



Объединенный институт ядерных исследований



КРАТКИЙ ОТЧЕТ

**о предварительных итогах исполнения Соглашения
между Правительством Российской Федерации
и международной межправительственной научно-
исследовательской организацией Объединенным институтом
ядерных исследований
о создании и эксплуатации комплекса сверхпроводящих колец
на встречных пучках тяжелых ионов NICA
(Комплекса NICA)**

по состоянию на 01.01.2020 года



г. Дубна, 2020 г.

Содержание:

Введение

1. Схема базовой конфигурации, основные характеристики и рабочие документы проекта «Комплекс NICA»
2. Статус реализации базовой конфигурации комплекса
 - 2.1 Объекты ускорительного блока
 - 2.1.1 Инжекционная цепочка
 - 2.1.1.1 Источники ионов
 - 2.1.1.2 Линейный ускоритель ЛУ-20М
 - 2.1.1.3 Линейный ускоритель тяжелых ионов NICA
 - 2.1.2 Бустер
 - 2.1.2.1 Магнитно-криостатная система
 - 2.1.2.2 Система электронного охлаждения
 - 2.1.2.3 Другие подсистемы Бустера
 - 2.1.2.4 Статус Бустера
 - 2.1.3 Нуклотрон
 - 2.1.3.1 Режимы работы Нуклотрона
 - 2.1.3.2 Основные системы Нуклотрона
 - 2.1.4 Коллайдер
 - 2.1.4.1 Магнитно-криостатная система
 - 2.1.4.2 Система стохастического охлаждения
 - 2.1.4.3 Система электронного охлаждения
 - 2.1.4.4 Система электропитания
 - 2.1.4.5 Каналы инжекции пучков
 - 2.1.4.6 ВЧ системы Коллайдера
 - 2.1.4.7 Система диагностики, управления и контроля
 - 2.1.4.8 Вакуумная система
 - 2.2 Экспериментальные установки
 - 2.2.1 Multi Purpose Detector (MPD) – многоцелевой детектор
 - 2.2.1.1 Соленоидальный магнит
 - 2.2.1.1.1 Соленоид
 - 2.2.1.1.2 Магнитопровод
 - 2.2.1.2 Детектор TPC
 - 2.2.1.3 Детектор ToF
 - 2.2.1.4 Детектор FFD
 - 2.2.1.5 Передний адронный калориметр FHCAL
 - 2.2.1.6 Детектор ECal
 - 2.2.1.7 Детектор ITS

- 2.2.1.8 Тонкостенная пучковая труба
- 2.2.1.9 Система сбора данных (DAQ) и компьютерный кластер MPD
- 2.2.2 Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N) – установка для изучения барионной материи на Нуклотроне
 - 2.2.2.1 Центральная трековая система
 - 2.2.2.2 Внешняя трековая система и калориметры
 - 2.2.2.3 Ионопровод, мишенная станция и элементы компьютерного кластера
- 2.2.3 Spin Physics Detector (SPD) – детектор для изучения спиновой физики
- 2.3 Научно-исследовательская и инженерная инфраструктура
 - 2.3.1 Здание коллайдерного комплекса
 - 2.3.2 Здание криогенно-компрессорной станции
 - 2.3.3 Здание Центра NICA
 - 2.3.4 Другие основные здания и экспериментальные павильоны комплекса
 - 2.3.5 Вспомогательное и технологическое оборудование.
 - 2.3.6 Криогенный комплекс
 - 2.3.6.1 Гелиевая компрессия и гелиевые установки
 - 2.3.6.2 Азотная компрессия и азотные установки
 - 2.3.7 Инфраструктура энергообеспечивающих и энергосберегающих инженерных систем
 - 2.3.7.1 Энергообеспечивающие системы
 - 2.3.7.2 Система питания канала вывода пучка из Нуклотрона в измерительный павильон
 - 2.3.7.3 Система питания каналов транспортировки пучка заряженных частиц в корпус №205
 - 2.3.8 Высокотехнологичная линия сборки и испытания сверхпроводящих магнитов
- 2.4 Компьютерно-информационный блок
 - 2.4.1 Общая структура компьютерного блока и сети
 - 2.4.2 Распределенная вычислительная сеть
 - 2.4.3 On-line кластер
 - 2.4.4 Off-line кластер NICA ЛФВЭ
 - 2.4.5 Off-line кластер NICA ЛИТ
 - 2.4.6 Файловые системы распределенного кластера
 - 2.4.7 Программное обеспечение «Комплекса NICA»

- 2.4.8 Инженерная инфраструктура компьютерного блока
 - 2.5 Каналы и установки для прикладных инновационных исследований
 - 2.5.1 Каналы транспортировки пучков
 - 2.5.2 Станция облучения микроэлектронных систем СОДИТ
 - 2.5.3 Станция облучения для радиобиологических исследований СОДИБ
 - 2.5.4 Станция для релятивистской ядерной энергетики
 - 2.5.5 Станция облучения радиоэлектронных систем СОКИТ
 - 3. Кадровые вопросы, мобильность и активность участников проекта
 - 4. Международное сотрудничество
- Заключение

Введение

Проект класса мега-сайенс «Комплекс NICA» реализуется в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) в соответствии с планами развития Института и Соглашением между Правительством Российской Федерации (РФ) и международной межправительственной научно-исследовательской организацией Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ) о создании и эксплуатации комплекса сверхпроводящих колец на встречных пучках тяжелых ионов NICA – Комплекса NICA (далее – Соглашение). Работы по созданию базовой конфигурации проекта «Комплекс NICA» проводятся по всем его объектам в соответствии с Соглашением с использованием утвержденных бюджетных средств ОИЯИ, целевых средств РФ, поступивших на счет ОИЯИ в 2016 – 2019 годах в соответствии с Соглашением и его расширением в рамках национального проекта Российской Федерации «Наука», а также вкладов других участников проекта.

В представленном отчете описан прогресс в создании Комплекса NICA, достигнутый в 2019 году (отчеты за 2017 и 2018 гг. расположен на сайте по адресу: <http://nica.jinr.ru>).

1. Схема базовой конфигурации, основные характеристики и рабочие документы проекта «Комплекс NICA»

Схема базовой конфигурации проекта «Комплекс NICA» приведена на рис.1. Комплекс позволит ускорять и сталкивать тяжелые ионы, вплоть до ионов золота, в оптимальном диапазоне энергий, от минимальных – в зоне выведенных пучков, до максимально достижимых – $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ (для Au^{+79} , в системе центра масс нуклон-нуклон) на Коллайдере, при средней светимости $L = 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что позволит изучать ядерную материю в состоянии максимальной барионной плотности, недоступной для исследований в других лабораториях мира.

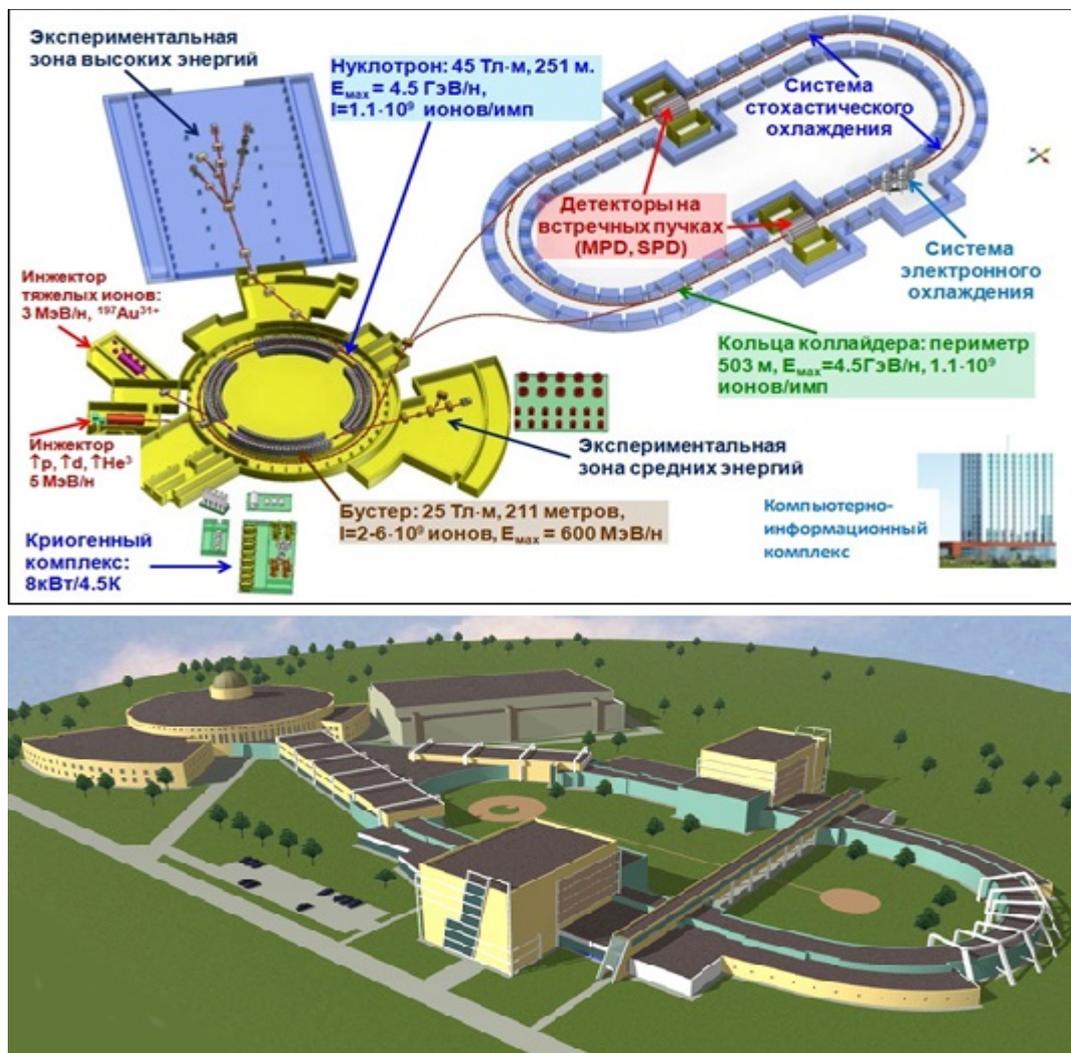


Рис. 1. Схема базовой конфигурации проекта «Комплекс NICA»: сверху – основные элементы комплекса и базовые параметры; внизу – архитектурный комплекс существующих зданий (Нуклотрона и павильона для экспериментов на выведенных пучках) и строящегося здания 17, в котором будут размещены Коллайдер и две установки MPD и SPD.

В дополнение к этому на коллайдере будут ускоряться и сталкиваться протоны и дейтроны с продольной и поперечной поляризацией в диапазоне энергий до $\sqrt{s_{NN}} = 27$ ГэВ и $\sqrt{s_{NN}} = 12,6$ ГэВ, соответственно, при светимости до 10^{32} см⁻²с⁻¹. Эти условия обеспечат приоритет в области исследований спиновой структуры нуклона и выяснения важнейших вопросов природы спина.

Обновленный паспорт проекта «Комплекс NICA» приведен на сайте http://nica.jinr.ru/docs/TDR_spec_Fin0_for_site_short.pdf. Более детальное техническое описание ускорительной части комплекса NICA размещено на сайте <http://nucloweb.jinr.ru/nica/TDR.html>. Далее приведены ссылки на научную программу проекта («Белая книга») - <http://nica.jinr.ru/files/WhitePaper.pdf>., проект детектора BM@N - http://nica.jinr.ru/files/BM@N/BMN_CDR.pdf, проект детектора MPD - http://nica.jinr.ru/files/CDR_MPD/MPD_CDR_en.pdf и предложение проекта SPD - <http://indico.jinr.ru/getFile.py/access?resId=11&materialId=3&confId=718>.

2. Статус реализации базовой конфигурации комплекса

Создание базовой конфигурации проекта «Комплекс NICA» начато в конце 2013 года на этапе подготовки Соглашения к подписанию. После его подписания в июне 2016 года при реализации проекта используются средства бюджета ОИЯИ, выделенные средства РФ и других стран (ФРГ, ЮАР). В числе наиболее крупных контрактов, частично или полностью профинансированных в 2019 г., следует отнести контракт на строительство здания №17, на создание катушек и всей холодной массы магнита, системы управления и его инженерной инфраструктуры, контракт на производство железного ярма и опор магнита, контракт на создание первой высокочастотной системы ВЧ-1, на разработку сателлитных гелиевых рефрижераторов с компанией НПО Гелиймаш, на транспортировку пучка из Нуклотрона в Коллайдер, контракт на строительство криогенно-компрессорной станции, контракт на изготовление элементов пучковых линз коллайдера, контракт на изготовление прецизионных источников тока коллайдера, контракт на изготовление модулей электромагнитного калориметра установки MPD и контракт на изготовление свинцовых пластин электромагнитного калориметра этой установки, контракт на приобретение оборудования для увеличения вычислительной мощности DAQ эксперимента BM@N, а также контракт на изготовление переключающих шкафов системы электропитания магнитных элементов канала транспортировки пучка заряженных частиц в корпусе 205.

Параллельно с созданием объектов базовой конфигурации проекта «Комплекс NICA» идет выполнение его научной программы.

Ниже приведен статус выполненных в 2019 году работ.

2.1. Объекты ускорительного блока

2.1.1. Инжекционная цепочка

Инжекционный комплекс (Рис.2.1.1.1) состоит из двух независимых частей:

- инжектор легких ионов в Нуклотрон;
- инжектор тяжелых ионов в Бустер.

Инжектор легких ионов в Нуклотрон включает в себя:

- источник легких ионов (Duoplasmotron);
- источник поляризованных ионов (SPI);
- лазерный источник ионов (LIS);
- линейный ускоритель, состоящий из радиочастотной квадрупольной секции (RFQ) и дрейфовой трубки типа Альварез - Линак ЛУ-20М;
- требуемые транспортировочные линии пучков.

В полной версии установки NICA линейный ускоритель будет заменен новым Ligh Ion Linear ускорителем (LILAc), который находится в стадии разработки.

Инжектор тяжелых ионов в усилитель включает в себя:

- источник тяжелых ионов «КРИОН»,
- линейный ускоритель тяжелых ионов (HILAc), состоящий из радиочастотного квадрупольного участка (RFQ) и двух участков дрейфовой трубы (H DTL),
- требуемые транспортировочные линии пучков.

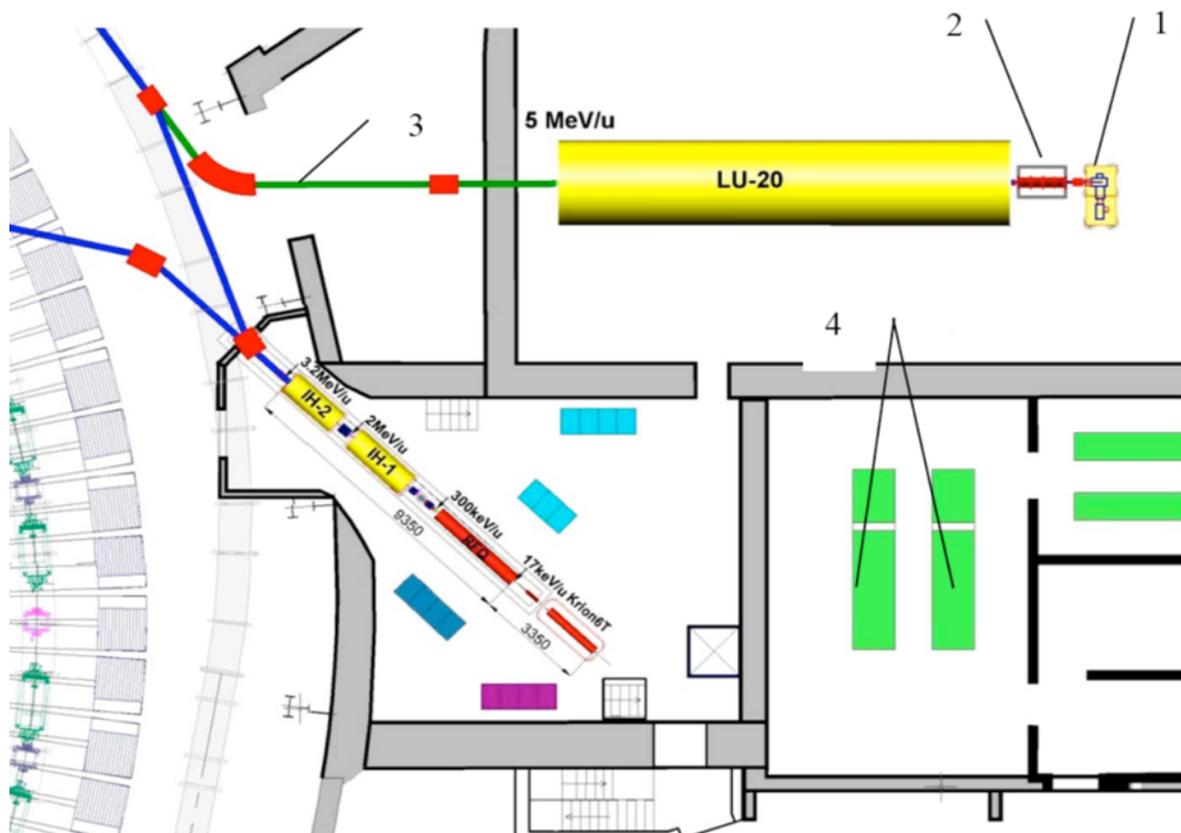


Рис. 2.2.1.1. Расположение элементов инжекционного комплекса: 1 - платформа высокого напряжения для источника легких ионов, LIS и SPI, 2 - форсунка RFQ, 4 - усилитель RF LU-20M, 3 - линия транспортировки пучка от LU-20M до Нуклотрона.

2.1.1.1. Источники ионов

Лазерный источник и источник легких ионов разработан в лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ. Плотность потока лазерного излучения на мишени оценивается в $\sim 10^{13}$ Вт/см. Испытания лазера на стенде подтвердили наличие шести зарядовых состояний ионов в углеродной плазме, что позволяет конфигурировать его для производства как легких ионов с высоким зарядом, так и ионов с низким отношением Z/A для тестирования обоих новых линейных ускорителей - HILAc и LILAc.

Duaplasmatron работает и предназначен для генерации интенсивных пучков легких ионов, в том числе He^{2+} .

Источник поляризованных ионов (SPI) обеспечивает интенсивность ускоренных поляризованных пучков в ускорительном комплексе ОИЯИ до 5×10^{10} частиц/импульс.

Основные системы источника (газоизмерительные, вакуумные, электронные и радиочастотные стойки, высокоточный источник питания - Рис. 2.1.1.2) расположены на платформе высокого напряжения. Для работы источника создана система дистанционного управления.

SPI создан в сотрудничестве с ИЯИ РАН (Москва), ввод его в эксплуатацию на ЛУ-20М был осуществлен в 2016 году.

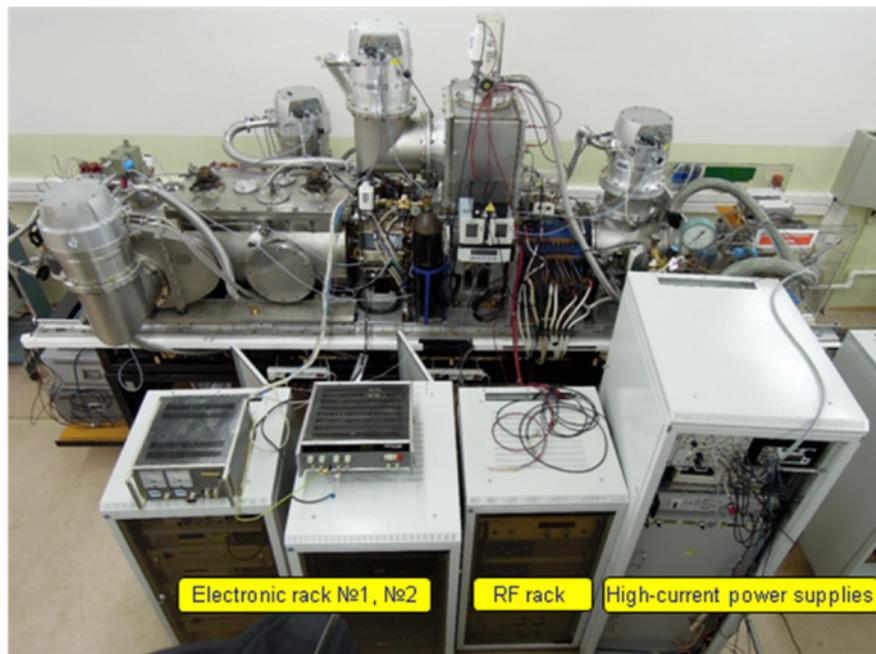


Рис. 2.1.1.2. SPI в сборке на испытательном стенде.

Источник тяжелых ионов «КРИОН» служит для создания пучков тяжелых ионов с высокими зарядовыми состояниями. Этот источник разработан в ОИЯИ и основан на явлении, обнаруженном при изучении режимов работы электронно-лучевого источника EBIS, работающего в отражательном режиме. Было обнаружено, что при определенных условиях «облако» многократно отраженных электронов, заключенных в сильное магнитное поле соленоида, проявляет свойства, подобные фазовому переходу. Это приводит к постепенному увеличению плотности электронной плазмы и переходу в новое стационарное состояние, называемое электронной струной. В рамках разработки базовой версии установки NICA была построена «стендовая» версия источника КРИОН-6Т (рис. 2.1.1.3). В экспериментальном сеансе Нуклотрона в 2018 году использовались пучки C^{6+} , Ar^{16+} и Kr^{26+} , а также исследовались режимы работы источника.



Рис 2.1.1.3. KRION-6T на инжекционной установке во время запуска Нуклотрона в марте 2018 года.

Продолжается также создание источника для полной конфигурации NICA - источника «КРИОН-Н». Источник «КРИОН-Н» (Рис. 2.1.1.4) - криогенного сверхвысоковакуумного ионизатора с 6 Т сверхпроводящим соленоидом.

Дополнительно предполагается создание и установка диагностических приборов для измерения коэффициента излучения и для анализа состава зарядового состояния выведенного пучка.

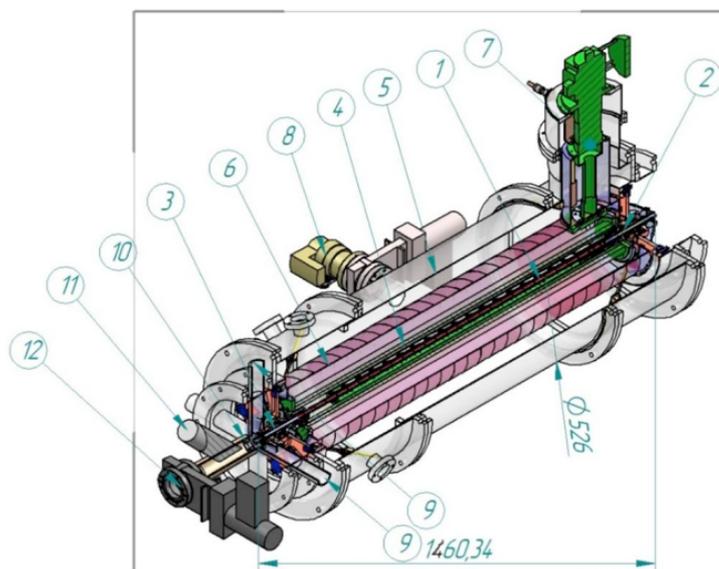


Рис.2.1.1.4. Источник ионов «КРИОН-Н», 1 - элементы электронно-ионно-оптической системы, расположенные вдоль оси соленоида, 2 - электронная пушка и 3 - электронный отражатель, расположенный вне соленоида в остаточных магнитных полях $B_{\text{тах}}/20$, 4 - сверхпроводящий соленоид 1200 мм, 5 - внешний вакуумный резервуар, 6 - тепловой защитный кожух, 7 - головка криоохладителя, 8 - вакуумный клапан, 9 - камера для подвижных детекторов, 10 - электростатическая линза для контроля выведенного ионного пучка, 11 - вход анализатора времени пролета, 12 - вакуумный клапан на входе в ускоряющую секцию.

Параметры ионных источников NICA приведены в таблице 2.1.1.1.

Таблица 2.1.1.1.

Параметры источников частиц инжекционного комплекса NICA

Источник	КРИОН-6N	Лазерный	Duoplasmatron	SPI
Частицы	Au^{31+}	Light ions up to Mg^{10+}	H^+, D^+, He^{2+}	$\uparrow H^+, \uparrow D^+$
Частиц в цикле	$\sim 2,5 \cdot 10^9$	$\sim 10^{11}$	$H^+, D^+ \sim 5 \cdot 10^{12}$ $He^{2+} \sim 10^{11}$	$5 \cdot 10^{11}$
Повторение цикла, Hz	10 (3 импульса за 5 с)	0,5	1	0,2

2.1.1.2. Линейный ускоритель ЛУ-20М

Инжектор легких ионов в Нуклотрон основан на модернизированном ускорителе ЛУ-20М и состоит из:

- нового форинжектора на базе ускорителя RFQ,
- ускорителя типа Альварез ЛУ-20М;
- линии транспортировки пучка из ЛУ-20М в Нуклотрон с дебанчером.

Инжектор включает в себя следующие основные системы и подсистемы:

- вакуумную систему;
- радиочастотную систему низкого уровня (LLRF);
- мощный радиочастотный усилитель ЛУ-20М «Радонит»;
- мощный RFQ РЧ усилитель;
- систему питания для дипольных магнитов, аксиальных и квадрупольных линз;
- диагностическую систему пучка;
- систему контроля.

Форинжектор (Рис. 2.1.1.5 и Рис. 2.1.1.6) включает в себя линию транспортировки пучка низкой энергии (ЛЕВТ), 3 секции ускорителя RFQ (или ПОКФ – с пространственно однородной фокусировкой) и линию транспортировки пучка средней энергии (МЕВТ). Основные параметры форинжектора приведены в таблице 2.1.1.2.

Основные параметры переднего инжектора приведены в таблице 2.1.1.2.

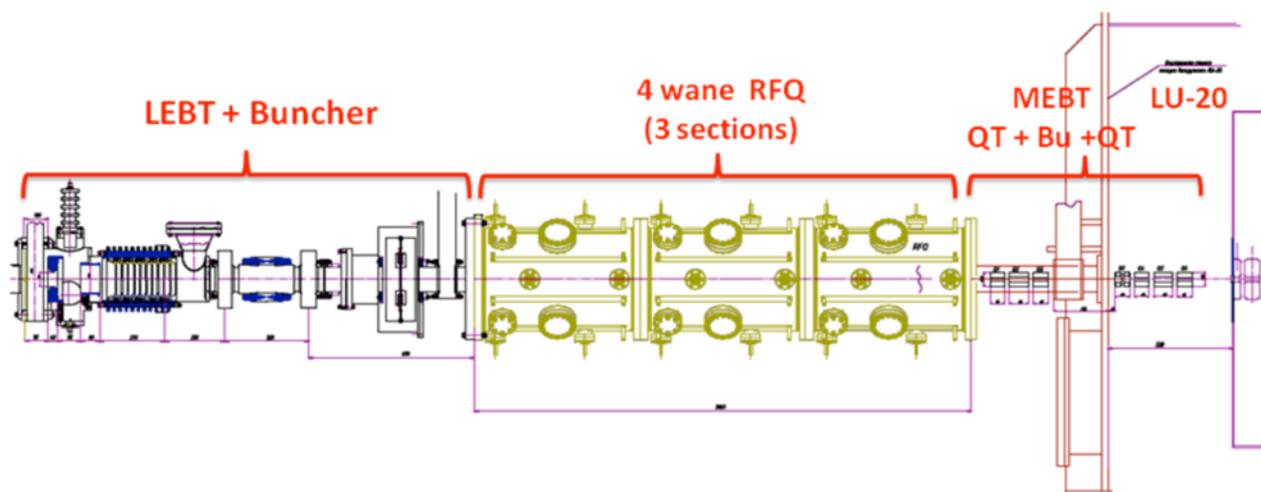


Рис. 2.1.1.5. Конструкция форинжектора ЛУ-20М.

LEBT, состоит из ускорительной трубки, двух магнитных осевых линз, группирователя и бокса диагностики пучка. Диагностический бокс был создан в сотрудничестве с ИЯИ РАН и введен в эксплуатацию в 2016 году. Ускоритель RFQ был спроектирован и построен в рамках соглашения между ОИЯИ, ИТЭФ и МИФИ. Мощный ВЧ усилитель и LLRF для RFQ были созданы ИТЭФ. LEBT и RFQ были введены в эксплуатацию в 2016 году. Структура MEBT, состоящего из двух триплетов квадрупольных линз и группирователя, была разработана ИТЭФ. Группирователь был собран в ЭЗАН, Черноголовка, квадрупольные линзы и система их питания разработаны и изготовлены в ОИЯИ. MEBT был введен в эксплуатацию в 2017 году.

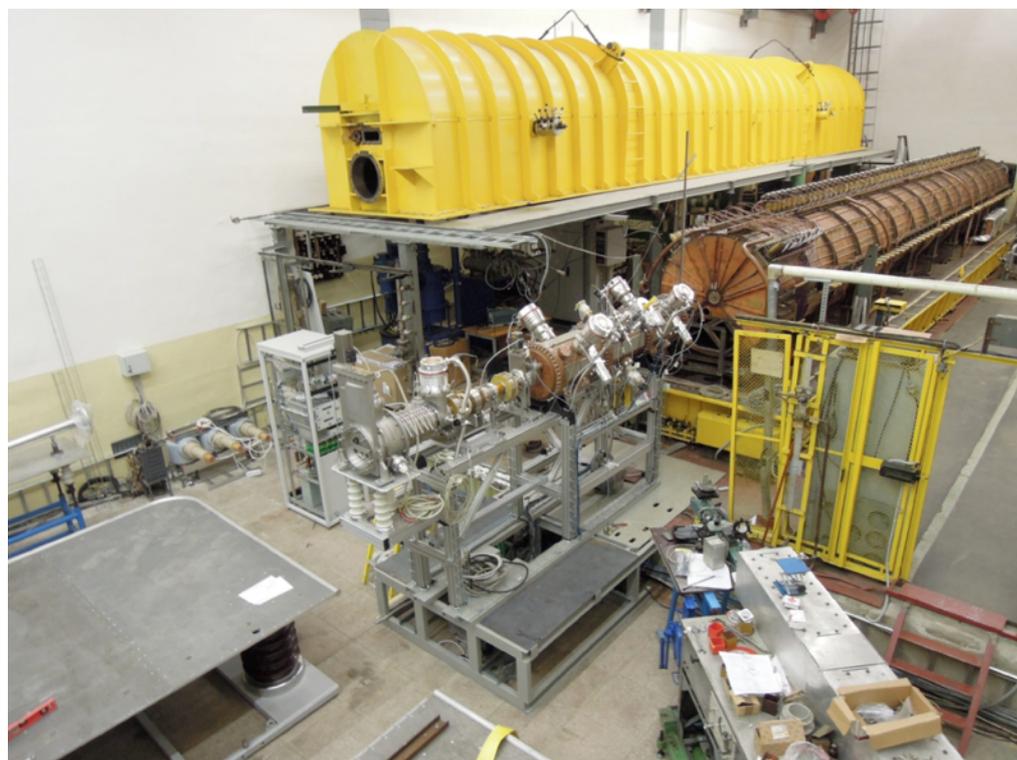


Рис. 2.1.1.6. Форинжектор ЛУ-20М при сборке.

Таблица 2.1.1.2.

Основные параметры форинжектора ЛУ-20М

отношение заряда иона к его массе q/A	1,0	0,5	$\geq 0,3$
Энергия инъекции, [кэВ]	31	61,8	103
Максимальный ток, [мА]	10	20	10
Выходная энергия [МэВ/н]	0,156		
Эмиттанс (на выходе) [$\mu\text{м} \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}$]	$\leq 0,5$		
Длина RFQ, [м]	2,2		
Передача, %	> 85%	> 89%	> 93%
В акцептансе ЛУ-20	70 %	71 %	80 %

Ускоритель ЛУ-20 был введен в эксплуатацию в 1972 году в качестве протонного инжектора для Синхрофазотрона. Для его эксплуатации в рамках установки НИСА при параметрах, соответствующих «Техническому заданию ускорительного комплекса НИСА», была проведена модернизация в 2013 - 2018 годах, включающая следующие работы:

- создание нового форинжектора;
- частичная модернизация ВЧ генератора «Родонит»;
- создание современной вакуумной системы;
- создание новой системы питания квадрупольных линз ЛУ-20;
- модернизация системы питания магнитных элементов транспортной линии ЛУ-20 - Нуклотрон;
- создание нового дебанчера;
- разработка системы диагностики пучка;
- модернизация систем управления и синхронизации.

На генераторе «Родонит» были установлены новые сплошные статические переключатели на модуляторах, модернизированы системы управления и питания.

Структура новой вакуумной системы форинжектора, ЛУ-20М и транспортной магистрали показана на Рис. 2.1.1.7 и Рис. 2.1.1.8.

Создана также система контроля вакуума.

Дебанчер в линии транспортировки пучка к Нуклотрону создан в сотрудничестве с ИЯИ РАН.

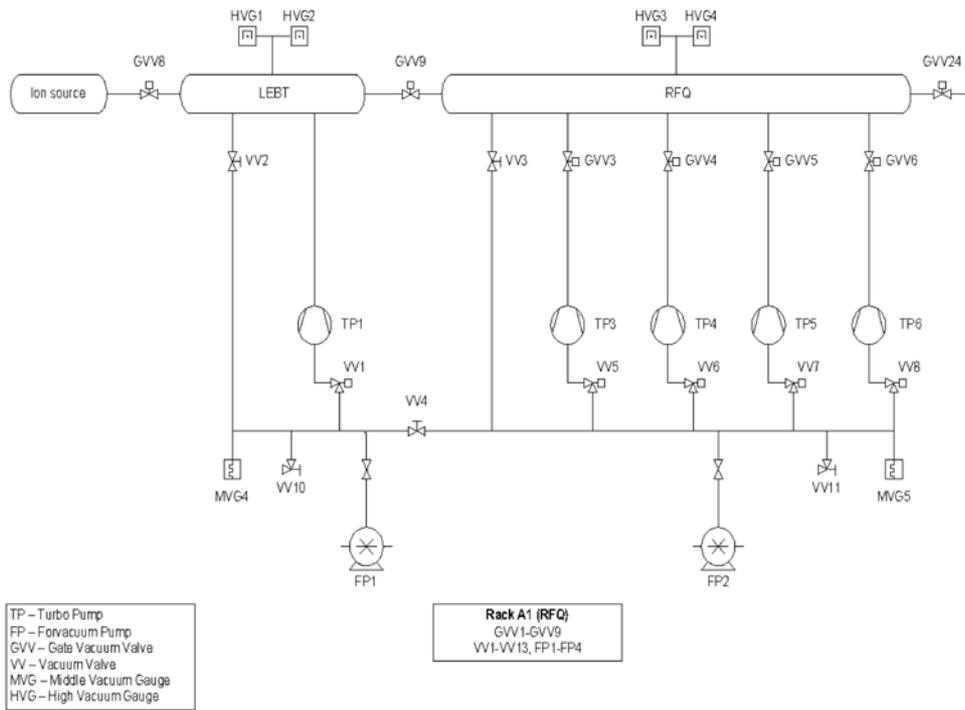


Рис. 2.1.1.7. Конструкция вакуумной системы форинжектора ЛУ-20М.

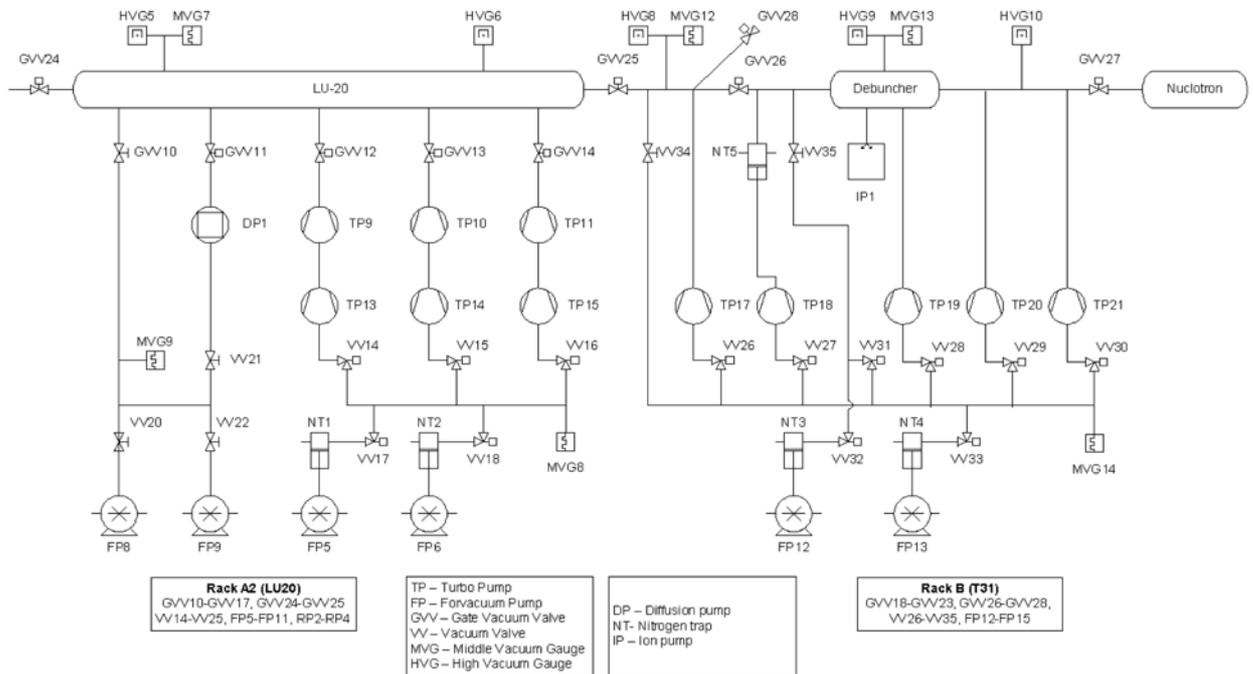


Рис. 2.1.1.8. Структура вакуумной системы ЛУ-20М и линия транспортировки пучка к Нуклотрону.

ЛУ-20М введен в эксплуатацию в 2018 году с примерно полугодовой задержкой по сравнению с первоначальным планом. Задержка связана, в основном, с длительным сроком работ по поиску подрядчиков в РФ. Основные достигнутые параметры ЛУ-20М приведены в таблице 2.1.1.3.

Основные параметры ЛУ-20М

Номер гармоники	$2\beta\lambda$
Энергия инъекции	156 кэВ/н
Выходная энергий	5 МэВ/н
Рабочая частота	145 МГц
Диаметр промежутка	1,4 м
Длина промежутка	14,4 м
Число дрейфовых трубок	57 + 2 полу- трубки
Фактор качества	40000
Синхротронная фаза	31,5°
Фокусирующая структура	FODO
Градиент магнитного поля в квадрупольных линзах	(58,4 ÷ 7,4) Т/м
Акцептанс	220 π ·мм·мрад

2.1.1.3. Линейный ускоритель тяжелых ионов НЛАС

НЛАС (Рис. 2.1.1.9) обеспечивает ускорение тяжелых ионов (до U) при соотношении заряда к массе $\geq 0,16$ для:

- дальнейшего их вывода в Бустер;
- транспортировки в третью зону прикладных исследований, которая будет разработана для исследований радиационных повреждений в микроэлектронике (тяжелые ионы с энергией 3,2 МэВ/н будут использованы здесь для облучения декапсулированных микросхем).



Рис. 2.1.1.9. НЛАС на ускорительном комплексе.

Инжектор тяжелых ионов в Бустере основан на НИЛAc и включает в себя:

- линию транспортировки пучка низкой энергии (LEBT), состоящую из ускоряющей трубки, двух магнитных осевых линз и блока диагностики пучка;
- секцию RFQ, ускоряющую ионы до 300 кэВ/н;
- линию транспортировки пучка средней энергии, включающую два дублета квадрупольных линз и банчер;
- две секции ИН DTL с квадрупольным дублетом, обеспечивающие выходную энергию 3,2 МэВ/н;
- линию транспортировки пучка из НИЛAc в Бустер, включающую дебанчер.

НИЛAc включает в себя следующие основные системы:

- ВЧ систему низкого уровня;
- мощную высокочастотную систему на основе твердотельных усилителей на частоте 100,6 МГц и общей импульсной мощностью около 1 МВт;
- вакуумную систему;
- систему электропитания квадрупольных линз;
- систему водяного охлаждения;
- систему автоматизированного управления.

В 2015 году НИЛAc был установлен на рабочем месте в зале инжекционного комплекса - примерно на год позже, чем предусматривалось первоначальным контрактом. Задержка была обусловлена, главным образом, задержкой ремонта здания в месте расположения ускорителя. В 2016 году было продемонстрировано ускорение первого пучка. В 2018 году была проведена серия испытаний по вводу в эксплуатацию НИЛAc с целью измерения энергии пучка и оценки коэффициента пропускания ускоренных пучков от лазерного источника ионов.

2.1.2. Бустер

Сверхпроводящий бустерный синхротрон (Бустер) является инжектором тяжелых ионов в Нуклотрон. Основными задачами Бустера являются:

- накопление ионов при энергии инъекции ($2 \cdot 10^9$ ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$);
- эффективное ускорение не полностью ободранных ионов за счет достижения ультравысокого вакуума в пучковой камере,
- формирование требуемого фазового объема пучка с использованием системы электронного охлаждения;
- ускорение тяжёлых ионов до энергии, требуемой для их эффективной обдирки;
- быстрый вывод ускоренного пучка для его инъекции в Нуклотрон.

Для перевода пучка в Нуклотрон Бустер оборудован соответствующим каналом транспортировки.

Бустер с периметром 211 м и структурой из четырёх периодов размещается внутри яра магнита Синхрофазотрона (Рис. 2.1.2.1). Максимальное поле дипольных магнитов Бустера составляет 1,8 Тл (магнитная жесткость 25 Тл.м), что соответствует энергии ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$ 578 МэВ/н.

