронов с длиной волны 8-10 ангстрем – 13-14 (**Рис. 41**) расчетное значение – до 20 при 20 К. Деградация потока холодных нейтронов в области 6-10 ангстрем за 350 МВт-часов – не более 5-7 %; поток нейтронов с более короткой длиной волны увеличивается с дозой облучения.
- Слив отработанной жидкости проходит достаточно быстро; вязкость исходного раствора увеличивается не более чем в 10 раз после работы в течение 7.3 суток (**Рис. 42**).
- Заполнение камеры и последующий слив мезитилена на влияют на реактивность реактора ИБР-2.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

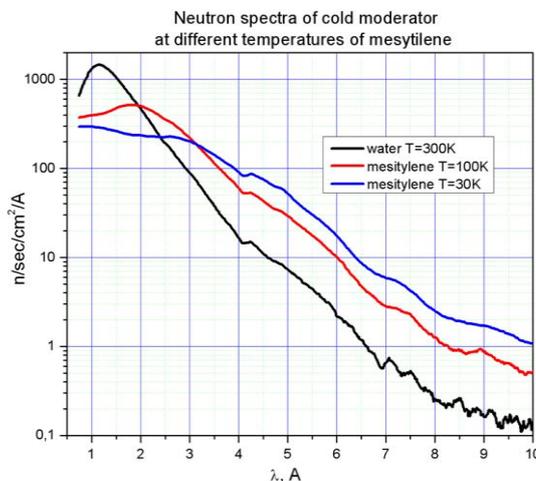


Рис. 41. Дифференциальная плотность потока нейтронов в месте расположения детектора ПЧД для пустой камеры (черная линия) и для заполненной при температурах 100 К и 30 К.

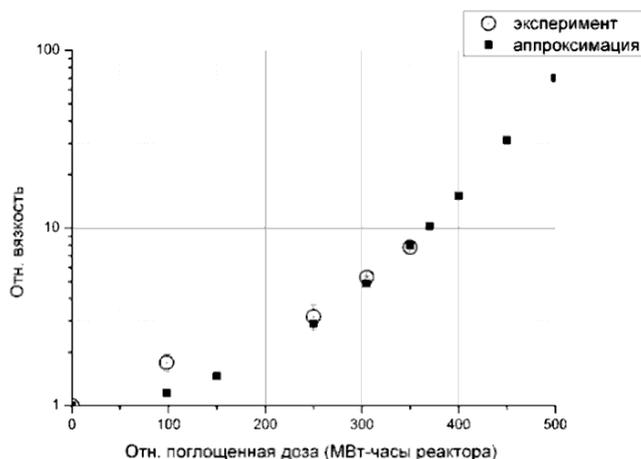


Рис. 42. Изменение вязкости жидкой смеси в зависимости от дозы облучения.

В течение 2013 г. основные технологические системы криогенного замедлителя были доработаны и модернизированы. Во всех циклах работы ИЯУ ИБР-2 в режиме холодного замедлителя на физический эксперимент КЗ-202 продемонстрировал устойчивую и безаварийную работу. Система управления и контроля замедлителя дает возможность техническому персоналу во время работы контролировать основные параметры замедлителя (скорость вращения вала вентилятора (газодувки), расход и температура гелия, вакуум в трубопроводах, движение шариков при загрузке трубопровода). Характеристики контрольно-измерительных приборов КЗ-202 в целом удовлетворяют проектным требованиям и позволяют обеспечить работу и обслуживание замедлителя в штатном режиме. Подготовлены отчет о пуске КЗ-202 и комплект документации для сдачи установки в эксплуатацию.

Разработана программа и начаты эксперименты по облучению как отработанной жидкости, так и свежих жидких растворов мезитилена и *m*-ксилола с примесью ингибиторов радиолитиза ароматических углеводородов, в облучательном канале №3 ИЯУ ИБР-2. Уже первые опыты показали, что при добавлении ингибиторов продолжительность цикла может быть

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

увеличена до 9-9.5 суток на одной загрузке. Требуется подтверждение этих результатов для твердой фазы раствора. Эти исследования продолжаются в сотрудничестве с химическим факультетом МГУ.

Начато проектирование холодного стенда для исследования загрузки, транспорта и выгрузки шариков на КЗ-201 – будущем холодном замедлителе на направлении пучков 4-6.

Расчеты и моделирование спектрометров.

В 2013 г. продолжалось усовершенствование специальных VITESS модулей, позволяющих моделировать и рассчитывать временную фокусировку нейтронов для времяпролетных спектрометров на импульсных источниках. При этом аппроксимация поверхности временной фокусировки возможна плоскостью/плоскостями, цилиндром/цилиндрами или сферой/сферами. Для спектрометра ФСД проведено моделирование детектора ASTRA (7 поверхностей, **Рис. 43**) с временной фокусировкой. Моделирование было выполнено для идеальной и аппроксимирующей (модификация цилиндрической поверхности) поверхностей временной фокусировки. Сравнение полученных результатов показывает практическое отсутствие сдвига в положении обоих дифракционных пиков. Однако наблюдается небольшое уширение дифракционного пика для аппроксимирующей поверхности. На **Рис. 44** показан пример моделирования 4-й поверхности временной фокусировки детектора ASTRA (углы покрытия 89.0-84.031 градусов; размер образца 0.1 мм × 0.1 мм; межплоскостное расстояние береговского рассеивателя $d = 10 \text{ \AA}$). Все остальные поверхности детектора дают похожие результаты. Экспериментальная проверка показала, что предложенная аппроксимация поверхности временной фокусировки приемлема для практической реализации.

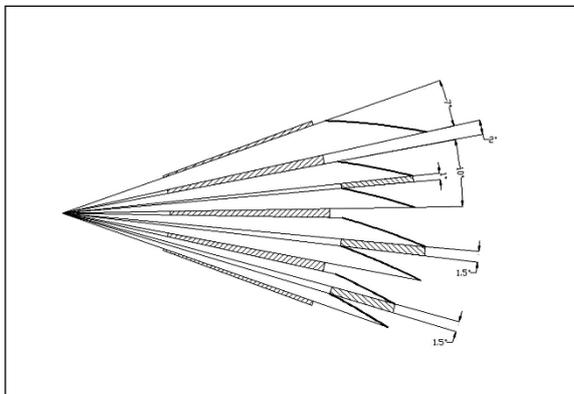


Рис. 43. Детектор ASTRA в горизонтальной плоскости.

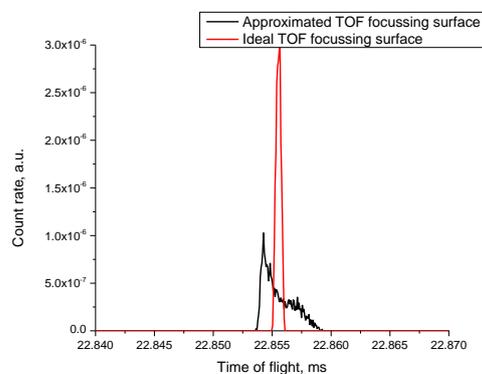


Рис. 44. Пример моделирования 4-й поверхности.

По программам VITESS были проведены расчеты методом Монте Карло проекта нового нейтропровода для спектрометра РЕФЛЕКС с общей длиной около 30 м, шириной 1 см и высотой 8 см. Нейтропровод будет содержать изогнутую часть (около 16 м), что позволит уменьшить фон быстрых нейтронов и гамма квантов на образце, и прямолинейный участок, обеспечивающий равномерную засветку образца. Нейтропровод планируется покрыть изотопом никеля ⁵⁸Ni.

В середине 2013 г. начались работы по применению метода обратного Монте Карло (Reverse Monte Carlo) для восстановления трехмерной структуры стекол (или других разупорядоченных систем) на основе дифракционных данных нейтронного рассеяния. В расчетах использовалась программа RMC_POT. Была также разработана специальная

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

программа, позволяющая рассчитать координацию атомов стекла с помощью сетей Вороного. Эта программа читает данные, полученные программой RMC_POT, и рассчитывает координационные числа. В частности, для трехэлементной системы FeYB рассчитывается девять координационных чисел. При необходимости в расчетах могут быть задействованы две опции, а именно: построение сети Вороного с учетом ионных радиусов частиц и отбрасывание частиц, для которых площадь поверхности Вороного меньше заданного уровня. Пример восстановленной трехмерной структуры из дифракционных данных для стекла FeYB программой RMC_POT приведен на **Рис. 45**.