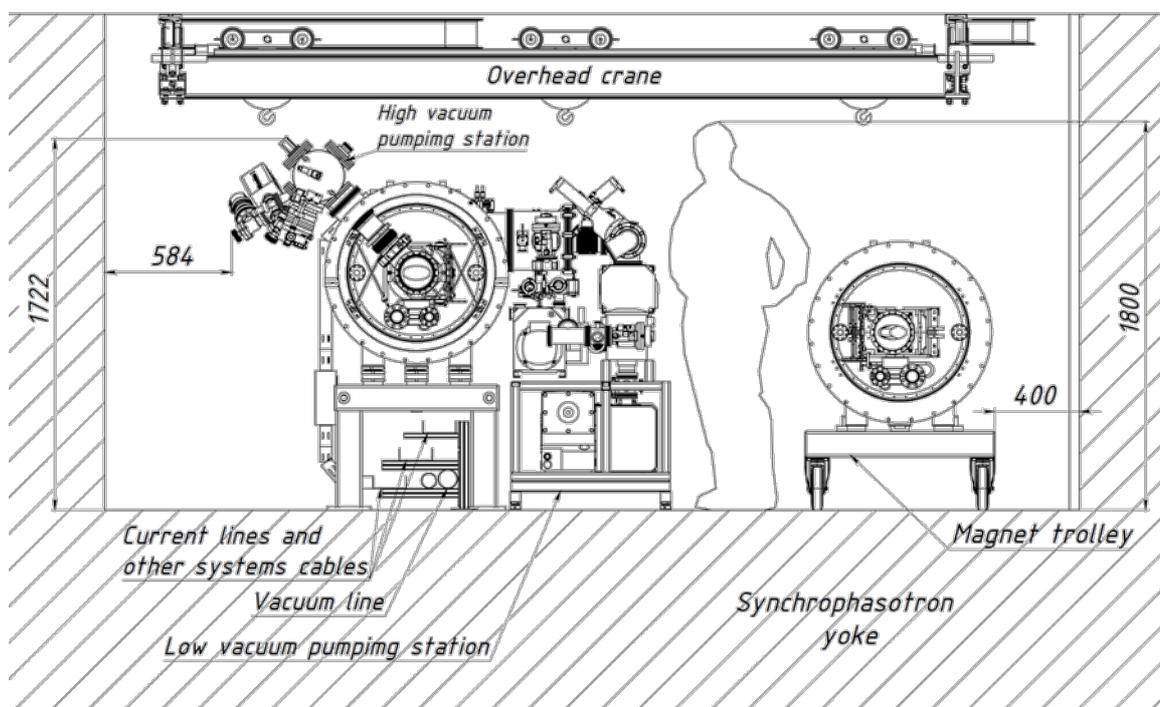


Рис. 2.1.2.1. Положение магнитов Бустера внутри яра магнита Синхрофазотрона

Бустер (Рис. 2.1.2.2) включает в себя перечисленные ниже системы и подсистемы.

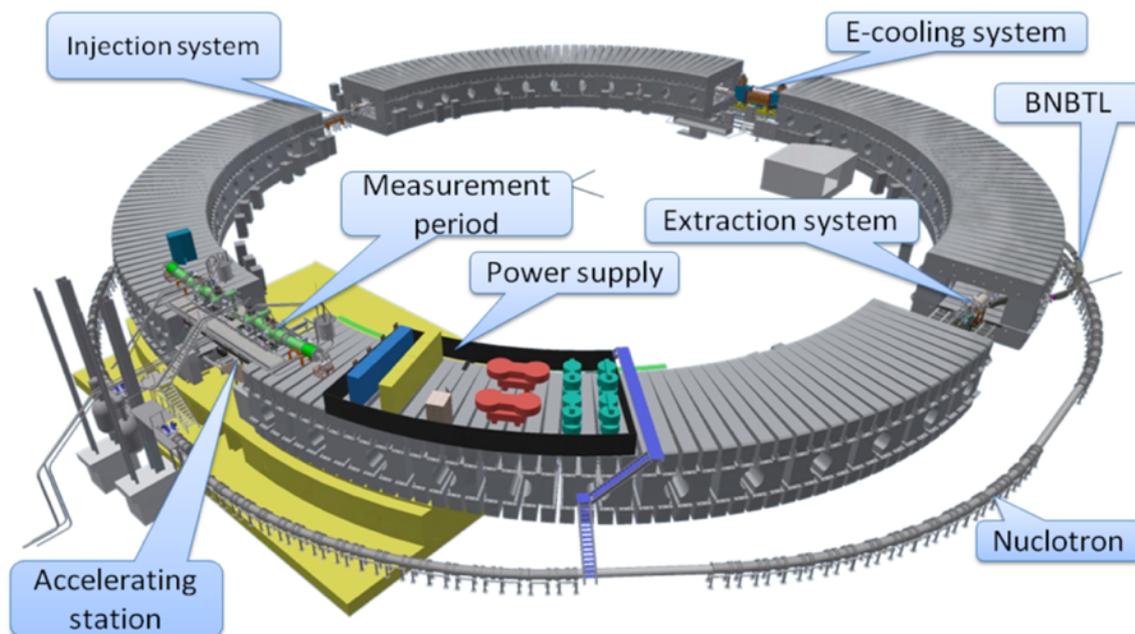


Рис. 2.1.2.2. Размещение основных систем Бустера.

2.1.2.1. Магнитно-криостатная система.

Магнитно-криостатная система включает в себя дипольные магниты, квадрупольные линзы, корректоры, вакуумные камеры, систему криостатирования. Магнитная структура Бустера состоит из 4-х суперпериодов, в каждый из которых входят 5 регулярных периодов и один период, не содержащий дипольных магнитов. Регулярный период включает в себя фокусирующую и дефокусирующую квадрупольные линзы, 2 дипольных магнита и 4 малых свободных промежутка, предназначенных для размещения мультипольных корректоров, коллиматоров и диагностического оборудования. Перечисленные элементы магнитной системы относятся к структурным элементам Бустера. Периоды, не содержащие дипольных магнитов, предназначены для размещения неструктурных элементов. К неструктурным элементам относятся: системы инжекции и вывода пучка, ускоряющей ВЧ системы, системы электронного охлаждения.

2.1.2.2. Система электронного охлаждения

Система электронного охлаждения (СЭО) Бустера предназначена для формирования требуемой величины фазового объема пучка, имеет максимальную энергию электронов 60 кэВ. Система электронного охлаждения разработана и изготовлена в ИЯФ им Г.И. Будкера (г. Новосибирск). Следующие системы входят в состав СЭО: Основная магнитная структура СЭО, Пушка, коллектор, магнитная оптика, Вакуумная система и диагностика СЭО, Система автоматизированного управления СЭО, Системы питания, Инженерные системы.

2.1.2.3. Другие подсистемы Бустера

Системы инжекции, вывода и перевода пучка, пучковые каналы, включающие следующие системы: Систему инжекции, Систему быстрого вывода, Канал инжекции из Бустера в Нуклотрон, Систему медленного вывода, Стенды испытания систем ввода, вывода.

Система питания магнитов Бустера, включающая в себя основной и два добавочных источника питания, источники питания корректоров, систему эвакуации энергии, систему детектирования переходов.

Высокочастотная система, включающая в себя ускоряющие станции и систему управления. Ускоряющие станции Бустера разработаны и изготовлены в ИЯФ им Г.И. Будкера (г. Новосибирск), доставлены в ОИЯИ и испытаны на стенде с имитатором цикла магнитного поля в 2014 г.

Система диагностики, контроля и управления, включающая следующие подсистемы и устройства: Систему измерения магнитного поля dB/dt , циклозадающую систему, пикапы, диагностику, систему коррекции орбиты, системы термометрии, АСУ Бустера, систему измерения орбиты, ионизационный монитор. Кроме того в состав системы входят стенды испытания диагностических и АСУ систем.

Вакуумная система, включающая в себя: систему откачки пучковой камеры, систему откачки изоляционного объема и АСУ вакуумной системы. В состав системы входят также высоковакуумные стенды.

Канал перевода пучка из Бустера в Нуклотрон также относится к системам Бустера и по функциональному назначению объединен с системами ввода и вывода пучков.

Система электропитания и защиты сверхпроводящих структурных магнитов Бустера использует последовательное соединение структурных дипольных магнитов, квадрупольных фокусирующих и дефокусирующих линз Бустера. На принципиально-монтажной силовой схеме системы питания Бустера представлено расположение оборудования (Рис. 2.1.2.3).

Оборудование системы электропитания Бустера (Рис. 2.1.2.4) размещено:

- на площадке №1 в цокольном этаже корпуса №1, где устанавливаются источники питания ИП1, ИП2, ИП3, аппаратура пульта управления, щиты питания РЩ0,69 и РЩ0,4;

- на площадке №2 на магните синхрофазотрона, где располагается сильноточное оборудование коммутаторов АК10, ключей эвакуации энергии К1-4, дросселей РО2 и УТ1 эквивалентной нагрузки;

- в малом зале корпуса №1 - силовоточное оборудование коммутатора АК6.

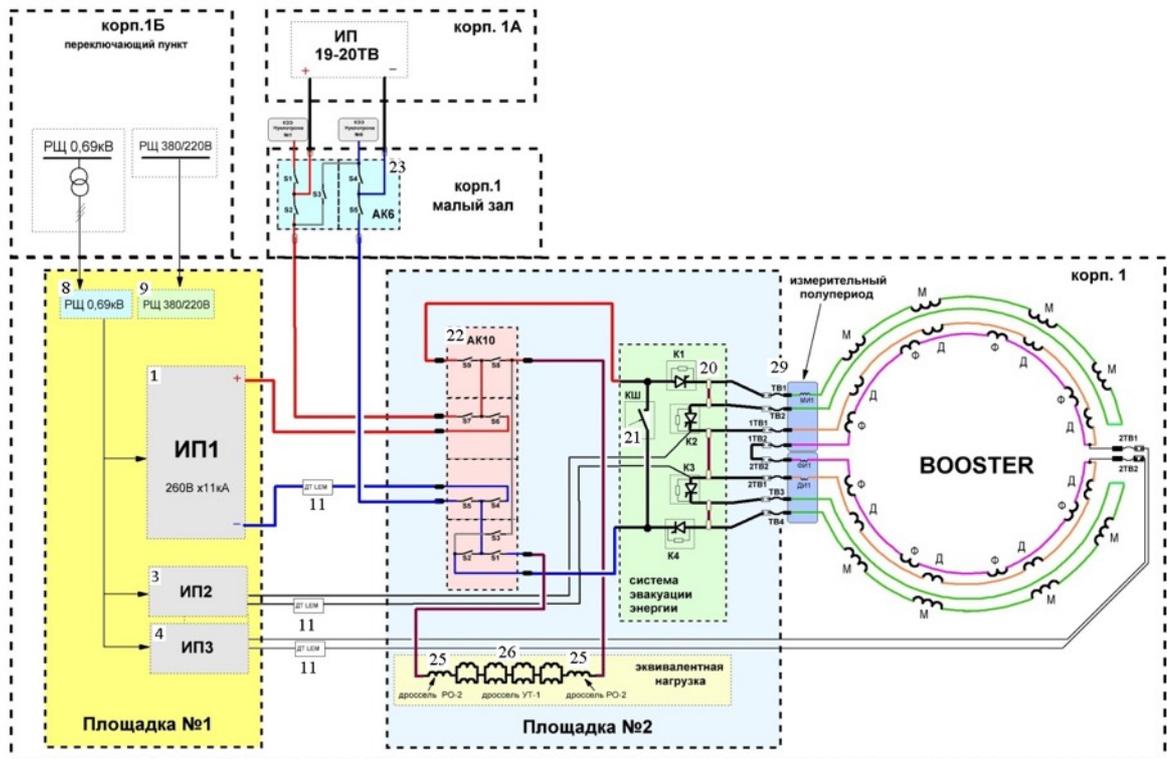
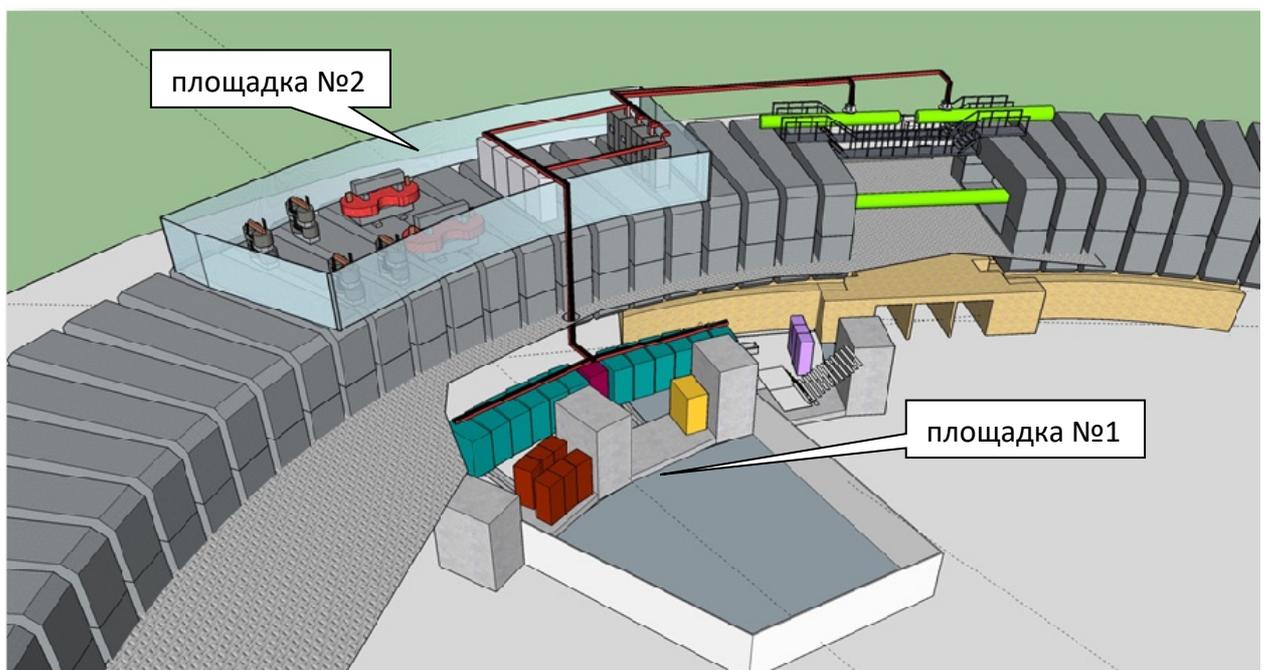


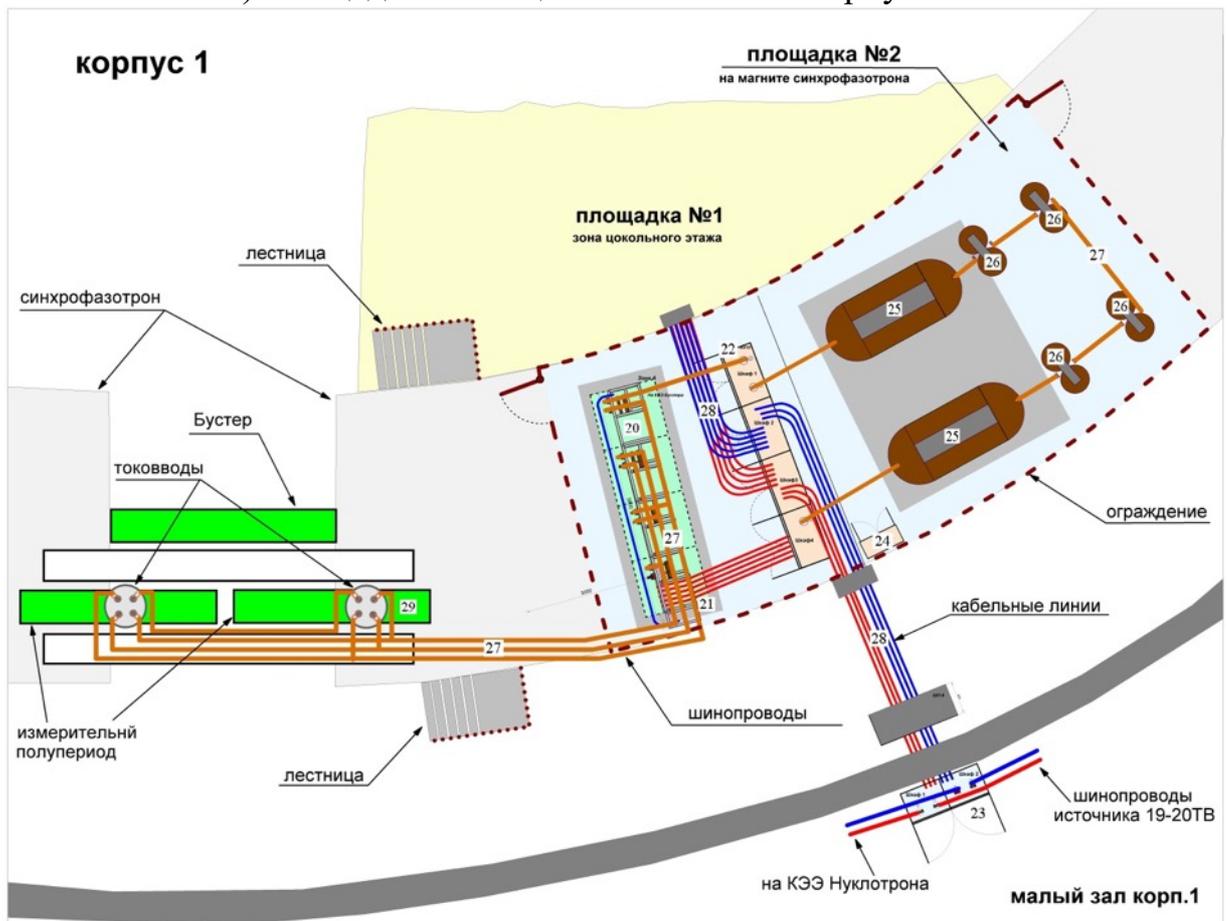
Рис. 2.1.2.3. Принципно-монтажная схема силовых цепей системы электропитания Бустера.



а) общий план



б) площадка №1 в цокольном этаже корпуса №1.



в) площадка №2 на магните синхрофазотрона

Рис. 2.1.2.4. План расположения оборудования системы электропитания Бустера.

В настоящее время завершен монтаж основного оборудования системы электропитания и защиты (Рис. 2.1.2.5). В декабре 2019 г. начаты работы по комплексному тестированию и настройке системы электропитания и защиты при работе на эквивалентную нагрузку.



Рис.2.1.2.5. Источники питания Бустера.

Высокочастотная ускоряющая система Бустера предназначена для ускорения ионов вплоть до золота ($^{197}\text{Au}^{31+}$ референсный ион) с энергии 3.2 МэВ/н до 578 МэВ/н. Бустер может быть использован как первый синхротрон инжекционной цепочки Коллайдера NICA, так и в качестве самостоятельного ускорителя с собственной физической программой.

В кольце бустера устанавливаются 2 одинаковые ускорительные станции (Рис. 2.1.2.6), конструктивно состоящие из модуля резонатора, модуля генератора, системы воздушного охлаждения и стойки управления. Масса ускоряющей станции 1760 кг, из них масса резонатора – 860 кг, генератора – 900 кг. Габариты ускорительной станции в сборе – 1400×1020×1705, отдельно: габариты резонатора – 1400×550×605, генератора – 1275×1020×1100.



Рис. 2.1.2.6. Ускорительные станции Бустера на испытательном стенде ОИЯИ

Ввод системы в эксплуатацию намечен на 2020 год.

Система диагностики, контроля и управления – это комплекс аппаратуры и программного обеспечения, который состоит из нескольких независимых подсистем. Кроме того, система предоставляет вычислительную, сетевую и программную инфраструктуру для разработки и безопасного отказоустойчивого выполнения задач СУ и взаимодействия между ее различными компонентами.

Системы диагностики пучка Бустера обеспечивает:

- измерение среднего тока пучка и интенсивности;
- измерение продольных профилей пучка;
- измерение равновесной орбиты пучка;
- измерение частот бетатронных колебаний пучка.

Автоматизированная система управления и контроля включает:

- измерение криогенных температур в магнитах и линзах Бустера;
- управление корректорами магнитного поля;
- систему задания цикла магнитного поля;
- систему управления питанием инфлекторных пластин инжекции в Бустер.

Инфраструктура АСУ включает:

- компьютерный кластер АСУ;
- сетевая инфраструктура;
- программные сервисы;

- сервисы TANGO;
- архивирование данных – сбор и хранение данных различных систем Бустера;
- мониторинг аппаратуры и программных сервисов СУ;
- журнал операций СУ;
- программное обеспечение пульта Бустера.

Инфраструктура автоматизированной системы управления состоит из распределённой сети компьютеров, соединённых между собой сетью Ethernet. Система реализована в виде трёх уровней — уровень доступа к оборудованию, сервисный уровень и клиентский уровень. Компоненты всех трёх уровней связаны между собой при помощи транспортного протокола, работающего через TCP/IP. АСУ NICA использует в качестве связующего ПО систему TANGO controls.

Разбиение компонентов АСУ на несколько уровней позволяет переместить большую часть вычислительных задач и задач обработки и хранения данных с компьютеров, непосредственно связанных с оборудованием и датчиками, и разместить их в другом месте, поскольку эти задачи уже не зависят от взаимодействия с конкретной аппаратурой. Наиболее эффективным способом организации сервисного уровня является виртуализация. Виртуальные серверы имеют ряд преимуществ по сравнению с физическими:

- простое управление – создание, клонирование, резервное копирование;
- эффективное разделение задач с гарантированным выделением ресурсов;
- высокая безопасность выполнения задач;
- тонкая регулировка выделяемых ресурсов;
- реализация высокой доступности - задачи перебрасываются на другие физические серверы в случае проблем.

Для задач АСУ Бустера используется кластер из нескольких физических серверов Supermicro под управлением системы виртуализации Proxmox, которая является полноценной открытой серверной платформой для создания и управления виртуальной инфраструктурой, включающей в себя виртуальные машины, хранилища, виртуальные сети и кластеры высокой доступности. Физические серверы кластера объединены при помощи быстрой дублированной сети 10 Гбит. Серверы являются одновременно и узлами распределенного сетевого хранилища CEPH и узлами для запуска виртуальных машин АСУ. Высоконадежные SSD диски с надежностью 5 DWPD (drive writes per day) используются в качестве основы для построения высоконадежного распределенного хранилища CEPH, которое используется для хранения и выполнения образов дисков виртуальных серверов.

Завершение монтажа и тестирование элементов системы диагностики и управления намечено на конец 2019 года, ввод системы в эксплуатацию - на 2020 год.

Вакуумная система Бустера состоит из 4-х сверхпроводящих арок, работающих при криогенных температурах, и 4-х прямолинейных участков, находящихся при комнатной температуре (Рис. 2.1.2.7).

На сегодня в ОИЯИ поставлены вакуумные объемы двух прямолинейных участков: ВЧ-станций и системы электронного охлаждения. Оба объема изготовлены в ИЯФ. В ходе монтажа и тестирования системы электронного охлаждения были достигнуты необходимые вакуумные условия на уровне 2×10^{-9} Па.

Прямолинейный промежуток системы инжекции находится в стадии изготовления и в 2019 г. должен быть поставлен в ОИЯИ. Прямолинейных промежуток системы вывода пучка из Бустера вместе с каналом перевода в Нуклотрон изготавливается в ИЯФ. Во всех «теплых» участках в качестве финального метода вакуумной откачки используются титановые распылители в комбинации с ионными насосами. В качестве дополнительных средств откачки используются нераспыляемые геттеры.

Проектирование вакуумных камер сверхпроводящих арок практически полностью завершено, и изготовлены прототипы различных камер, работающие при криогенных температурах. В настоящее время готовятся вакуумные испытания пучковых камер криволинейных магнитов, изготовленных в сотрудничестве с компанией FRAKOTERM (г. Пловдив, Польша). Предполагается, что основным сортом ионов остаточного газа в сверхпроводящих арках будут молекулы и атомы водорода, поэтому вакуумные посты бустера включают в себя насосы на основе нераспыляемых геттеров.

В базовой конфигурации вакуумной системы Бустера будут установлены 8 постов откачки (по два на каждую арку) на основе турбомолекулярных насосов только, что позволит достигнуть давления на уровне 10^{-8} Па. В дальнейшем использование 24 постов откачки, расположенных в сверхпроводящих арках через 9 метров, позволит улучшить вакуумные условия в несколько раз. Достижение необходимых вакуумных условий на уровне 10^{-9} Па предполагается после установки дополнительных сублимационных насосов между всеми магнитами Бустера.

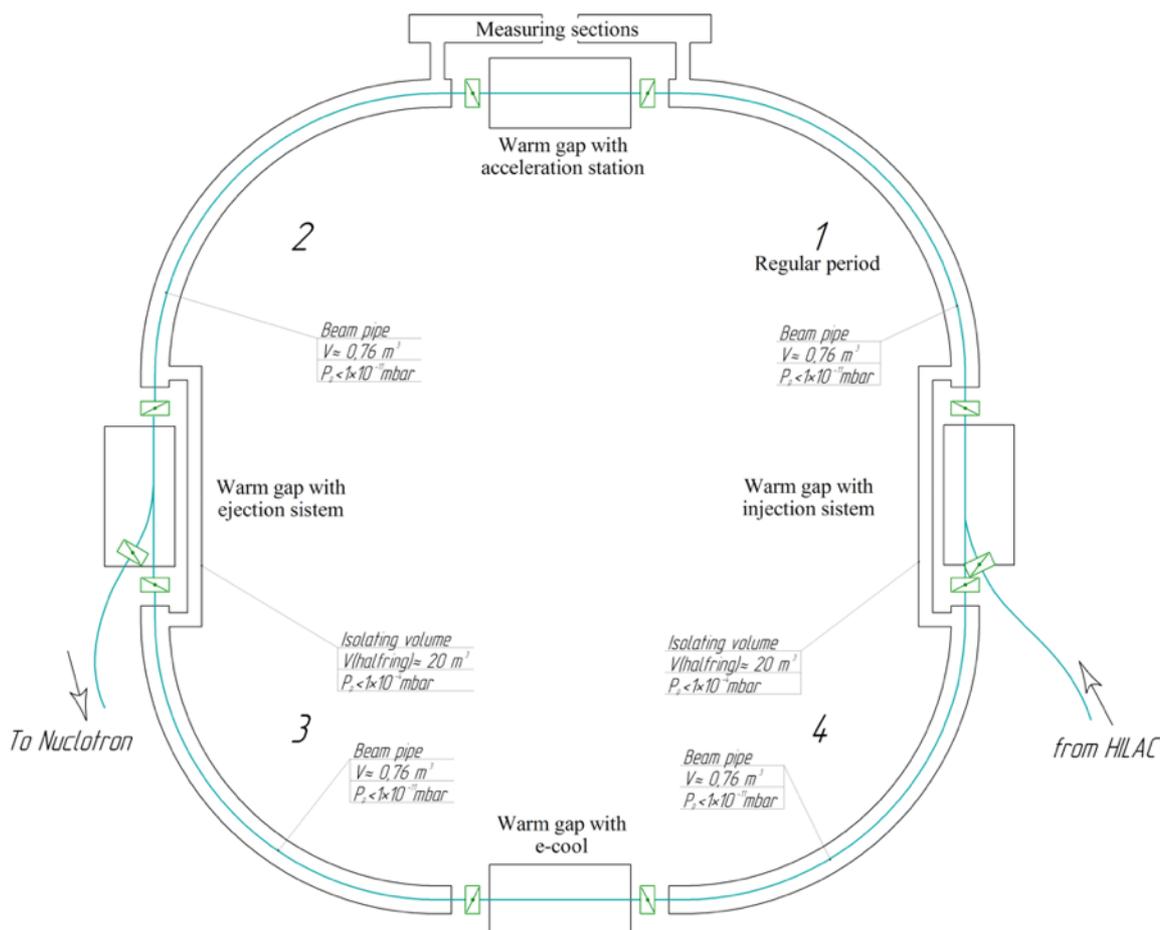


Рис. 2.1.2.7. Схема вакуумных объемов пучковой камеры и криостатов Бустера

2.1.2.4. Статус Бустера

Основные параметры Бустера приведены в таблице 2.1.2.1.

Структура Бустера, рабочий цикл и параметры высокочастотной ускоряющей системы были представлены и одобрены экспертами на заседании NICA MAC 07 июня 2011.

Монтаж Бустера начался в 2016 году с установки системы электронного охлаждения в штатное положение. Работы по выводу ее на проектные параметры в настоящее время находятся в завершающей стадии. Первые элементы магнитной системы Бустера были доставлены в зал ускорителя в сентябре 2018 г.

Таблица 2.1.2.1.

Основные параметры Бустера

1. Общие данные	
Ионы	$^{197}\text{Au}^{31+}$
Энергия инжекции	3,2 МэВ/н
Максимальная энергия	600 МэВ/н
Магнитная жёсткость при инжекции	1,6 Тл·м
Максимальная	25 Тл·м
Периметр	210,96 м
Критическая энергия	3,25 ГэВ/н

2. Структура и магнитные элементы	
Количество суперпериодов	4
Периодов типа ДФО	24
Дипольных магнитов	40
Квадрупольных линз	48
Эффективная длина: Дипольных магнитов	2,2 м
Квадрупольных линз	0,47 м
Индукция в дипольных магнитах: При инжекции	0,11 Тл
Максимальная	1,8 Тл
Градиент в линзах Φ при инжекции	1,28 Тл/м
Максимальный	21,01 Тл/м
Градиент в линзах D при инжекции	-1,31 Тл/м
Максимальный	-21,48 Тл/м
Радиус кривизны в дипольных магнитах	14,09 м
Сагитта в дипольных магнитах	0 мм
Количество длинных прямолинейных секций	4
Длина большой прямолинейной секции	7 м
Длины малых прямолинейных секций	0,7/0,85/0,95 м
3. Динамические характеристики структуры и пучка	
Частоты бетатронных колебаний: Q_x	4,8
Q_z	4,85
Хроматичность: $\Delta Q_x/(\Delta p/p)$	-5,1
$\Delta Q_z/(\Delta p/p)$	-5,5
Коэффициент уплотнения орбит	0,05
Амплитуда скорректированной орбиты	4 мм
Аксептанс: Горизонтальный	150 π мм·мрад
вертикальный	57 π мм·мрад
Эмиттанс пучка при инжекции $\varepsilon_{x,z}$	15 π мм·мрад
В конце ускорения ε_x	< 11 π мм·мрад
В конце ускорения ε_z	< 1,5 π мм·мрад
Импульсный разброс при инжекции	$\pm 10^{-3}$
Максимальный	$\pm 2,3 \cdot 10^{-3}$
В конце ускорения	$\pm 2,2 \cdot 10^{-4}$
Период обращения при инжекции	8,5 мкс
В конце ускорения	0,89 мкс

В соответствии с первоначальным планом завершение сборки и начало тестирования всех систем Бустера было намечено на конец 2018 г. Задержка длительностью примерно год обусловлена двумя основными причинами:

- задержкой в изготовлении мониторов положения пучка фирмой-производителем более чем на полгода;
- задержкой в сборке дублетов линз, вызванной непредвиденными работами по юстировке мониторов положения пучка с нарушением чистоты высоковакуумного объема пучковой камеры и ее последующим восстановлением;

– необходимостью ремонта и повторных испытаний нескольких обмоток квадрупольных линз, вызванной нарушениями технологического процесса при их изготовлении.

Завершение монтажа бустера намечено на март 2020 г. Первый сеанс Нуклотрона с новой тяжелоионной инжекционной цепочкой намечен на конец 2020 г.

В настоящее время все магниты Бустера изготовлены, протестированы и установлены в штатное положение внутри туннеля Бустера (Рис. 2.1.2.8).



Рис. 2.1.2.8. Секции дипольных магнитов в канале.

Квадрупольные магниты устанавливаются в вакуумные кожухи парами. На Рис. 2.1.2.9 представлен дублет линз Бустера в процессе сборки полуярм.

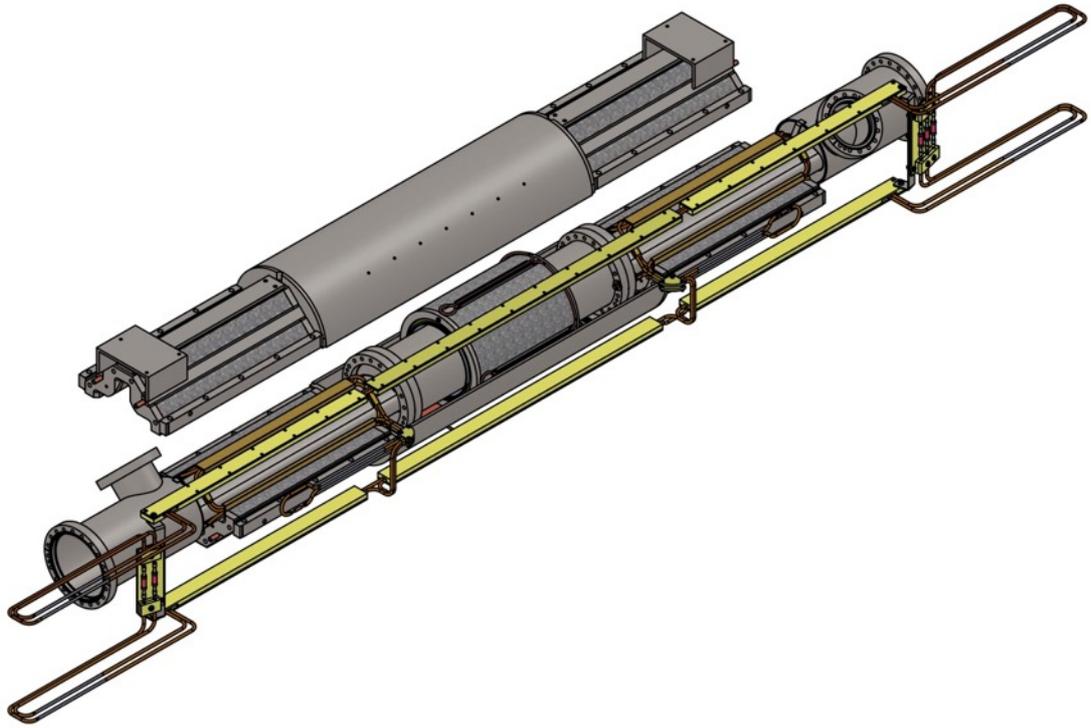


Рис. 2.1.2.9. Дублет линз Бустера NICA в процессе сборки полуярем, в промежутке между линзами расположен дипольный корректирующий магнит.

Соединение модулей магнитной системы осуществляется в передвижной чистой зоне (Рис. 2.1.2.10).

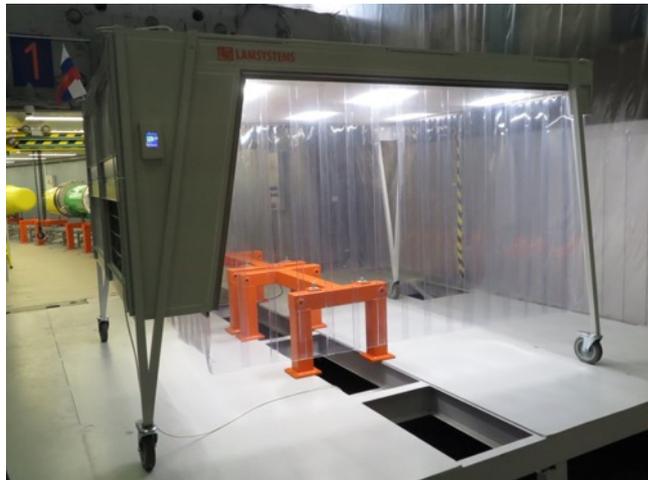


Рис. 2.1.2.10. Передвижная чистая зона.

Система электронного охлаждения смонтирована в 4-м длинном прямолинейном промежутке магнитно-криостатной системы Бустера (Рис. 2.1.2.11). В настоящее время находится на завершающей стадии наладки.

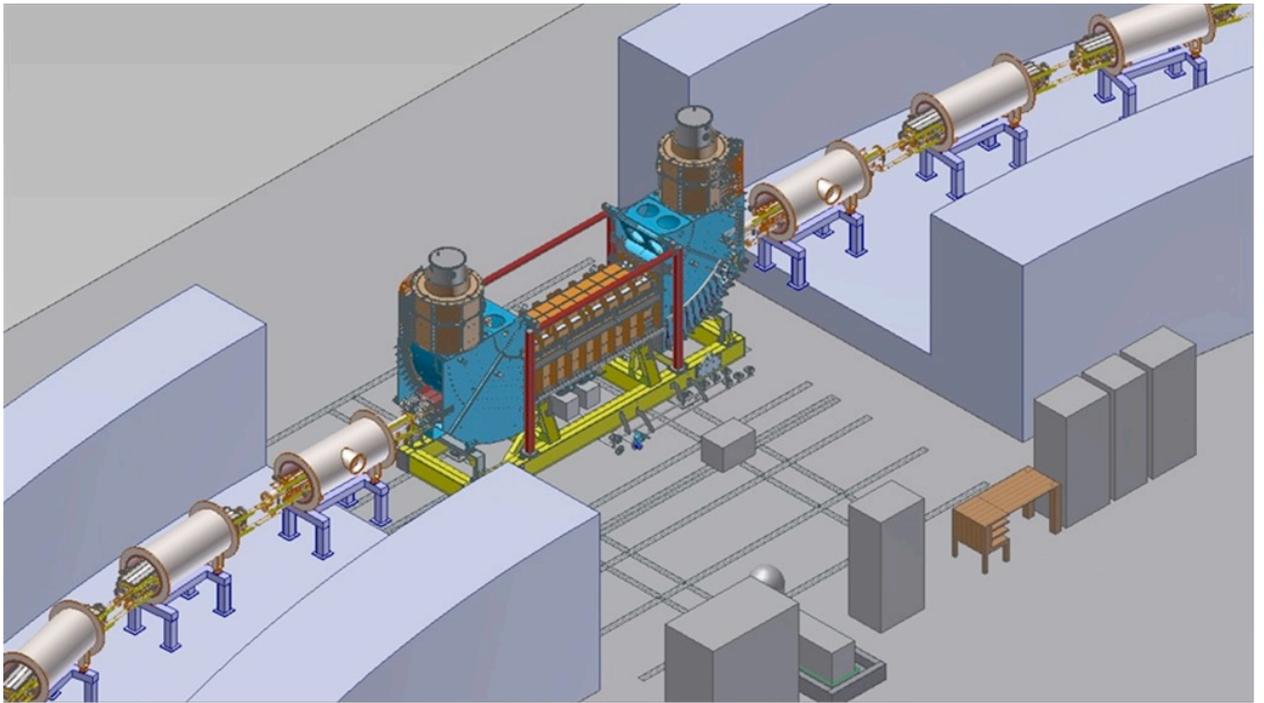


Рис. 2.1.2.11. Четвертый прямолинейный участок бустера с Системой Электронного Охлаждения.

Основные элементы системы ввода пучка размещаются в первом прямолинейном промежутке Бустера (Рис. 2.1.2.12).

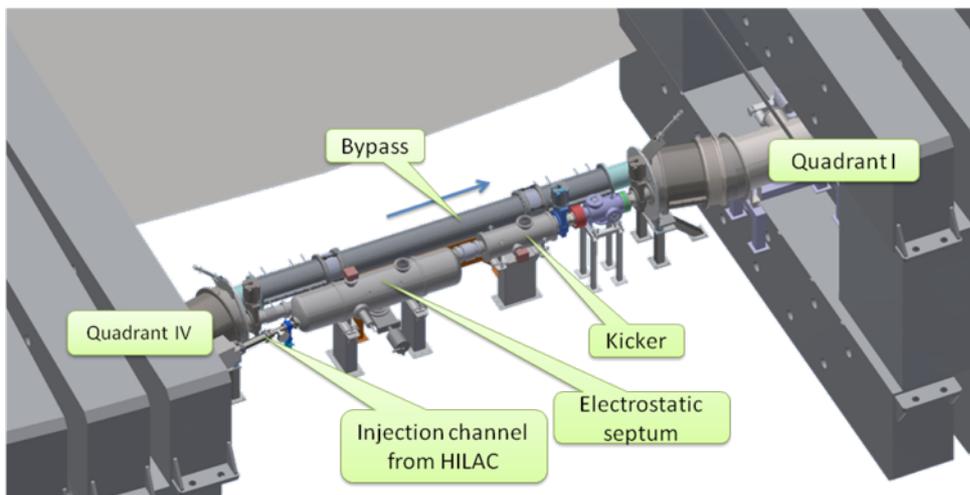


Рис. 2.1.2.12. Размещение элементов системы ввода пучка.

В базовой конфигурации оборудования Бустера устанавливаются электростатический септум ESS и инфлекторные пластины IP2 (Рис. 2.1.2.13), изготовленные компаниями Cryosystems/HiVac и BEVATECH/PINK companies соответственно.



Рис. 2.1.2.13. Электростатический септум ESS в процессе изготовления (слева) и инфлекторные пластины IP2 (справа).

Монтаж системы ввода пучка будет завершен в 2019 г., ввод в эксплуатацию намечен на начало 2020 г.

Система вывода пучка предназначена для «обдирки» ионов золота, ускоренных в Бустере и их перевода в канал транспортировки пучка в Нуклотрон. Ее основные элементы (ударный магнит – кикер, две секции септума) располагаются в третьем прямолинейном промежутке Бустера (Рис. 2.1.2.14).

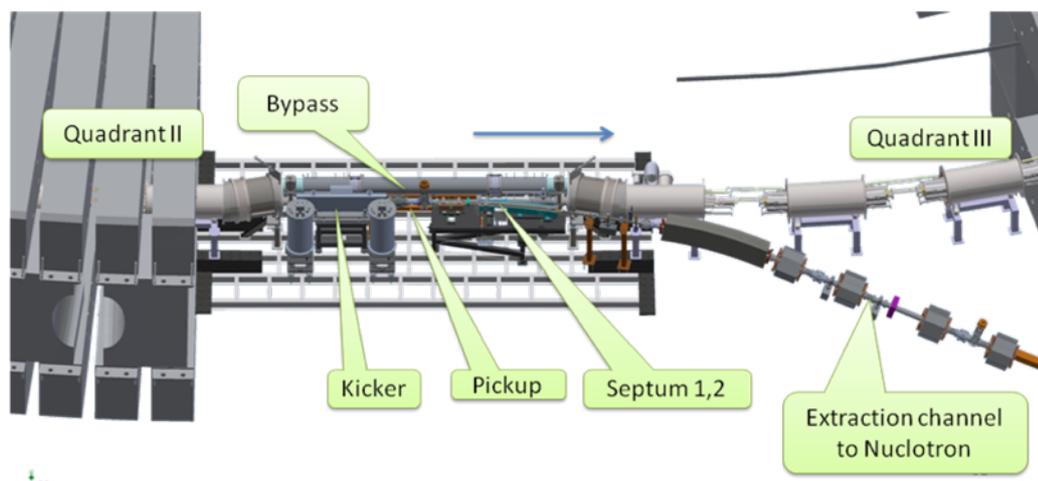


Рис. 2.1.2.14. Размещение элементов системы вывода пучка.

Система и канал транспортировки пучка в Нуклотрон изготавливаются в ИЯФ им. Будкера, срок поставки в ОИЯИ – март 2020 года. Монтаж и ввод в эксплуатацию системы вывода и канала транспортировки намечен на 2020 год.

Канал транспортировки пучка из НЛАС в Бустер смонтирован (Рис. 2.1.2.15), проводятся работы по его тестированию. Ввод канала в эксплуатацию намечен на 2020 год..



Рис. 2.1.2.15. Элементы канала транспортировки пучка из НИЛАС в Бустер в процессе монтажа.

Канал транспортировки пучка Бустер-Нуклотрон (Рис. 2.1.2.16) имеет сложную трехмерную геометрию и транспортировка пучка в нем производится по горизонтали и вертикали одновременно. Трасса канала транспортировки состоит из основного тракта перевода ионов в Нуклотрон и ответвления для сброса нецелевой зарядности. Ионно-оптическая система канала состоит из 5-и дипольных магнитов, 8-и квадрупольных линз, септумного магнита для сброса ионов нецелевой зарядности и 3-х двухкоординатных дипольных корректоров. Суммарная длина канала составляет 25,5 м. Азимутальный размер канала составляет приблизительно 45° , что соответствует инжекции пучка через один суперпериод (октант) Нуклотрона от точки вывода из Бустера.

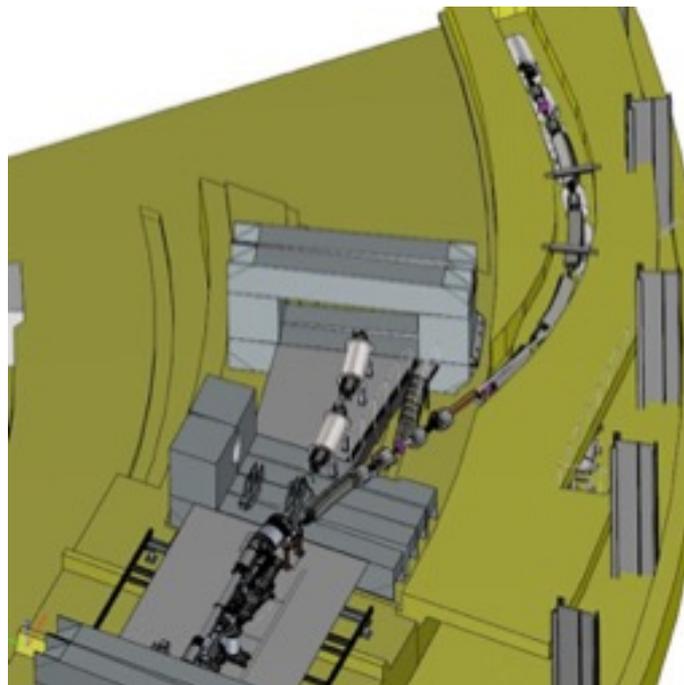


Рис. 2.1.2.16. Внешний вид участка быстрого вывода пучка из Бустера и канала транспортировки пучка Бустер-Нуклотрон.

Вакуумная система канала Бустер-Нуклотрон обеспечивает достижение рабочего вакуума порядка 10^{-9} Торр вдоль ионопровода канала, за исключением начальной секции канала с дифференциальной откачкой, в которой достигается давление остаточного газа на уровне вакуума кольца Бустера - 10^{-11} Торр.

Канал изготавливается в ИЯФ им. Будкера. В соответствии с договором срок поставки – март 2020 года. Монтаж и ввод канала в эксплуатацию намечен на лето и осень 2020 г.

2.1.3. Нуклотрон

Сверхпроводящий синхротрон Нуклотрон является основной ускорительной установкой комплекса, обеспечивающей пучками ионов от протонов до ядер золота и поляризованными пучками легких ядер экспериментальные установки комплекса NICA. Максимальное поле дипольных (поворотных) магнитов, соответствующее режиму стабильной долговременной работы, составляет 1,8 Тл (магнитная жесткость 38,5 Тл·м). Это соответствует кинетической энергии протонов 10,7 ГэВ, дейтронов и легких ионов (с отношением зарядового числа к массовому $Z/A = 1/2$) – 4,95 ГэВ/н, для ионов с $Z/A = 1/3$ (например, Хе с $A = 124$, $Z = 42$) – 2,6 ГэВ/н, и 3,8 ГэВ/н для ядер золота.

2.1.3.1. Режимы работы Нуклотрона

Реализованы и предусмотрены следующие режимы работы Нуклотрона:

1) Ускорение тяжелых ионов в Нуклотроне для экспериментов на фиксированных мишенях; производится после их ускорения в Бустере до энергии 600 МэВ/н (магнитное поле поворотных магнитов 0,46 Тл), последующей полной обдирки на выходе в канал Бустер-Нуклотрон, транспортировки и инъекции. Частицы ускоряются на первой кратности ВЧ до энергии эксперимента, пучок адиабатически разгруппировывается и системой медленного напряжения переводится в канал транспортировки пучка в корпус №205. Длительность медленного вывода – $5 \div 10$ с. Полная длительность цикла – $15 \div 20$ с.

2) Ускорение тяжелых ионов для накопления в Коллайдере; подготавливается и производится так же, но до момента ввода пучка на энергии накопления в Коллайдере, когда предварительно за счет адиабатического роста ВЧ напряжения формируется сгусток требуемой для перевода длины. Затем система быстрого (однооборотного) вывода, синхронно с системой инъекции Коллайдера, направляет сгусток ионов в канал транспортировки пучка из Нуклотрона в Коллайдер. Полная длительность цикла 4,02 с.

3) Ускорение поляризованных протонов и дейтронов для экспериментов на фиксированных мишенях осуществляется после транспортировки из ускорителя ЛУ-20 и инъекции в Нуклотрон при энергии 5 МэВ/н (магнитное поле поворотных магнитов примерно 0,03 Тл для дейтронов и 0,015 для протонов). Процедура ускорения и вывода та же, что и для тяжелых ионов в экспериментах на фиксированных мишенях (см. п.1).

4) Ускорение поляризованных пучков протонов или дейтронов для накопления в Коллайдере; отличается от описанной в п.3 только схемой вывода. В этом случае используются быстрый вывод по схеме п.2.

5) Ускорение различных типов ионов для проведения экспериментов на внутренней мишени; производится в соответствии с режимами п.п.1 или 2 в зависимости от вида ускоряемых ионов. Вывод пучка при этом не осуществляется. Длительность «стола» магнитного поля - до 300 с.

6) Ускорение ионов для накопления в Коллайдере при его работе в несимметричной моде (частицы в кольцах Коллайдера отличаются массой и/или зарядом); производится для каждого из двух видов частиц в режимах, описанных в п.п. 2 или 4, с последующим накоплением в разных кольцах.

Для обеспечения всех необходимых режимов работы Нуклотрон оборудован двумя инжекционными цепочками:

1. лазерный источник и источник поляризованных протонов и дейтронов линейный ускоритель ЛУ-20;
2. источник тяжелых ионов, линейный ускоритель тяжелых ионов НПЛАС, синхротрон Бустер.

2.1.3.2. Основные системы Нуклотрона

Нуклотрон состоит из перечисленных ниже основных систем.

1. Канал транспортировки пучка из ЛУ-20 в Нуклотрон и система инъекции.
2. Сверхпроводящая магнитно-криостатная система.
3. Вакуумная система изоляционного и пучкового объемов.
4. Система питания магнитов Нуклотрона.
5. Система защиты и эвакуации энергии из сверхпроводящих магнитов.
6. Высокочастотная ускоряющая система.
7. Автоматизированная система управления.
8. Система диагностики.
9. Система стохастического охлаждения.
10. Система инъекции в Нуклотрон из Бустера.
11. Система контроля и управления поляризацией частиц.
12. Система медленного вывода пучка из Нуклотрона.
13. Система быстрого вывода пучка из Нуклотрона.
14. Канал вывода и транспортировки выведенного пучка в корпусе №205 к экспериментальным установкам с фиксированной мишенью; элементы магнитной системы, системы питания, диагностики.
15. Система быстрого однооборотного вывода пучка в каналы транспортировки пучков из Нуклотрона в Коллайдер.

Основные системы Нуклотрона были созданы в рамках проекта «Модернизация магнитной системы Синхрофазотрона». Нуклотрон введен в эксплуатацию в 1993 г. В процессе создания комплекса NICA проводится модернизация ряда его существующих систем и создание новых, необходимых для работы в составе нового ускорительного комплекса.

Ниже приведено краткое описание основных систем Нуклотрона, указаны выполненные и запланированные работы по их модернизации в рамках реализации базовой конфигурации комплекса NICA.

Канал транспортировки пучка ЛУ-20 в Нуклотрон и система инжекции предназначены для транспортировки пучка из линейного ЛУ-20 ускорителя в Нуклотрон, согласования пучка со структурными функциями Нуклотрона в точке инжекции, уменьшения импульсного разброса частиц пучка и формирования требуемой длительности импульса инжекции.

Канал имеет следующие основные элементы и системы: магнитную систему, 10 квадрупольных линзы и два дипольных поворотных магнита, систему вакуумной откачки на основе турбомолекулярных насосов, импульсный дефлектор, разгруппирователь (дебанчер) с системой ВЧ питания, систему диагностики пучка, включающую 4 проволочных флофилометра, быстрый трансформатор тока и цилиндр Фарадея, систему управления.

С 2015 года была проведена полная замена систем питания всей магнитной оптики канала. Проведена замена первого триплета линз канала на новые (прежние оставались от канала синхрофазотрона с постоянным питанием), включая вакуумную камеру ионпровода и оборудование системы откачки всего канала. Изготовлен и проходит испытания новый дебанчер и его система ВЧ питания.

Сверхпроводящая магнито-криостатная система включает структурные элементы дипольные, квадрупольные и корректирующие СП-магниты, и встроенные элементы-устройства -инжекции пучка две ускоряющие станции ВЧ напряжения, устройства системы медленного вывода, теплый прямолинейный промежуток и устройства системы диагностики пучка. Магнитная структура состоит из 8 суперпериодов, в каждый из которых входят 3 регулярных периода типа ФОДО и один период, не содержащий дипольных магнитов (большой линейный промежуток). Магнитная структура состоит из 96 дипольных и 64 квадрупольных СП-магнитов.

Вакуумная система изоляционного и пучкового объемов состоит из двух подсистем - изоляционного объема и высоковакуумной пучковой камеры.

Допустимое давление в изоляционном вакуумном объеме 10^{-3} Па. Необходимое разрежение обеспечивается паромасленными насосами.

Высоковакуумная пучковая камера Нуклотрона изготовлена из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 0,5 мм по технологии, предписанной для высоковакуумных изделий. Восемь участков камеры длиной по 1,5 м каждый (криогенные насосы) имеют рабочую температуру 4,5 К – 5 К. Шесть участков длиной по 3 м каждый (ускоряющие станции) имеют температуру от 80 К до 300 К. На остальных участках общей протяженностью около 200 м температура стенки камеры изменяется от 10 К до 30 К в зависимости от изменения параметров цикла магнитного поля в Нуклотроне. На этих участках камера охлаждается за счет теплового контакта её стенок с железным ярмом магнитов и линз регулярной структуры ускорителя. Сечение камеры имеет форму эллипса с осями 110 мм и 55 мм.

Вакуумная система пучковой камеры Нуклотрона созданная в ходе реализации проекта модернизации Нуклотрона, обеспечивает среднее по орбите пучка давление остаточного газа 10^{-7} Па. В процессе эксплуатации конфигурация системы откачки была оптимизирована, а ее АСУ была обновлена.

Система питания магнитов Нуклотрона обеспечивает прецизионное воспроизведение опорной функции (зависимости тока от времени) в трех принципиально различных режимах:

- стабилизация постоянного тока, при напряжении на нагрузке близком к нулю;
- рост или уменьшение тока с постоянной первой производной по времени и при напряжении в интервале от нуля до нескольких сотен вольт;
- рост или уменьшение тока с постоянной второй производной.

Система формирования функции роста и спада магнитного поля в структурных магнитных элементах Нуклотрона строится на основе схемы питания последовательно соединенных структурных магнитных элементов Нуклотрона. Главной особенностью установки является то, что работа и поддержание токов должно обеспечиваться в диапазоне от 50 А до 6000 А в сверхпроводящей высокоиндуктивной нагрузке. Такая задача является уникальной в общемировой практике.

Система питания была существенно модернизирована за последние годы. Получено новое качество и стабильность тока питания магнитной системы. Точность поддержания и повторяемость токов достигает $1 \cdot 10^{-4}$ в широком

диапазоне рабочих значений, что является на сегодня практическим пределом для ускорительных систем в мире.

Система защиты и эвакуации энергии из сверхпроводящих магнитов Нуклотрона производит безопасный вывод энергии, накопленной в магнитах, в случае обнаружения перехода обмотки одного из магнитов в нормально-проводящее состояние. Система основана на балластном резисторе, установлении снаружи криостата совместно с коммутирующим устройством, замыкающим цепь группы магнитов на этот резистор в случае срыва сверхпроводимости. Система детектирования нормальной фазы в сверхпроводящем кабеле обмотки основана на измерении разбаланса в мостовой схеме включающей различные элементы или части обмоток магнитов.

Были изменены схемы и подходы к детектированию нормальной зоны в элементах Нуклотрона, заменены все кабельные линии и датчики переходов обмоток магнитов на новые, спроектированные с учетом большого опыта эксплуатации и современного подхода.

Высокочастотная ускоряющая система Нуклотрона предназначена для захвата, ускорения частиц и формирования сгустков перед переводом в Коллайдер, а так же роспуска сгустков частиц на столе магнитного поля для медленного вывода или при экспериментах на внутренней мишени. ВЧ система позволяет осуществлять перегруппировку сгустков на промежуточном столе магнитного поля с изменением кратности частоты ВЧ напряжения для перепуска сгустков из Нуклотрона в Коллайдер.

Автоматизированная система управления Нуклотрона основана на технологии Tango Controls и включает в себя подсистемы, соответствующие основным системам ускорителя.

Для обеспечения безопасной работы комплекса используется Автоматическая система радиационного контроля (АСРК) и система блокировок и сигнализации (СБИС). Самостоятельная система управления используется для контроля за вакуумным оборудованием.

С 2013 года продолжается начатое ранее коренное обновление АСУ кольца. Заменена большая часть сложного электронного оборудования во многих подсистемах. В частности, существенно модернизирована система управления медленным выводом пучка для улучшения характеристик растяжки, подсистемы инъекции пучка, и др. Для обеспечения безотказной работы Нуклотрона в комплексе NICA понадобится модернизация еще ряда подсистем, таких как управление законом изменения ВЧ, автоматизация изменения режимов работы, управление системами инъекции из Бустера и

переводом в кольцо Коллайдера, система синхронизации Нуклотрона для работы в рамках глобального тайминга всего комплекса на основе технологии White Rabbit.

Система диагностики Нуклотрона включает в себя подсистемы термометрии, диагностики параметров циркулирующего и выведенного пучка, измерения и коррекции замкнутой орбиты (система «орбита»).

Система диагностики циркулирующего пучка предназначена для измерения структуры, интенсивности и положения пучка. Положение в поперечной плоскости измеряется мониторами положения пучка (пикап-электродами). Ток пучка - трансформаторами тока, а профиль - ионизационным монитором. Все устройства частично обновлены. Развита система мониторинга потерь частиц, введена система измерения частоты поперечных колебаний частиц (Q-meter). Ионизационный профилометр на основе микроканальных пластин коренным образом обновлен и позволяет надежно регистрировать параметры пучков с малыми интенсивностями, при которых другие методы диагностики не справляются.

Система стохастического охлаждения (ССО) Нуклотрона предназначена для тестирования элементов системы стохастического охлаждения Коллайдера NICA и для охлаждения продольной степени свободы пучка, циркулирующего в Нуклотроне (ССО Нуклотрона одноканальная).

Пикап и кикер, изготовленные в Исследовательском центре Юлиха (Германия), имеют одинаковую конструкцию: шестнадцать колец каждое из которых имеет 8 петель для снятия сигнала, собранные в единую конструкцию. Сигналы с петель, расположенных на одном азимуте, суммируются с помощью соединительных плат. Сигналы с каждой из плат высокочастотными кабелями выводятся через фланец вакуумной камеры, в которой размещается вся сборка. Вакуумная камера кикера расположена в «теплом» прямолинейном промежутке, вакуумная камера пикапа размещена внутри криостата в прямолинейном промежутке диаметрально противоположном «теплому». ССО также претерпела частичное обновление, главным образом со стороны диагностического измерительного оборудования.

Система инъекции в Нуклотрон из Бустера, предназначенная для быстрого (однооборотного) ввода пучка ионов, поступающего из канала транспортировки состоит из магнита Ламбертсона и импульсного ударного магнита – кикера, с соответствующими подсистемами питания.

Для питания устройств системы инъекции служат источники питания основной обмотки и корректирующего витка магнита Ламбертсона, а также источники питания модулей ударного магнита, размещаемые в

непосредственной близости от участка инъекции. Питание обмоток магнита Ламбертсона постоянное. Ударный магнит работает в импульсном режиме с частотой повторения импульсов — 0,25 Гц.

Магнит Ламбертсона представляет собой дипольный магнит с двумя апертурами: областью ввода пучка и областью циркуляции пучка, имеющий трапецеидальную форму сечением 134x70 мм². В области ввода пучка сверхпроводящими обмотками создается горизонтальное магнитное поле до 1,1 Тл, отклоняющее инжектируемый пучок. Область циркуляции пучка отделена перегородкой (септумом) от области сброса, магнитное поле в области циркуляции минимально. Для понижения уровня рассеянного магнитного поля в области циркуляции вблизи перегородки устанавливается сверхпроводящий корректирующий виток, работающий от внешнего источника питания.

Пучковая вакуумная камера, устанавливаемая внутри магнита Ламбертсона, имеет сложную конфигурацию с двумя камерами для циркулирующего и инжектируемого пучков. Стенки вакуумной камеры несколько уменьшают аксептанс Нуклотрона. Для его восстановления к исходным значениям при инъекции пучка из линейного ускорителя ЛУ-20 предусмотрена возможность смещения выхода магнита Ламбертсона на 15 мм.

Ударный магнит состоит из двух секций, представляющей собой две пары проводников, устанавливаемых внутри вакуумного бокса параллельно оси движения пучка. Полная длина ударного магнита – 2 м, номинальное магнитное поле-78 мТл.

Источники питания ударного магнита импульсные, построены на основе формирующей линии частота повторения импульсов – 0,25 Гц, максимальная амплитуда импульса тока – 25 кА. Длительности переднего и заднего фронтов – не более 500 нс. Длительность плато импульса – 500 ÷ 700 нс.

Завершено проектирование основных элементов системы инъекции. Заканчивается изготовление прототипов и электротехнических моделей. По результатам испытаний будет заказываться изготовление рабочих элементов.

Система контроля и управления поляризацией частиц включает:

- устройства для измерения степени поляризации пучка, установленные в канале перевода пучка из ЛУ-20 в Нуклотрон, в «теплом» прямолинейном промежутке и в канале вывода пучка в корпус 205;

- систему управления ориентацией спина, представляющую собой элементы магнитной оптики, расположенные в канале перевода пучка из ЛУ-20 и непосредственно на кольце Нуклотрона.

Идут работы по проектированию и изготовлению прототипов элементов магнитной оптики для управления поляризацией. Работы по изготовлению и запуску полномасштабной системы планируется провести в 2023 году.

Система медленного вывода (МВ) пучка из Нуклотрона предназначена для равномерного по времени вывода пучка, циркулирующего в Нуклотроне на «столе» магнитного поля, и его перевода в канал транспортировки к экспериментальным установкам в здании № 205 и малом измерительном павильоне. Для вывода частиц используется управляемое увеличение амплитуды поперечных колебаний частиц в Нуклотроне за счет смещения частот поперечных колебаний в область нелинейного резонанса $Q_x=22/3$ и шумового воздействия на циркулирующий пучок с помощью диагностического кикера. Медленный вывод пучка выполнен по двухступенчатой схеме, расчетная эффективность которой составляет не менее 95%: первая ступень электростатический септум, отклоняющий частицы в горизонтальной плоскости; на второй ступени используется магнит Ламбертсона (МЛ), обеспечивающий подъем пучка в вертикальной плоскости до уровня каналов транспортировки в экспериментальных залах.

Система МВ в значительной степени реконструирована. Заменены источники питания резонансных линз раскачки, заменена система управления раскачкой с обратной связью. Введен дополнительный канал контроля за равномерностью растяжки с помощью возбуждения управляемого ВЧ шума кикера. В результате получена рекордная равномерность растяжки выведенного пучка тяжелых ионов в ускорительном сеансе №55.

Канал транспортировки из Нуклотрона в №205 корпус служит для перевода пучка из Нуклотрона в экспериментальный зал корпуса № 205 и Измерительный павильон №1 (Рис.2.1.2.17), где размещаются экспериментальные установки ВМ@N и установки для прикладных исследований. Длина канала от выхода пучка из Нуклотрона до ВМ@N составляет около 170 м. До установки ВМ@N общая длина воздушных промежутков более 40 м. По всей длине канала вывода пучка давление составляет 10^{-3} мТор. Существующий канал не соответствует требованиям для экспериментов на выведенных пучках ионов из Нуклотрона и должен быть модернизирован. Протяжённость вакуумной камеры канала, которая должна быть модернизирована составляет 110 м. Диаметр вакуумной камеры канала равен 196 мм. Ионопровод также должен быть оснащен средствами диагностики пучков, работающих как в режиме настройки канала, так и в режиме реального времени при измерении параметров пучков.

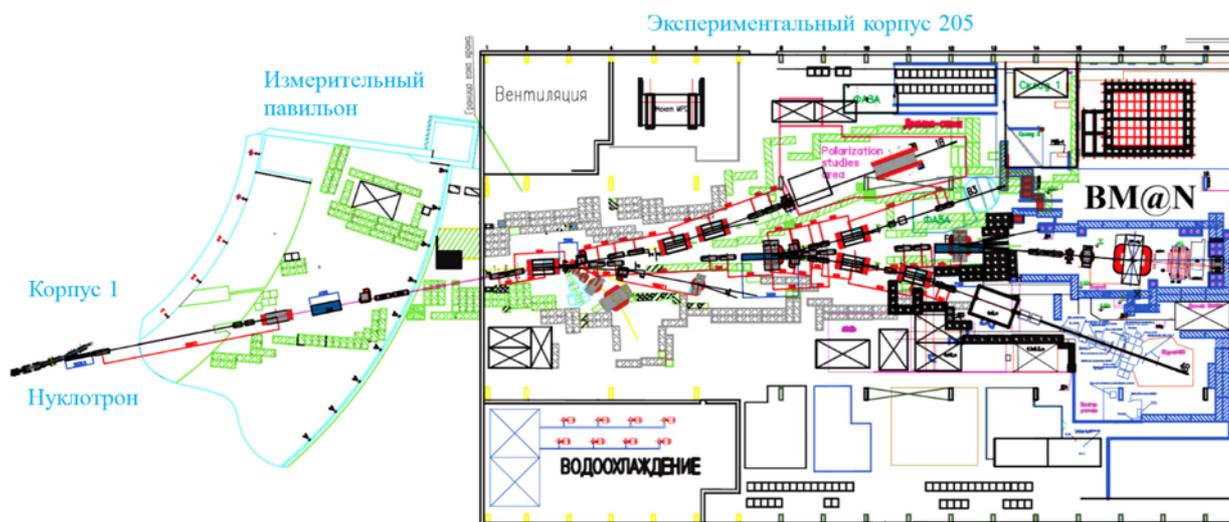


Рис.2.1.2.16. Схема каналов транспортировки на выведенных пучках Нуклотрона.

Ионопровод проходит через 27 элементов магнитной оптики, таких как квадрупольные линзы типа K100, K200, отклоняющие магниты типа СП-12А, СП-94, СП-40, СП-12 и корректирующие магниты. Вакуумную камеру канала и систему диагностики пучков изготавливает Белгородский государственный университет, монтаж вакуумного и диагностического оборудования запланирован в 2020 г.

Особенностями проектируемой системы питания магнитных элементов (МЭ) являются большая сила тока (от 600 А до 4000 А), относительно невысокое напряжение (от 75 В до 230 В).

Система электропитания состоит из следующих элементов: питающее распределительное устройство РУ-6кВ подстанции «К»; силовых трансформаторов 6/0,69 кВ; высокопрецизионных источников питания; шкафов переключения; кабельных трасс, автоматизированной системы управления.

Работы по введению в строй распределительного устройства РУ-6кВ и силовых трансформаторов 6/0,69 кВ, реконструкция подстанции, изготовление прецизионных источников начаты в 2018 г. В этих работах принимают участие российские фирмы НПП ЛМ Инвертор», «ЭПП-Т» «ДСС инжиниринг» и польская фирма «Frako Term». На конец 2019 г. установлено, подключено и испытано оборудование РУ-6кВ, трансформаторы 6/0,69кВ, распределительное устройство 0,69кВ, источники питания, шкафы переключения и аппаратура автоматизированной системы управления. Все работы по модернизации системы питания планируется завершить осенью 2020 г.

Система быстрого вывода пучка из Нуклотрона предназначена для однооборотного вывода пучка ядер тяжелых элементов и аналогична по своей конструкции схеме однооборотной инжекции.

Магнит Ламбертсона системы быстрого вывода пучка состоит из двух секций, имеющих апертуры: МЛ1- область вывода пучка 35×130 мм², область циркуляции пучка трапецеидальной формы 85×70 мм²; МЛ2-область вывода сечением 276×44 мм², область циркуляции пучка трапецеидальной формы сечением 134×70 мм². Элементы системы быстрого однооборотного вывода находятся в разработке. Изготовление прототипов планируется на 2020 год, а рабочих элементов и их систем питания в 2021 году. Ведутся работы по созданию испытательных стендов для тестирования элементов системы вывода пучка.

2.1.4. Коллайдер

Оптическая структура Коллайдера — последовательность дипольных, квадрупольных и корректирующих магнитов, размещена вдоль периметра каждого из накопительных колец, она формирует магнитную оптику для каждого из циркулирующих пучков. Главная задача магнитной оптики:

- обеспечить проектное пиковое значение светимости установки — $10^{26} \div 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
- обеспечить время жизни светимости (1 и более часов) много больше времени подготовки пучков (10 мин.)

Максимальная светимость Коллайдера предполагает:

- компактный периметр;
- большой динамический аксептанс (как поперечный, так и продольный);
- достаточно малое значение бета-функции в точках встречи пучков β^* ;
- определённое соотношение продольной длины сгустка σ_s и бета-функции в точках встречи пучков β^* ;
- максимально возможное количество сгустков на орбите.

Оптическая структура Коллайдера (таблица 2.1.4.1) обеспечивает выполнение вышеперечисленных требований за счёт использования технологии магнитов типа «Нуклотрон» (величина индукции в дипольных магнитах до 1,8 Тл), использования системы коррекции натуральной хроматичности и других нелинейностей магнитного поля кольца (при помощи набора корректирующих магнитов), компактной структуры общего участка сведения и фокусировки пучков перед точками встречи.

Таблица 2.1.4.1.

Основные характеристики Коллайдера

Параметр	
Ускоряемые частицы	p↑, d↑, Au ⁷⁹⁺
Полная энергия (на нуклон) ионов $\sqrt{s_{NN}}$ в точке столкновения, ГэВ/н	4 ÷ 11
Энергия ускоренных ионов ¹⁹⁷ Au ⁷⁹⁺ в каждом из колец, ГэВ/н	1 ÷ 4,5
Периметр, м	503,04
Энергия инъекции, ГэВ/н	1 ÷ 3,8
Максимальная магнитная жёсткость, Тл·м	44,5
Максимальное поле дипольных магнитов, Тл	1,8
Максимальный градиент в квадрупольных магнитах, Тл/м	23
Скорость нарастания магнитного поля, Тл/с	0,1
Бета-функция в точке встречи, м	0,6
Частоты бетатронных колебаний Q_x / Q_y	9,44/9,44

Тип инъекции	Однооборотная, многократная
Вывод (сброс) пучка	однооборотный
Давление остаточного газа в пучковой камере, Па	10^{-9}

Кольца Коллайдера имеют форму беговой дорожки стадиона (рейстрека) с периметром 503,04 м (2 периметра Нуклотрона) и располагаются одно над другим на расстоянии 0,32 м. Основу магнитной системы составляют двухапертурные дипольные и квадрупольные магниты типа «Нуклотрон», квадрупольные магниты финальной (перед точками встречи) фокусировки пучков, дипольные магниты системы вертикального сведения/разведения пучков.

За основу магнитной оптики выбрана ячейка типа ФОДО (фокусировка-промежуток-дефокусировка-промежуток). Набег фазы бетатронных колебаний в горизонтальном и вертикальном положениях на одной ячейке 90° .

На длине ФОДО-ячейки бета-функции не превышают 20 м. В свободных промежутках между диполями (М) и квадрупольями (Л) располагаются мультипольные корректоры (МПК), мониторы положения пучка (МПК), а также модуль присоединения вакуумного оборудования. МПК - корректирующий магнит включает в себя несколько типов обмоток. Мониторы положения пучка (пикап-станции) располагаются вблизи каждой квадрупольной линзы и измеряют либо горизонтальное отклонение центра тяжести пучка (у фокусирующего квадрупольного магнита), либо вертикальное (у дефокусирующего квадрупольного магнита). Максимальное (на длине магнита) отклонение пучка от центральной линии апертуры дипольного магнита из-за кривизны траектории (саггита) составляет 10 мм.

В прямолинейных промежутках Коллайдера располагаются:

- детекторы MPD и SPD;
- элементы системы инъекции (септум и ударный магнит) пучков;
- устройства аварийного сброса пучков;
- элементы высокочастотной ускоряющей системы;
- система электронного охлаждения пучков;
- устройства системы стохастического охлаждения пучков (пикап станции и кикеры);
- устройства системы обратных связей;
- система коллимации гало пучков.

Каждое из колец Коллайдера имеет отдельную систему электропитания, состоящую из 3-х основных и 52-х дополнительных источников.

Максимальный ток возбуждения магнитов 10400 А (соответствует энергии ионов золота 4,5 ГэВ/н).

Для точной настройки магнитной оптики каждого из колец предусмотрены 52 дополнительных источника питания малой мощности для независимой подстройки каждого из квадрупольных магнитов в прямолинейных промежутках, квадрупольных магнитов финальной фокусировки пучков и магнитов вертикального сведения/разведения пучков.

Система коррекции магнитного поля состоит из 62-х комбинированных мультипольных корректирующих магнитов для каждого из двух колец и 4-х корректоров — общих для обоих колец Коллайдера (всего 128 корректирующих магнитов). Продольная длина мультипольного корректора 0,3 м. Каждый корректор содержит до 5-ти сверхпроводящих обмоток «косинусного» типа. Мультипольные корректоры расположены рядом с квадрупольными магнитами в поворотных секциях и в прямолинейных промежутках.

Система подавления связи состоит из косых квадрупольных обмоток в составе мультипольных корректирующих магнитов, расположенных в прямолинейных промежутках. При включении системы бета-функции β_y , β_x не превышают 5м по всему кольцу для всех энергий пучка.

Система коррекции хроматичности состоит из секступольных обмоток в составе мультипольных корректирующих магнитов, расположенных около соответствующих квадрупольных магнитов в западной и восточной поворотных секциях. Система включает в себя 4 семейства секступолей.

Система коррекции динамической апертуры состоит из 3-х семейств октупольных обмоток в составе мультипольных корректоров, расположенных симметрично в полукольцах W и E в северном и южном прямолинейном промежутках.

2.1.4.1. Магнитно-криостатная система

Сверхпроводящие (СП) магниты типа «Нуклотрон» (таблицы 2.1.4.2 – 2.1.4.3), составляющие основу всей магнитно-криостатной системы Коллайдера разработаны в ЛФВЭ ОИЯИ. Они являются магнитами с циркуляционной системой криостатирования, когда жидкий гелий не омывает сп-обмотку, а циркулирует в специально предусмотренных каналах. Кабель обмотки изготавливается из трубчатого сверхпроводника, внутри которого циркулирует двухфазный (парожидкостный) гелий. Ядро изготовлено из листов электротехнической стали, скреплённых между собой с помощью сварки. Оно охлаждается потоком двухфазного гелия поступающего на выходе обмотки.

Таблица 2.1.4.2.

Состав магнитной системы Коллайдера

Тип элемента	Количество
Двух апертурный дипольный магнит	80
Двух апертурный дипольный магнит системы вертикального сведения/разведения пучков	4
Одно апертурный дипольный магнит системы вертикального сведения/разведения пучков	4
Двух апертурный квадрупольный магнит	70
Одно апертурный квадрупольный магнит финальной фокусировки пучков	12
Одно апертурный корректирующий магнит	128

Таблица 2.1.4.3.

Основные параметры магнитной структуры Коллайдера

Эффективная длина дипольного магнита, м	1,94
Эффективная длина квадрупольного магнита в поворотных секциях ² , м	0,47
Длина регулярной ФОДО-ячейки, м	11,96
Набег фазы бетатронных колебаний на одной ФОДО-ячейке	90
Количество ФОДО-ячеек в поворотной секции	12
Длина поворотной секции, м	141,72
Длина длинного прямолинейного промежутка, м	109,80
Периметр всего кольца, м	503,04

Пучковая высоковакуумная камера (ВВК) плотно вставляется в железное ярмо и имеет с ним устойчивый тепловой контакт для охлаждения.

Дипольные магниты (таблица 2.1.4.4) размещаются в криостатах, которые состоят из вакуумного кожуха, азотного экрана, системы подачи и отвода гелия, системы подвеса магнита и подставки. Криостат обеспечивает достижение в магните температуры сверхпроводимости и её долговременное поддержание.

В вакуумном кожухе поддерживается изоляционный вакуум на уровне 10^{-5} Па. Внутри вакуумного кожуха находится азотный экран, охлаждаемый жидким азотом при температуре 77 К. Поверхность экрана покрыта несколькими слоями лавсановой изоляции. Магнит крепится (подвешивается) к криостату на 8-ми спицах-тягах, обеспечивающих его неизменное положение при захолаживании. Жидкий гелий подается в магнит из питающего прямого коллектора. Из магнита гелий поступает в обратный коллектор. СП-магниты в магнитно-криостатной системе Коллайдера по гелию соединены параллельно. Через каждый модуль СП-магнита проходят транзитные СП-кабели, обеспечивающие коммутацию всех магнитов.

На Рис. 2.1.4.1 слева направо показаны дипольный магнит, квадрупольные линзы, криостаты и высоковакуумная пучковая камера Коллайдера.



Рис. 2.1.4.1. Слева направо: дипольный магнит, квадрупольные линзы, криостаты и высоковакуумная пучковая камера Коллайдера.

Таблица 2.1.4.4.

Основные параметры дипольных и квадрупольных магнитов Коллайдера

Параметр	Дипольные магниты	Квадрупольные магниты
Максимальная индукция (градиент) магнитного поля в апертуре, B_{\max} (G_{\max}), Тл, (Тл/м)	1.8	23.1
Минимальная индукция (градиент) магнитного поля в апертуре, B_{\min} (G_{\min}), Тл, (Тл/м)	0.57	7.3
Эффективная длина, м	1.94	0.47
Скорость изменения поля dB/dt , (градиента поля, dG/dt), Тл/с, Тл/(м·с)	≤ 0.1	≤ 1.3
Относительная неоднородность магнитного поля (градиента магнитного поля), $\Delta B/B$ ($\Delta G/G$) на радиусе $r=30$ мм	$\leq 2 \cdot 10^{-4}$	$\leq 2 \cdot 10^{-4}$
Апертура пучковой камеры (гориз./верт.), мм	120 /70	120/70
Расстояние от оси до полюса, мм	-	47.5
Угол поворота, град	4.5	-
Толщина ярма, м	0.302	0.300
Высота ярма, м	0.548	0.594
Расстояние между пучками, мм	320	
Общий вес, кг	1670	250
Ток при максимальном магнитном поле (градиенте магнитного поля), кА	10.4	
Число витков в каждой обмотке (на полюс)	10(5)	8(2)
Индуктивность каждой обмотки, μ Гн	450	94
Диаметр охлаждающего канала кабеля, мм	3,0	3,0
Общий тепловыделения, Вт	12,8	5.7
Максимальная температура гелия в обмотке, К	4.65	
Перепад давления между питающим и отводящим гелиевым коллектором, кПа	≤ 27	

Квадрупольные (фокусирующие) магниты-линзы состоят из двухапертурного магнита, двух (для каждого из циркулирующих пучков) мультипольных корректирующих магнитов (МПК), двух мониторов положения пучка (МПП), ВВК пучка с патрубками откачки и криостата магнита. Криостат магнита состоит из вакуумного кожуха, азотного экрана, системы подачи и отвода гелия, системы подвеса магнита и подставки.

Система вертикального сведения/разведения обеспечивает разделение по вертикали пучков, циркулирующих в Коллайдере в противоположных направлениях, и их столкновение в двух точках встречи.

Криомагнитная система входит в состав базовой конфигурации коллайдера. Серийное изготовление дипольных магнитов и квадрупольных линз коллайдера было начато осенью 2018 г. Идет изготовление основных компонентов магнитных элементов коллайдера, включая ярма и обмотки дипольных и квадрупольных магнитов, криостаты дипольных и квадрупольных магнитов, пучковые вакуумные камеры, подставки под магниты и другое. На конец 2019 г. изготовлены: все вакуумные кожухи для дипольных магнитов и линз в арках, 77 ярм дипольных магнитов и 40 ярм линз в арках, 32 и 16 комплектов обмоток дипольных и квадрупольных магнитов, соответственно, полностью изготовлены сильфонные компенсаторы для соединения вакуумных кожухов.

2.1.4.2. Система стохастического охлаждения

Система стохастического охлаждения (ССО) Коллайдера NICA (таблица 2.1.4.5) предназначена для достижения и поддержания проектной светимости на уровне $10^{27} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в диапазоне энергии пучка от 3 до 4.5 ГэВ/нуклон. Для этого необходимо сформировать очень короткие сгустки высокой интенсивности с малым шестимерным фазовым объемом и сохранять этот фазовый объем пучков во время работы в режиме столкновения (для сохранения светимости).

Таблица 2.1.4.5.

Параметры ССО Коллайдера.

Параметр	Величина
Диапазон энергий	3 – 4,5 ГэВ/н
Полоса частот пропускания	2 – 4 ГГц
Диапазон коэффициента усиления	84 – 122 ± 0,5 дБ
Диапазон задержки	537 816 – 544 453 ± 1пс
Средняя мощность одного канала ССО	500 Вт

Для охлаждения продольной степени свободы выбран вариант системы стохастического охлаждения на основе метода фильтра. В базовой конфигурации ССО состоит только из каналов продольного охлаждения. В качестве измерителей шума пучка (пикапов) и корректоров разброса частиц по импульсу (кикеров) за основу выбрана кольцевая структура со щелевой связью. Элементарной ячейкой данной структуры служит кольцо с восемью сенсорными петлями, распределенными по азимуту. Несколько колец объединены микрополосковыми платами, суммирующими сигнал на каждом из азимутальных направлений. Возможность комбинирования сигналов с различных направлений совместно с высоким импедансом делает такую структуру универсальной в применении как для продольного, так и для поперечного охлаждения. Для обеспечения требований по достижению ультравысокого вакуума в оригинальную структуру были внесены изменения: вакуумная камера перенесена внутрь колец пикапа и изготавливается из керамики. Для предотвращения электрических пробоев вследствие накопления заряда от пучка, внутренний слой камеры металлизирован титаном толщиной в 100 нм. Корпус камеры имеет электрический контакт с внешним контуром заземления. Для сборки кольца пикапа разрезаны по продольной образующей. Конструкция кикера идентична конструкции пикапа. В отличие от пикапа отрезок пучковой камеры кикера имеет четыре секции. На концах кикера со стороны входа и выхода пучка располагаются барабаны со вставками из магнитного материала ТТ2-111R для подавления распространения по пучковой камере высших ВЧ мод.

В настоящее время изготовлен и закуплен ряд компонентов системы стохастического охлаждения: изготовлен стенд для испытаний пикапов и кикеров, изготовлено 4 мощных усилителя (на 30 Вт) для кикеров, керамическая трубка с фланцами, векторные и скалярные анализаторы, цифровые задержки, оптическая платформа и другое оборудование.

2.1.4.3. Система электронного охлаждения

Система электронного охлаждения (СЭО) предназначена для достижения проектных значений светимости в экспериментах со встречными ионными пучками. В Коллайдере NICA необходимо сформировать короткие сгустки с малым шестимерным фазовым объемом. В результате, становится очень актуальным вопрос охлаждения ионных пучков непосредственно на энергии эксперимента, в связи с чем в Коллайдере используются системы охлаждения электронная и стохастическая. Охлаждение ионов в Коллайдере электронным пучком необходимо для полного подавления эффектов нагрева каналов внутривидовым рассеиванием (ВВР) и нелинейного резонанса при сдвиге

частоты бетатронных колебаний под действием пространственного заряда пучка (ЭПЗ).

Для охлаждения пучков ионов в Коллайдере NICA на энергии эксперимента $1 \div 4,5$ ГэВ/нуклон создается высоковольтная система электронного охлаждения с энергией электронов до 2,5 МэВ (таблица 2.1.4.6).