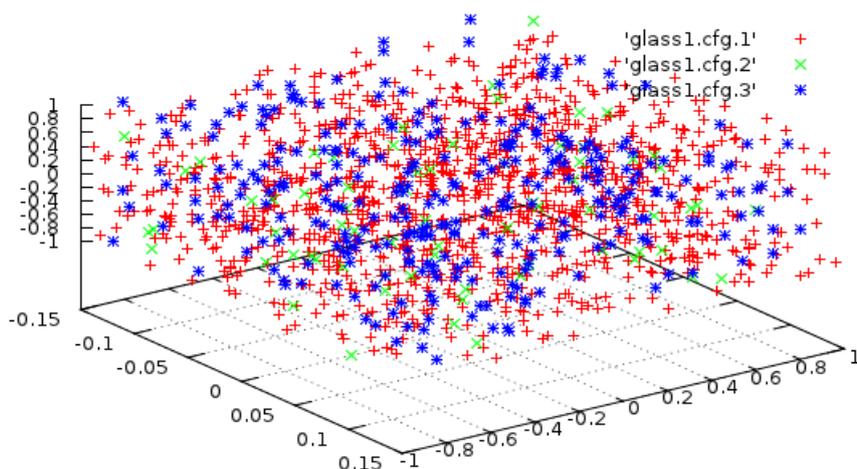


Рис. 45. Пример восстановленной структуры стекла FeYB (красным цветом показаны атомы железа, зеленым - иттрия, синим – бора).

Разработка и изготовление оборудования для новых и модернизируемых спектрометров.

Продолжались работы по созданию на 13 канале ИЯУ ИБР-2 в ОИЯИ нового фурье-дифрактометра высокого разрешения, основанного на узлах спектрометра FSS (Fourier Stress Spectrometer), который длительное время использовался в исследовательском центре GKSS (Германия). В соответствии с заключенным договором с ПИЯФ оборудование спектрометра FSS в контейнерах перевезено в Дубну (**Рис. 46**). В настоящее время ведется проверка оборудования и конструкторская проработка его размещения и монтажа на 13 канале ИБР-2. На этом же канале создается инфраструктура для тестирования спектрометрического оборудования.



Рис. 46. Десять контейнеров с оборудованием спектрометра FSS.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для дифрактометра RTD (ДН-2), предназначенного для исследований переходных процессов в реальном времени, разработан и изготовлен кольцевой гелиевый детектор обратного рассеяния вместе с 8-канальной аналоговой электроникой и многоканальной электроникой накопления данных (MPD). Детекторная система была настроена и протестирована на стенде, а затем установлена на пучке канала 6а ИБР-2 (**Рис. 47**), где проведен первый этап испытаний. После изготовления и монтажа фоновой защиты будут измерены физические характеристики детектора и осуществлен ввод в эксплуатацию в штатном режиме. Двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор на RTD работает со встроенным в PC блоком электроники сбора и накопления данных De-Li-DAQ1. В ближайшее время он будет заменен на блок De-Li-DAQ2, выполненный в конструктиве NIM и обеспечивающий скорость регистрации до 10^6 соб/сек.



Рис. 47. Кольцевой гелиевый детектор обратного рассеяния на дифрактометре RTD

Разработана и изготовлена регулируемая диафрагма нейтронного пучка с линейным перемещением по горизонтальной и вертикальной осям и креплением на выходном фланце нейтронновода RTD (**Рис. 48**). Размер диафрагмы – 20×105 мм², используемый материал для поглощения нейтронов – пиролитический нитрид бора толщиной 1.1 мм. Для управления диафрагмой используются шаговые двигатели FL57STH51; четырехканальный блок управления двигателями подключен через CAN/USB преобразователь к управляющему компьютеру.

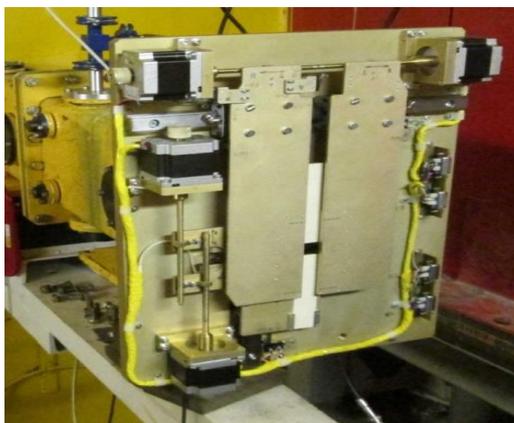


Рис. 48. Регулируемая диафрагма нейтронного пучка дифрактометра RTD.