Таблица 2.1.4.6.

Параметры СЭО Коллайдера NICA.

Параметр	Величина
Энергия электронов , МэВ	0,2 ÷ 2,5
Стабильность высокого напряжения ($\Delta U/U$)	$\leq 10^{-4}$
Электронный ток , А	0,1 ÷ 1
Потребляемая электрическая мощность, к Вт	650
Параметры СЭО на участках охлаждения ионов	
Диаметр электронного пучка, мм	5÷20
Длина секции охлаждения, м	6
Магнитное поле, кГс	0.5 ÷ 2
Вакуум, мбар	10^{-11}
Значение бета-функции на участке ох (гориз./верт.), м	(11 ÷ 13)/(13 ÷ 14)
Поперечная температура электронов, эВ	50
Продольная температура электронов, мэВ	5,0
Время жизни ионов вследствие рекомбинации, ч	1

Электронное охлаждение планируется использовать во всём диапазоне энергии ионов 1 - 4,5 ГэВ/н. В диапазоне энергии от 3 до 4,5 ГэВ/н время электронного охлаждения несколько меньше характерного времени ВПР-нагрева и сравнимо со временем стохастического охлаждения. Однако в диапазоне низкой энергии ионов, ниже 3 МэВ/н, время электронного охлаждения существенно меньше времени ВПР (примерно в 20 раз при 1 ГэВ/Нуклон). Электронное охлаждение позволяет уменьшить поперечный эмиттанс и продольный размер сгустков ионов, повышая тем самым светимость Коллайдера. При энергии ионов 4,5 ГэВ/н время охлаждения составляет 250 сек. Установившаяся длина сгустка равна 0,6 м, а продольный разброс частиц по импульсу около $1.2 \cdot 10^{-3}$.

Основная проблема, которая возникает и решена при применении электронного охлаждения — подавление рекомбинации ионов с охлаждающими электронами в секции электронного охлаждения. Подавление рекомбинации осуществляется за счёт увеличения температуры электронов при возбуждении, их ларморовского вращения и формирования полого электронного пучка.

Величина максимального магнитного поля в секции охлаждения до 0,2 Тл требуется для обеспечения условия адиабатичности движения электронов при пересечении участков неоднородного поля на стыках соленоидов и сильную замагниченности электронов в соленоиде секции охлаждения. Последнее позволяет осуществить эффективное охлаждение при большой поперечной температуре электронов, что необходимо для подавления рекомбинации. Темп охлаждения при использовании замагниченного электронного пучка определяется в основном температурой продольной степени свободы электронов.

Каждая из двух систем электронного охлаждения верхнего и нижнего кольца Коллайдера состоит из магнитной системы с максимальным полем 2 кГс, электростатического ускорителя на максимальную энергию электронов 2,5 МэВ, включающего в себя электронную пушку на ток до 1 А, коллектор электронов с эффективностью рекуперации $\leq 10^{-3}$ и напряжением относительно катода пушки 5 кВ, фильтра Вина, ускорительную колонну на основе двух ускорительных трубок с напряженностью 10 кВ/см, секции с источниками высокого напряжения и магнитного поля и питающий их каскадный трансформатор, вакуумной системы с давлением 10-11 мбар, системы измерения прямолинейности силовых линий $\leq 10^{-5}$ участка секции охлаждения, систем охлаждения дистиллированной водой, масляного охлаждения, элегазовой системы.

Система электронного охлаждения Коллайдера NICA состоит из двух независимых «охладителей». Ускоряющая и замедляющая трубки каждого охладителя расположены в одном баке с элегазом (SF₆) под давлением 8 атм. Электронный пучок рождается в пушке, расположенной в баке, ускоряется в электростатической трубке и по транспортному каналу направляется в секцию охлаждения, где взаимодействует с ионами. Пройдя секцию охлаждения, электроны по другому транспортному каналу приходят в трубку с замедляющим электрическим полем и поглощаются в коллекторе. Для максимально эффективного использования участка, выделенного под систему электронного охлаждения, секции охлаждения обоих охладителей расположены одна над другой и имеют одинаковую длину. Электронные пучки в них, как и ионные, движутся в противоположные стороны. Расстояние между центрами вакуумных камер двух охладителей в секциях охлаждения равно 32 мм.

Транспортные каналы системы электронного охлаждения состоят из отдельных элементов: 90-градусных поворотов и прямолинейных участков. Для согласованного перехода между соленоидами с разными значениями

продольного магнитного поля между ними устанавливаются согласующие секции.

Соленоид секции охлаждения (см. Рис. 2.1.4.2, слева) каждого из двух охладителей состоит из 92-ух катушек. При поле 2 кГс величина тока в каждой катушке составляет 219.4 А. Потребляемая мощность двух соленоидов 130 кВт.

Соленоид секции охлаждения является наиболее важным элементом магнитной системы. Качество магнитного поля - прямолинейность силовой линии на уровне 10^{-5} рад. - определяет эффективность электронного охлаждения и достигается юстировкой с точностью не хуже 10 мкм. Полная потребляемая мощность магнитной системы СЭО составляет около 450 кВт.

В СЭО используются электронные пушки с управляемым профилем электронного пучка, что достигается применением сегментированного управляющего электрода, расположенного около катода. Вся пушка помещена в соленоид продольного магнитного поля, которое «замагничивает» движение электронов. Такая конструкция позволяет управлять как током пучка, так и его профилем.

Электронный коллектор служит для поглощения пучка после его замедления в электростатической трубке он представляет собой цилиндр Фарадея с дополнительными электродами, создающими запирающий потенциал, препятствующий выходу вторичных электронов. Удержание электронов в коллекторе дополнено магнитной пробкой, запирающей вторичные электроны. Для захвата вторичных электронов с низкой энергией в коллекторе создается с помощью супрессорного электрода потенциальный барьер. Параметры источника питания коллектора: напряжение до 5 кВ, ток до 3 А, максимальная мощность: 15кВт.

Для повышения эффективности захвата электронов коллектор дополним специальной вставкой фильтром Вина, подавляющим поток электронов, отраженных от коллектора. Применения фильтра Вина снижает уровень потерь тока пучка до величин $\Delta I/I \approx 10^{-6}$ при токе пучка ≈ 1 А.

Электростатический ускоритель для каждой из систем электронного охлаждения Коллайдера NICA имеет (рис.1) 2 ускорительные трубки, секции с источниками создания высокого напряжения и магнитного поля и питающий их каскадный трансформатор. Ускорительная колонна состоит из 42 секций с шагом секции 64 мм, наверху ускорительной колонны установлен высоковольтный терминал с пушкой, коллектором и фильтром Вина, а так же блоки электроники управления. Пушка и коллектор помещены в продольное магнитное поле, создаваемое двумя соленоидами в высоковольтном терминале.

Питание всего оборудования в терминале обеспечивается каскадным трансформатором. Весь электростатический ускоритель помещен в высоковольтный бак, заполненный элегазом (SF₆) под давлением до 8 атм. Электрические поля, возникающие в ускорителе, стабильны до напряжения 370 кВ /см.

Каскадный трансформатор (Рис. 2.1.4.2, справа) построен с учётом требований минимизации потерь и получения максимально возможного коэффициента связи между каскадами.

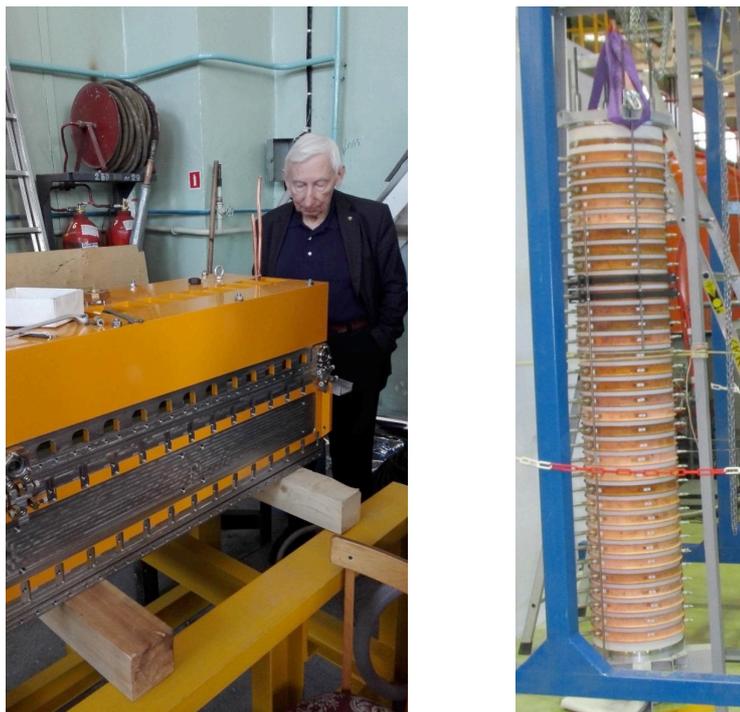


Рис.2.1.4.2. Соленоид секции охлаждения (слева) и каскадный трансформатор СЭО (справа).

В установках электронного охлаждения применяются автономные трансформаторные колонны (таблица 2.1.4.7), по две в каждом баке. Первая трансформаторная колонна служит для распределённого питания секций, внутри которых размещены высоковольтные модули основного выпрямителя и соленоиды для создания магнитного поля.

Таблица 2.1.4.7.

Параметры каскадного трансформатора.

Максимальное рабочее напряжение, МВ	2.5
Число каскадов трансформатора	42
Напряжение между соседними каскадами, кВ	60
Шаг каскадов трансформатора, мм	64
Суммарная мощность передаваемая в нагрузки, кВ	19
Магнитная индукция, кГс	2
Магнитные потери при индукции 2.0 кГс, Вт/кг	12

Напряжение, В	600
Полная мощность, передаваемая трансформатором, кВт	40
Полные потери, кВт	7

Второй каскадный трансформатор питает мощный выпрямитель - рекуператор и крейт с электроникой, находящийся под высоким потенциалом до 2,5 МВ. Суммарная передаваемая трансформатором мощность в нагрузки 19 кВт-потребляемая мощность выпрямителя-рекуператора 15 кВт с учётом КПД, мощность, потребляемая высоковольтным крейтом с электронными блоками и соленоидом, 4 кВт. Во втором трансформаторе отсутствуют обмотки отбора мощности секции высоковольтной колонны.

Вакуумная система СЭО состоит из двух независимых подсистем для каждого из двух колец Коллайдера. Каждая из вакуумных подсистем СЭО делится, в свою очередь, на три сегмента, отделенные друг от друга и от вакуумных камер Коллайдера шиберами. Все части вакуумной системы, включая многочисленные электрические вводы и керамические изоляторы, выдерживают прогрев до 250° С. Система электронного охлаждения входит в расширенную конфигурацию оборудования Коллайдера.

Разработка и изготовление СЭО были начаты Институтом ядерной физики Сибирского отделения РАН в 2016 году. В настоящее время изготовлены ряд ключевых элементов СЭО: секция соленоида охлаждения, катушки тороидальных секций, коллектор электронов, корпуса высоковольтных баков, каскадные трансформаторы и другое оборудование. Монтаж СЭО в корпусе Коллайдера запланирован на 2021 год, на два года раньше, чем это планировалось в ходе проектирования оборудования Коллайдера.

2.1.4.4. Системы электропитания

Магнитная система каждого кольца Коллайдера имеет независимые источники питания. В состав оборудования для каждого кольца Коллайдера входят три основных источника питания (таблица 2.1.4.8) и 52 дополнительных источника. Параметры структурных магнитов Коллайдера приведены в таблице 2.1.4.9. Максимальный ток в магнитах Коллайдера составляет 10400 А, соответствующей энергии ионов золота 4,5 ГэВ/н.

Основной источник Коллайдера обеспечивает питание дипольных магнитов, квадрупольных фокусирующих и дефокусирующих линз при их последовательном соединении. Второй источник питания используется для всех линз, а третий только для дефокусирующих линз. Второй и третий источники питания имеют на порядок меньшую мощность, чем первый источник питания. При переходе от рабочей точки 9,44 к 9,1 ток в квадрупольных линзах изменяется на 300 А (исключая линзы финального

фокуса) и на 9 А для D-линз. Длина каждой пары квадрупольных линз была оптимизирована для прямолинейных секций. Дополнительно, каждая линза в прямолинейной секции и каждая линза финального фокуса имеет индивидуальный источник питания, обеспечивающий максимальный ток 300 А. Полное число индивидуальных источников питания для каждого кольца составляет 52 штуки.

Система источников питания относится к базовой конфигурации оборудования Коллайдера. Все источники питания Коллайдера разработаны и изготавливаются российской фирмой ЛМ Инвертор. Изготовление источников питания было начато в 2019 году, монтаж источников питания запланирован на осень 2020 года.

Таблица 2.1.4.8.

Состав и основные параметры системы электропитания Коллайдера.

Источник питания	Наименование		Выходной ток, А
	1-е кольцо (нижнее)	2-е кольцо (верхнее)	
Основной источник для структурных магнитов	1-PS1	2-PS1	11000
Источник токодобавки в цепь всех квадрупольных магнитов в поворотных секциях	1-PS2	2-PS2	1000
Источник токодобавки в цепь дефокусирующих квадрупольных магнитов в поворотных секциях	1-PS3	2-PS3	600
Дополнительные маломощные источники питания	1-APS5, ... , 1-APS26, 1-APS35, ... , 1-APS56	2-APS1, ... , 2-APS60	300

Таблица 2.1.4.9.

Параметры структурных магнитов Коллайдера.

Суммарная индуктивность дипольных магнитов, L_m	мГн	36
Суммарная индуктивность квадрупольных фокусирующих магнитов, L_f	мГн	4,6
Суммарная индуктивность квадрупольных дефокусирующих магнитов, L_d	мГн	4,6
Ток дипольного магнита при максимальном поле 1,8Тл, I_m	кА	10,4
Стабильность тока, $\Delta I_m / I_m$		2×10^{-5}
Ток квадрупольного фокусирующего магнита при максимальном градиенте поля, I_f	кА	10,4
Диапазон увеличения тока квадрупольного фокусирующего магнита, % от I_f	%	10
Стабильность тока, $\Delta I_f / I_f$		2×10^{-4}
Ток квадрупольного дефокусирующего магнита при максимальном градиенте поля, I_d	кА	10,4
Диапазон увеличения тока квадрупольного дефокусирующего магнита, % от I_d	%	8
Стабильность тока, $\Delta I_d / I_d$		2×10^{-4}

Максимальное напряжение прикладываемое к цепи последовательно включенных всех структурных магнитов при скорости изменения магнитного поля 0,1 Тл/с, U_i	В	26
---	---	----

2.1.4.5. Каналы инжекции пучков

Канал транспортировки пучков из Нуклотрона в Коллайдер (Канал НК) имеет оптическую систему, производящую согласование поперечного фазового объема (эмиттанса) сгустка ионов (таблица 2.1.4.10) с акцептансом Коллайдера. Согласование осуществляется по всем структурным функциям, за исключением вертикальной дисперсии и ее производной.

Таблица 2.1.4.10.

Основные параметры пучка в канале транспортировки пучков Нуклотрон-Коллайдер.

Ионы	Au^{79+}
Интенсивность	до $1 \cdot 10^9$
Энергия ионов, ГэВ/н	1 ÷ 4
Магнитная жесткость ионов, Тл·м	14 ÷ 40
Эффективность перевода, %	95
Поперечные 95 %-ные эмиттансы, $\square \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	< 3 (гор.) / < 1,5 (верт.)
Среднеквадратичный продольный импульсный разброс	< $2 \cdot 10^{-4}$

Канал будет располагаться как в существующих, так и во вновь возводимых зданиях ЛФВЭ. Канал проходит из туннеля Нуклотрона (корпус №1 ЛФВЭ), через пристройку к корпусу №1 и затем по туннелю, который через 23 м разделяется на северный (164 м) и южный (153,5 м) по которым пучок попадает в верхнее и нижнее кольца Коллайдера.

Оба кольца Коллайдера имеют системы инжекции и сброса пучка. Система инжекции однооборотная. Система сброса переводит пучок, циркулирующий в Коллайдере, на поглотители в случае его деградации и значительного падения светимости (перед накоплением нового пучка), а также и в аварийных ситуациях (при срыве сверхпроводимости в обмотках магнитов Коллайдера и т.п.). Элементы систем размещаются внутри криостатов в прямолинейных промежутках полукольца. Основными элементами системы инжекции пучка являются септумные и ударные магниты, а также подсистема бампа замкнутой орбиты, состоящая из структурных дипольных магнитов Коллайдера с дополнительными тоководами. Септум-магниты служат для ввода пучка в вакуумные камеры колец Коллайдера, а ударные магниты выводят его на замкнутую орбиту. Использование локальных бампов замкнутой орбиты на участках ввода пучка в Коллайдер снижает требования к параметрам ударных магнитов.

Сброс пучков из Коллайдера осуществляется набором ударных и септумных магнитов, устанавливаемых симметрично устройствам системы инжекции пучка в кольцо с противоположным направлением движения частиц. Пучки сбрасываются в направлениях, обратных направлениям инжекции пучка в кольца Коллайдера. Ударные магниты забрасывают циркулирующие пучки в септум-магниты, которые завершают вывод пучков на поглотители. При этом сброс пучка из верхнего кольца осуществляется по горизонтали с помощью ударного и импульсного септум-магнитов. Сброс пучка из нижнего кольца производится по двум направлениям- по горизонтали и затем по вертикали с помощью ударного магнита, магнита Ламбертсона и наклонного импульсного септум-магнита. После вывода пучков из криостата Коллайдера их транспортировка к поглотителям производится по воздуху. Поглотители представляют собой железный сердечник и бетонное окружение, обеспечивающие также биологическую защиту.

Магниты инжекции работают поочередно в импульсном режиме с периодичностью 8 с. (период инжекции ионов в кольце Коллайдера). Для устройств сброса пучков средняя частота повторения импульсов при эксплуатации Коллайдера — 1 импульс в 1000 с.

Режим работы подсистемы бампа замкнутой орбиты циклический. По окончании накопления её источники питания отключаются. Магнит Ламбертсона системы сброса пучков последовательно включен в цепь электропитания структурных магнитов Коллайдера и работает в циклическом режиме согласно циклу ведущего магнитного поля Коллайдера.

Магнитные элементы канала НК «тёплые» и работают в импульсном режиме с частотой повторения 0,25 Гц в головной части канала и 0,125 Гц в его ветвях. В Канале используются секторные дипольные магниты (таблица 2.1.4.11), их максимальное поле -1,5 Тл, соответствующий максимальный ток в обмотках - 530 А. Охлаждение магнитов водяное.

Таблица 2.1.4.11.

Основные параметры дипольных магнитов Канала.

Параметр	Единица измерения	Значение	
		длинный магнит	короткий магнит
Основные параметры			
Номинальное магнитное поле	Т	1,5	
Магнитный зазор	мм	60	
Эффективная длина	мм	2000	1200
Угол поворота (при $B_p = 45 \text{ Т·м}$)	рад	0,0667	0,04
Качество поля			

Интеграл поля вдоль траектории $\int Bdl$	Т·м	3	1,8
Горизонтальный размер области хорошего поля	мм	±35	
Вертикальный размер области хорошего поля	мм	±25	
Качество интеграла поля $\Delta \int Bdl / \int Bdl$		$\leq \pm 5 \cdot 10^{-3}$	
Электрические параметры			
Амплитуда тока I_{max}	А	530	
Сопротивление обмотки при 20°C	Ом	0,738	0,46
Индуктивность магнита	Гн	0,173	0,103
Длительность импульса	сек	0,18	0,096
Частота повторения импульсов	Гц	0,25	
Напряжение U_{nom}	В	1400	
Средняя рассеиваемая мощность при I_{max}	Вт	3240	1130
Охлаждение водяное			
Количество контуров охлаждения		8	
Перепад давления	кг/см ²	6	
Перепад температуры воды при I_{max}	°С	13,3	3,7
Полный расход воды	л/мин	3,1	3,9

Квадрупольные магниты (таблица 2.1.4.12) двух типов: длинные 0,5 м и короткие длиной 0,33 м. Максимальный градиен поля – 30 Тл/м, максимальный ток в обмотках - 230 А. Охлаждение магнитов воздушное. Корректирующие магниты (горизонтально и вертикально отклоняющие) создают магнитное поле до 0,114 Тл, ток в обмотках до 89 А. Охлаждение магнитов воздушное.

Таблица 2.1.4.12.

Основные параметры квадрупольных магнитов Канала.

Параметр	Единица измерения	Значение	
		длинная линза	короткая линза
Основные параметры			
Градиент магнитного поля	Т/м	31,1	30,6
Вписанный диаметр	мм	60	
Эффективная длина	мм	513,8	350,3
Качество поля			
Интеграл градиента поля вдоль траектории $\int Gdl$	Т	15,98	10,72
Радиус области хорошего поля	мм	35	
Качество интеграла поля $\Delta \int Gdl / \int Gdl$		$\leq \pm 3 \cdot 10^{-3}$	

Электрические параметры			
Амплитуда тока I_{\max}	А	231	
Сопротивление обмотки при 20°C	Ом	0,139	0,105
Индуктивность линзы	Гн	0,08	0,0586
Длительность импульса	сек	0,14	0,2
Частота повторения импульсов	Гц	0,25	
Напряжение U_{nom}	В	450	
Средняя рассеиваемая мощность при I_{\max}	Вт	125	96
Охлаждение воздушное			
Перепад температуры воздуха при I_{\max}	°С	9,7	9,6

Источники питания магнитов канала генерируют импульсы тока, имеющие форму полусинусоиды, частота повторения 0,25 Гц, средняя суммарная мощность электропотребления магнитной системы Канала не превышает 150 кВт.

Канал НК имеет систему диагностики пучка - его интенсивности, положения, профиля и потерь транспортируемых ионов. Система включает 4 трансформатора тока, 21 модуль пикап-электродов, 12 люминофорных профилометров, 8 мониторов потерь ионов и блоки обработки сигналов. Диагностическое оборудование Канала рассчитано на диапазон интенсивностей выше 10^7 дейтронов/легких ионов и от 10^6 до $2 \cdot 10^9$ тяжелых ионов до Au^{79+} включительно.

Вакуумное оборудование обеспечивает давление ниже 10^{-7} Па за исключением конечных участков ветвей Канала, где предельное давление допустимо не ниже $5 \cdot 10^{-9}$ Па.

Основные параметры ударных магнитов приведены в таблице 2.1.4.13.

Таблица 2.1.4.13.

Основные параметры ударных магнитов систем инжекции и сброса пучков.

Параметр	инжекция	сброс
Номинальное магнитное поле, Тл	0,05	0,11
Эффективная длина, мм	4000	4000
Угол поворота (при $B\rho = 40$ Тл·м), мрад	5	10
Диаметр проводников, мм	8	8
Горизонтальный размер области хорошего поля, мм	40	50
Вертикальный размер области хорошего поля, мм	30	40
Качество интеграла поля $\Delta Bdl / Bdl $, %	± 1	± 5
Амплитуда тока I_{\max} , кА	8	16
Длительность импульса, нс	≤ 600	> 1700
Индуктивность одной пары проводников, мкГн	0,4	0,4

Оборудование канала транспортировки из Нуклотрона в Коллайдер относится к базовой конфигурации. Изготовление оборудования осуществляется французской фирмой Сигма-Фи. Начало поставки оборудования запланировано на конец 2019 года. Монтаж оборудования каналов инъекции в Коллайдер планируется начать летом 2020 г.

2.1.4.6. ВЧ системы Коллайдера

Формирование ионного пучка в Коллайдере осуществляется с помощью трех различных ВЧ системы. Первый тип – станция «барьерного» ВЧ напряжения (ВЧ-1) (Рис. 2.1.4.3, таблица 2.1.4.14), которая используется для накопления и ускорения частиц в диапазоне энергий от 1 до 4,5 ГэВ/н. Эта станция создает последовательность ускоряющих и тормозящих прямоугольных импульсов напряжений с амплитудой до 5 кВ.



Рис. 2.1.4.3. Станция ВЧ1 Коллайдера.

Таблица 2.1.4.14.

Параметры ВЧ1-станции и накопленных пучков.

Параметр	1 ГэВ/н	3 ГэВ/н
Продольный размер ВЧ1 станции		
количество станций на кольцо Коллайдера	1	
Амплитуда импульса напряжения, кВ	5	
Максимальная длительность полочки напряжения, нс	80	
Минимальная длительность полочки напряжения, нс	10	
Длительность переднего и заднего фронтов, нс	10	
Максимальная мощность, кВт	21	

Количество импульсов за период обращения иона	4	
Длительность плато кикера инъекции, нс	200	
Передний фронт кикера инъекции, нс	200	
Задний фронт кикера инъекции, нс	200	
Частота следования импульсов инъекции в каждое кольцо Коллайдера, Гц	0,125	
Максимальное ускоряющее напряжение меандр, В	$\pm(300\pm30)$	
Фронты меандра, нс	10	
Количество импульсов инъекции при накоплении	5	55
Количество инжектируемых частиц из Нуклотрона, при энергии	10^9	10^9
Количество накопленных ионов в Коллайдере	$4,4 \times 10^9$	$5,3 \times 10^{10}$
Эффективность накопления без охлаждения	0,7	0,7
Эффективность накопления с охлаждением	0,93	0,94
Сепаратриса ВЧ барьера по $(dp/p)_h$	$7,3 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-3}$
Продольный эмиттанс накопленного сгустка, эВ·с	59	202

Станция ВЧ-2 гармонического ВЧ напряжения (Рис. 2.1.4.4 слева, таблица 2.1.4.15) на частоте 22-й гармоники частоты обращения частиц в ускорителе построена на основе вакуумного коаксиального резонатора, укороченного емкостью. Максимальная амплитуда напряжения 25 кВ. В каждом кольце Коллайдера будут стоять четыре станции ВЧ-2, т.е. их суммарное ускоряющее напряжение 100 кВ. Резонансная частота резонатора перестраивается (в зависимости от энергии эксперимента $1 \div 4,5$ ГэВ/н) в пределах $11 \div 13$ МГц.

Станции третьего типа ВЧ-3 (Рис. 2.1.4.4 справа, таблица 2.1.4.15) также построены на основе вакуумного коаксиального резонатора, укороченного емкостью, они создают гармоническое напряжение на 66-ой гармонике частоты обращения частиц в ускорителе с максимальной амплитудой 125 кВ. В каждом кольце будут стоять по восемь станций ВЧ-3, т.е. их суммарное напряжение 1 МВ. Резонансная частота резонатора перестраивается (в зависимости от энергии эксперимента $1 \div 4,5$ ГэВ/н) в пределах $34 \div 39$ МГц.

Резонаторы станций ВЧ2 и ВЧ3 перестраиваются ёмкостными тюнерами.

Все станции имеют механические короткозамыкатели (КЗ) ускоряющих зазоров. Когда КЗ станции замкнут (закорочен), пучок «видит» гладкую камеру, а не резонансную полость.



Рис. 2.1.4.3. Станция ВЧ2 (слева) и ВЧ3 (справа) Коллайдера.

Таблица 2.1.4.15.

Параметры ВЧ2 и ВЧ3 резонатора.

Система	ВЧ2	ВЧ3
Длина резонатора по оси (без сильфонного узла), мм	1660	1626
Ускоряющее напряжение на резонаторе, кВ	25	125
Количество резонаторов в кольце	4	8
Полное ускоряющее напряжение, кВ/кольцо	100	1000
Минимальное напряжение при адиабатическом захвате, кВ	1,5	22
Частота обращения ионов, МГц	0,522-0,587	
Гармоника частоты обращения	22	66
ВЧ-частота, МГц	11.484÷12.914	34.452÷38.742
Перестройка частоты, МГц	1,5	4,3
Характеристическое сопротивление	75÷87	50
Собственная добротность, Q	3400÷3700	6700÷7200
Скорость перестройки частоты, кГц/сек	14,7	25,7
Шунтовое сопротивление, кОм	260÷320	335÷425
Ионный ток пучка, А	0,4	
Мощность ВЧ потерь на 1 резонатор, кВт	4.8÷3.9	23.4÷18.4
Мощность ВЧ усилителя	7	40
Нестабильность фазы напряжения	±0,2°	
Ресурс короткозамыкателя, циклов	100000	
Диаметр вакуумной камеры, мм	100	
Вакуум в резонаторе, не хуже, Торр	3×10 ⁻¹¹	
Максимальный темп ускорения, МэВ/н-сек	250	150
Вес, т	1,5	1,5
Габариты (Д×Ш×В), мм	1951×1753×2540	1832×1423×2540

Последовательные циклы инжекции частиц (ионы золота $^{192}\text{Au}^{79+}$) из Нуклотрона накапливают в Коллайдере с помощью ВЧ-1. После накопления необходимого числа частиц система ВЧ-1 выключается и закорачивается. Пучок распускается, занимая весь периметр Коллайдера, и адиабатически медленно включается система ВЧ-2. Формируется 22 сгустка. Процесс сопровождается охлаждением - электронным и/или стохастическим. Амплитуда ВЧ-2 растёт до того момента, когда сгусток в состоянии уместиться в сепаратрисе 66-й гармоники (ВЧ-3). В этот момент адиабатически медленно включается ВЧ-3 при работающей станции ВЧ-2 и происходит перезахват сгустка из ВЧ-2 в ВЧ-3.

Группировка пучка на 66-й гармонике частоты обращения в присутствии ВЧ-2 с амплитудой 100 кВ при адиабатическом увеличении суммарного напряжения ВЧ-3 от 21,87 кВ до 0,8 МВ и охлаждении с временем 100 сек обеспечивает формирование сгустков со ср. кв. проектной длиной 0,6 м и ср. кв. проектным импульсным разбросом 10^3 - значения параметров, требуемые для режима столкновений и проектной светимости сталкивающихся сгустков.

Система ВЧ-3 наряду с группировкой ионных сгустков может быть использована для их ускорения при подъеме магнитного поля и изменении частоты ВЧ-3 резонатора. Скорость изменения частоты 25,7 кГц/сек. определяет темп ускорения ионов. Для ВЧ-2 он равен 150 МэВ/(н×сек.). Ускорение ионов в ВЧ3 станциях происходит в 2.5 раза быстрее, чем это делается с помощью ВЧ-1 станции.

Для возбуждения резонаторов ВЧ-2 и ВЧ-3 используются транзисторные усилители производства ООО «НПП Триада ТВ», г. Новосибирск.

Две станции ВЧ1 и четыре станции ВЧ2 относятся к базовой конфигурации оборудования Коллайдера. Четыре дополнительные станции ВЧ2 и шестнадцать станций ВЧ3 относятся к расширенной конфигурации оборудования Коллайдера. Изготовление ВЧ станций в ИЯФ СО РАН было начато в 2016 году. В настоящее время в ИЯФ СО РАН изготовлены и протестированы две ВЧ1 станции. Весной 2020 года они будут поставлены в ОИЯИ. Монтаж этих станций в здании Коллайдера начнется летом 2020 года. Также в ИЯФ СО РАН изготовлены и протестированы прототипы ВЧ2 и ВЧ3 станций. Весной 2020 года они будут поставлены в ОИЯИ. В настоящее время идет изготовление основных компонентов четырех ВЧ2 станций для базовой конфигурации. Их монтаж запланирован на лето-осень 2020 года. В настоящее время идет изготовление еще четырех ВЧ2 станций и шестнадцати ВЧ3 станций. Их поставка и монтаж в здании коллайдера запланированы в 2021 году, на два года раньше, чем это было в начальной версии проекта NICA.

2.1.4.7. Система диагностики, управления и контроля

Система диагностики, управления и контроля (СДУК) Коллайдера представляет собой комплекс аппаратуры и программного обеспечения, состоящий из нескольких независимых подсистем - вычислительную, сетевую и программную инфраструктуру для разработки и выполнения задач других систем управления. СДУК Коллайдера строится на общих принципах с СУ Бустера и состоит из следующих подсистем:

- диагностика пучка в кольцах Коллайдера,
- СДУК параметров магнитной системы,
- инфраструктура АСУ.

Система диагностики пучка в кольцах Коллайдера обеспечивает измерение:

- среднего тока пучка,
- продольных профилей сгустков сгруппированного пучка,
- параметров равновесной орбиты пучка,
- положения в пространстве и времени отдельных коротких сгустков,
- частот бетатронных колебаний частиц.

СДУК параметров магнитной системы осуществляет:

- контроль температуры элементов магнитной системы и ее автоматическую корректировку,
- управление корректорами магнитного поля,
- задание цикла магнитного поля в элементах магнитной системы Коллайдера.

Инфраструктура АСУ состоит из распределённой сети компьютеров, соединённых между собой сетью Ethernet. Система выполнена в виде трёх уровней — уровень доступа к оборудованию, сервисный уровень и клиентский уровень. Компоненты всех трёх уровней связаны между собой при помощи транспортного протокола, работающего через TCP/IP. АСУ NICA использует в качестве связующего ПО систему TANGO controls. Для задач АСУ Коллайдера, Бустера и Нуклотрона используется кластер из нескольких физических серверов Supermicro под управлением системы виртуализации Proxmox, которая является полноценной открытой серверной платформой для создания и управления виртуальной инфраструктурой, включающей в себя виртуальные машины, хранилища, виртуальные сети и кластеры высокой доступности. Физические серверы кластера объединены при помощи быстрой дублированной сети 10Гбит. Серверы являются одновременно и узлами распределенного сетевого хранилища CEPH и узлами для запуска виртуальных машин АСУ. Высоконадежные SSD диски с надежностью 5 DWPD (drive writes

per day) используются в качестве основы для построения высоконадежного распределенного хранилища СЕРН, которое используется для хранения и выполнения образов дисков виртуальных серверов.

Пункты оперативного контроля и управления составляют часть общей СДУК и размещаются в помещениях №137 (локальный пульт управления №1) и №187 (локальный пульт управления №2), связанных кабельными трассами с кольцевым кабельным каналом туннеля 500x500 мм².

Оборудование системы диагностики, управления и контроля относится к базовой конфигурации. В настоящее время приобретено значительное количество компонентов диагностического оборудования и системы управления, включая, аппаратуру сбора и обработки данных фирм Libera Hadron и Instrumentation Technology, высокочастотных усилителей тока фирмы Femto, сетевого оборудования серверов фирмы PXI National Instruments, трансформаторов тока фирмы Vergoz, микроканальных пластин и др. Монтаж диагностического оборудования в кольцах Коллайдера запланирован на осень 2020 г.

2.1.4.8. Вакуумная система

Вакуумные объемы Коллайдера разделяются на изоляционные вакуумные объемы системы криостатирования сверхпроводящих магнитов, описанные выше, и объемы пучковой камеры, которые, в свою очередь, делятся на «теплые», находящиеся при комнатной температуре, и «холодные», стенки которых в рабочих условиях находятся в диапазоне температур от 4,2 К до 300 К. Давление в пучковой камере не выше 2×10^{-9} Па.

При общей длине Коллайдера около 500 м большую часть занимают «холодные» промежутки и арки. В них расположены сверхпроводящие магниты, элементы системы диагностики и управления пучка, системы ввода, переходы «тепло-холод». В теплых промежутках располагаются ВЧ станции, система электронного охлаждения, система стохастического охлаждения, детекторы и устройства диагностики пучка.

Управление вакуумным оборудованием и контроль его работы осуществляются автоматизированной системой диспетчеризации и управления (АСДУ) вакуумного оборудования Коллайдера NICA.

Оборудование вакуумной системы относится к базовой конфигурации. Пучковые вакуумные камеры, пикап-электроды, сильфонные вставки Коллайдера с 2019 года изготавливаются польской фирмой Fracoterm. Вакуумные камеры, параллельные 26 ВЧ станций, изготавливаются в ИЯФ СО РАН. В настоящее время приобретено значительное количество стандартного вакуумного оборудования, включая, высоковакуумные шиберы, течеискатели,

диффузионные насосы, высоковакуумные посты и др. Монтаж вакуумного оборудования прямолинейных секций и арок Коллайдера запланирован на лето 2020 года.

2.2. Экспериментальные установки

2.2.1. Multi Purpose Detector (MPD) – многоцелевой детектор

Установка MPD разработана как 4π спектрометр, способный идентифицировать заряженные адроны, электроны и фотоны в столкновениях тяжелых ионов в диапазоне энергий и светимости Коллайдера комплекса NICA. Для достижения этой цели установка включает трехмерную трековую систему и систему идентификации частиц (PID), основанную на измерениях времени пролета и калориметрии. Основные проектные параметры были определены физическими процессами при ядерных столкновениях в NICA и несколькими техническими ограничениями, обусловленными компромиссом между эффективной реконструкцией событий и разумным материальным бюджетом. При расчетной светимости частота событий в области взаимодействия MPD составляет около 6 кГц; полная множественность заряженных частиц превышает 1000 в центральных столкновениях Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ. Поскольку средний поперечный импульс частиц, образующихся при столкновении при энергиях NICA, ниже 500 МэВ/с, конструкция установки требует высокой прозрачности.

Целью данного проекта является создание первой стадии установки MPD (базовая конфигурация).

В базовой конфигурации установка должна включать сверхпроводящий соленоид, время-проекционные камеры (TPC), баррельную время-пролетную систему (ToF), электромагнитный калориметр (EMCal), передний адронный калориметр (FHCAL) и быстрый передний детектор (FFD). Весь центральный детектор (CD) будет представлять собой цилиндр длиной 9 м и диаметром около 6,6 м. Компонировка MPD показана в поперечном разрезе на Рис. 2.2.1.1. Ниже кратко описаны характеристики основных детекторов. Более подробное описание компонентов детекторов можно найти в MPD TDR.

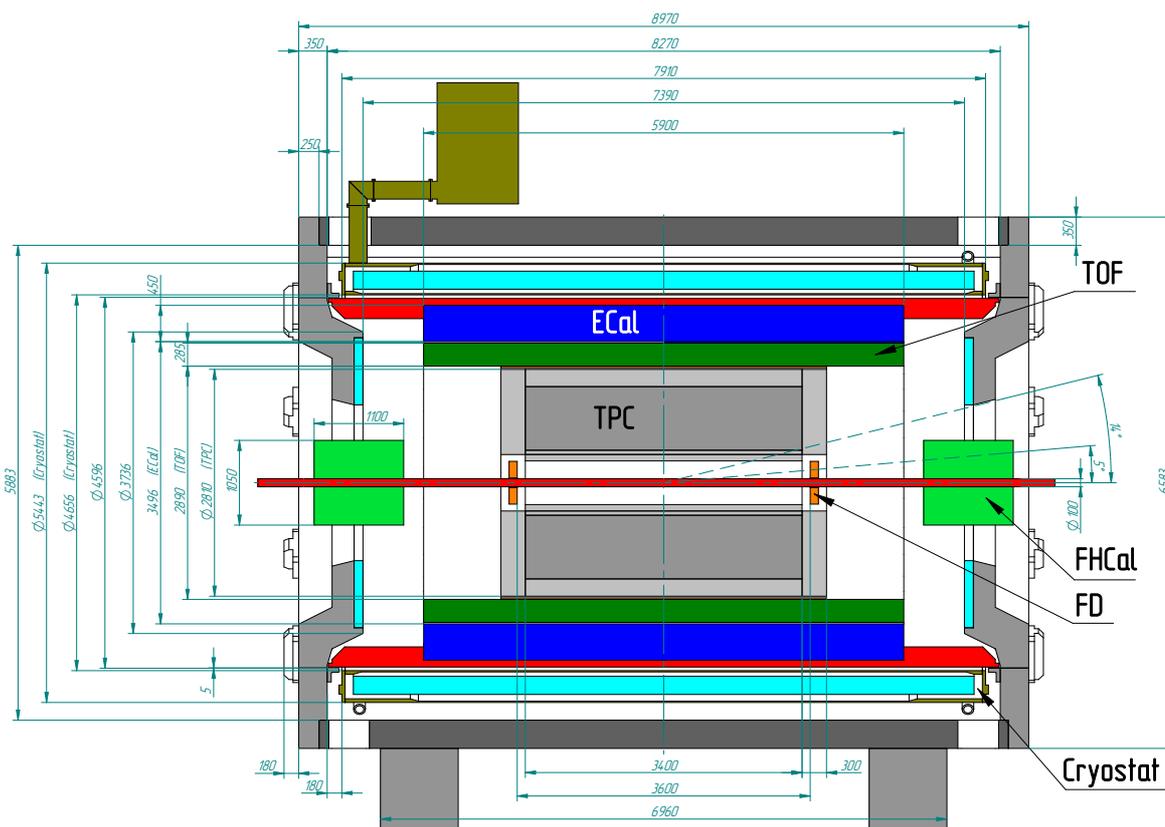


Рис. 2.2.1.1. Центральная часть базовой конфигурации установки.

2.2.1.1. Соленоидальный магнит

Составной частью MPD является соленоидальный магнит со сверхпроводящей катушкой NbTi и стальным возвратным ярмом. Сверхпроводящий магнит MPD предназначен для создания высокооднородного магнитного поля напряженностью 0,57 Тл в объеме диаметром 4596 мм для обеспечения разрешения по поперечному импульсу в диапазоне энергий Коллайдера NICA 0,1–3,0 ГэВ/с. Магнит MPD состоит из (Рис. 2.2.1.2):

- криостата со сверхпроводящей катушкой и контрольным прибором Дьюара;
- железного ярма с двумя опорными кольцами, 28 стержнями и двумя полюсами с корректирующими катушками;
- станины для поддержки магнита;
- вспомогательной платформы для перемещения полюсов;
- роликовых катков для перемещения магнита и его полюсов.

Кроме того, имеются источники питания для сверхпроводящей катушки и для подстроечных катушек в полюсах, система защиты от отепления SC катушек, криогенная система с криогенным трубопроводом, вакуумная система, гелиевый охладитель и система управления магнитами.

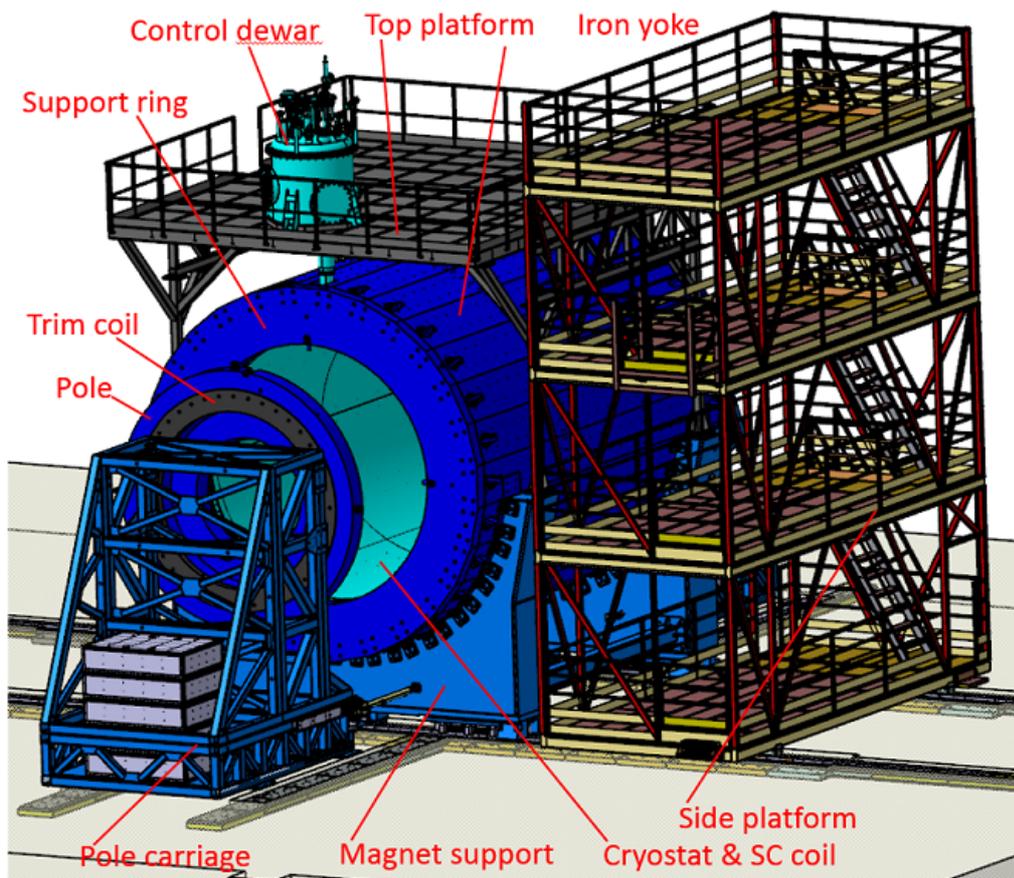


Рис. 2.2.1.2. Общий вид соленоидального магнита MPD.

Номинальный ток магнита составляет 1790 А (это соответствует полю в апертуре 0,5 Тл). Максимальное магнитное поле, при котором поддерживается указанное значение интеграла радиальной составляющей индукции в области ТРС $Int \leq 1,5$ мм и которое может быть достигнуто при максимальном уровне технологических отклонений от оптимизированной геометрии магнитного поля, составляет 0,57 Тл.

2.2.1.1.1. Соленоид

В 2014 году Технический проект магнита был разработан компанией «Нева-Магнит» в Санкт-Петербурге (Россия) по запросу ОИЯИ. В 2015 году была определена компания-производитель для производства соленоида и его вспомогательного оборудования, такого как источники питания, система управления и защиты, вакуумная система и т. д. В конце 2015 года был подписан соответствующий контракт с ASG Superconductors s.p.a (Италия).

В 2019 г. закончена сборка холодной массы, которая вместе с вакуумным сосудом доставлена в помещение ASG, где проведена полная сборка соленоида - введение холодной массы в вакуумный резервуар, подвеска холодной массы с использованием осевых и радиальных стяжек, установка азотного теплозащитного экрана и многослойной термоизоляции. Таким образом, весь заказ на предприятии ASG выполнен (см. Рис. 2.2.1.3 и Рис. 2.2.1.4).



Рис. 2.2.1.3. Одна из корректирующих обмоток (слева) и соленоид в криостате (справа).



Рис. 2.2.1.4. Соленоид в сборе.

2.2.1.1.2. Магнитопровод

В 2012 году геометрия детектора MPD была принята в окончательном варианте (Рис. 2.2.1.5). Длина магнитопровода составила 8970 мм, наружный диаметр 6.63 м. Общий вес магнитопровода, состоящего из 2-х опорных колец, 2-х полюсов и 24-х балок составляет 630 тонн. Вес детектора MPD в проектной конфигурации – 980 тонн.

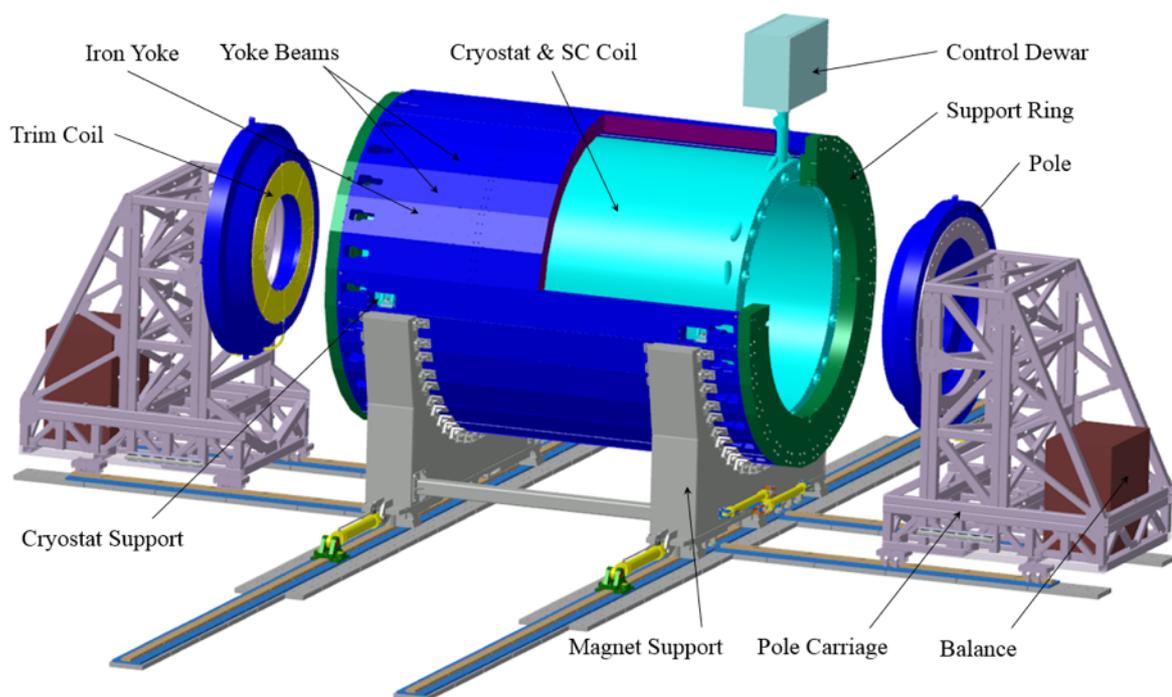


Рис. 2.2.1.5. Магнитопровод MPD с полюсами на транспортных опорах.

В 2012-2016 гг. силами сотрудников КО ЛФВЭ была выпущена рабочая документация (РД) на изготовление магнитопровода в конфигурации 24 балки, составляющие продольную часть магнитопровода, а затем, по технологическим причинам рабочая документация (РД) была переделана на современный вариант с 28-ю балками. Соответствующим образом была выпущена РД на опорные кольца, полюса, ложемент, транспортные опоры для полюсов. Попутно в КО ЛФВЭ была разработана технология сборки магнитопровода, а также выпущена РД на необходимые для сборки магнитопровода технологические приспособления. Одно из важнейших технологических приспособлений – манипулятор (Рис. 2.2.1.6) для подъема 16-ти тонных балок, длиной 8470 мм и поворота их на нужный при монтаже угол – был безвозмездно привезен из ЦЕРН, где он использовался на сборке трех цилиндров адронного тейл калориметра установки ATLAS на LHC.

В конце 2015 года были заключены два основополагающих контракта на изготовление магнитопровода:

- с ООО «ПП СПЕЦМАШ», г. С.Петербург, на изготовление поковок для 28-ми балок, 2-х опорных колец и 2-х полюсов;

- с VHM, г. Витковице (Острава), Чехия, на изготовление деталей магнитопровода (из нашего давальческого сырья), ложемента, транспортных опор полюсов и всего необходимого технологического оборудования с проведением контрольной сборки магнитопровода в заводских условиях.



Рис. 2.2.1.6 Манипулятор.

По факту, балки магнитопровода (Рис. 2.2.1.7) были изготовлены на НКМЗ, г. Краматорск (Украина), в полном соответствии с требованиями контракта.



Рис. 2.2.1.7. Поковки балок на НКМЗ перед отправкой.

Поковки для опорных колец и полюсов магнитопровода (Рис. 2.2.1.8) были изготовлены в Италии на предприятии «Forgiatura Morandini».

Все поковки для балок и колец были доставлены на ВНМ к июлю 2016 г. транспортной компанией «АЕТ Транс», г. С.Петербург.

Изготовление всех компонент магнитопровода заняло более 2-х лет с середины 2016 года по декабрь 2018 г.



Рис. 2.2.1.8. Поковки опорных колец и полюсов после предварительной обработки с припуском 5 мм на контур.

Все важные размеры деталей магнитопровода и ложементов были выполнены с более высокой точностью, чем указано в РД.

На заводе ВМ при участии инженеров и техников из ОИЯИ была выполнена контрольная сборка магнитопровода (Рис. 2.2.1.9).

Габаритные размеры магнитопровода соответствуют номинальным размерам по чертежу при точности измерения 0,2 мм. Соосность опорных колец составила 0,1 мм, неперпендикулярность опорных колец составила 0,5 мм с отклонением на внешнюю сторону на обоих торцах (теоретически возможные отклонения (envelope) составляют 20 мм на сторону).



Рис. 2.2.1.9. Установка первой нижней плиты магнитопровода (слева), магнитопровод собран (справа).

В феврале-марте 2019 года основные негабаритные части магнитопровода - опорные кольца внешним диаметром 6,7 м и полюса 4,7 м - были вывезены транспортной компанией «АЕТ Транс», г. С.Петербург, в ЛФВЭ ОИЯИ. Для выполнения таможенных процедур с негабаритным грузом, на территории ЛФВЭ была создана зона временного таможенного контроля (ЗВТК), которая закрылась 30 июля 2019 г., по окончании вывоза в строго намеченные сроки всего оборудования, изготовленного по контракту с ВМ. Для данной перевозки компании «АЕТ Транс» потребовалось 37 автофургонов, 7 из которых везли негабаритный груз.

Следующий важный этап – создание системы перемещения (СП) собранного детектора МРД (полным штатным весом 980 т) и полюсов (весом до 100 тонн с установленными на них детекторами). По действующему контракту с ООО «НПП СПЕЦМАШ», г. С.Петербург, все компоненты данной системы изготовлены, доставлены в ОИЯИ и находятся на складе СМТС ОИЯИ. Монтаж и ввод в эксплуатацию СП намечен на 2020 год.

Для возможности безопасного перемещения детектора МРД, в строительные чертежи фундамента прямка павильона по инициативе ОИЯИ были введены стальные, 100 мм толщиной, фундаментные плиты для распределения весовой нагрузки от детектора.

Строительная фирма «Штрабаг» установила в прямке детектора МРД фундаментные плиты. Неплоскостность верхней поверхности плит (обработанные заранее на заводе) составила 0,4 мм на длине 30 м, что позволит в дальнейшем произвести монтаж рельс с похожей точностью, а это в свою очередь устранил высокие локальные нагрузки от роликовых тележек перемещения и обеспечит равномерность нагрузок на рельсовые пути и фундамент. В августе 2019 года ООО «Пелком Дубна Машиностроительный завод» произвело монтаж подрельсовых плит и самих рельс (Рис. 2.2.1.10). Неплоскостность верхней поверхности рельс составила 0,4 мм на рабочей длине 7 м, что в разы меньше назначенной неплоскостности в РД. Непрямолинейность боковой поверхности базового рельса составила 0.17 мм на длине 30 м.



Рис. 2.2.1.10. Рельсовые пути в прямке павильона МРД; рабочие поверхности закрыты кожухами.

2.2.1.2. Детектор ТРС

Время-проекционная камера (ТРС) является основным трековым детектором установки МРД. Это хорошо известный детектор для реконструкции треков заряженных частиц и их идентификации по dE/dx для событий с большой множественностью. ТРС / МРД обеспечит:

- перекрытие по псевдобыстроте - $\eta \leq 1,2$;
- разрешение по импульсу для заряженных частиц - до 3% в диапазоне поперечных импульсов $0,1 < p_t < 1$ ГэВ/с;
- двухтрековое разрешение - около 1 см.;

- измерение ионизационных потерь с разрешением не хуже 8% для идентификации частиц.

Эти требования должны быть выполнены при проектной светимости Коллайдера NICA с частотой событий около 7 кГц. Максимальная множественность заряженных частиц - до 1000 треков в центральных Au + Au столкновениях.

TRC состоит из четырех цилиндров (C1-C4), изготовленных российской промышленностью из композиционных материалов. Это обеспечивает достаточную продольную прочность цилиндров (прогиб по центру - не более 100 мкм) и небольшое количество вещества на пути частиц - 0,4 г/см². Все четыре цилиндра соединены между собой двумя алюминиевыми фланцами. Промежуток между цилиндрами C1-C2 и C3-C4 продувается азотом N₂ для защиты от высоковольтных разрядов и предотвращения диффузии H₂O и O₂ в дрейфовый объем TRC.

Камеры считывания (ROC) для стартовой версии MPD базируются на многопроволочных пропорциональных камерах со считыванием сигналов с катодных площадок (pads readout). Полное число каналов считывания для TRC - 95232.

Газовая система основана на опыте создания газовых систем для TRC экспериментов STAR и PHENIX в Брукхейвенской национальной лаборатории, США. Система состоит из двух контуров – внешнего и внутреннего. Газовая система работает как замкнутый контур с рециркуляцией рабочей газовой смеси через TRC по внутреннему контуру, содержащему систему очистки. При работе системы, при необходимости, добавляется до 10% «свежей» смеси из внешнего контура.

Газовая смесь для состоит из (10 ± 0,1)% CH₄ в Ar при избыточном давлении в TRC $dP=(2 \pm 0,01)$ мбар. Скорость продува смеси через TRC – (200÷3000) л/ч.

Конструктивно газовая система может работать как в закрытом варианте для длительного эксперимента, так и в открытом - для продувки TRC при ее запуске. Поскольку расстояние между TRC и местом расположения газовой системы составляет около 70 метров, газовая схема содержит две части: одна с компрессором для прокачки газовой смеси через TRC и вторая – для приготовления «свежей» смеси из сосудов с газами, хранящимися в домике на улице. Эти части реализованы в виде стоек как показано на Рис. 2.2.1.11.

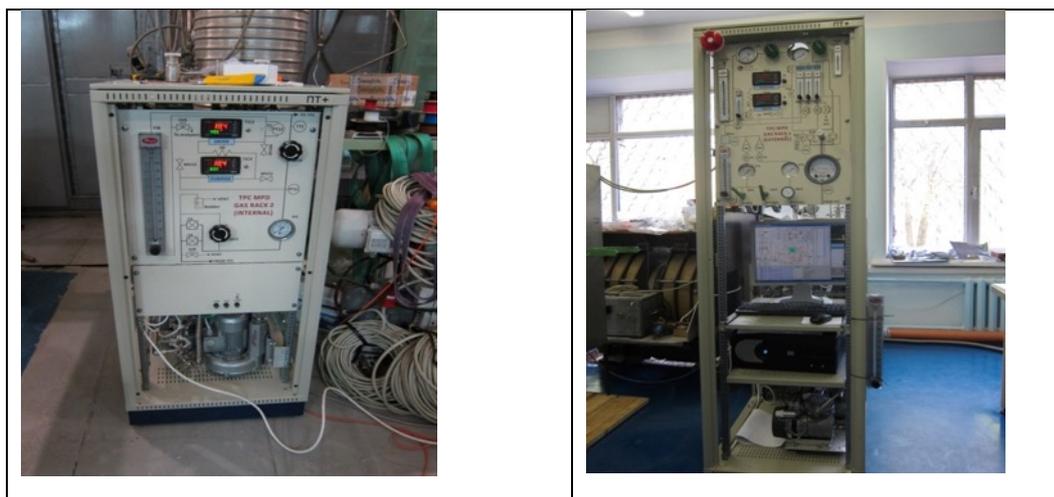


Рис. 2.2.1.11. Стойки газовой системы ТРС.

Система лазерной калибровки ТРС необходима для минимизации погрешности в абсолютном измерении координат треков частиц. Она учитывает как статические, так и зависящие от времени искажения электрического поля на пути дрейфа электронов и определяет скорость их дрейфа. Система основана на двух ультрафиолетовых лазерах с длиной волны 266 нм с коротким импульсом (5 нс) и мощностью до 130 мДж. Лазерные лучи расщепляются на 224 веерных луча для имитации прямых треков диаметром 1 мм, что достаточно для калибровки скорости дрейфа электронов во всем объеме ТРС.

Схема распределения лазерного луча на 28 «треков» в одной из 8 плоскостей и схема ее технической реализации представлены на Рис. 2.2.1.12. Внутренняя часть лазерной системы калибровки показана на Рис. 2.2.1.13.

Система охлаждения служит для температурной стабилизации детектора ТРС. Целью является стабильность температуры газа внутри объема ТРС в пределах 05°C . Система использует 180 датчиков Pt100, размещенных на корпусе детектора, и обеспечивающих измерение температуры с точностью до $0,1^{\circ}\text{C}$. Дистиллированная вода используется в качестве теплового агента. Цилиндрический тепловой экран ТРС и образцы охлаждающих панелей показаны на Рис. 2.1.1.14.

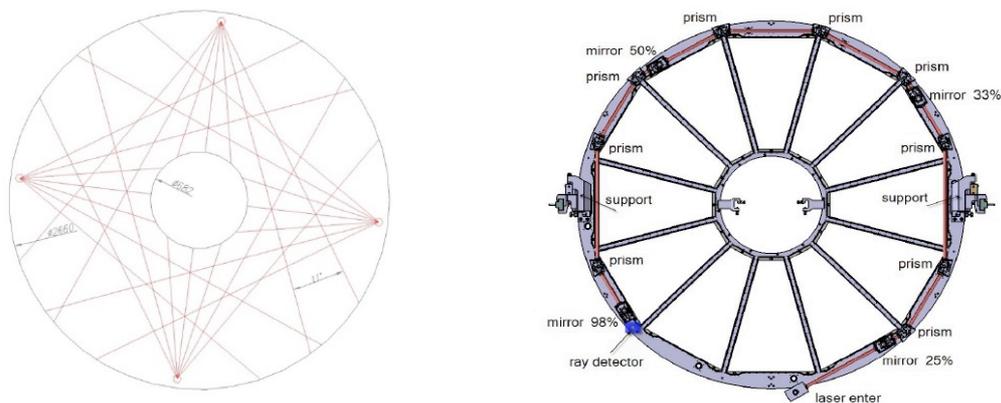


Рис. 2.2.1.12. (а) - схема распределения лазерных лучей в одной из 8 плоскостей; (б) - схема технической реализации системы лазерной калибровки..

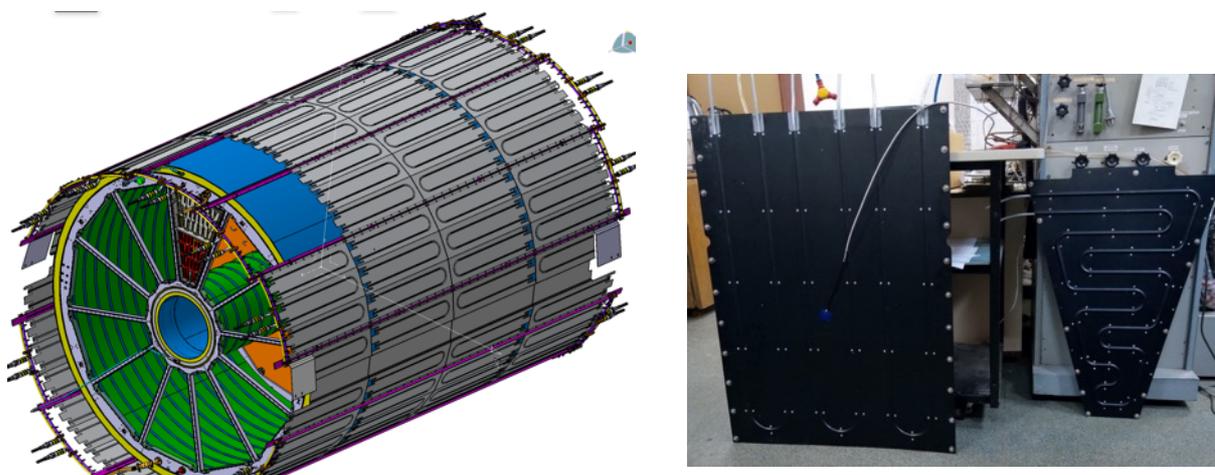


Рис. 2.2.1.14. Внутренняя часть системы лазерной калибровки (делитель лучей)

Электроника считывания данных (Front-End Electronics - FEE) TPC базируется на специализированных микросхемах (ASIC), программируемых интегральных микросхемах (FPGA) и интерфейсных микросхемах для обеспечения высокоскоростных линий связи.

Основными элементами системы считывания данных с ROC камер являются 64-канальная карта (FEC) и контроллер (RCU). Вся система считывания состоит из 1488 FEC и 24 RCU. На Рис. 2.2.1.15 представлена блок-схема системы считывания с одной ROC камеры.

Каждый из 24 контроллеров RCU выполняет функции управления 62-мя картами FEC (включая запуск, сброс, синхронизацию), мониторинга состояния карт, приема данных и их передачу в DAQ систему. Скорость передачи данных из FEC в RCU - 2,5 Гбит/сек, а из RCU в DAQ – 10 Гбит/сек. Все 62 карты FEC (3968 каналов регистрации) работают параллельно и независимо друг от друга, обеспечивая общую пропускную способность для каждой ROC камеры до 100 Гбит/сек.

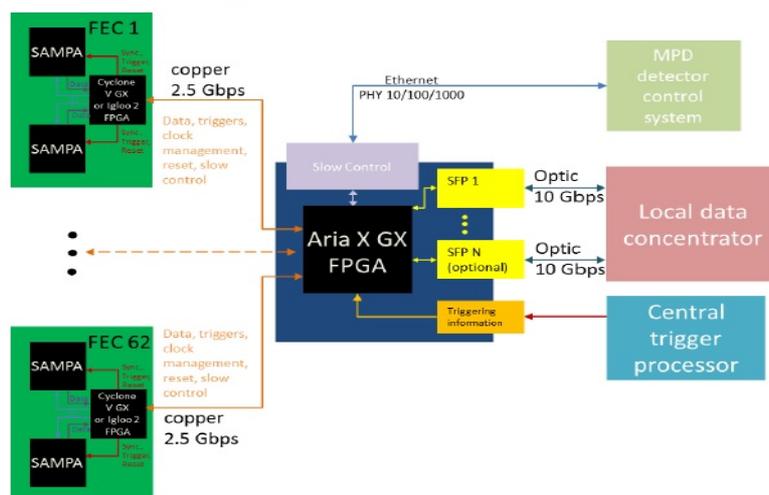


Рис. 2.2.1.15. Блок-схема системы считывания данных с одной ROC камеры.

Каждый из 24 контроллеров RCU выполняет функции управления 62-мя картами FEC (включая запуск, сброс, синхронизацию), мониторинга состояния карт, приема данных и их передачу в DAQ систему. Скорость передачи данных из FEC в RCU - 2,5 Гбит/сек, а из RCU в DAQ – 10 Гбит/сек. Все 62 карты FEC (3968 каналов регистрации) работают параллельно и независимо друг от друга, обеспечивая общую пропускную способность для каждой ROC камеры до 100 Гбит/сек.

Каждая 64-канальная FEC включает в себя две специализированные 32-канальные микросхемы ASIC SAMPA, которые были разработаны группой электроники USP Brazil совместно с CERN для модернизации эксперимента ALICE. Использование микросхем SAMPA на FEC картах позволило значительно уменьшить их геометрический размер и радиационную длину ($X/X_0 \sim 3\%$). Карты могут работать как с положительной, так и с отрицательной полярностью входных сигналов, что позволит в будущем заменить ROC камеры на основе MWPC на камеры на основе GEM.

Конструктивно карта FEC состоит из двух плат. На первой плате расположены два ASIC SAMPA, которые обеспечивают 64 канала регистрации событий (Рис. 2.2.1.16, справа). Каждый независимый канал регистрации имеет зарядо-чувствительный усилитель-формирователь входных сигналов с пэдов ROC, 10-разрядный АЦП с частотой 10 МГц для оцифровки аналоговых сигналов, цифровой процессор DSP для обработки сигналов. DSP имеет две опции работы – ON/OFF.

Вторая плата FEC является контроллером карты (Рис. 2.2.1.16, слева). Цифровая логика управления картой реализована в FPGA CYCLONE V GX и выполняет управление и настройку режимов ASIC SAMPA, приём и передачу данных в RCU, а также функции медленного контроля.

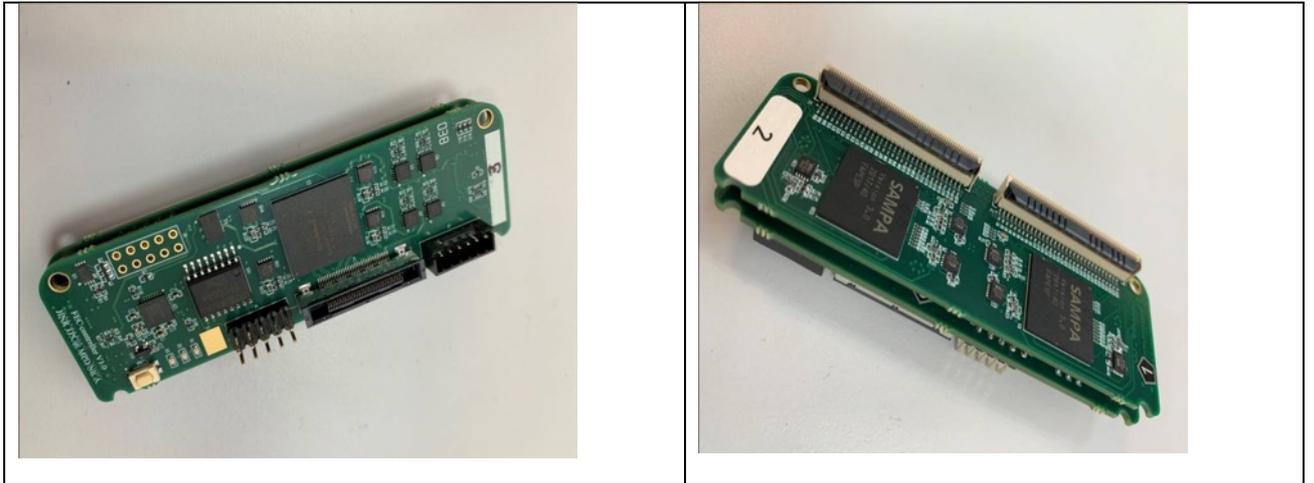


Рис. 2.2.1.16. FEC для ROC камеры.

Каждая из 1488 FEC включает в себя две ASIC «SAMPA», которые были разработаны группой электроники USP Brazil совместно с CERN для модернизации эксперимента ALICE. Использование микросхем SAMPA на FEC картах позволило значительно уменьшить их геометрический размер и радиационную длину ($X/X_0 \sim 3\%$). FEC может работать как с положительной, так и с отрицательной полярностью входных сигналов. Это позволит в будущем заменить ROC камеры на основе MWPC на камеры на основе GEM фольг.

Первые испытания FEC показали их пригодность для использования в качестве электроники TPC. Использование FPGA в системе сбора данных предоставляет большие возможности для дальнейшего совершенствования системы считывания. Реализация FEC в форме плат, расположенных в 2-х уровнях, дает дополнительную гибкость в будущем для обновления системы. При необходимости, контроллер FEC может быть заменен другой картой с радиационно-стойкой FPGA на основе флэш-памяти.

Система медленного контроля (slow control) TPC обеспечивает контроль и мониторинг источников высоковольтного (HV) питания для считывающих камер ROC и HV электрода TPC, источников низковольтного питания (LV) для электроники считывания, параметрами газовых и охлаждающих систем, работой системы лазерной калибровки TPC.

Блок-схема низковольтной системы питания TPC на основе радиационно-стойкого оборудования CAEN показана на Рис. 2.2.1.17, слева. Дополнительная заказная плата стабилизации и распределения питания LVN9 для карт FE, разработанная и изготовленная в НИИ ЯП БГУ (Минск), показаны на Рис. 2.2.1.17, справа.

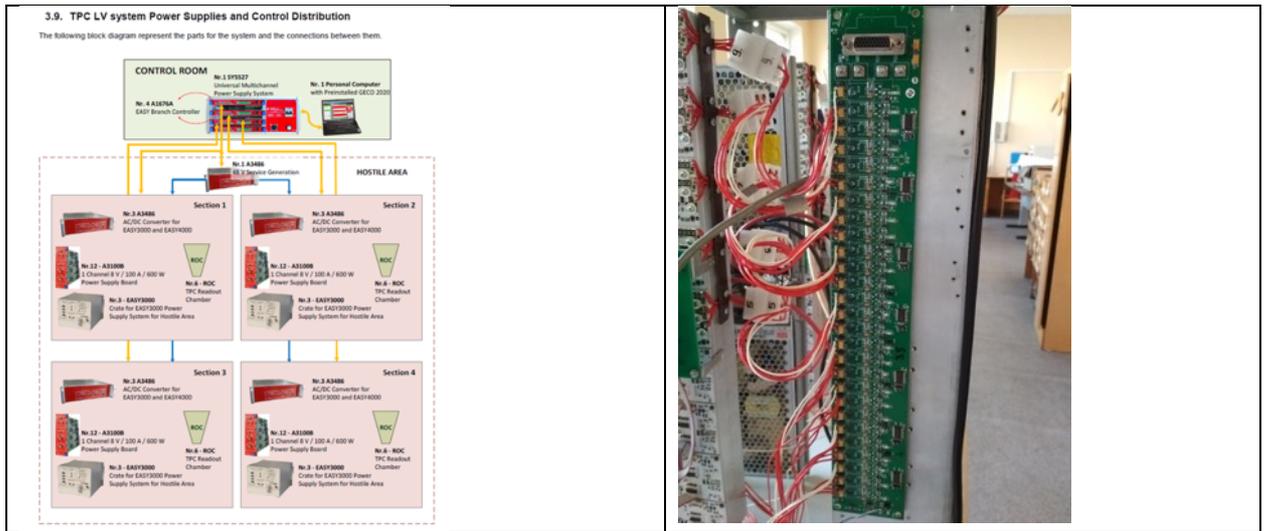


Рис. 2.2.1.17. Блок-схема системы низковольтного питания ТРС (слева). Карта стабилизации и распределения питания LVN9 (справа).

Система высоковольтного питания ТРС строится на основе стандартного крейта CAEN SY4527 с модулями A7236DN, A7236DP, A1542HDN. Высоковольтное и низковольтное оборудование фирмы CAEN управляется с помощью фирменного программного пакета GECCO 2020.

Сборка ТРС осуществляется в настоящее время по разработанной технологии в специально подготовленной чистой комнате в корпусе №217 ЛФВЭ. Для этого этапа Корпорацией машиностроения и приборостроения (ГКМП, Брянск, Россия) была разработана и изготовлена специальная оснастка (см. Рис. 2.2.1.18)

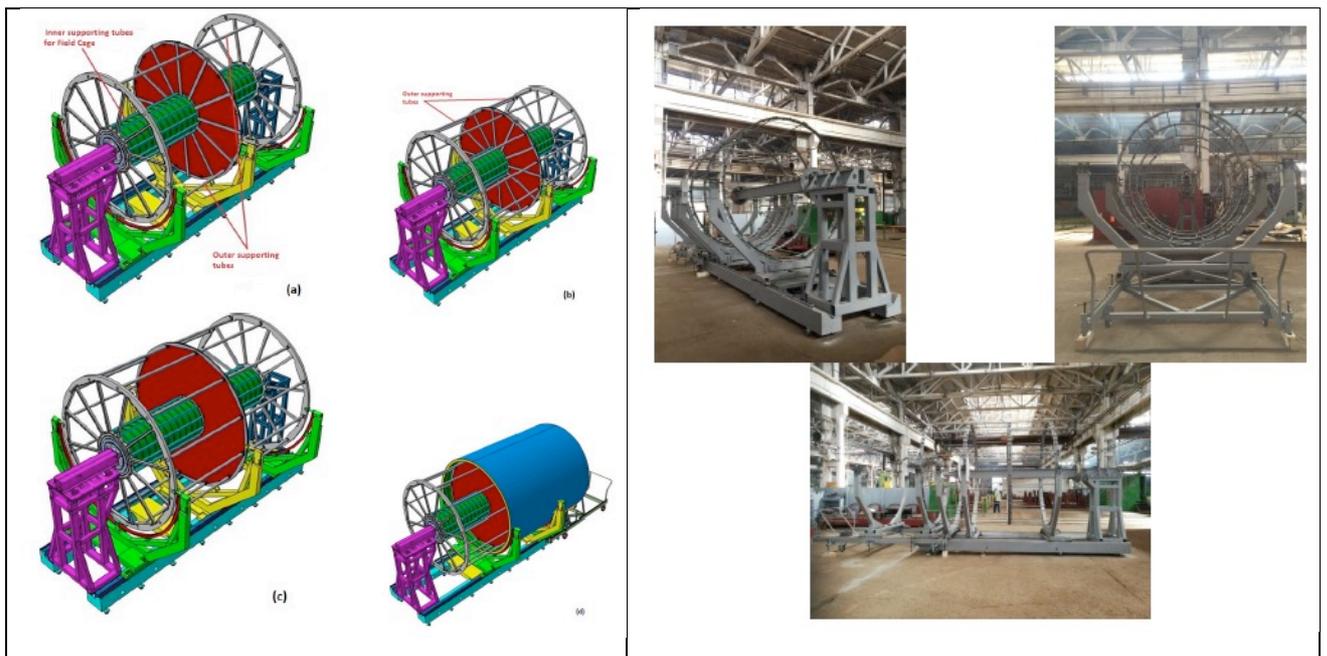


Рис. 2.2.1.18. Этапы сборки ТРС (слева) и оснастка для ее сборки.

Один из этапов сборки ТРС (сборка цилиндров С3-С4) показан на Рис. 2.2.1.19.

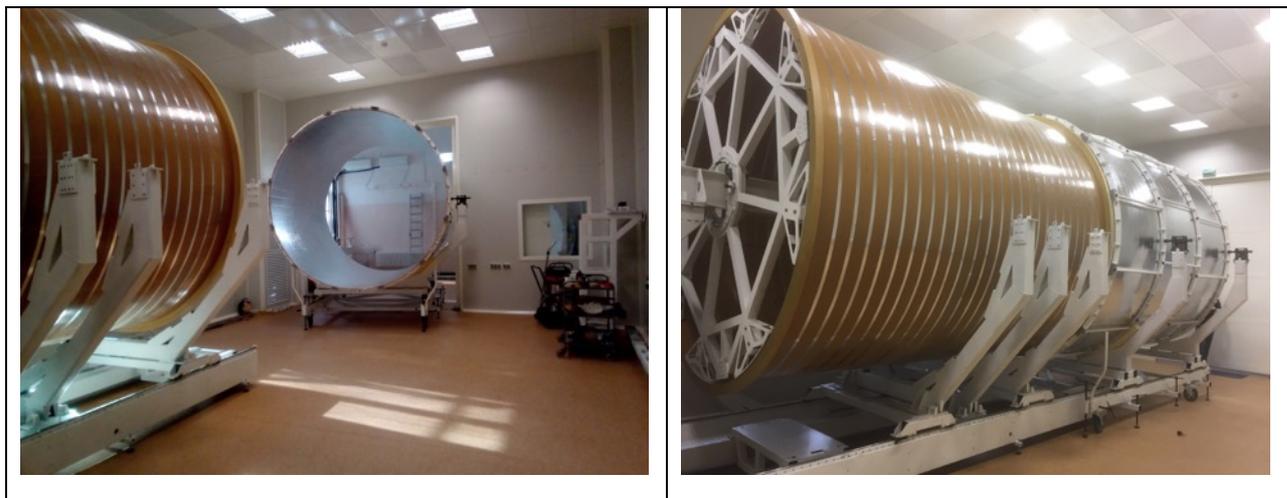


Рис. 2.2.1.19. Сборка цилиндров С3-С4 ТРС.

Начало тестирования ТРС в составе установки МРД запланировано на конец 2020 - начало 2021 года..

2.2.1.3. Детектор ТоF

Время-пролетная система (ТоF) является базовой системой идентификации заряженных адронов МРД. В начальной конфигурации ТоF будет представлена как цилиндр длиной около 6 метров и диаметром 3 метра, собранный из 28 модулей (Рис. 2.2.1.20). Каждый модуль содержит 10 субдетекторов МРПК (Рис. 2.2.1.21). Система детектора ТоF организована по модульному принципу, чтобы минимизировать количество компонентов и стоимость. Помимо модулей ТоF, система включает в себя следующие сервисные подсистемы: источники питания низкого и высокого напряжения, газовая система, электроника сбора данных, охлаждение и медленный контроль. Стартовая конфигурация системы ТоF должна быть введена в эксплуатацию в начале 2021 году.

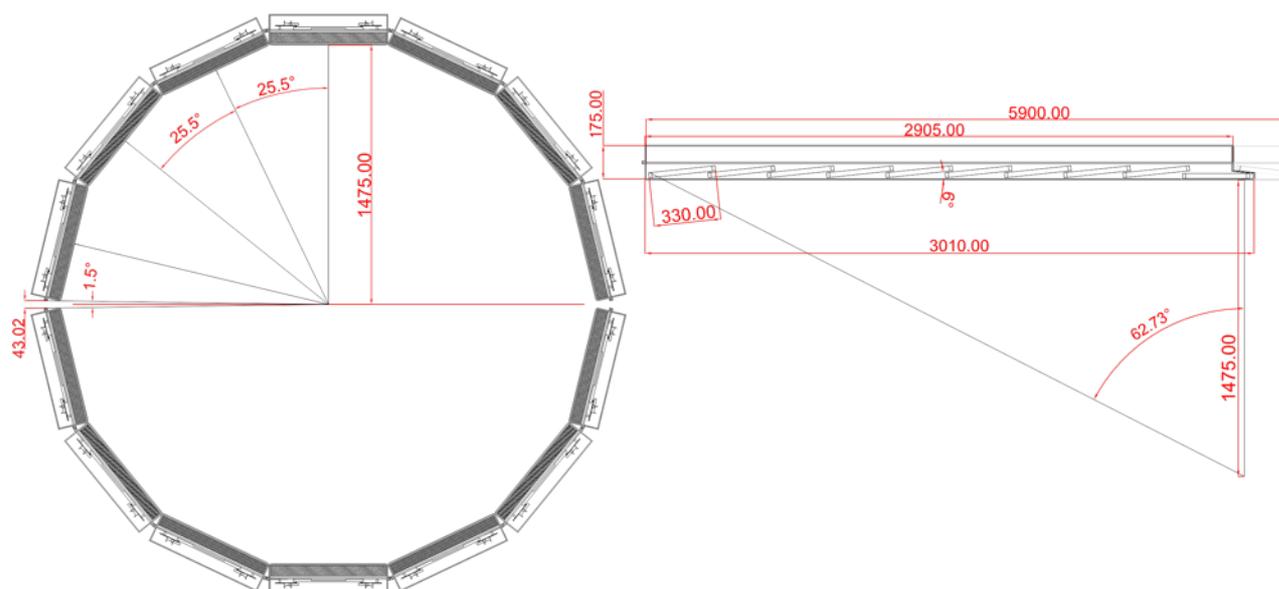


Рис. 2.2.1.20. Схема барреля системы ToF с габаритными размерами.

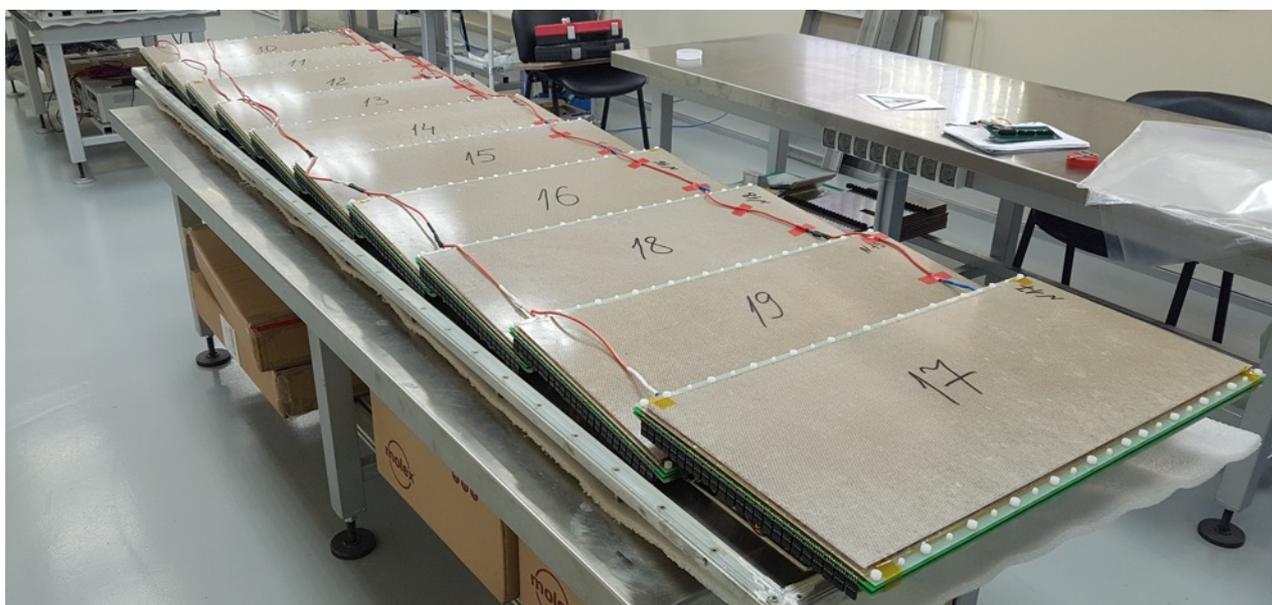


Рис. 2.2.1.21. Расположение детекторов МРПК в модуле ToF.