Выполнена модернизация детекторной системы дифрактометра для исследования микрообразцов под высоким давлением ДН-12, состоящей из двух детекторных колец, каждое из

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

которых включает в себя 16 газовых детекторов. Новые детекторы СНМ-31 установлены в коллиматорах и находятся в общем защитном кожухе. Каждый детектор имеет свой независимый выход, который присоединяется к отдельному входу предусилителя. Новая детекторная и управляющая электроника обеспечивает усиление и селекцию сигналов, а также управление от компьютера порогами регистрации и высоким напряжением на счетчиках. Сбор и накопление данных осуществляются 32-канальным электронным блоком МРД, разработанным в ЛНФ. Программное обеспечение ДН-12 аналогично ПО дифрактометра ДН-6.

Полностью заменена аналоговая электроника 2-х кольцевых 8-ми канальных детекторов спектрометра малоуглового рассеяния нейтронов ЮМО. Детекторы протестированы на стенде и введены в эксплуатацию. Внедрена новая система накопления данных на основе МРД-32.

Модернизация систем окружения образца и систем управления на спектрометрах ИБР-2. Криогеника.

В настоящее время системы окружения образца и системы управления модернизированы на 10 спектрометрах из 13. Основными особенностями новых систем являются:

- построение всех систем по единой схеме;
- выполнение систем контроля и управления спектрометра в виде независимого модуля, подключенного к РС через интерфейс USB;
- вынос системы управления к образцу через оптический удлинитель USB;
- унификация основных элементов системы (датчиков, двигателей, контроллеров управления перемещением, температурных контроллеров и т.п.) и их интерфейсов;
- ориентация на использование промышленного оборудования.

В качестве примера на **Рис. 49** приведена структурная схема системы управления и контроля спектрометра ЮМО после модернизации.

По такой же схеме в 2013 г. была выполнена модернизация систем автоматизации для Фурье-дифрактометров: ФДВР (6 каналов управления) и ФСД (12 каналов), а также создана новая система для спектрометра ГРЕЙНС (26 каналов). У образца устанавливается 19-дюймовый крейт высотой 3U с контроллерами шаговых двигателей, число которых равно числу каналов управления. В таком же крейте у РС размещается адаптер USB-RS485 AC4 (фирмы ОВЕН), обеспечивающий связь РС с контроллерами шаговых двигателей. Каждый из контроллеров имеет свой адрес на линии RS485. Возможность одновременного движения шаговых двигателей задается управляющей программой и ограничена только мощностью соответствующего источника питания.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