Каждый модуль ToF состоит из 10 идентичных многозачерных камер с резистивными пластинами с 24 каналами считывания каждый. Разработка и тестирование прототипов МРПК проводились в период с 2013 по 2017 год. Тестировались несколько различных версий МРПК с использованием космических лучей и пучка дейтронов Нуклотрона. Окончательный вариант МРПК изготовлен из коммерческого стекла толщиной 280 мкм. Он имеет 15 газовых промежутков и обеспечивает временное разрешение около 50 пс.

Массовое производство детекторов и модулей началось в начале 2019 года. В 2019 было произведено 80 детекторов МРПК и 3 модуля TOF. Производство всех модулей должно быть завершено в 2020 году. С начала 2020

года все модули ToF испытываются на стенде космических лучей, который был разработан и введен в эксплуатацию специально для этой цели в 2019 году.

Для ToF MPD была разработана 24-канальная плата предусилителя на основе чипа NINO (Рис. 2.2.1.22). Эта плата предусилителя специально адаптирована для двухстороннего считывания электродов в МРПК в эксперименте MPD. Габаритные размеры предусилителя составляют 196,5 x 89 мм². Отличительными особенностями платы предусилителя MPD ToF являются стабилизированное напряжение питания NINO, входной импеданс, согласованный с импедансом МРПК, конденсаторы на входах для считывания сигналов с электродов, пороговое дистанционное мониторирование и управление, а также наличие переходной платы и мониторирование температуры в газовом объеме.

Производство и тестирование всех необходимых (560 шт.) предусилителей завершено в конце 2019 года.

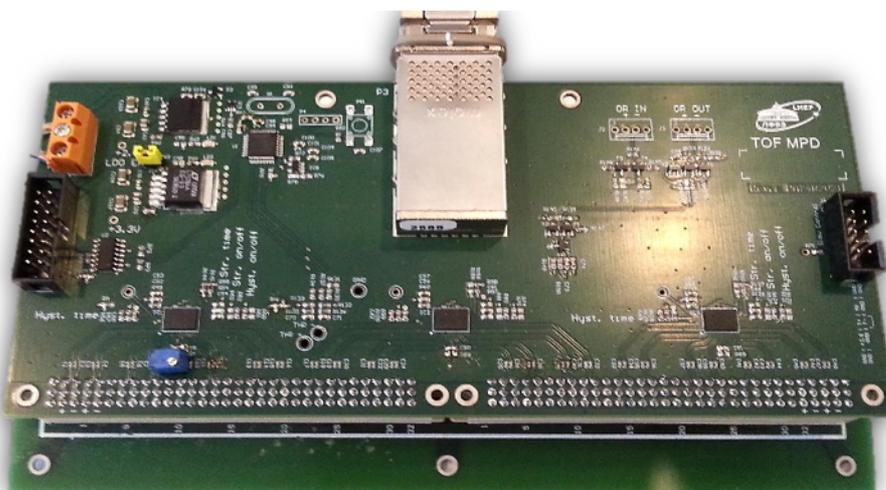


Рис. 2.2.1.22. 24-канальный предусилитель на основе чипа NINO с выходным разъемом СХР.

Новый время-цифровой преобразователь VME64x VXS TDC72VXS на основе чипа NPTDC был разработан для считывания MPD ToF и FFD. Он используется для оцифровки LVDS сигналов, поступающих с выхода усилителя NINO с использованием кабелей Molex P/N 11102512xx с разъемами Molex 76105-0585. Время дискретизации TDC72VXS составляет 23,4 пс на бин. TDC72VXS обеспечивает возможность точной синхронизации с использованием технологии “White Rabbit” с другими устройствами. Общее количество TDC необходимое для MPD ToF составляет 196 (по 14 модулей на каждый из 14 крейтов VME).

Все крейты VME были куплены и доставлены в 2017-2019 годах. Платы TDC72VXS выпускаются с начала 2019 года. В настоящее время доступны и протестированы 149 модулей TDC. Производство, калибровку и испытания считывающей электроники планируется завершить к середине 2020 года.

Детекторы ToF будут работать с негорючей газовой смесью, содержащей 90% $C_2H_2F_4$ + 5% $i-C_4H_{10}$ + 5% SF_6 . Общий объем газа в барреле TOF составляет примерно 3000 литров с учетом объема, занимаемого детекторами. В связи с большим объемом газа, было принято решение использовать замкнутую систему газоснабжения (Рис. 2.2.1.23).

Проектирование и производство газовой системы продолжалось с 2017 по 2019 год. На данный момент система находится в эксплуатации и используется для испытания на стенде космических лучей. После проверки всех модулей к концу лета 2020 года планируется перенести систему в здание №17 и внести незначительные изменения в ее конструкцию.

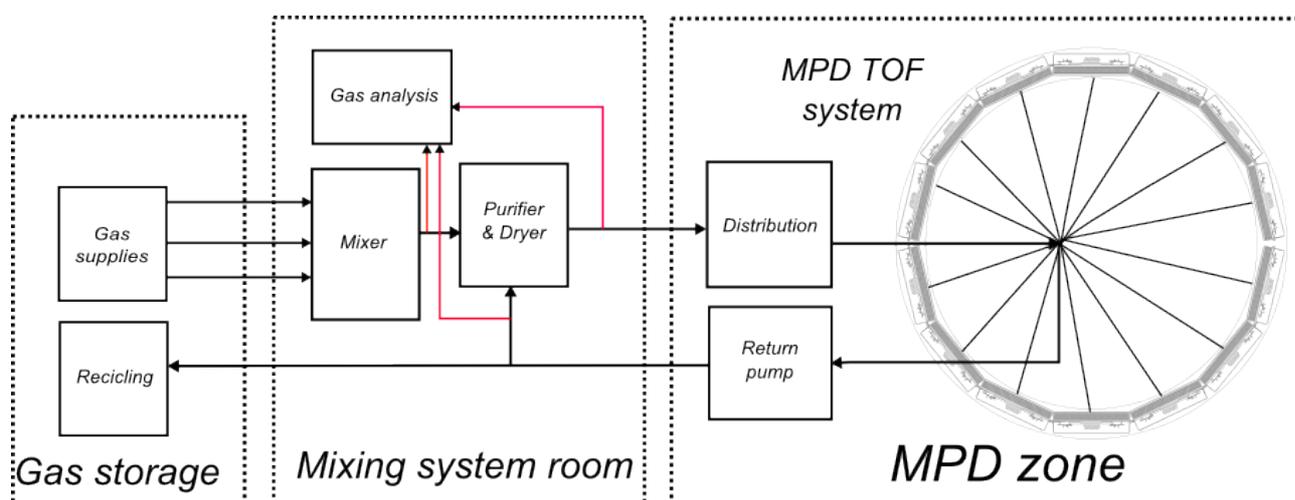


Рис. 2.2.1.23. Схематическое изображение замкнутой газораспределительной системы.

Для подачи высоковольтного питания (HV) на модули ToF будет использоваться высоковольтная система производства компаний ISEG и WIENER (Германия). Система состоит из 28 4-канальных источников питания iSeg EHS4080p(n) (до 8 кВ и 1 мА), размещенных в четырех крейтах MPOD от WIENER.

Для питания всех предусилителей системы ToF достаточно 8 модулей низковольтного питания (LV) iSeg MPV 8016I. Каждый модуль низкого напряжения iSeg MPV 8016I имеет 8 каналов с максимальной мощностью 50 Вт на канал в различных диапазонах напряжения.

Системные устройства HV и LV были приобретены и поставлены в 2017 - 2019 годах в полном объеме.

Система медленного контроля ToF MPD необходима для управления и мониторинга нескольких параметров различных подсистем, таких как газовая система, высоковольтная и низковольтная системы, накамерная электроника и т.д. В настоящее время большая часть системы управления разработана и продолжает развиваться. Часть оборудования будет приобретена уже во время сборки ToF в MPD.

Разработку системы управления и мониторинга ToF планируется провести до 2021 г.

Надлежащее охлаждение входной и считывающей электроники необходимо для предотвращения повреждений/возгорания и для удовлетворения температурных требований центральной области MPD (поверхность детектора должна иметь температуру ниже 25°C). Наиболее оптимальным способом охлаждения для такого отвода тепла является использование системы, основанной только на радиаторах и рециркуляции воздуха в замкнутом контуре. Этот вариант более приемлем из-за низкой стоимости и меньшей вероятности повреждения электроники. Однако этот метод не позволяет контролировать температуру с хорошей точностью.

Закупка и производство системы охлаждения должны быть сделаны в 2020 году.

Установка ToF в MPD начнется после окончания установки электромагнитного калориметра ECal. Каждый модуль ToF будет вставлен в свое положение с обеих сторон ядра магнита. Это будет сделано с помощью мобильной системы поддержки. Конструкция оснащена регулируемыми направляющими того же типа, что и внутри барреля MPD. Чтобы вставить модуль в баррель, достаточно будет подвесить систему поддержки с помощью крана в холле перед выбранным сектором и соединить рельсы вместе, чтобы сформировать уникальную скользящую линию, которая позволит сдвинуть модуль в правильное положение.

Проектирование части интеграционного оборудования закончено. Производство и сборка интеграционных устройств в зале MPD должны быть закончены летом 2020 года.

2.2.1.4. Детектор FFD

Быстрый передний детектор (FFD) является важной частью установки MPD и его целью является выработка быстрого триггера ядро-ядерных столкновений в центре установки MPD, а также T0 сигнала для ToF детектора. Концепция и технические детали детектора FFD подробно описаны в FFD TDR.

Система FFD, показанная на Рис. 2.2.1.24, состоит из двух идентичных под-детекторов FFD_E и FFD_W , основанных на 20 черенковских модулях каждый; двух систем электроники под-детекторов (SDU), обрабатывающих импульсы модулей детекторов; электроники Vertex триггера (VU); электроники считывания; калибровочной системы с пикосекундным лазером; источника высоковольтного электропитания; системы контроля детектора (DCS); кабельной системы; системы охлаждения.

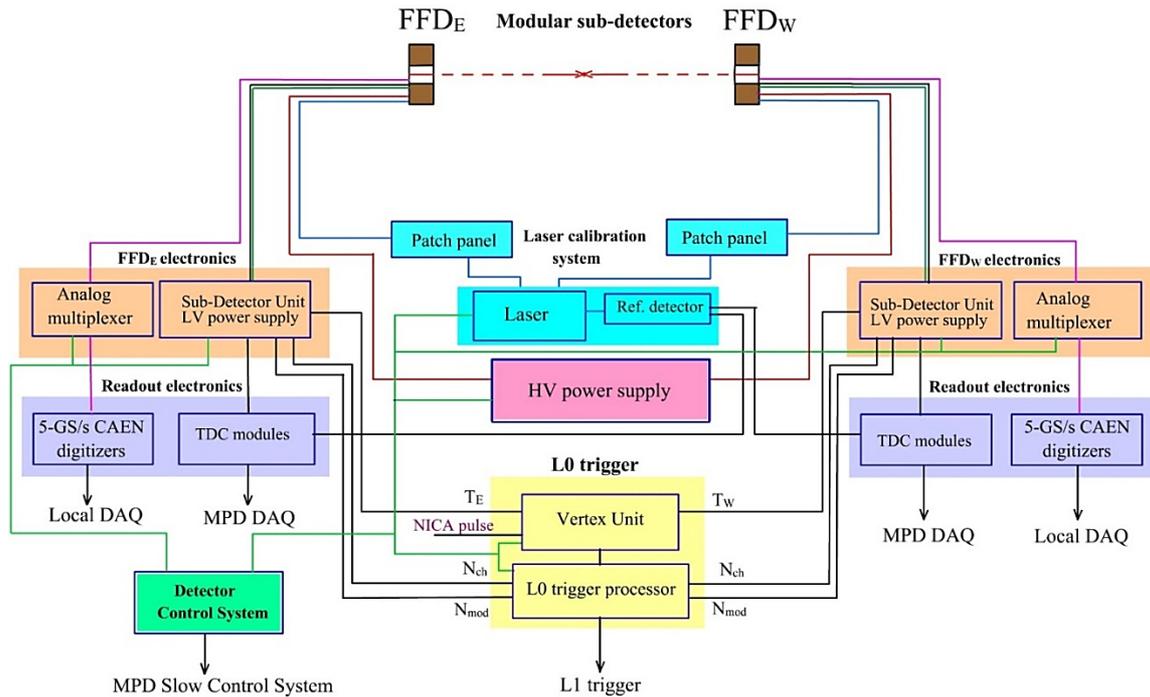


Рис. 2.2.1.24. Блок-схема системы FFD.

Окончательный вид модуля FFD показан на Рис. 2.2.1.25. Полученное временное разрешение индивидуального канала FFD модуля с кабелями и электроникой, используемой в MPD, составляет $\sigma_{FFD} \approx 44$ пс, что лучше требуемых 50 пс для ToF системы.

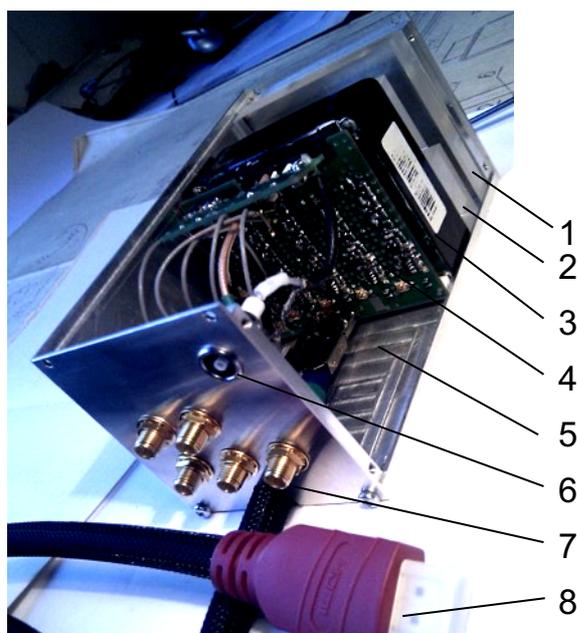


Рис. 2.2.1.25. Вид FFD модуля: 1 – свинцовая пластина, 2 – кварцевый радиатор, 3 – MCP-PMT XP85012/A1, 4 – плата фронт-энд электроники, 5 – корпус модуля, 6 – высоковольтный разъем, 7 – SMA выходы аналоговых сигналов, 8 – HDMI кабель.

В настоящее время все основные элементы модулей закуплены и произведены, включая MCP-PMT XP85012/A1 (41 шт.), кварцевые радиаторы (160 шт.), свинцовые конвертеры (40 шт.). В 2019 г. продолжилось производства модулей. Отдельные механические элементы модулей изготавливаются на 3D принтере в ЛФВЭ. 2020 г. является периодом сборки FFD под-детекторов и тестирования на стенде, созданном в 2019 г. для испытаний FFD в космических лучах. Этот стенд состоит из четырех сцинтилляционных плоскостей 50×50 см² с кремниевыми фотоумножителями, свинцового поглотителя, триггерной электроники и электроники считывания. Процесс изготовления сцинтилляционных плоскостей показан на Рис. 2.2.1.26.



Рис. 2.2.1.26. Изготовление сцинтилляционных плоскостей.

Электроника под-детекторов SDU имеет модульную структуру. Она содержит набор модулей, размещенных в VME крейте со специально спроектированной задней панелью. Набор модулей включает: модули низковольтного питания (LVM), модули обработки сигналов (SPM), центральный процессорный модуль (CPM) и интерфейсный модуль (IM). Для быстрой загрузки в FPGA конфигурационного файла каждый модуль, содержащий FPGA, имеет FPGA конфигурационный загрузочный модуль (CLM), прямо связанный с загрузочным интерфейсом. Через заднюю панель крейта обеспечивается управление всеми модулями SDU, используя линию RS485 и меж-модульные соединения для быстрых сигналов и подачи низковольтного питания между LVM и SPM.

Модули аналогового мультиплексора (AMMs) используются для мониторинга работы FFD каналов. Входы соединены с индивидуальными аналоговыми каналами, а выходные импульсы подаются на оцифровщики.

Финальный проект электроники SDU был разработан в 2016 – 2018 гг. 2019 г. был посвящен созданию и тестированию прототипов модулей электроники. Также были куплены два VME крейта с источниками питания. Производство электронных модулей будет выполнено в 2020 г.

Vertex электроника (VU) триггера взаимодействия использует информацию, поступающую от электроники под-детекторов (SDU_E , SDU_W). VU состоит из одного Vertex модуля (VUM) и интерфейсного модуля, расположенных в VME крейте. Концепция триггерной электроники была разработана в 2016 – 2018 гг. Производство и тестирование запланировано на период 2020 – 2021 гг.

Основная электроника считывания FFD основана на использовании модулей TDC72VHL, расположенных в VME крейтах ToF детектора. Тестирование электроники считывания с FFD под-детекторами будет выполнено в 2020 г.

Специальная система, основанная на PiLas лазере с 30-пс импульсом и длиной волны 405-нм, используется для прецизионной временной калибровки FFD каналов и мониторингования работы детектора. Основными частями системы являются PiLas модуль управления, модуль с лазерным излучателем и оптической системой, жгуты кварцевых волокон, патч-боксы, оптические кабели, опорный фотодетектор с MCP-PMT PP0365G. Вид основных элементов (кроме жгутов кварцевых волокон) показан на Рис. 2.2.1.27.



Рис. 2.2.1.27. Вид PiLas модуля управления, модуля с лазерной головкой и оптической системой и опорного фотодетектора MCP-PMT PP0365G.

В период 2013 -2019 гг. были куплены и изготовлены все элементы системы калибровки. В 2019 г. начаты тестовые измерения с лазерной системой. Окончательные тесты будут проведены в 2020 г.

Для обеспечения высоковольтного питания фотодетекторов MCP-PMT в FFD модулях используется высоковольтная система фирм ISEG и WIENER (Германия). Она состоит из трех 16-канальных модулей с плавающей землей и контроллера от компании ISEG, которые размещены Mrod мини-крейтах компании WIENER. Система была закуплена и поставлена в 2017 г. Программное обеспечение для управления системой было разработано в 2019 г.

Система контроля детектора (DCS) обеспечивает управление и мониторингование высоковольтным питанием, низковольтным питанием,

фронт-энд электроникой, функционированием FFD модулей, а также SDUs и VU, лазерной системой калибровки, локальной системой сбора данных. Каждая под-система имеет свою собственную низко-уровневую связь с управляющим компьютером. Сервер имеет графический пользовательский интерфейс GUI для отображения состояния подсистем и для контроля и управления экспертами. Создание и испытание DCS будет выполнено в период 2019 – 2021 гг.

Каждый FFD модуль соединяется посредством HDMI кабеля с электроникой под-детектора (SDU), высоковольтным кабелем с системой высоковольтного питания, 50-ом коаксиальными кабелями с аналоговым мультиплексором и кварцевым оптическим кабелем со жгутами волокон лазерной системы калибровки. Некоторое дополнительное число кабелей необходимо для передачи сигналов и низковольтного питания между модулями электроники. Для системы контроля детектора (DCS) тоже потребуется некоторое число кабелей для обеспечения ее функционирования. Данные локальной системы считывания, оцифровщики CAEN mod. N6742, передаются посредством оптических кабелей в компьютер. В период 2013 – 2018 гг. были протестированы различные типы кабелей и на основании полученных результатов был сделан окончательный выбор кабелей для FFD. С 2019 г. начинается закупка и производство кабелей. Продолжаются также испытания кабелей.

Специальная система охлаждения требуется для стабилизации температурного режима внутри модулей FFD со значением ниже +30°C. Выполненные испытания показали, что поток сухого воздуха (или азота) со скоростью 5 л/мин. является достаточным для этой цели. В 2019 г. с использованием опыта тестовых измерений на прототипах модулей разработан проект системы охлаждения. Покупка и производство необходимого оборудования и компонент запланированы на 2020 г.

Инсталляция FFD под-детекторов выполняется вместе с кремниевыми вершинными детекторами ITS и пучковой вакуумной трубой, используя специальный цилиндрический контейнер для обеспечения механической жесткости. Конструкция этой системы сейчас прорабатывается. Расположение крейтов с SDU электроникой и оптические патч-боксы должны быть максимально приближены к под-детекторам FFD, поэтому их расположение находится рядом с выходом кабелей из MPD магнита и недалеко от ToF крейтов. Другие крейты FFD и оборудование размещены в стойке на втором этаже эстакады.

Производство FFD под-детекторов и большинства подсистем будет закончено в конце 2020 г. На 2021 г. запланировано завершить создание электроники и DCS, провести финальные испытания и ввести FFD в состав установки MPD.

2.2.1.5. Передний адронный калориметр FNCal

Передний адронный калориметр фрагментов (FNCal) для установки MPD/NICA создается в рамках сотрудничества ИЯИ РАН – ОИЯИ. Данный калориметр является одним из основных компонентов экспериментальной установки и предназначен для измерения геометрии столкновений тяжелых ионов в пучках ускорительного комплекса НИКА. Измерения энергетических и пространственных распределений невзаимодействующих нуклонов налетающих ядер (спектаторов) в калориметре дает уникальную возможность определения центральности ядро-ядерных столкновений, плоскости реакции, а также чувствительных к свойствам горячей области столкновений импульсов отдачи спектаторов.

FNCal состоит из двух одинаковых плеч (44 модулей в каждом), расположенных симметрично с обеих сторон от области столкновений. Модульная структура одного плеча FNCal представлена на Рис. 2.2.1.28, слева. Поскольку тяжелые фрагменты выходят в зону пучка, невозможно различить центральные и периферийные столкновения, используя только выделенные энергии в FNCal. Разделение калориметра на две - внутреннюю и внешнюю, части (Рис. 2.2.1.28.) и расчет энерговыделений E_{in} и E_{out} отдельно в этих частях калориметра позволяет построить новую наблюдаемую энергетическую асимметрию: $AE = (E_{in} - E_{out}) / (E_{in} + E_{out})$. Принимая двумерную корреляцию между асимметрией энергии, АЭ и осаждением полной энергии в калориметре, можно разрешить неоднозначность в определении центральности. Отрицательная и положительная части АЕ соответствуют центральным и периферическим событиям соответственно.

Поскольку тяжелые фрагменты выходят в зону пучка, невозможно различить центральные и периферийные столкновения, используя только выделенные энергии в FNCal. Разделение калориметра на две - внутреннюю и внешнюю, части и расчет энерговыделений E_{in} и E_{out} отдельно в этих частях калориметра позволяет построить новую наблюдаемую энергетическую асимметрию: $AE = (E_{in} - E_{out}) / (E_{in} + E_{out})$. Используя двумерную корреляцию между асимметрией энергии, АЕ и полной выделенной энергией в калориметре, можно разрешить неоднозначность в определении центральности, вызванную утечками энергий спектаторов в отверстие для пучка, а также улучшить точность определения центральности.

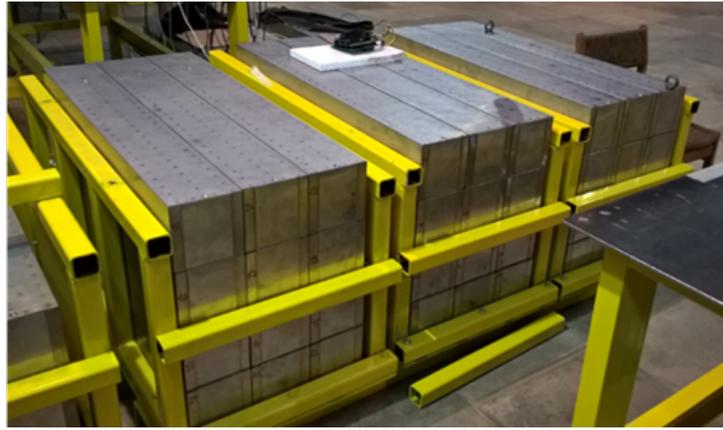


Рис. 2.2.1.28. Слева – схема расположения модулей переднего адронного калориметра. В центре – структура индивидуального модуля. Справа – изготовленные модули калориметра, готовые к установке в детектор..

Структура FHCal модулей

Каждый модуль калориметра представляет собой многослойную структуру с перемежающимися слоями пассивного абсорбера адронного ливня (сурьяно-свинцовый сплав) и пластин органического сцинтиллятора, измеряющими энергию частиц в ливне, см рис. 2.2.1.28 в центре. Для съема и транспортировки света в пластинах используются переизлучающие оптоволоконна фирмы Kuraray (Япония) типа Y11(200) S-type диаметром 1 мм.

В калориметре используются пластины размером $15 \times 15 \times 0.4$ см³ с оптоволоконном, вклеенным в спиральную канавку. Для увеличения световыхода, один конец оптоволоконна покрыт слоем специальной светоотражающей краски на основе серебра.

Для измерения световыхода отдельных сцинтилляционных пластин был создан стенд, позволяющий проводить измерения с источником β -излучения Sr⁹⁰. Исследования влияния формы канавки для оптоволоконна на величину световыхода были проведены для двух типов канавок – круглой и спиральной. На рис. 2.2.1.29 приведены распределения световыходов пластин с круглой и спиральной канавками при сканировании радиоактивным источником вдоль диагонали сцинтилляционных пластин.

Как видно из рисунка, для круглой и спиральной канавок распределения световыхода почти идентичны. Для спиральной канавки средний световыход немного выше (более 20 фотоэлектронов) с лучшей неоднородностью (RMS распределения 0.9 фотоэлектронов). Поэтому было принято решение изготавливать пластины со спиральной формой канавки.

Параллельно с изготовлением свинцово-сцинтилляционных модулей калориметров разрабатывается схема съема сигналов и система управления параметрами калориметров.

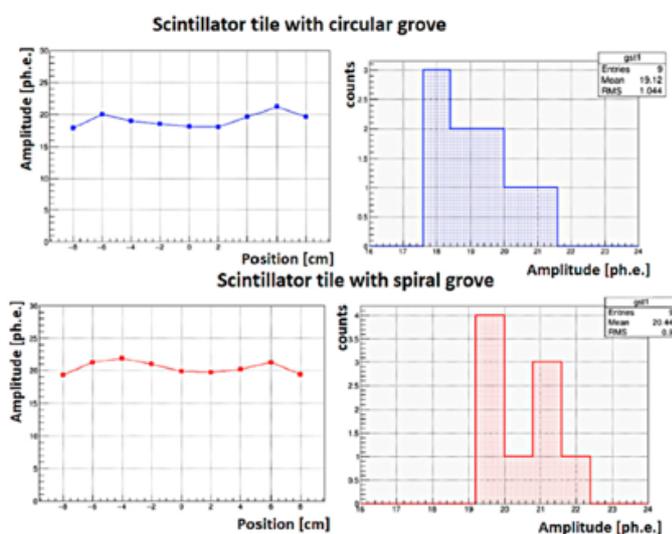


Рис. 2.2.1.29 Распределение световых выходов вдоль диагонали сцинтилляционной пластины с двумя типами канавок для оптоволокон. Вверху – для круглой канавки, внизу – для спиральной канавки. Гистограммы слева – проекции на вертикальную ось распределений справа.

Съем сигналов с FHCAL модулей

В 2019 г. были изготовлены платы с аналоговой электроникой FEE (front-end electronics). Эти платы (рис. 2.2.1.30) размещаются в торце модуля на панели с оптическими разъемами. На первой плате (рис. 2.2.1.30, слева) установлены фотодетекторы – фотодиоды MPPC S14160-010C/P производства Hamamatsu. Размер пикселей этих фотодиодов составляет 10×10 мкм² и они имеют время восстановления порядка 10 наносекунд. Это позволило увеличить динамический диапазон за счет того, что пиксели успевают перезарядиться несколько раз в течение импульса света от спектросмещающего оптоволоконка длиной порядка 50-60 нс.

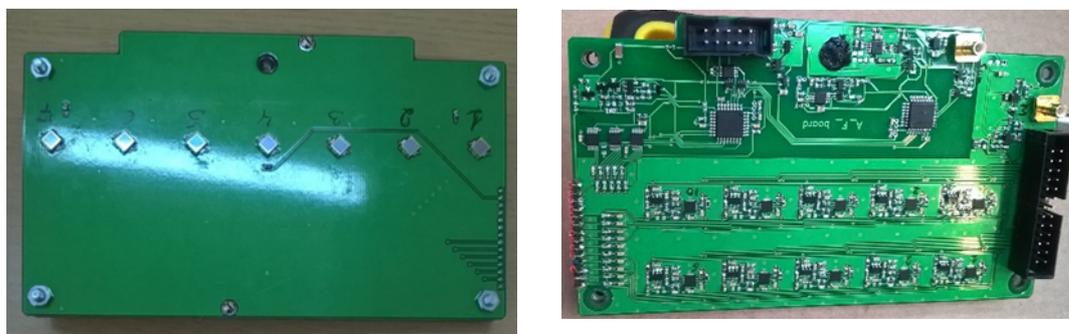


Рис. 2.2.1.30. Слева — плата с фотодиодами, справа – плата с аналоговой электроникой для считывания сигналов с фотодиодов.

На второй печатной плате расположены усилители сигналов фотодиодов, микроконтроллер и система управления напряжением питания фотодиодов, датчик температуры, а также элементы генератора калибровочных световых импульсов, включая микроконтроллер управления, светодиод и PIN-фотодиод, предназначенный для контроля амплитуды световой вспышки. Платы аналоговой электроники и управляющий модуль разработаны и изготовлены в Дубне в ОИЯИ специально для FHCa1 калориметра. Оцифровка аналоговых сигналов с калориметра осуществляется 64-канальными 62.5 MS/s амплитудно-цифровыми преобразователями ADC64s2, изготовленными компанией AFI Electronics, Дубна. Представленная схема съема сигнала с калориметра была успешно протестирована на адронных пучках низких энергий.

Энергетическая калибровка FHCa1 модулей

После сборки модулей основное внимание уделялось тестированию изготовленных модулей калориметра с помощью космических мюонов. Данное тестирование имеет двойную задачу. Первое, необходимо осуществлять постоянный контроль за качеством собранных модулей калориметра. Второе, необходимо разработать методику калибровки продольных секций модулей калориметра с помощью космических лучей. Основной задачей является отбор космических мюонов с заданной геометрией треков.

В настоящее время разрабатываются несколько подходов в энергетической калибровке модулей с помощью космических мюонов. Так на рис. 2.2.1.31, слева приведены геометрии треков космических мюонов, проходящие через две, три или все семь продольных секций FHCa1 модуля. Наиболее предпочтительными являются события с почти горизонтальными треками, проходящими через все секции модуля. К сожалению, статистика таких событий очень низкая, что вынуждает разрабатывать методы восстановления энергии, выделенной в секциях модулей, с помощью космических мюонов с различной геометрией треков. На рис. 2.2.1.31, справа представлено распределение светового выхода в секциях FHCa1 модулей. Как видно, средний световой выход составляет около 45 фотоэлектронов на одну продольную секцию модуля. Это позволяет надежно выполнять энергетическую калибровку FHCa1 модулей непосредственно в рабочем положении при установке в магните.

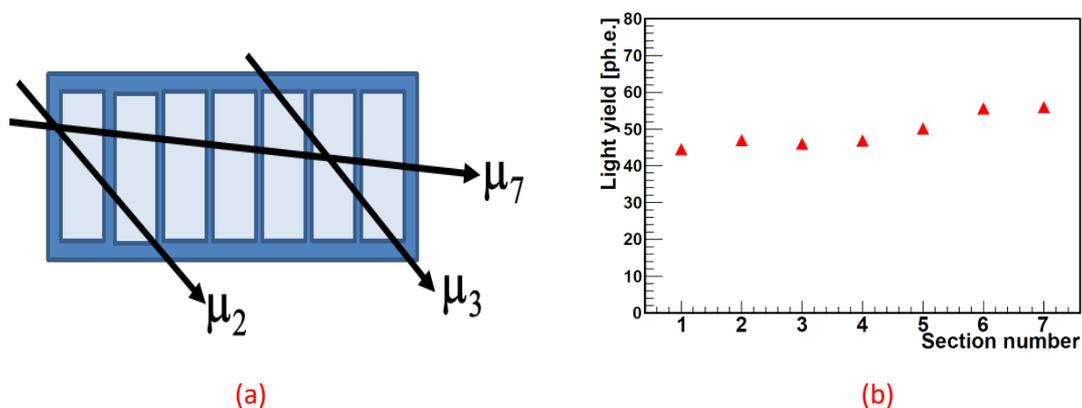


Рис. 2.2.1.31. Слева — схема треков космических мюонов с различной геометрией. Справа – распределение светового выхода в продольных секциях FHCAL модулей.

В настоящее время все 90 FHCAL модулей изготовлены и готовы для установки в MPD магнит. см рис. 2.2.1.28.

2.2.1.6. Детектор ECal

Крупногабаритный (6 метров в длину и 4,5 метра в диаметре) цилиндрический электромагнитный калориметр ECal является важной частью многоцелевого детектора MPD и перекрывает центральную область псевдобыстрот $|\eta| < 1,2$ (см. Рис. 2.2.1.32). ECal оптимизирован для точных измерений пространственных и энергетических характеристик фотонов и электронов в диапазоне энергий от около 20 МэВ-2 ГэВ. Для работы в условиях высокой множественности вторичных частиц в реакции типа Au+Au, ECal имеет высокую сегментацию и состоит из 38 400 ячеек («башен»). Учитывая все требования (высокое энергетическое разрешение, достаточно большое расстояние до вершины взаимодействия, малый радиус Мольера, возможность работы в сильном магнитном поле, высокое временное разрешение, радиационная стойкость и приемлемая цена), был выбран электромагнитный калориметр типа «шашлык», общий вид которого в составе установки MPD показан на Рис. 2.2.1.32.

Каждая башня имеет сэндвич-структуру из 210 полистирольных сцинтилляторов и 210 свинцовых пластин с 16 спектросмещающими волокнами (WLS), которые пронизывают пластины и собирают сцинтилляционный свет; толщина каждой сцинтилляторной пластины составляет 1,5 мм, а толщина свинцовой пластины – 0,3 мм.

Эти особенности новой конструкции привели к некоторой задержке в подготовке серийного производства калориметрических модулей.

Каждый модуль электромагнитного калориметра состоит из 16 башен, которые склеены вместе. Геометрия каждого модуля зависит от его положения по Z-координате относительно точки пересечения пучков. Для детектирования сцинтилляционного света, собираемого 16 волокнами WLS, которые проходят через отверстия в сцинтилляторе и свинцовых плитках, были выбраны силиконовые фотоумножители Hamamatsu S13360-6025 MAPD (с чувствительной областью 6×6 мм²). Несколько модулей новой конструкции (Рис. 2.2.1.34) были изготовлены и испытаны в тестовом пучке космических мюонов. Результаты испытаний (Рис. 2.2.1.35) согласуются с прогнозами компьютерного моделирования.

В настоящее время вся техническая документация по серийному производству восьми типов калориметрических модулей завершена и направлена производителям модулей ECal. Две компании («Полипак» в Дубне и «Унипласт» во Владимире) произвели 10 млн. сцинтилляционных пластин, что составляет 100% от общей потребности ECal. Компания «Полипак» произвела полное количество прижимных пластин (для сжатия башен модуля) и «коронки» (для формирования волокон WLS в окнах вывода света), необходимое для изготовления ECal.



Рис. 2.2.1.34. Прототипы модулей. На нижней фотографии слева показан модуль с платой электроники.

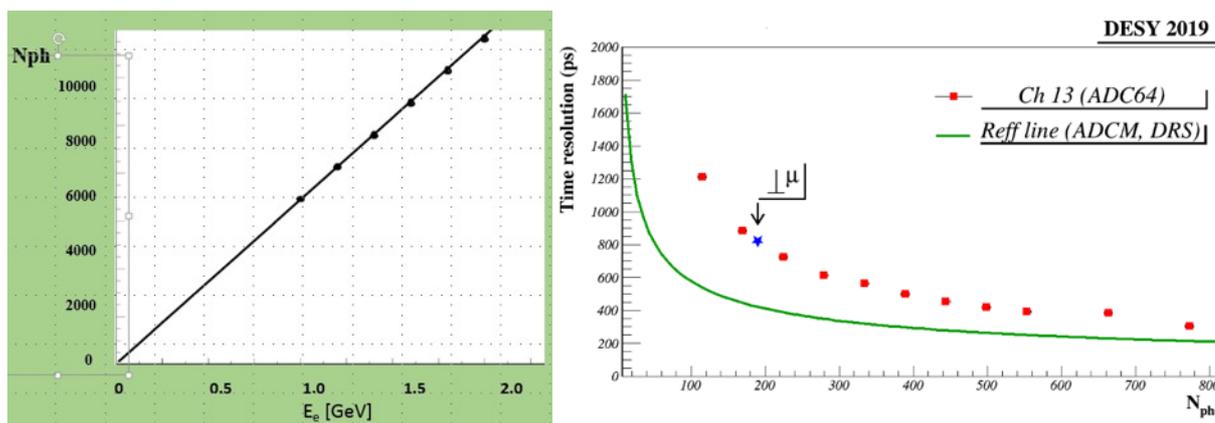


Рис. 2.2.1.35. Линейность светового сигнала (слева) и временное разрешение (справа) для прототипа модуля ECal. Результаты испытаний прототипа модуля на пучке электронов и на космических мюонах.

Часть общего количества WLS волокон, необходимого для производства модулей, была приобретена у компании Kuraray. Разработана клей-краска для склеивания башен в модули, налажено ее производство. Технология нанесения отражающего покрытия на свинцовые пластины была разработана и передана двум компаниям.

Доля производства модулей в России (25%) должна быть завершена в течение одного года (т. е. в середине 2020 года). Производство остальной части модулей предполагается выполнить в Китае до конца 2020 г.

Геометрически ECal состоит из 25-ти секторов или 50-ти полусекторов. Каждый полусектор (Рис. 2.2.1.36) содержит 48 модулей 8-ми различных типов, которые вклеены в контейнер (корзину) из стеклопластика, а также соответствующую электронику считывания и управления общей массой около 1,5 тонны. Модельные расчеты показывали, что ячеистая структура корзины со стенками толщиной 2 мм обеспечивает достаточную прочность и жесткость для того, чтобы деформации полусектора под собственным весом не превышали 0,5 мм для всех возможных ориентациях полусектора в пространстве. В настоящее время контракт на производство 52 корзин подписан, ожидается, что 16 корзин будут поставлены в ОИЯИ к октябрю 2020 года, а весь объем корзин планируется поставить к лету 2021 года.

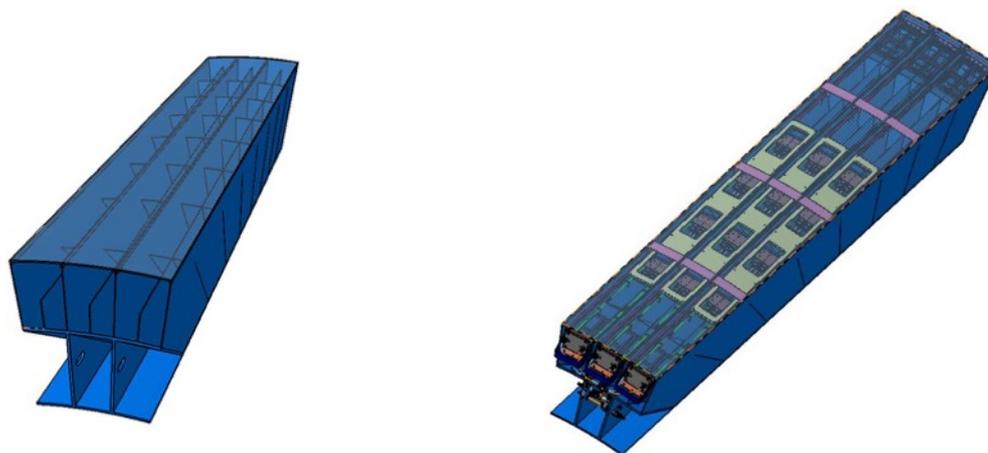


Рис. 2.2.1.36. Корзина ECal без электроники (слева) и с установленной (справа) электроникой.

Первоначально электромагнитный калориметр планировался как самонесущая конструкция, где каждый сектор является силовым элементом всей конструкции. Но после разделения производства модулей ECal между российскими и китайскими площадками (с разными временными графиками) потребовалась возможность установки и переустановки секторов (полусекторов) калориметра без демонтажа всего калориметра и MPD. Для удовлетворения этого требования планируется использовать специальный силовой каркас (около 8 метров в длину и около 4,5 метров в диаметре) из углепластика, способный выдержать всю нагрузку от детекторов MPD без поддержки секторов ECal (Рис. 2.2.1.37.). Этот каркас будет состоять из внутренней (толщиной 20 мм) и наружной (толщиной 15 мм) цилиндрических оболочек с 25 переборками (толщиной 10 мм) между ними, что образует 25 ячеек для установки секторов калориметра. Были выполнены расчеты жесткости для упрощенной модели каркаса, и они показали, что планируемая суммарная нагрузка 120 тонн приведет к максимальным деформациям каркаса около 2 - 3 мм, что соответствует нашему требованию иметь деформации ниже 5 мм, чтобы сохранить возможность установки и повторного монтажа полусекторов. Прочностные расчеты показывают способность рамы выдерживать нагрузку примерно в 10 раз выше наших максимальных ожиданий, а расчеты надежности и испытания гарантируют 15-летнюю эксплуатацию рамы. На данный момент контракт на проектирование и изготовление каркаса находится в стадии окончательного подписания; мы ожидаем поставку каркаса в ОИЯИ в ноябре 2020 г.

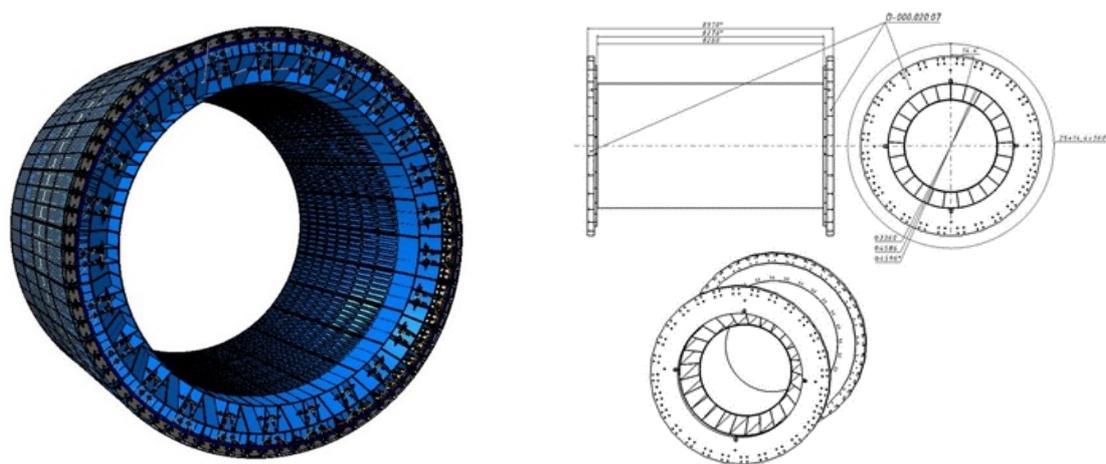


Рис. 2.2.1.37. Силовой каркас MPD. Слева схематически показаны установленные полусектора; справа показаны крепление каркаса к опорному кольцу магнита.

В ОИЯИ разработана электроника считывания и управления. Были изготовлены и испытаны опытные образцы электроники. Массовое производство электроники начнется в ближайшие месяцы и будет завершено к моменту сборки калориметра во второй половине 2020 г. Производство предполагается распределить между российскими (считывающая электроника) и китайскими (электроника управления и предусилители) компаниями. В настоящее время большие усилия группы ECal сосредоточены на разработке инновационной системы для установки и замены электроники калориметра без демонтажа самого калориметра. В этой системе все элементы электроники со значительным тепловыделением расположены внутри охлаждающих коробов с вентиляцией; платы предусилителей с силиконовыми фотоумножителями располагаются снаружи коробов и используют их в качестве опорных конструкций. Сами короба (длиной 3 метра каждый) монтируются на рельсах в полусекторах и могут вдвигаться в калориметр и извлекаться из него. Наиболее сложной инженерной задачей в данной конструкции является надежное и высокоточное (лучше, чем 0,5 мм) совмещение выходных окон WLS волокон на модулях калориметра с соответствующими силиконовыми фотоумножителями на платах предусилителей. Прототип короба с точным позиционированием для электроники сейчас тестируется в ОИЯИ. Система водяного охлаждения для электроники ECal сконструирована под руководством экспертов группы электроники MPD.

Для контроля качества выпускаемых модулей и выполнения первоначальной калибровки детекторов был разработан специальный стенд (Рис. 2.2.1.38), позволяющий одновременное тестирование 12 модулей ECal на космических мюонах. К концу зимы 2020 г. планируется ввести в эксплуатацию 8 таких стендов (для 8-ми различных типов модулей) с общей

производительностью 96 модулей (или 2 полусектора) за каждые 2 недели, что позволит протестировать все модули ECal в течение одного года.



Рис. 2.2.1.38. Прототип стенда для одновременного тестирования 12-ти модулей ECal на космических мюонах.

Продолжаются компьютерное моделирование калориметра с целью выявления возможного влияния различных параметров детектора на исследуемую физику. Обнаружен эффект, связанный с неидеальностью проективной геометрии калориметра, и предложен метод его коррекции.

2.2.1.7. Детектор ITS

Внутренняя трековая система (ITS) всегда рассматривалась как важная подсистема MPD, которая, однако, из-за своей технической сложности и больших затрат, изначально входила в базовую конфигурацию MPD не в полном объеме. Такой статус MPD ITS продолжался до того момента, пока в Протоколе №134 от 2018 г. между ЦЕРН и ОИЯИ не были сформулированы порядок и условия передачи новой технологии и ноу-хау, разработанной ЦЕРН, которая позволяет построить MPD-ITS на основе монолитных активных пиксельных сенсорах (MAPS) ALPIDE. Этот документ проложил дорогу к реальному построению MPD ITS, вероятно, являющейся наиболее технологически сложной из всех систем детекторов, создаваемых в ОИЯИ.

Многоцелевой детектор MPD создается для изучения свойств чрезвычайно плотной ядерной материи, образованной в релятивистских ядроядерных столкновениях при энергиях NICA. Выходы странных и очарованных частиц являются важными наблюдаемыми, чувствительными к критическим явлениям при фазовых переходах QGP-вещества при высокой плотности барионов. Высокоэффективная регистрация таких короткоживущих продуктов

ядерных взаимодействий с использованием вершинных кремниевых пиксельных детекторов, возможно, сыграет ключевую роль в экспериментальном обнаружении деконфайнмента кварков в файрболе, вызванного флуктуациями плотности ядерного вещества в критических условиях. Считается, что перспективными пробниками таких процессов являются частицы с тяжелыми очарованными кварками. Без MPD ITS изучение процессов в очарованном секторе невозможно.

Концептуальная компоновка MPD ITS (Рис. 2.2.1.39) повторяет схему, используемую новейшей церновской системой ALICE ITS2, но с уменьшением количества слоев пиксельных сенсоров с семи (ALICE ITS2) до пяти (MPD ITS) из-за значительно меньшего диаметра внутреннего отверстия MPD TPC (500 мм). MPD ITS будет состоять из двух цилиндров со слоями разной толщины и совершенно разной конструкции несущей опорной конструкции наружных (ОВ) и внутренних (ИВ) цилиндров.

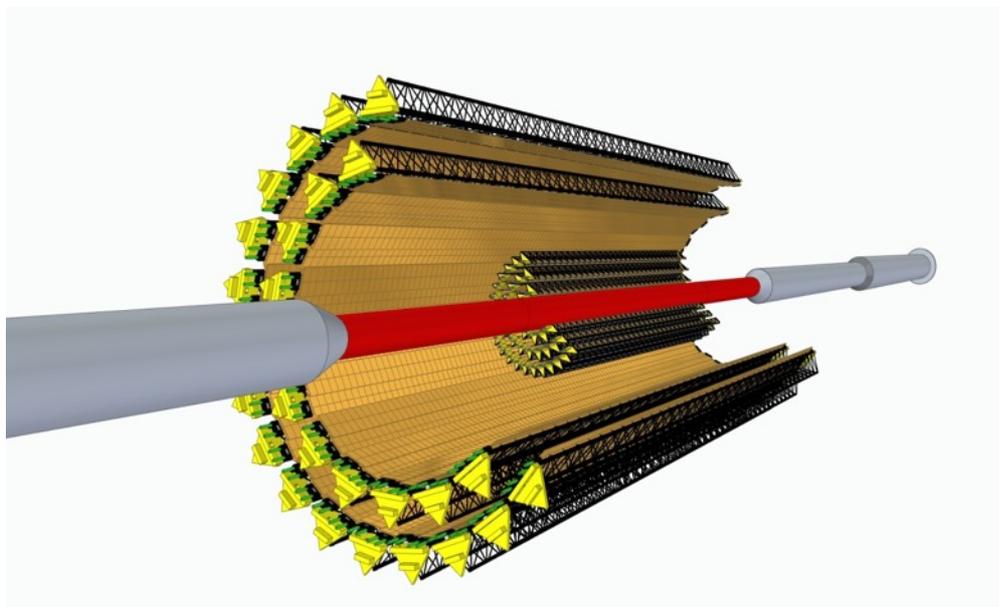


Рис. 2.2.1.39. Концептуальная компоновка MPD ITS вокруг тонкостенной пучковой трубу установки MPD.

2.2.1.8. Тонкостенная пучковая труба

Одним из важнейших элементов проекта NICA MPD является тонкостенная пучковая труба, изображенная на Рис. 2.2.1.40.

Центральная часть ионопровода сделана из бериллия, две внешние части – из специального сплава алюминия. Толщина стенки ионопровода составляет 1.0мм как для бериллиевых, так и для алюминиевых деталей.

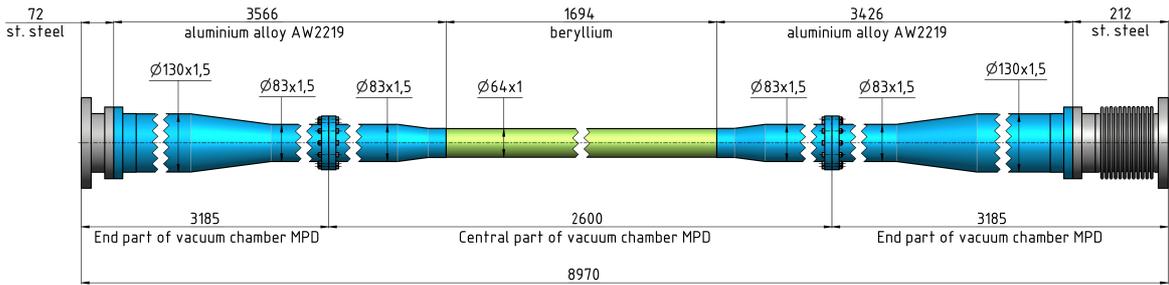


Рис. 2.2.1.40. Концептуальный дизайн вакуумной пучковой трубы установки MPD.

2.2.1.9. Система сбора данных (DAQ) и компьютерный кластер MPD

Основная функция системы DAQ — это реализация передачи данных от детекторов в систему хранения данных. Она включает в себя передачу данных от электроники считывания к процессору обработки данных первого уровня, конструктор событий, раздачу триггера первого уровня и систему хранения данных. Главными компонентами DAQ являются сеть передачи данных, сервера обработки данных, система хранения данных, программные пакеты, протоколы сетевого соединения и форматы данных. Электроника считывания данных и интерфейсы, реализованные в ней, системы временной синхронизации и синхронизации тактовых сигналов, система раздачи триггерных сигналов так же включены в систему DAQ на установке MPD.

Считывание данных, основанное на модулях Время-Цифрового преобразования (ВЦП), используется на детекторах ToF и FFD установки MPD. В обоих детекторах применяется похожая DAQ архитектура: ВЦП модули устанавливаются в VXS крейты и синхронизация модулей внутри одного крейта осуществляется модулем TTVXS (Рис. 2.2.1.41.). Межкрейтовую триггерную синхронизацию осуществляет модуль CRU-16. Для организации DAQ системы детектора ToF необходимо 14 VXS крейтов. В каждом крейте устанавливается 1 модуль TTVXS и 14 модулей TDC72VHL (Рис. 2.2.1.42.). TTVXS получает триггерную информацию через триггерную сеть от CRU-16 (Рис. 2.2.1.43), а временную синхронизацию от сети White Rabbit. Внутри VXS крейта модуль TTVXS раздает триггерные и тактовые сигналы модулям ВЦП. Он также собирает от них признаки занятости и статусы (напряжения, температуры и т.д.). Все модули отсылают данные через 1Гб подключение к сети данных (по одному на модуль).

FFD DAQ аналогична ToF DAQ, с той лишь разницей, что использует 2 VXS крейта по 5 TDC72VHL в каждом.

Модуль TTVXS является источником триггеров и временной синхронизации для модулей внутри VXS крейта. Он также собирает от них признаки занятости и статусы (напряжения, температуры и т.д.). Топологией для всех связей является звезда. TTVXS и каждый нагрузочный модуль соединяются посредством 1 серийного двунаправленного соединения со скоростью до 2,5 Гб/с, 1 двунаправленного LVDS соединения и 2 однонаправленных LVDS соединений со скоростью до 125 Мб/с.

TTVXS имеет линии связи типа SMBus со всеми нагрузочными модулями для мониторингования их состояния. Эта информация может быть передана через 10/100 Ethernet.

В модуле TTVXS имеется 4 SFP+ разъема для подключения к различным сетям (временной синхронизации, триггерной и передачи данных). Скорость соединения может достигать 10 Гб/с. В модуле также реализованы 6 управляемых LVTTTL разъемов (вход/выход). На данный момент их функционал находится в стадии обсуждения.



Рис. 2.2.1.41. TTVXS модуль.



Рис. 2.2.1.42. TDC72VHL модуль.

Платы типа ВЦП осуществляют временную оцифровку отдельных сигналов (хитов) с точностью порядка 20 пс. В основе этой платы лежит микросхема НРТДС. Временные метки сигналов хранятся в кольцевом буфере на 104 мкс. Таким образом полная задержка триггера не должна превышать это значение.

До конца 2019 года будет произведено 120 модулей TDC72VHL и 4 модуля TTVXS для использования на MPD ToF стенде. 80 модулей TDC72VHL и 16 модулей TTVXS планируется произвести в 2020 году.

Плата сбора данных на основе АЦП оцифровывает входной аналоговый сигнал в фиксированные временные интервалы. Ее логика подавления нулей основана на отслеживании базовой линии и значения порога. Формирование сигнала осуществляется в цифровом виде с помощью FIR фильтра. Это позволяет уменьшить количество оцифрованных точек для представления сигнала с минимальной потерей точности. Каждый канал содержит кольцевую

память на 30 мкс. Это накладывает ограничение на общую задержку триггерного сигнала.

Модуль ADC64Ecal (Рис. 2.2.1.44) разработан для оцифровки сигналов с детекторов ECal и FHCAL. Он является 64 канальным 14 битным АЦП с частотой дискретизации 62,5 МГц. Внутри ПЛИС Xilinx Kintex 7 реализована логика цифровой обработки данных. Каждый модуль имеет 2 оптических линии связи (основная и резервная) для временной синхронизации, передачи триггерной информации и передачи собранных данных. Размеры платы позволяют расположить ее в специальных контейнерах внутри магнита. На плате использованы магнито и радиационно устойчивые компоненты. На данный момент произведены 15 модулей, 20 будут произведены до конца 2019 года. В 2020 будет произведено еще 100 модулей.



Рис. 2.2.1.43. CRU-16 модуль.

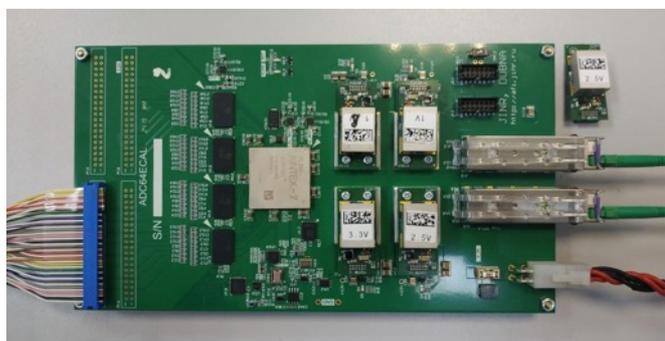


Рис. 2.2.1.44. ADC64Ecal модуль.

4 модуля будут расположены внутри одного контейнера. Система жидкого охлаждения (СЖО) для электроники в данный момент находится в стадии разработки. Тестовая система охлаждения на 12 модулей будет готова во втором квартале 2020 года.

В финальном варианте MPD будет состоять из 600 модулей ADC64Ecal для ECal и 12 модулей для FHCAL. Вся эта электроника должна иметь временную и триггерную синхронизацию. Для этих целей разработан модуль CRU-16. Это типовой модуль вычитки данных с поддержкой временной синхронизации посредством White Rabbit сети. Он способен обеспечить временную синхронизацию 16 нижестоящих модулей, обеспечить их триггерными сигналами и аккумулировать данные с них. Эти данные далее передаются в сеть через 40 Гб/с оптический интерфейс. 2 модуля произведены и протестированы и 10 модулей планируется произвести в 2020 году.

Закупленное сетевое оборудование для MPD DAQ частично покрывает нужды тестового запуска установки.

Сетевые устройства и DAQ электроника будут размещаться внутри и

вокруг барреля MPD, на платформе MPD и внутри MDC.

На TPC, ECal и FHCал считывающая электроника будет размещена внутри барреля. Данные с детекторов будут передаваться на сетевые устройства для TPC и на модули CRU-16 для ECal и FHCал по оптоволоконным соединениям. Сетевые устройства и модули CRU-16 будут размещены на платформе MPD. Все данные, собираемые модулями CRU-16 будут передаваться в MDC.

Сетевые устройства и DRE от детекторов ToF и FFD будут размещены на барреле. Данные пойдут следующим путём: из DRE на сетевые коммутаторы на платформе, затем, уже оттуда в MDC.

Разработан проект зала управления детектором MPD с использованием мини стандартизованного центра обработки данных (MDC). Соответствующие схемы приведены на Рис. 2.2.1.45.

Договор на производство MDC и комнаты управления будет заключен до конца 2019 года. Ввод в эксплуатацию и тестовый запуск запланирован на май 2020 года.

Сеть White Rabbit (WR) обеспечивает синхронизацию для больших и распределённых систем с суб-наносекундной точностью и пикосекундным разбросом. Это обеспечивает детерминированную и надёжную доставку данных. Платы DRE оцифровывают сигналы детектора, используя общее представление о времени и частоте, предоставляемое сетью White Rabbit (WR). Привязка времени осуществляется приёмником GPS/GLONASS и резервной прецизионной частотной привязкой (цезиевые или рубидиевые часы).

10 WR коммутаторов закуплены до 2019 года и 10 планируется приобрести в 2020 году.



Рис. 2.2.1.45. Схемы MDC (сверху) и зала управления (внизу).

Каждая программа MPD DAQ имеет свою конфигурацию. Запись в конфигурации представляет собой структуру данных ключ-значение, называемую документ. Это означает, что данные похожи на JSON документы. Это представление данных более ёмкое, нежели традиционного табличное представление. Типичное количество документов соответствующее каждой программе от 10 до 500, типичная глубина вложенности структур от 5 слоев и выше. Управление такими структурами данных осуществляется документо-ориентированной базой данных Mongo, распространяемой под свободной

лицензией. Программы, используемые в эксперименте, тоже представляют собой древовидную структуру. Команды передаются по этому дереву от программы к программе от головной программы.

В конце 2019 - начале 2020 года планируется разработать программное обеспечение для объединения всех ранее написанных программ под одной программой мониторинга приложений. Предполагается, что данная программа сможет мониторить от 10 до 50 других программ (подпрограмм). Она будет хранить всю необходимую информацию для успешного воспроизведения подпрограмм запуска.

Разработан функционал, схема и протоколы взаимодействия основных подпрограмм эксперимента. Разрабатывается также программа, которая будет отвечать за управление модулем CRU и за интеграцией других программ в систему контроля запуска.

2.2.2. Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N) – установка для изучения барионной материи на Нуклотроне

Целью эксперимента BM@N является исследование динамики реакций и изучение модификации свойств адронов в ядерной материи, рождение странных гиперонов около порога и поиск гиперядер с использованием установки BM@N во взаимодействиях выведенных пучков ионов Нуклотрона с фиксированными мишенями. В рамках проекта также ведется исследование структуры ядер на малых меж-нуклонных расстояниях на детекторе BM@N.

В рамках проекта создания базовой конфигурации комплекса NICA продолжалось плановое развитие установки BM@N с последовательным тестированием различных конфигураций детекторов в ее составе на выведенных из Нуклотрона пучках ионов до ее полной конфигурации, показанной на Рис. 2.2.2.1.

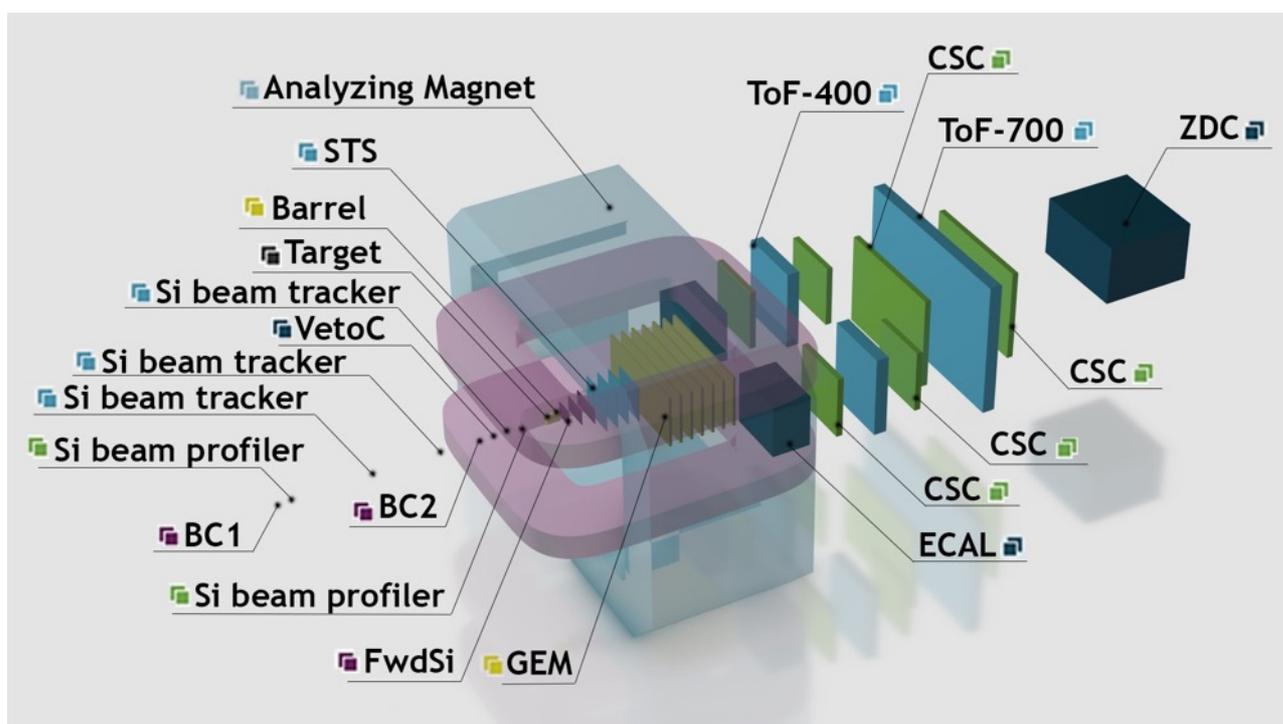


Рис. 2.2.2.1 Полная конфигурация детекторов BM@N для исследования взаимодействий тяжелых ядер.

В 2019 г. был выполнен физический анализ данных, полученных в сеансе экспозиции стартовой конфигурации установки BM@N 2018 г. по исследованию рождения Λ гиперонов во взаимодействиях пучка углерода с кинетической энергией 3,5, 4,0 и 4,5 АГэВ на ядрах C, Al, Cu, Pb; получены сечения и выходы Λ гиперонов в указанных взаимодействиях в зависимости от кинематических переменных быстроты и поперечного импульса; проведено сравнение с предсказаниями моделей ядро-ядерных взаимодействий DCM-

QGSM и UrQMD (Рис. 2.2.2.2). Первые физические результаты эксперимента BM@N представлены на международных конференциях по физике ядро-ядерных взаимодействий при высоких энергиях SQM2019 и QM2019.

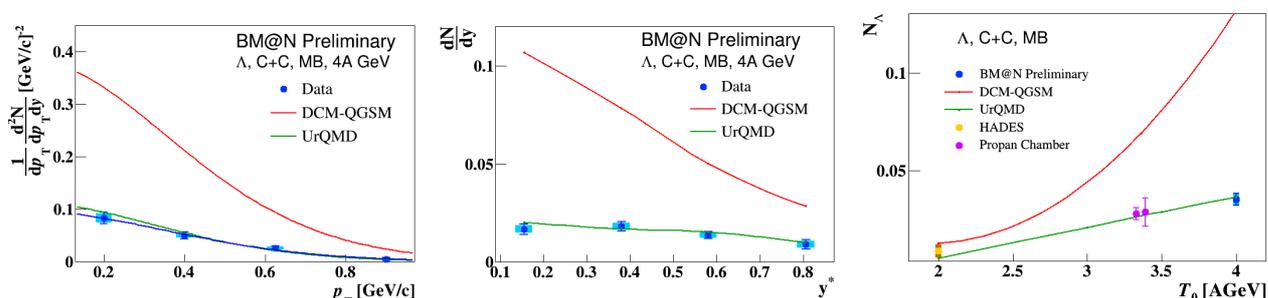


Рис. 2.2.2.2. Зависимость выхода Λ гиперонов во взаимодействиях C+C от поперечного импульса p_T (слева) и быстроты y^* в системе центра масс. (в центре); энергетическая зависимость выхода Λ гиперонов C+C взаимодействиях, измеренная в различных экспериментах, включая BM@N. Предсказания моделей DCM-QGSM и UrQMD показаны линиями.

Во взаимодействиях пучка аргона с мишенями по данным с центральных трековых детекторов и времяпролетной системы идентифицированы заряженные пионы, каоны, протоны и легкие ядерные фрагменты (He^3 , d/He^4 , t), исследуются выходы данных частиц от кинематических переменных, По программе межнуклонных корреляций идентифицированы ядерные фрагменты от He^4 до B^{11} в исследуемых реакциях пучка углерода на водороде.

По программе развития установки для исследования взаимодействий тяжелых ядер разрабатывались детекторы для полной конфигурации BM@N (Рис.1).

2.2.2.1. Центральная трековая система

В рамках создания центральной трековой системы, базирующейся на детекторах GEM и кремниевых микростриповых детекторах выполнены перечисленные ниже работы.

Совместно специалистами коллаборации BM@N и сотрудниками ЦЕРН изготовлены и протестированы 7 детекторов GEM с размером чувствительной области $163 \times 39 \text{ см}^2$, предназначенные для детектирования треков частиц в нижней части аксептанса установки; изготовлена часть электроники считывания для данных детекторов на основе чипов фирмы IDEAS (Integrated Detector Electronics AS, Норвегия) (см. Рис. 2.2.2.3).

Изготовлены кремниевые микростриповые детекторы для трех плоскостей передних трековых детекторов FwdSi, которые будут установлены сразу после мишени; разработана конструкция трех плоскостей детекторов, разработана электроника считывания на основе чипов фирмы IDEAS.



Рис. 2.2.2.3. 128 канальная плата считывания данных (передняя и задняя стороны).

Изготовлены кремниевые детекторы для трех пучковых трековых детекторов (Si beam tracker) и двух профилометров пучка ионов (Si beam profiler), которые будут установлены до мишени для измерения траектории пучка и его фокусировки на мишень; разработана конструкция детекторов, разработана электроника считывания на основе чипов фирмы IDEAS (см. Рис. 2.2.2.4); разработан триггерный детектор на основе кремниевых пластин.

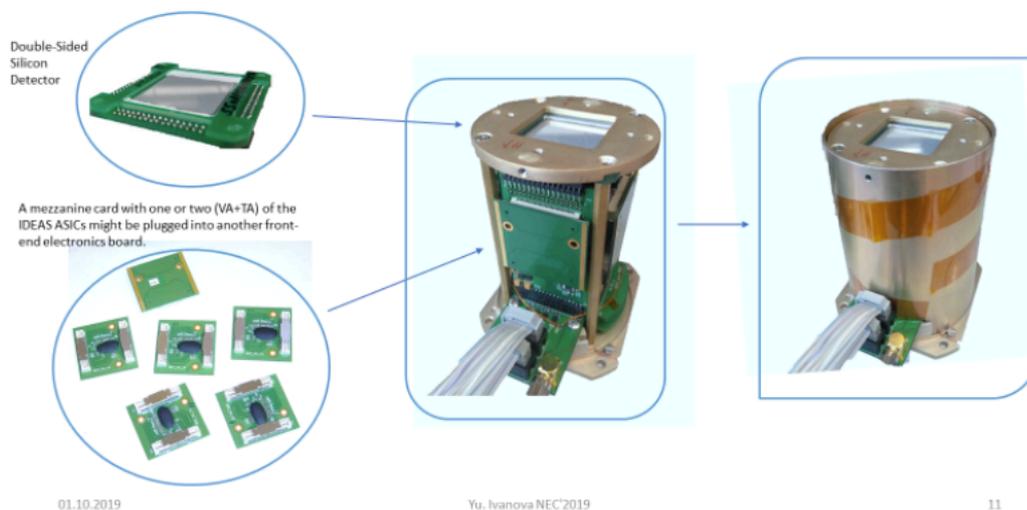


Рис. 2.2.2.4. Прототипы профилометров пучка ионов.

Совместно с сотрудниками коллаборации CBM разрабатывается широкоапертурная трековая система, состоящая из 4-х плоскостей микро-стриповых кремниевых детекторов STS; разрабатывается быстрая электроника считывания и приема данных для этих детекторов.

2.2.2.2. Внешняя трековая система и калориметры

В дополнение к одной уже работающей изготовлены три катодные стриповые камеры CSC размером $113 \times 107 \text{ см}^2$ (Рис. 2.2.2.5, слева) с целью регистрации треков для времяпролетной системы ТоF-400. Разработана конструкция двух больших катодных камер CSC размером $219 \times 145 \text{ см}^2$ для время-пролетной системы ТоF-700 (Рис. 2.2.2.5, справа).

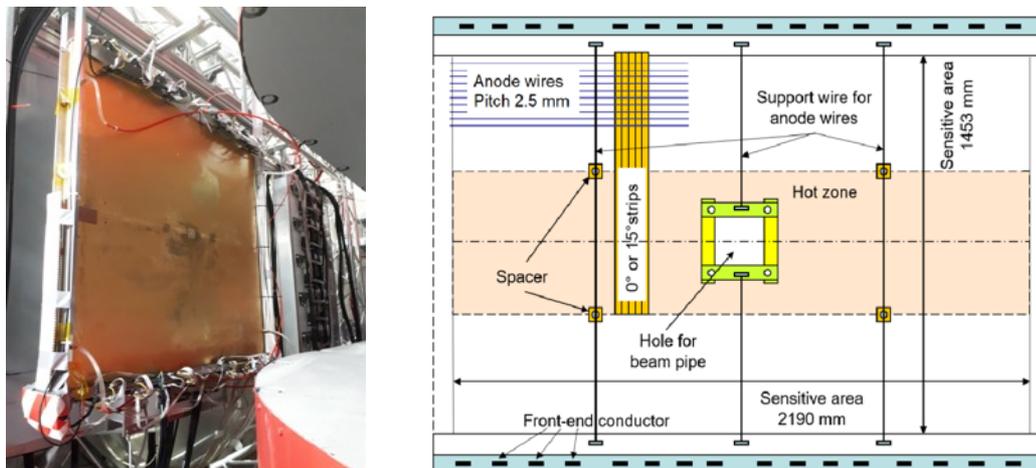


Рис. 2.2.2.5. Катодная стриповая камера CSC размером $113 \times 107 \text{ см}^2$ (слева) и схема катодной стриповой камеры CSC размером $219 \times 145 \text{ см}^2$ (справа).

Разрабатывается перспективная быстрая электроника считывания для детекторов GEM, CSC на основе чипов VMM3a и TIGER для работы в пучках ионов большой интенсивности (2-5 МГц).

Изготовлен и установлен адронный калориметр FHCa1 на основе модулей типа MPD и CBM для использования в пучках тяжелых ионов большой интенсивности (на месте калориметра ZDC).

2.2.2.3. Ионопровод, мишенная станция и элементы компьютерного кластера

Спроектирован, изготовлен и установлен вакуумный ионопровод в экспериментальной зоне BM@N до мишени (см. Рис. 2.2.2.6). Ионопровод протестирован на заводе-изготовителе «Вакуумные системы и технологии» (Белгород, Россия). В настоящее время на этом же заводе разрабатывается механизм для ввода в ионопровод профилометров пучка перед началом сеанса Нуклотрона и удаления его после начала работы системы сбора данных. Разрабатывается также вакуумный ионопровод внутри установки от мишени до адронного калориметра ZDC для подавления взаимодействий тяжелых ионов с воздухом.

Разработана мишенная станция с несколькими мишенями в вакууме (см. Рис. 2.2.2.7), устанавливаемая после первой секции ионопровода. Станция позволит менять мишени на установке без нарушения вакуума

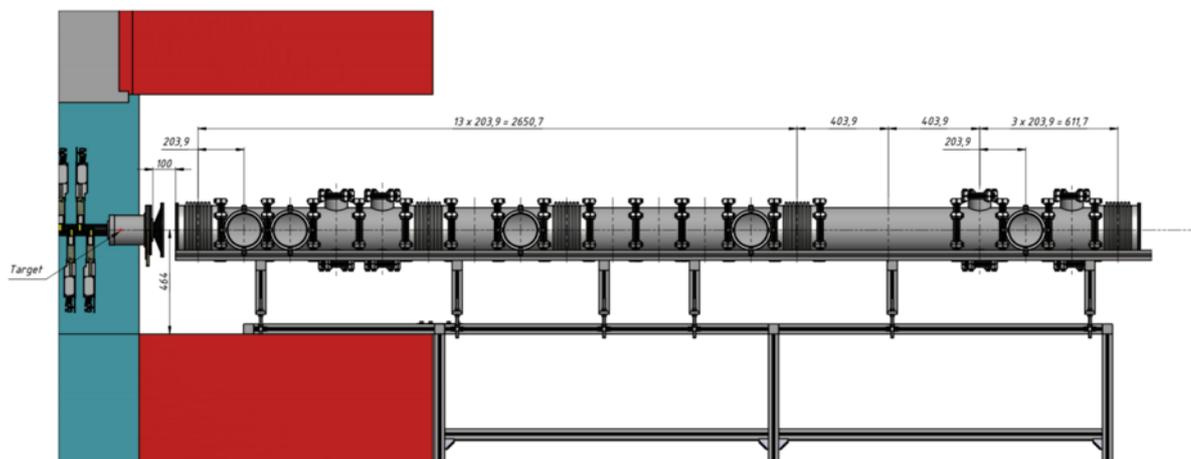


Рис. 2.2.2.6. Вакуумный ионопровод в экспериментальной зоне ВМ@N до мишени.

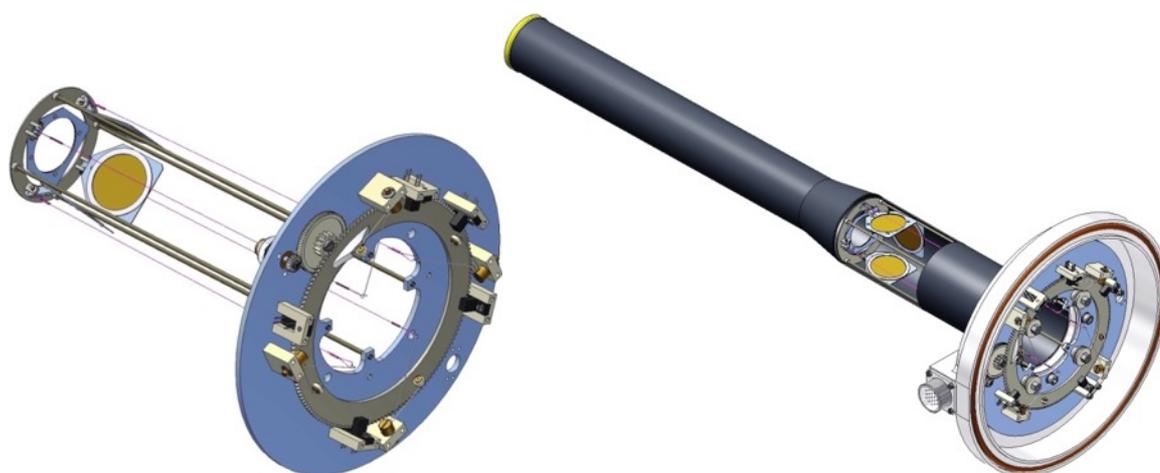


Рис. 2.2.2.7. Мишенная станция.

Приобретена и установлена мобильная компьютерная ферма для системы приема данных установки ВМ@N (Рис. 2.2.2.8). Установленное оборудование фермы обеспечит предварительную обработку данных экспериментов на установке в ближайших сеансах ее экспозиции на Нуклотроне.

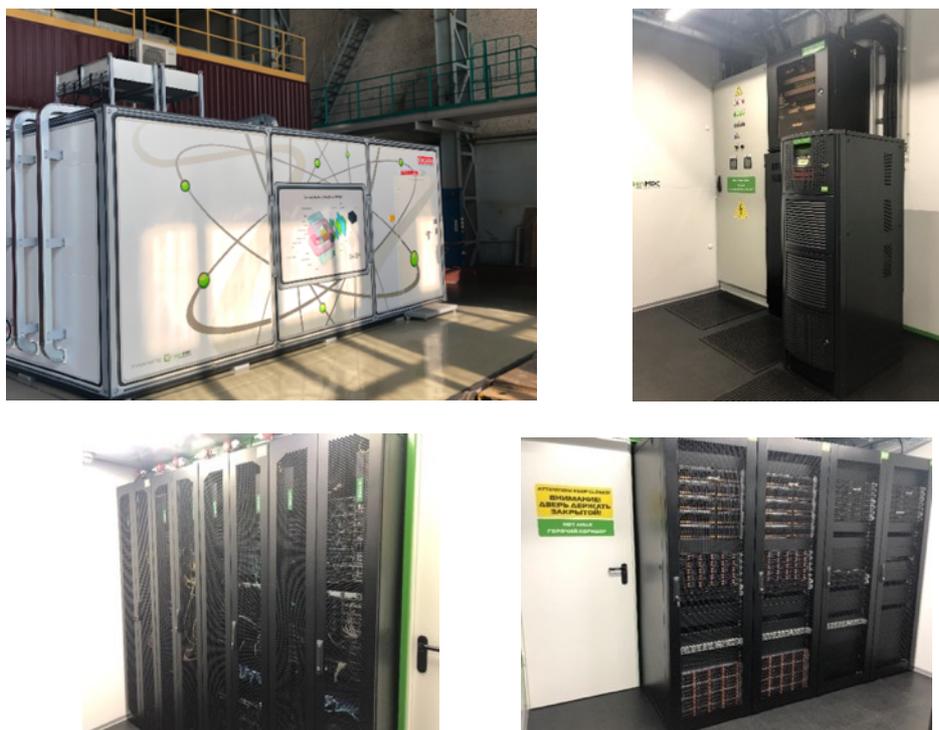


Рис. 2.2.2.8. Мобильная компьютерная ферма установки $VM@N$ (слева вверху – вид снаружи; вид 3-х помещений изнутри).

Конфигурация детекторов $VM@N$, параметры пучков и скорости приема данных в эксперименте $VM@N$ приведены в таблице 2.2.2.1.

Таблице 2.2.2.1.

Конфигурация детекторов $VM@N$, параметры пучков и скорости приема данных в эксперименте $VM@N$

Год	2016	2017 весна	2018 весна	2021	2022 и далее
Пучок	d(\uparrow)	C	Ar, Kr, C(SRC)	Kr, Xe	до Au
Интенсивность пучка, Гц	0.5M	0.5M	0.5M	0.5M	2-5M
Частота приема данных, Гц	5k	5k	10k	10k	20k→50k
Конфигурация центрального трекера	6 полу- плоскостей GEM	6 полу- плоскостей GEM	6 полу- плоскостей GEM + 3 плоскости FwdSi	7 плоскостей GEM + 3 плоскости FwdSi	7 плоскостей GEM + 3 плоскости FwdSi + 4 плоскости STS
Статус эксперимента	технический сеанс	технический сеанс	технический и физический сеанс	физический сеанс, первая стадия	физический сеанс, вторая стадия

2.2.3. Spin Physics Detector (SPD) – детектор для изучения спиновой физики

Детектор SPD будет расположен в экспериментальном павильоне на второй (южной) точке встречи пучков Коллайдера.

На ПКК по физике частиц в январе 2019 г. была представлена предварительная версия концептуального проекта SPD (Spin Physics Detector) на Коллайдере NICA. ПКК выразил поддержку и рекомендовал одобрить предложение Лаборатории для работы по подготовке технического проекта SPD в 2019-2021 гг.

За период с января по ноябрь 2019 выполнялся анализ предложенной концептуальной схемы SPD с учетом высказанных на ПКК замечаний и получены следующие результаты:

1. Проработаны варианты магнитной системы SPD, состоящей из трех пар сверхпроводящих катушек для центральной и торцевых частей установки соответственно (см. Рис. 2.2.3.1). Результаты опубликованы в журнале «Письма в ЭЧАЯ» и доложены на европейской конференции по прикладной сверхпроводимости EUCAS2019 (Glasgow, September 2019).

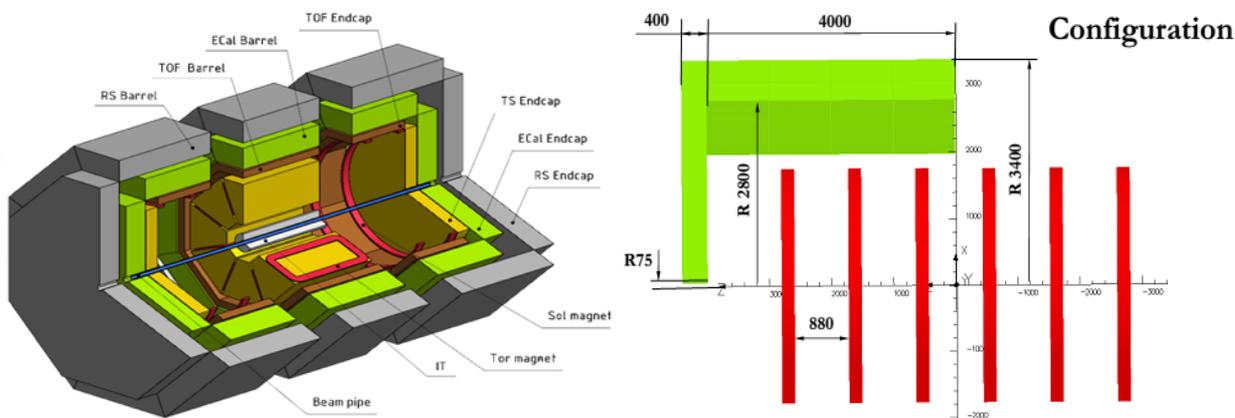


Рис. 2.2.3.1. Общая композиция детектора SPD (слева) и схема размещения катушек магнитного поля (справа).

Некоторые параметры магнитной системы SPD в сравнении с магнитной системой установки CMS на LHC приведены в таблице 2.2.3.1.

2. Предложены два варианта мюонной системы, которые необходимо заложить в пакеты Geant4 и SPD-Root и выполнить детальное моделирование для ряда физических процессов. Показано, что мюонная система толщиной 4 ядерных длины + электромагнитный калориметр существенно улучшает отношение сигнала к фону по сравнению со стартовой версией SPD.