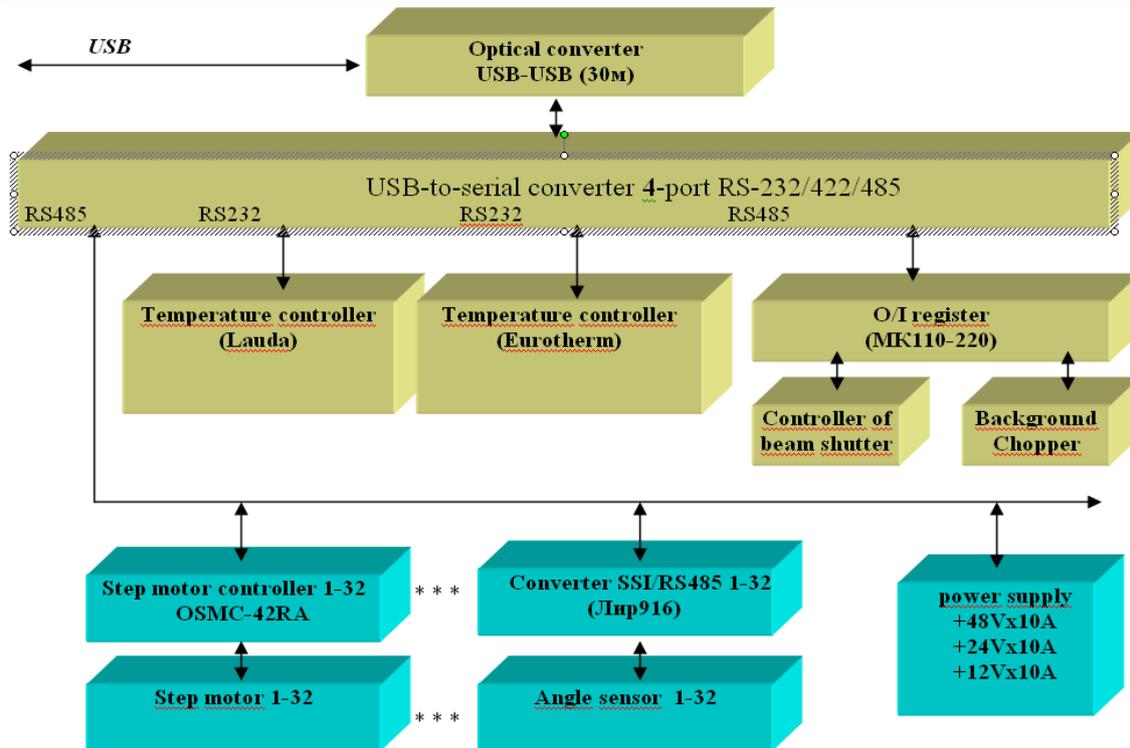


Рис. 49. Структурная схема системы управления и контроля спектрометра ЮМО.

Комплект устройств связи с объектом контролирует состояние шибера и прерывателя и управляет через контроллеры OSM-42RA-3U гониометрами и сканерами Huber (Рис. 50), диафрагмами, поляризаторами, коллиматорами и другими устройствами. Имеется возможность подключения до 8 таких устройств с интерфейсами RS 232/422/485.



Рис. 50. Гониометр и сканер Huber на дифрактометре ФСД.

В состав спектрометра ФДВР включено новое устройство смены образцов на 6 позиций.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработан, изготовлен и установлен на дифрактометр ДН-6 горизонтальный криостат для охлаждения камер высокого давления с образцом (Рис. 51). Получена минимальная температура 4 К на камере образца.



Рис. 51. Горизонтальный криостат для дифрактометра ДН-6.

Выполнены предварительные расчеты магнитной системы криостата со сверхпроводящим магнитом для работы в полях до 4 Тл и изменяемой температурой на образце в диапазоне 5-300 К. Проведены предварительные конструкторские работы. Криостат будет иметь загрузочную шахту для загрузки охлаждаемого держателя образца и может располагаться как в вертикальном, так и горизонтальном направлении. Конструкция криостата предусматривает его применение на дифрактометрах ДН12 и ФДВР. Работы выполняются совместно с ICPE-CA, Бухарест, Румыния.

На спектрометре НЕРА-ПР проводится модернизация шахтного криостата.

Детекторы.

Разработан и создан тестовый сцинтилляционный детектор на основе ND-экрана со съёмом светового сигнала с помощью спектросмещающих волокон. Проведены исследования его характеристик на 9 пучке реактора ИБР-2, получен времяпролетный спектр нейтронов (Рис. 52).

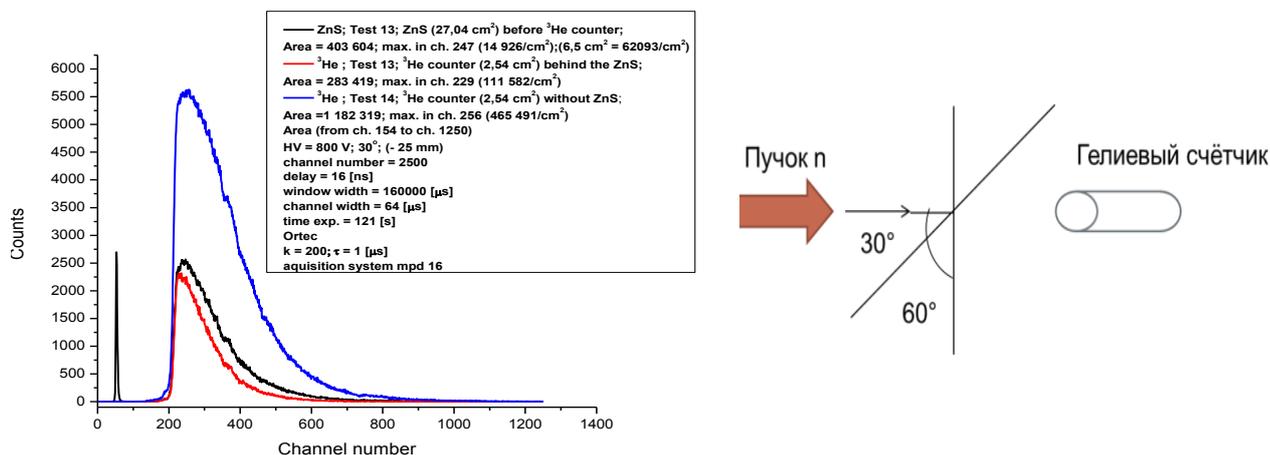


Рис. 52. Времяпролетный спектр тестового детектора с ND-экраном. Черным показан спектр с тестового детектора, синим — спектр счетчика СНМ-17, установленного перед детектором, красным — спектр с СНМ-17 сразу после детектора. Ширина временного канала равна 64 мкс. ND-детектор установлен под углом 30 градусов к пучку нейтронов.

Во 2-м квартале был изготовлен и протестирован на стенде с источником прототип сцинтилляционного счетчика детектора АСТРА для дифрактометра ФСД. Во время осенних

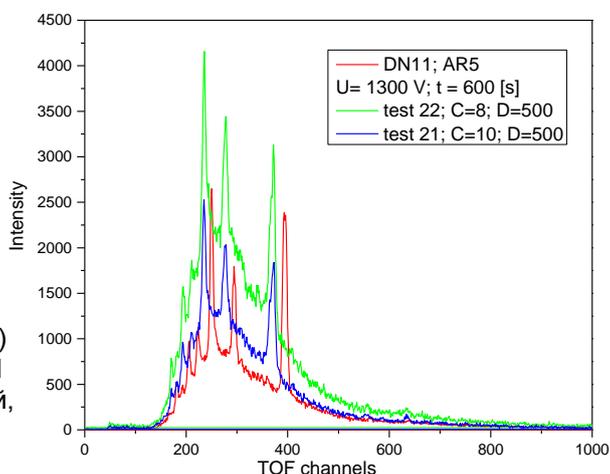
1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

циклов на ИБР-2 проведены сравнительные испытания “нового” и “старого” счетчиков (Рис. 53), показавшие хорошие результаты для TOF-спектров низкого разрешения (Рис. 54). Ведутся работы по изготовлению секции из четырех сцинтилляционных счетчиков детектора АСТРА.



Рис. 53. Новый счетчик во время сравнительных испытаний на детекторе «Астра».

Рис. 54. Общий вид TOF-спектров (низкое разрешение) для детекторов AstraR5 (красный, был включен только 1 элемент из 4-х) и нового ZnS элемента (синий, зеленый, сняты 2 спектра при разных порогах).



Проведены измерения профиля нейтронного пучка №10. Повторены измерения профилей пучков №7а-1, №7а-2, №7-б, после юстировки нейтронновода. Совместно с сотрудниками отдела НЭОФЯ проведены одновременные измерения профилей пучков №6а, №6б, №10, №11, №12 с помощью монитора тепловых нейтронов и оценка их интенсивности с помощью урановой камеры.

Изготовлен и установлен на спектрометре РЕФЛЕКС 2-D ПЧД с чувствительной областью 200x200 мм². Разработана конструкторская документация на 2-D ПЧД для горизонтального канала №3 реактора ИР-8 в НИЦ «Курчатовский институт». Чертежи переданы в НПО «Атом» для изготовления корпуса и других механических узлов детектора. Ведутся работы по созданию нового двухкоординатного позиционно-чувствительного монитора тепловых нейтронов для измерения профилей пучков реактора ИБР-2. Техническое задание на монитор согласовано с заинтересованными отделами НЭОФЯ и НЭОНИКС ЛНФ.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электроника систем сбора данных.

Изготовлены и настроены семь комплектов цифровых и аналоговых блоков MPD-32 для систем сбора и накопления данных со спектрометров ИБР-2. Из этих блоков были собраны и введены в эксплуатацию DAQ-системы на упомянутых ранее спектрометрах RTD, ЮМО, ДН-12, а также укомплектованы и находятся в стадии отладки системы на фурье-дифрактометрах ФСД и ФДВР. Для блоков MPD-16 и MPD-32 разработаны firmware программы для цифровой фильтрации входных сигналов со сцинтилляционных детекторов. Именно с этими блоками на спектрометре ФСД проводятся испытания «List Mode»-анализатора для накопления «сырых» данных в списочном режиме и отладка программ обработки данных для построения спектров высокого разрешения. Измерения проводятся параллельно на старой системе RTOF-анализаторов с двумя подключенными модулями 90° детектора ASTRA или детектора обратного рассеяния (BS) и на «List Mode»-анализаторе со всех модулей детекторов ASTRA и BS. На **Рис. 55** приведены спектры высокого разрешения, измеренные DSP и «List-mode»-анализаторами. Видно, что спектры идентичные, но есть различия в абсолютных значениях интенсивности и уровне фона. Причины этих различий выясняются в проводимых в настоящее время исследованиях.

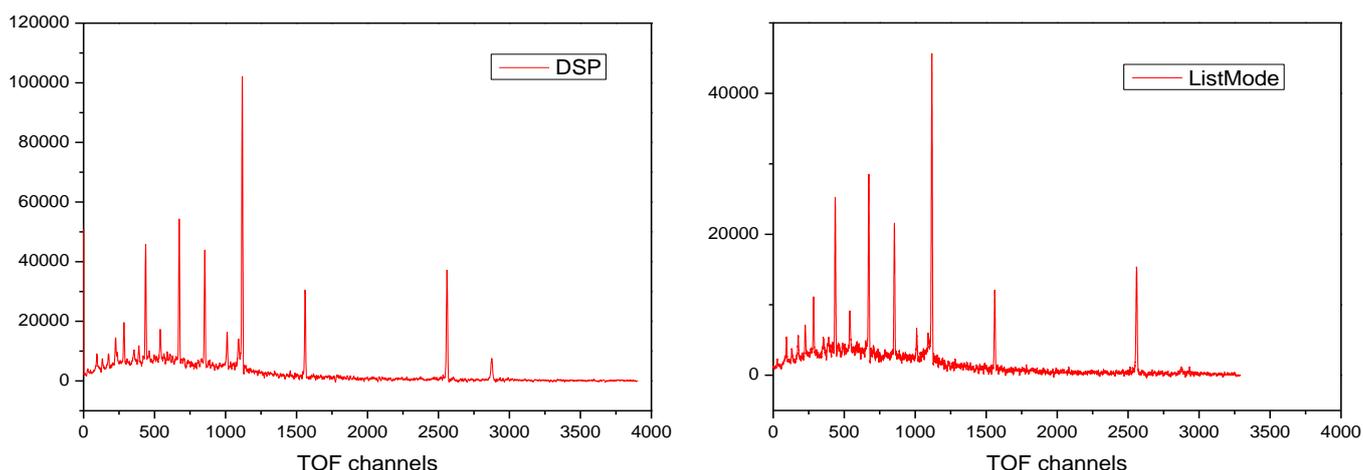


Рис. 55. Спектры высокого разрешения, измеренные DSP и «List-mode»-анализаторами.

Изготовлен и налажен новый блок сбора и накопления данных De-Li-DAQ2 для одно- и двухкоординатных позиционно-чувствительных детекторов (**Рис. 56**) и заканчивается разработка его программного обеспечения. Блок имеет встроенную гистограммную память емкостью 1 Гбайт и высокоскоростной интерфейс с оптической линией связи с персональным компьютером. В блоке предусмотрены два режима работы: режим гистограммирования во внутренней памяти блока и списочный режим (list-mode), при котором исходные данные накапливаются непосредственно на диске PC. Реальная скорость регистрации (с учетом передачи и записи данных в PC) составляет не менее 10^6 соб./сек.



Рис. 56. Блок De-Li-DAQ2 для сбора и накопления данных с ПЧД.

Изготовлены и установлены на 6 спектрометрах разветвители стартов реактора ИБР-2 с оптической развязкой. Проводились также профилактические работы на спектрометрах ИБР-2, текущая модернизация и ремонт электронного оборудования.

Программное обеспечение.

В соответствии с планом в 2013 г. выполнены работы по установке разработанного в ЛНФ программного комплекса Sonix+ на спектрометрах ИБР-2: полностью на ДН-6, СКАТ, ДН-12; на RTD и ГРЕЙНС только для имеющегося в наличии оборудования (в дальнейшем комплекс будет расширяться по мере поступления новых устройств). На дифрактометре ФДВР из-за напряженной пользовательской программы работы по замене VME системы и установке Sonix+ выполняются в перерывах между измерениями, что, конечно, приводит к задержкам.

Развитие самого комплекса Sonix+ включало:

- разработку нового универсального пользовательского интерфейса (GUI) на основе PyQt и matplotlib (внедрено на спектрометрах ЮМО, НЕРА-ПР, СКАТ, РЕМУР), пример показан на Рис. 57;
- совершенствование библиотеки операций для рефлектометров (РЕМУР, РЕФЛЕКС, ГРЕЙНС);
- совершенствование программ визуализации (SpectraViewer) и юстировки (ICE) по запросам пользователей.

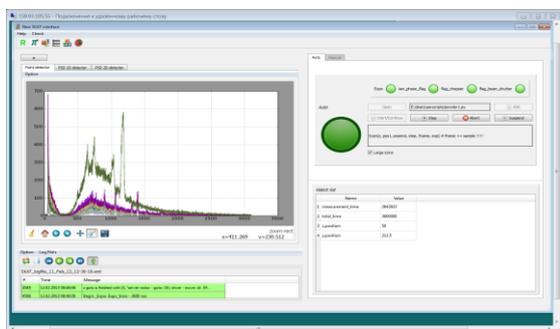


Рис. 57. Новый GUI на примере спектрометра СКАТ.

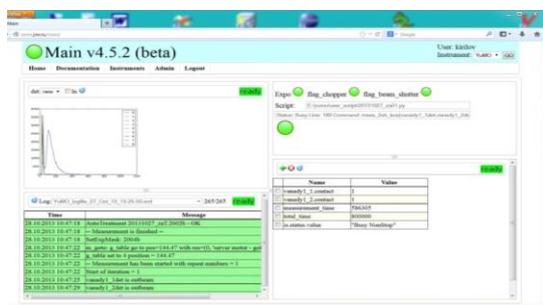


Рис. 58. Основная страница WebSonix на примере спектрометра ЮМО.

В течение года была подготовлена новая существенно улучшенная версия системы удаленного контроля параметров и управления спектрометрами (WebSonix), которая находится в опытной эксплуатации на спектрометрах СКАТ и ЮМО (Рис. 58).

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Локальная вычислительная сеть.

За отчетный период сетевой службой ЛНФ был установлен и сконфигурирован файловый сервер (**Рис. 59**) на базе серверной платформы Supermicro DP SSG-6047R-E1R24N со следующими техническими характеристиками:

процессор – 2x Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2637 0 @ 3.00GHz;

оперативная память – 32 GByte;

жёсткие диски – 2x 500GByte и 24x 3 TByte.

В качестве операционной системы выбрана свободная в распространении FreeBSD 9.1, зарекомендовавшая себя в пользовательской среде как наиболее отказоустойчивая и производительная ОС. Важной её особенностью является поддержка файловой системы ZFS, которая обеспечивает реализацию программного RAID-массива на основе HBA адаптера. Данная файловая система является журналируемой и обладает технологией snapshots, обеспечивающей возможность фиксации мгновенного состояния процесса, что увеличивает вероятность восстановления потерянных данных. Файловая система сохраняет работоспособность при потере до 2-х дисков.

Дисковый массив реализован на 24-х дисках Hitachi HUA72303 на основе файловой системы ZFS. Его ёмкость составляет 58 TByte. Доступ к нему возможен с помощью таких протоколов как: **cifs**, **smb**, **nfs**, и **scp**. В настоящее время сервер находится в опытной эксплуатации.



Рис. 59. Новый файловый сервер.

Завершено создание сети WiFi в основных корпусах ЛНФ: 42, 42а, 117 (башня) и 119 (экспериментальные залы ИБР-2), 119. В качестве точек доступа используются D-link DW-360AP и Ubiquiti UniFi AP. На данный момент работает 21 беспроводная точка доступа к сети интернет.