Моделирование процессов Дрелла-Яна, рождения чармония и прямых фотонов продолжается.

Таблица 2.2.3.1.

Сравнение параметров магнитной системы SPD и установки CMS на LHC

Параметр	Единица измерения	SPD/NICA	CMS/LHC
Диаметр/длина	м/м	3.6/8,0	6,5/12,7
Магнитная система		6 обмоток	соленоид
Пиковое магнитное поле	Тл	2,0	4,5
Объем поля	м ³	~ 80	~ 414
Накопленная энергия	МДж	~ 80	~2800
Число витков		6x40	2112
Рабочий ток	кА	10	20
Полная индуктивность	Гн	~ 2	12,6

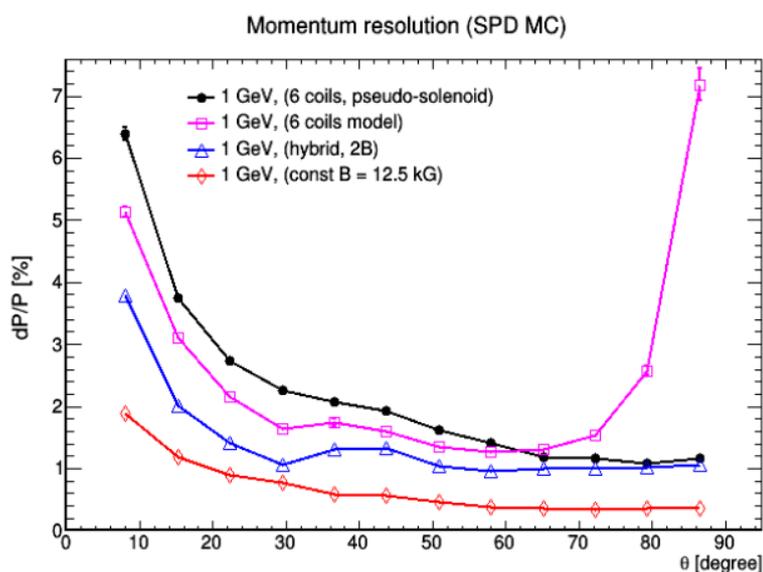


Рис. 2.2.3.2. Импульсное разрешение для частицы с энергией 1 ГэВ в случае использования различных магнитных систем в зависимости угла вылета.

3. Подготовлен проект и начато создание пучковой тестовой зоны SPD в корпусе №205 на выведенном пучке Нуклотрона.

4. Начаты и продолжаются работы по созданию и тестированию прототипов детекторов: кремниевого и строу трекеров, мюонной системы, электромагнитного и адронного калориметров, beam-beam counter (BBC) системы и др.

5. Начаты работы по созданию системы сбора данных SPD.

6. В июне 2019 г. в рамках международного совещания по программе SPD, проведенного в ОИЯИ, начато формирование коллаборации SPD; создана комиссия по подготовке регламентирующих документов, в частности, «конституции SPD».

7. Результаты подготовки физической программы и CDR детектора докладывались на конференциях DSPIN2019 в сентябре 2019 г. (3 доклада) и NICA-DAYS2019 в октябре (2 доклада).

Полномасштабное сооружение установки SPD и ее запуск планируется реализовать на следующем этапе выполнения проекта «Комплекс NICA» в 2022 - 2025 годах.

2.3. Научно-исследовательская и инженерная инфраструктура

2.3.1. Здание коллайдерного комплекса

Здание № 17

В 2009 году начаты работы по проектированию здания №17 для размещения в нем коллайдерного комплекса. В качестве проектировщика была выбрана компания ЗАО «КОМЕТА» (Россия). В 2013 году завершено проектирование (стадия «П») и в 2015 году начато строительство. В качестве генподрядчика в результате проведения международного конкурса была выбрана австрийская компания ЗАО «Штрабаг» (Договор 100/2795 от 18.09.2015г. на сумму 3 620 181 414,5 рублей). В результате уточнения технического задания специалистами ОИЯИ на этапе проектирования и на начальном этапе строительства произошли существенные изменения проекта 2013 года, что привело к увеличению площади здания №17 с изначально планируемых 19 900 м² до 30 800 м². Изменение площади здания повлекло за собой увеличение свайного поля, железобетонных и металлических конструкций, площадей ограждающих конструкций и кровли, с соответствующим увеличением объемов инженерного оборудования (вентиляционное, холодильное, силовое). Потребность в электрических мощностях увеличилась с 4 МВт до 9 МВт. Дополнительно, силами организации-генподрядчика был произведен вынос пяти кабельных линий, реконструирована подстанция №13 в корпусе №1А, а также выполнены работы по строительству замкнутой системы хладоснабжения с демонтажем существующего речного водопровода. Предварительная стоимость строительства здания №17 с учетом дополнительного объема работ оценивается в настоящий момент в 7 миллиардов рублей. Проектные изменения отражены в четырех дополнительных соглашениях к Договору

генерального подряда. (№1 от 23.06.2016 г., №2 от 21.03.2017 г., №3 от 15.08.2017 г., №3.1 от 25.10.2017 г.) и 10 дополнительных соглашений к Договору на оказание услуг по техническому аудиту проектной документации и разработку рабочей документации (№1 от 01.12.2014 г., №2 от 24.09.2015 г., №3 от 25.09.2015 г., №4 от 10.02.2016 г., №5 от 20.01.2017 г., №6 от 29.12.2017 г., №7 от 29.05.2018 г., №8 от 20.10.2018 г., №9 от 13.05.2019 г., №10 от 25.09.2019 г.).

К концу 2019 года выполнено устройство свайного поля (100%), конструкции железобетона (95%), монтаж металлических конструкций (80%), монтаж фасадов (14%), устройству кровли (40%), земляные работы и устройство временных дорог (90%). Выполнен демонтаж пристройки корпуса №1, с учетом увеличенных объемов, для обеспечения возможности соединения корпуса со строящимся зданием №17. Оборудован проем в перекрытии корпуса №1 с целью монтажа оборудования по выводу пучка из Бустера в Нуклотрон.

На стадии завершения тендеры по выбору компаний на производство монтажных работ систем вентиляции, благоустройства. Выбраны подрядные организации на проведение работ по электроснабжению (ООО «ТЭС») и отделочных работ (ООО «Бетиз и К» и ООО «КСП-монтаж»).

Общий вид строительной площадки по состоянию на конец 2019 г. приведен на Рис. 2.3.1.1. Срок сдачи корпуса №17 согласно графика производства работ (с учетом увеличения объемов строительства) - декабрь 2020 г. Это на 1,5 года позже ранее намеченного срока. Однако, на сегодняшний день, присутствуют риски отклонения и от этого графика по следующим причинам:

1. Задержка в согласовании ОИЯИ компаний на поставку и монтаж системы электроснабжения и хладоснабжения.
2. Отсутствие разделов рабочей документации, которая необходима для монтажа фасадных систем, витражей и кровельного пирога, а также для начала проведения тендерных процедур по монтажу следующих внутренних инженерных систем: вентиляции, водопровода, канализации, силового электрооборудования, хладоснабжения, автоматизации, диспетчеризации и слаботочных систем.

Принимая во внимание вышеизложенное, дата завершения строительства окончательно не зафиксирована.



Рис. 2.3.1.1. Общий вид строительной площадки (декабрь 2019 г.)

2.3.2. Здание криогенно-компрессорной станции

В 2017 году силами компании ПАО «КриогенМаш» (Договор на выполнение проектных работ № МВ-421-2015-025 от 31.03.2016г.) закончено проектирование и пройдена негосударственная экспертиза проекта на строительство Криогенно-Компрессорной Станции. В результате проведенного тендера в качестве генерального подрядчика была выбрана компания ООО «ПСЙ» (Чехия). (Договор № 100-539 от 22.11.2017г.), однако, данной компании не удалось осуществить реализацию проекта по причине банкротства. В результате, оказавшись в сжатых временных рамках, руководителями проекта было принято решение об изменении условий выбора подрядной организации в соответствии с которыми необходимо выбрать

компанию или группу компаний с задачей построить здание станции и провести сборку, наладку и запуск криогенного оборудования, закупленного силами ОИЯИ. В ходе проделанной работы и проведения закупочных процедур в качестве генерального подрядчика была выбрана компания ООО «СК «Стройтехинвест» (Договор подряда № 100-1789 от 30.05.2019г.) с условием привлечения на монтаж оборудования организации, в обязательном порядке согласованной с ОИЯИ.

К концу 2019 года произведена разработка котлована, бетонирование столбчатых фундаментов, вынос электрических, слаботочных и канализационных сетей из пятна застройки, ведутся работы по монтажу металлических конструкций каркаса здания. Частично выполнена обратная засыпка.

Срок сдачи объекта уточняется в связи с принятым решением по привлечению специализированной компании для монтажа криогенного оборудования. Работы планируется закончить в 2020 году.

2.3.3. Здание Центра NICA

В апреле 2018 года, по результатам проведенного тендера, заключен договор на разработку проектно-сметной документации по объекту «Центр NICA» (Договор № 1/03-2018 от 11.04.2018г.). В качестве Генерального проектировщика выбрана компания ООО «Проектный институт уникальных сооружений «АРЕНА». В рамках реализации проекта согласована концепция будущего здания, формируется техническое и технологическое задания, произведены необходимые экологические, геодезические и геологические изыскания, согласованы архитектурный облик и внутренняя планировка здания. На стадии согласования решения по выбору материалов и технологий для реализации внутренних и внешних инженерных систем. Осуществлена посадка здания на местности. Осуществляется согласование наружных инженерных систем: хозяйственной и ливневой канализации, питьевого и пожарного водопровода, слаботочных кабельных трасс, силовых кабельных линий. На стадии согласования находятся вопросы систем внутреннего пожаротушения, системы контроля доступа, систем отопления, кондиционирования, вентиляции. В скором времени службам Института будет представлена Проектная документация стадия «П» с целью согласования и подачи документов в Главную Государственную Экспертизу РФ.

В процессе работы над проектом появилось два дополнительных соглашения о переносе сроков сдачи проектной документации (ДС №1 от 14.06.2019 г. и ДС №2 в стадии согласования) со сроком исполнения

30.09.2020 г. Причины переноса срока реализации проектных работ следующие:

1. Длительные согласования предложенных проектных решений службами ОИЯИ.
2. Приведение концепции и архитектурных решений проектируемого здания в соответствие к объемам планируемого финансирования.

Согласованный концептуальный вид будущего здания центра NICA приведен на Рис.2.3.3.1.



Рис. 2.3.3.1. *Согласованный концептуальный вид здания центра NICA.*

В целях реализации мегапроекта создаются и будут эксплуатироваться объекты комплекса NICA на базе существующих зданий и сооружений, расположенных на технической площадке ЛФВЭ. Реконструкцию и модернизацию существующих зданий проводится в соответствии с задачами, изложенными в таблице 1 Паспорта объекта «Комплекс NICA» (см. http://nica.jinr.ru/docs/TDR_spec_Fin0_for_site_short.pdf).

2.3.4. Другие основные здания и экспериментальные павильоны комплекса

Корпус №1

Существующее здание, является частью создаваемого ускорительного комплекса, требующее технологической реконструкции. Корпус №1

представляет собой капитальное строение - промышленное здание круглой формы, диаметром 87,3 метра, высотой в купольной части 30 метров и общей площадью 23931 квадратных метра с двумя пристройками. В корпусе разместится: магнитно-криостатная система кольца периметром 251,5 м расположена в тоннеле вокруг фундамента электромагнита синхрофазотрона, система диагностики пучков, контроля и управления, вакуумная система кольца, ВЧ система ускорения пучков в Нуклотроне, система медленного резонансного вывода ускоренных пучков в направлении основного экспериментального зала (корп.205) с начальным участком транспортировки пучка от выходного окна криостата Нуклотрона до точки «фокус F3», каналы транспортировки выведенных пучков от точки F3 к экспериментальным установкам в корпусе №205. Принимая во внимание поставленную задачу в корпусе проведены и продолжают проводиться следующие мероприятия по реконструкции: обследование, проектирование, реконструкция инженерных систем, общестроительные работы по созданию необходимых строительных конструкций и перепланировке помещений, замена светоотражающих конструкций, оборудование проема в бетонном перекрытии, работы по восстановлению фасадов, замена кровельного пирога, создание бетонного контура биологической защиты, строительные мероприятия по соединению корпуса №1 со строящимся корпусом №17, обустройство входных групп, реконструкция погрузочно-разгрузочной зоны с заменой ворот благоустройство прилегающей территории.

Корпус №1А

Существующее здание, требующее технологической реконструкции. Корпус №1А представляет собой капитальное строение – промышленное четырехэтажное отдельно стоящее здание прямоугольной формы, оснащенное опорным, двух балочным, электрическим краном грузоподъемностью 30,0/5,0 т. Основное назначение – расположение источников питания магнитов, линз кольца Нуклотрона, каналов транспортировки пучков и силовых кабельных трасс. В рамках запланированных работ реконструирована подстанция №13 расположенная в корпусе, а также выполнены работы по строительству замкнутой системы хладоснабжения с демонтажем существующего речного водопровода. Реконструкция здания предполагает замену технологического оборудования (источников питания), в корпусе необходимо расположить: зал управления МРД, зал управления источниками питания, серверную, офисные помещения для персонала. Для выполнения поставленных задач проведены и проводятся следующие мероприятия по реконструкции корпуса: обследование, проектирование, реконструкция инженерных систем, замена светоотражающих конструкций, общестроительные работы по созданию необходимых строительных конструкций и перепланировке помещений, замена кровельного

пирога, реконструкция въездной группы, необходимые мероприятия по замене технологического оборудования, благоустройство прилегающей территории.

Корпус №1Б

Существующее здание, требующее технологической реконструкции. Корпус №1Б представляет собой капитальное строение – промышленное здание, непосредственно примыкающее к корпусу №1, и предполагает расположение системы криогенного обеспечения Нуклотрона. В здании располагаются гелиевые рефрижераторы с необходимой инфраструктурой для хранения и циркуляции газообразного гелия, а также емкости для хранения жидкого азота и линии его транспортировки. Реконструкция корпуса проводится с целью установки дополнительного криогенного оборудования на вновь создаваемую платформу. Дополнительное оборудование позволит увеличить производительность криогенной системы. В рамках реконструкции проведено и проводятся мероприятия по обследованию, проектированию, реконструкции инженерных систем, общестроительные работы по созданию платформы для размещения криогенного оборудования и других необходимых строительных конструкций, перепланировку и ремонт технологических помещений, необходимые мероприятия по замене технологического оборудования с привлечением специалистов в области промышленного дизайна.

Корпус № 4

Существующее здание, является частью создаваемого ускорительного комплекса, требующее технологической реконструкции. Корпус №4 представляет собой капитальное строение – промышленное одно-двухэтажное отдельно стоящее здание, в котором расположен Цех Опытно-Экспериментального Производства. На базе производства необходимо создать участок сборки тепловых экранов. Для этого предполагается провести реконструкцию левого крыла корпуса. Проведено обследование, по результатам которого выполнено проектирование, заменен кровельный пирог, проводится реконструкция инженерных систем, работы по восстановлению фасадов, общестроительные работы по подготовке помещений для установки технологического оборудования – ультразвуковые ванны, сушильный шкаф и т.д., создание системы промышленной приточно-вытяжной вентиляции, устройство наружного тамбура, расширение существующего оконного проема для устройства металлических ворот, благоустройство прилегающей территории.

Корпус №14

Существующее здание, является частью создаваемого ускорительного комплекса, требующее технологической реконструкции. Корпус №14 представляет собой капитальное строение – промышленное двухэтажное отдельно стоящее здание, в котором предполагается создать Инженерную

инфраструктуру онлайн фермы ЛФВЭ. Онлайн ферма предназначена для размещения телекоммуникационного оборудования, серверного оборудования, системы хранения данных, а инженерная инфраструктура необходима для обеспечения условий непрерывного и бесперебойного функционирования ИТ оборудования ОФ. Инженерная инфраструктура должна обеспечить круглосуточный режим работы ОФ в режиме 7x24x365. По итогам выполненного обследования, заканчивается проектирование для проведения модернизации инженерных систем, несущих и ограждающих конструкций здания, замены кровельного пирога, общестроительных работ по подготовке помещений для установки технологического и компьютерного оборудования.

Корпус №32

Существующее здание корпус №32 представляет собой капитальное строение – промышленное трехэтажное отдельно стоящее здание, в котором создается экспресс-участок ЦОЭП, с установкой станков с ЧПУ и модернизацией кран-балки (увеличение грузоподъемности с 3 до 5 тонн) с проведением экспертизы промышленной безопасности для производства необходимых деталей из различных материалов (металлы, текстолит, поликарбонат и т.д.) под нужды физико-технологического оборудования создаваемого комплекса NICA. В рамках реконструкции проведено обследование, проектирование, реконструкция инженерных систем, общестроительные работы по модернизации подкрановых путей, созданию платформы для размещения станков с ЧПУ и других необходимых технологических конструкций, замена кровельного пирога, проводится перепланировка и ремонт технологических и офисных помещений, замена технологического оборудования, замена светоотражающих конструкций, работы по восстановлению фасадов, обустройство входных групп, благоустройство прилегающей территории.

Корпус №42

Существующее здание, корпус №42 представляет собой капитальное строение – промышленное двухэтажное отдельно стоящее здание, в котором будут созданы: участок сборки времяпролетных детекторов для MPD и VM@N, участок сборки электромагнитного калориметра, участок тестирования элементов ускорителя, а также специально подготовленные помещения для складирования сверхпроводящих магнитов. В рамках реконструкции проведено обследование, проектирование, реконструкция инженерных систем, общестроительные работы по модернизации подкрановых путей с проведением экспертизы промышленной безопасности и других необходимых технологических конструкций, проводится перепланировка и ремонт технологических и офисных помещений, необходимые мероприятия по

монтажу технологического оборудования, замена светоотражающих конструкций, работы по утеплению внешних стен и монтажу вентилируемых фасадов, замена кровельного пирога, обустройство входных групп, реконструкция погрузочно-разгрузочной зоны с заменой ворот, благоустройство прилегающей территории.

Корпус № 203А

Существующее здание, является частью создаваемого ускорительного комплекса, требующее реконструкции. Корпус №203А представляет собой капитальное строение – промышленное одноэтажное отдельно стоящее здание, в котором будет создан комплекс подготовки деталей ускорителя к финишной сборке состоящий из ультразвуковой мойки, вакуумной печи прогрева и помещения «чистой комнаты». В мероприятия по реконструкции проведено обследование, по результатам которого ведется проектирование с учетом реконструкции инженерных систем, общестроительных работ по созданию подкрановых путей и других необходимых технологических конструкций, перепланировки и ремонта технологических и офисных помещений, необходимых мероприятий по монтажу технологического оборудования, замены светоотражающих конструкций, замены кровельного пирога, обустройства входных групп, реконструкции зоны перемещения оборудования с заменой ворот.

Корпус № 205

Существующее здание корпус №205 представляет собой капитальное строение – промышленное здание для проведения физических экспериментов, состоящее из одноэтажной промышленной части для расположения установок задействованных в экспериментах, двух пристроек восточной и западной с расположением в них офисов и элементов энергопитания Коллайдера. В корпусе №205 планируется создание с дальнейшим развитием установки BM@N, тестовой зоны MPD, SPD, зоны совершенствования технологии «ROC» для камер ТРС проекта MPD, модернизация зоны РБ защиты, создание систем питания корпуса. Частично проведено и планируется провести следующие мероприятия по реконструкции корпуса: обследование, проектирование, реконструкция инженерных систем, общестроительные работы по созданию подкрановых путей и других необходимых технологических конструкций, перепланировку и ремонт технологических и офисных помещений, замену грузоподъемных механизмов (лифтов), необходимые мероприятия по монтажу технологического оборудования, замена светоотражающих конструкций, замена кровельного пирога, работы по утеплению внешних стен и монтажу вентилируемых фасадов, реконструкция погрузочно-разгрузочной зоны с заменой ворот, благоустройство прилегающей территории.

Корпус №216

Существующее здание, является частью создаваемого ускорительного комплекса попадающее под реконструкцию. Корпус №216 представляет собой капитальное строение – промышленное двухэтажное здание, соединенное с корпусом №215 галереей, в котором уже созданы и в процессе создания несколько помещений «чистая комната»: участок сборки модулей кремниевых трековых систем для экспериментов VM@N и MPD; участок сборки и сертификации трековых систем; участок склейки и механической обработки конструктивных элементов трековых систем. Также в помещениях корпуса уже создана компьютерная off-line ферма ЛФВЭ. В рамках реконструкции проведено и проводится: обследование, проектирование, реконструкция инженерных систем, общестроительные работы по модернизации необходимых технологических конструкций, мероприятия по укреплению полов и созданию фундаментов под устанавливаемое оборудование, перепланировку и ремонт технологических и офисных помещений, необходимые мероприятия по монтажу технологического оборудования, замена светоотражающих конструкций, работы по утеплению внешних стен и монтажу вентилируемых фасадов, замена кровельного пирога, обустройство входных групп, реконструкция погрузочно-разгрузочных зон, благоустройство.

Корпус №217

Существующее здание, является частью создаваемого ускорительного комплекса. Корпус №217 представляет собой капитальное строение – промышленное двухэтажное отдельно стоящее здание. В корпусе создан и продолжает развиваться производственный комплекс для сборки и тестирования сверхпроводящих магнитов проекта NICA, несерийных элементов магнитно-криостатной системы ускорительного комплекса NICA, а также размещена «чистая комната», в которой осуществляется сборка время-проекционной камеры ТРС для установки MPD. В рамках мероприятий по реконструкции проведено: обследование, проектирование, реконструкция инженерных систем, создание системы промышленной приточно-вытяжной вентиляции, общестроительные работы по созданию подкрановых путей и других необходимых технологических конструкций, перепланировку и ремонт технологических и офисных помещений, необходимые мероприятия по монтажу технологического оборудования, замена светоотражающих конструкций, замена кровельного пирога, обустройство входных групп, реконструкция погрузочно-разгрузочной зоны с заменой ворот, благоустройство прилегающей территории.

2.3.5. Вспомогательное и технологическое оборудование

В целях обеспечения монтажных работ на ускорительном комплексе NICA были спроектированы и изготовлены:

- механические 4 кран балки г/п 2 т для Бустера, эксплуатируются с 2016 года (Рис. 2.3.4.1);

- механические 18 кран балок г/п 3,2 – 5 т для тоннелей ускорителя, хранятся на заводе изготовителе, 3 из них планируется установить в октябре 2019 г.;



Рис. 2.3.4.1. Монтаж и испытания кран балок Бустера.

- мостовые краны г/п 80/20 т для павильонов MPD и SPD, кран в павильоне MPD смонтирован, испытан (Рис. 2.3.4.2), подписан Акт приемки в эксплуатацию контролирующими структурами ОИЯИ и представителем Ростехнадзора. Исключительной особенностью этого крана является то, что при грузоподъемности основного крюка крана в 80 тонн его минимальная скорость перемещения составляет всего 0,05 м/мин. Низкая скорость крюка крана позволит комфортно и безопасно вести монтаж «деликатных и нежных» детекторов и их частей. Вторым положительным моментом является радиоуправление краном с пола;

- монтаж такого же крана, для сборки детектора SPD, начат в октябре 2019г.;

- 8 мостовых кранов г/п 3,2 – 10 т для вспомогательных помещений;

- траверса г/п 75 тонн для монтажа криостата в магнитопровод;

- траверса г/п 50 тонн для кантовки полюсов и установки их на транспортные опоры (в стадии изготовления на НПО «Атом», г.Дубна);



Рис .2.3.4.2. Статические испытания крана г/п 80 тонн. Вес контрольного груза 100 тонн

- 14 специальных силовых (армированных) бетонных блоков, размеры и вес которых обозначены в технологии сборки магнитопровода;
- технологическая опора для криостата;
- приобретены стропы, пауки, серьги, рым-болты и прочее такелажное оборудование и изготовлен контейнер 2х2х4 м для их хранения;
- 4-х этажная подвижная платформа для электроники (завершается производство на ООО «Пелком Дубна Машиностроительный завод»);

Для проведения испытаний кранов под нагрузкой в 2019 году изготовлен комплект наборных контрольных грузов общим весом 100,5 тонн, позволяющие испытывать краны г/п от 3,2 т до 80 т.

До конца 2019 года планируется:

- произвести монтаж мостового крана г/п 80/20 т,
- 3-х механических кран балок,
- завершить изготовление подвижной платформы,
- завершить изготовление траверсы г/п 50 т,
- прочее.

На 2020 год намечены следующие работы:

- транспортировка элементов магнитопровода и технологического оборудования в павильон МРД,
- контрольная сборка магнитопровода в павильоне МРД,
- разборка магнитопровода до 13 балок,
- приемка криостата,
- монтаж криостата,

- финальная сборка магнитопровода,
- сборка полюсов с катушками,
- сборка транспортных опор полюсов и их СП,
- монтаж системы магнитных измерений,
- магнитные измерения поля магнита,
- юстировка положения криостата,
- монтаж, наладка, сдача в эксплуатацию СП, обучение персонала ОИЯИ работе с ней,
- изготовление и монтаж верхней платформы,
- сборка подвижной платформы с оборудованием,
- изготовление и монтаж электроподъемника на подвижной платформе,
- монтаж и испытания кранов.

2.3.6. Криогенный комплекс

Криогенная система ускорительного комплекса проекта NICA создается на базе двух модернизированных гелиевых установок КГУ-1600/4,5, запущенных в начале 90-х годов для охлаждения сверхпроводящего синхротрона - Нуклотрона. Чтобы обеспечить охлаждение еще двух ускорителей - Бустера и Коллайдера, необходимо увеличить холодопроизводительность существующей криогенной системы с 4000 Вт до 10000 Вт. Эта задача решается посредством ввода в эксплуатацию дополнительного гелиевого ожижителя ОГ-1000 производительностью 1000 л/час и трех сателлитных рефрижераторов РСГ-2000/4,5 с избыточным обратным потоком. Криогенные установки такого типа работают совместно с центральным крупным ожижителем за счет получаемого от него жидкого гелия. Два сателлитных рефрижератора располагаются рядом с ускорительным кольцом Коллайдера, а третий – на платформе криогенных установок в корпусе 1Б. Там же размещается ожижитель ОГ-1000.

Основные параметры криогенного комплекса:

- холодопроизводительность на температурном уровне 4,5 К – 10000 Вт;
- общая масса оборудования, охлаждаемого до 4,5 К – 290 т;
- установленная мощность компрессорных установок – 11,4 МВт;
- объем хранимого гелия – 34932 нм³;
- производительность по ожижению азота – 2300 кг/ч;
- объем хранимого азота – 61676 нм³;
- общая площадь, занимаемая оборудованием

криогенного комплекса – 4000 м².

Ниже перечислены основные элементы криогенного комплекса.

1. Центральная платформа криогенной станции в корпусе 1Б; в составе следующее оборудование:
 - криогенная гелиевая установка КГУ-1600/4,5 – 2 шт.;
 - оживитель гелия ОГ-1000 – 1 шт.;
 - гелиевый сателлитный рефрижератор РСГ-2000/4,5 для бустера – 1 шт.;
 - реконденсатор азота РА-0,5 – 1 шт.;
 - оживитель азота ОА-1,3 – 1 шт.;
 - блоки маслоочистки и осушки сжатого гелия МО-800 – 4 шт.
2. Машинный зал криогенного комплекса. В составе следующее оборудование:
 - гелиевый винтовой компрессор «КАСКАД-80/25» – 2 шт.;
 - гелиевый поршневой компрессор 305ПП-20/31 – 3 шт.;
 - гелиевый поршневой компрессор 2ГМ4-12/31 – 2 шт.;
 - гелиевый поршневой компрессор 6ГШ1,6/1,1-200-1 – 3 шт.
3. Градирни машинного зала открытого типа – 2 шт.;
4. Гелиевый газгольдер постоянного объема – 1 шт.;
5. Ресиверы для хранения газообразного гелия – 10 шт.;
6. Танк для хранения жидкого азота – 2 шт.;
7. Контейнер-цистерна для хранения жидкого гелия – 1 шт.;
8. Разветвленная система гелиевых трубопроводов;
9. Разветвленная система азотных трубопроводов;
10. Криогенно-компрессорная станция. В составе следующее оборудование:
 - винтовой гелиевый компрессор «КАСКАД-110/30» – 2 шт.;
 - турбокомпрессор азотный «АЭРОКОМ-178/18» – 1 шт.;
 - турбокомпрессор азотный «SAMSUNG SM5000» – 2 шт.;
11. Азотный газгольдер постоянного объема – 1 шт.;
12. Ресиверы для хранения газообразного азота – 5 шт.;
13. Гелиевый сателлитный рефрижератор РСГ-2000/4,5 для коллайдера – 2 шт.;
14. Реконденсатор азота РА-0,5 – 1 шт.;
15. Танк для хранения жидкого азота – 1 шт.

Расположение элементов криогенного комплекса на площадке ЛФВЭ показано на Рис.2.3.6.1.

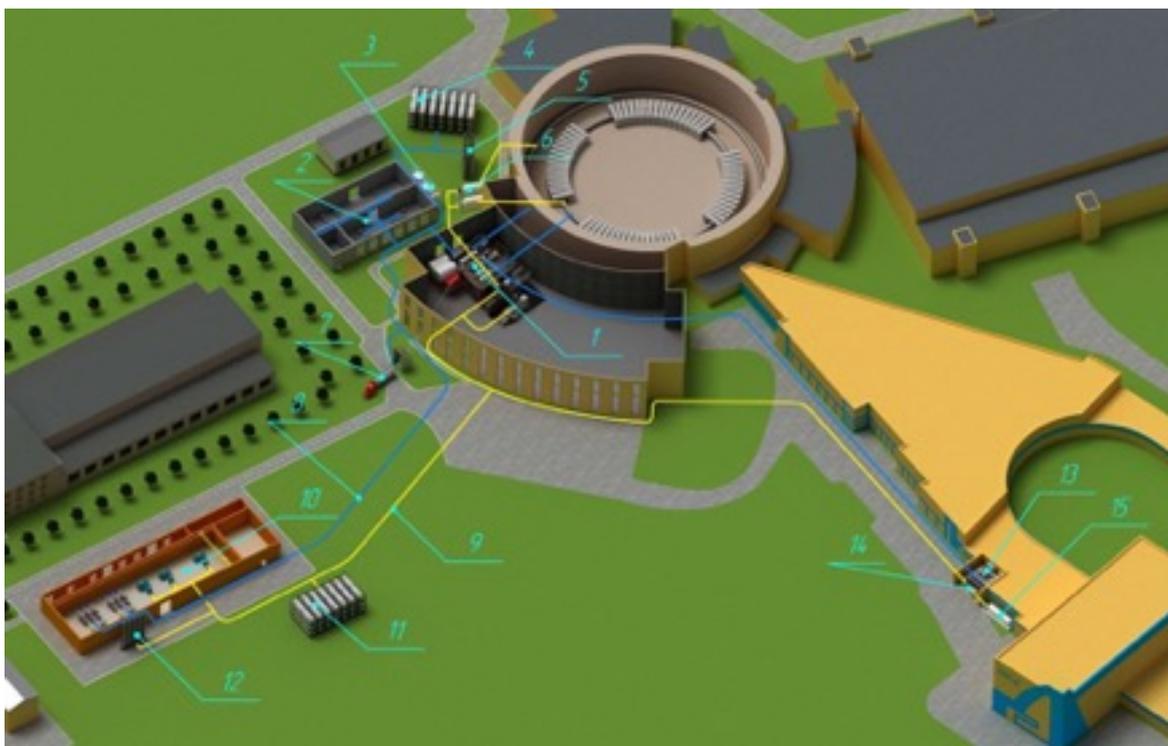


Рис.2.3.6.1. Расположение основных элементов криогенного комплекса на площадке ЛФВЭ.

2.3.6.1. Гелиевая компрессия и гелиевые установки

Гелиевые компрессоры предназначены для обеспечения сжатым гелием криогенных установок ускорительного комплекса. К настоящему времени

- изготовлены и доставлены в ОИЯИ две винтовых компрессорных установки «Каскад 110/30». Компрессоры не смонтированы, т. к. в настоящий момент не достроено здание криогенно-компрессорной станции;

- изготовлен и запущен в эксплуатацию поршневой компрессор 405ГП-20/30;

- в 2019 году изготовлен и запущен в эксплуатацию поршневой компрессор 305НП-20/30 (см. Рис. 2.3.6.2);

- изготовлены и запущены в эксплуатацию три компрессора 6ГШ-200/1,6, один из которых – в 2019 г. (см. Рис. 2.3.6.3).

Криогенные гелиевые установки обеспечивают охлаждение сверхпроводящих магнитов ускорительного комплекса до рабочей температуры 4,5К. К настоящему времени:

- изготовлен и введен в опытную эксплуатацию гелиевый ожижитель ОГ-1000, ведутся работы по отладке системы управления;

- в 2019 году изготовлено три гелиевых сателлитных рефрижератора РСГ-2000/4,5; монтаж одного из них (для охлаждения Бустера) ведется в корпусе №1Б., срок окончания – декабрь 2019 г.; еще два рефрижератора для

охлаждения Коллайдера находятся на ответственном хранении на заводе-изготовителе до завершения строительства помещения для их размещения;



Рис. 2.3.6.2. Компрессор 305HP-20/30.



Рис. 2.3.6.3. Компрессор 6ГШ-200/1,6.

— изготовлено четыре блока масло-влагоочистки МО-800, предназначенных для очистки гелия после сжатия в компрессоре от примесей масла и влаги, производительностью 800 кг/ч газообразного гелия каждый;

один блок введен работу, спроектирована платформа для размещения остальных; работы по монтажу блоков начнутся в 2020 г.;

– в 2019 г. изготовлена 40 м³ контейнер-цистерна для хранения жидкого гелия, использование которой позволит увеличить вместимость существующей системы хранения гелия в 4 раза, наладить экономичную доставку гелия от производителя своим транспортом; ввод контейнера в эксплуатацию запланирован на первую половину 2020 г.;

– к концу 2019 года ожидается поставка блока очистки KB910, предназначенного для тонкой очистки гелия при проведении испытаний магнитов и подачи газа на подшипники турбодетандеров; ввод блока в работу запланирован на первую половину 2020 г.

– изготавливается гелиевый газгольдер постоянного объема изохорного типа, служащий для обеспечения поддержания избыточного давления на всасывании компрессоров и их технологичного запуска; устройство представляет собой комплекс сосудов, суммарным объемом 1000 м³, соединенных общим коллектором; монтаж газгольдера запланирован на 2020 г.

2.3.6.2. Азотная компрессия и азотные установки

Азотные компрессоры снабжают сжатым азотом ожижитель и реконденсаторы азотной системы ускорительного комплекса. К настоящему времени

– изготовлена и доставлена в ОИЯИ установка «Аэроком 178/18»; монтаж установки запланирован на вторую половину 2020 г.;

– изготовлены и доставлены в ОИЯИ установки «Samsung SM5000». Машины не смонтированы, т. к. в настоящий момент не достроено здание криогенно-компрессорной станции. Монтаж планируется во второй половине 2020 г.

Установки азотной системы предназначены для снабжения жидким азотом потребителей ускорительного комплекса – криогенные установки, теплозащитные экраны, ловушки и др., а также приема и реконденсации холодных паров азота от потребителей.

– Изготовлен ожижитель азота ОА-1,3. Монтаж запланирован на 2020 г. после готовности платформы для его размещения в корпусе №1Б;

– Изготовлено два реконденсатора азота РА-500, один из которых в 2019 г. Монтаж запланирован на 2020 г. после готовности платформы и помещений для их размещения в корпусах №1Б и №17;

– Изготовлены и доставлены пять азотных ресиверов Рв-20/3,5 для хранения газообразного азота. Монтаж будет проведен после готовности здания криогенно-компрессорной станции в 2020 г.;

– Изготовлены и доставлены 3 емкости объемом 30 м³ для хранения жидкого азота. Разрабатывается проект по размещению. Монтаж запланирован на 2020 г.

Для обеспечения поддержания избыточного давления на всасывании компрессоров и их технологичного запуска изготавливается азотный газгольдер постоянного объема изохорного типа. Данное устройство представляет собой комплекс сосудов, суммарным объемом 1000 м³, соединенных общим коллектором. Поставка в ОИЯИ запланирована на вторую половину 2020 г.

2.3.7. Инфраструктура энергообеспечивающих и энергосберегающих инженерных систем

2.3.7.1. Энергообеспечивающие системы

Выполнен большой объем работ по энергообеспечению всех объектов создаваемой научно-исследовательской инфраструктуры. Рост потребности в электроэнергии привел к необходимости реконструкции главной понизительной подстанции ГПП-1 (110/6 кВ). В ходе реконструкции ее мощность возрастет до 40,8 МВт.

В таблице 2.3.7.1 приведено планируемое распределение мощности ГПП-1 по объектам Комплекса после ее модернизации.

Необходимая мощность ГПП-1 будет обеспечена двумя новыми трансформаторами производства ООО «Сименс Трансформерс», г. Воронеж. Проектные работы по реконструкции ГПП-1 ведет организация Костромское управление — филиал АО "Электроцентромонтаж". В настоящее время выдана рабочая документация на согласование в ОИЯИ, в декабре текущего года планируется получить сметную документацию, и к весне следующего года выбрать генподрядчика на производство СМР. Реконструкцию ГПП-1 предполагается провести в 2020 году.

Таблица 2.3.7.1.

Запланированные мощности электрообеспечения по объектам Комплекса

Объекты	Мощность, МВт
Бустер	1,6
Коллайдер	9,0
Новая криогенно-компрессорная станция	9,0
Компьютерный кластер	1,0
Нуклотрон	1,4
Каналы экспериментов на выведенных пучках (к. 205)	1,6
Технологическая линия производства СП магнитов (к. 217)	1,1
Инфраструктура ЛФВЭ	5,0

Восточная котельная	0,8
Центр NICA	1,8
Внешние потребители	8,5
Всего	40,8

На Рис. 2.3.7.1. показаны реконструированные и принятые в эксплуатацию 6-ти кВ электроподстанции №11, №13, №42 и «К».



Рис. 2.3.7.1. Реконструированные и принятые в эксплуатацию 6 кВ электроподстанции №№42,11,13 и подлежащие реконструкции - №№ 11, 12, 15 и К.

На Рис. 2.3.7.2 показаны реконструируемые 6 кВ электроподстанции №12, №15, № 21, №31 и пять подстанций Коллайдера.

Подстанция №12 будет обеспечивать электропитание Нуклотрона и Бустера.

Подстанция №15 второй центр питания Коллайдера, и каналов корпуса №205.

Подстанция №21 электроснабжение новой криогенно-компрессорной станции.

Подстанция №31 Лаборатории для создание элементов детектора МРД.

Пять строящихся подстанции (РТП-1, ТП-2, РП-2, ТП-3, ТП-4) обеспечат электроснабжение здания №17.



Рис. 2.3.7.2. Реконструируемые 6 кВ электроподстанции №12, №15, № 21, №31 и пять подстанций Коллайдера.

Полностью закончено обновление системы оперативного тока Лаборатории (Рис. 2.3.7.3).

Работы в рамках развития энергообеспечивающих и энергосберегающих инженерных систем предполагают модернизацию объектов наружных сетей, работа по которым ведется постоянно (см., например, Рис. 2.3.7.4).



Рис. 2.3.7.3. Оборудование для реконструкции системы оперативного тока.

В связи со строительством новых зданий и сооружений, а также выработкой эксплуатационного ресурса имеющихся наружных сетей в Лаборатории подготовлены и реализуются проекты по их реконструкции.

Полностью завершены работы по водоснабжению и сети канализации Коллайдера. Проведена модернизация канализационной насосной станции КНС №15 (Рис. 2.3.7.3), для принятия дополнительных объемов от зданий Коллайдера и Центра NICA.

По состоянию на конец 2018 года выполнена замена водоводов в объеме 75%, теплосетей в объеме 90%, канализационных сетей в объеме 10%. В итоге всего уложено более 12 км новых трасс. Окончание модернизации тепловых и водяных сетей планируется в 2019 г., канализационных сетей - в 2021 г.



Рис. 2.3.7.4. Реконструированные РЩ корпусов №205 (слева) и №217 (справа).

Планируется ряд других работ, важнейшие из которых:

- монтаж сети теплоснабжения Коллайдера и резервного ввода на площадку ЛФВЭ, реализация – 2019 г., заключен договор;
- реконструкция внешнего теплоснабжения ЛФВЭ, реализация - 2019-2020 гг., подготовлены документы для начала конкурса по выбору подрядчика;
- система теплоснабжения Центра NICA, реализация - 2019-2020 гг., проект проходит согласование;
- система внешнего водоснабжения и сети канализации ЛФВЭ для обеспечения корпуса Центр NICA, реализация – 2019 - 2020 гг., идет подготовка к заключению договора на проектирование.

2.3.7.2. Система питания канала вывода пучка из Нуклотрона в измерительный павильон

Система питания предназначена для подачи прецизионного постоянного тока в магнитные элементы (МЭ) для формирования магнитооптической оси траектории пролета заряженных частиц от кольца Нуклотрона через Измерительный павильон в корп.205. В состав канала входят МЭ - дипольные и квадрупольные магниты, предназначенные для управления движением

заряженных частиц по каналам транспортировки. Существующие МЭ охлаждаются водой и имеют систему технологических защит по перегреву, нарушению работы системы охлаждения, по максимальному току и т.п. В штатном режиме один источник питания запитывает МЭ только одного из каналов. Электрические параметры магнитных элементов приведены ниже в таблице 2.3.7.1.

Таблица 2.3.7.1.

Параметры магнитных элементов.

Элемент	I, А	U, В	$R=U/I$	L_{max} , Гн	В т. ч. для канала вывода пучка из Нуклотрона
20К100	3500	75	0.021	0.010	2
20НК100	4000	84	0.021	0.010	2
20К200	3500	130	0.037	0.017	2
СП-94	635	212	0.334	0.870	1
СП-12А	1700	215	0.126	0.600	1
ВКМ	1600	200	0.125		1

Основные особенности системы питания являются высокие показатели по точности поддержания высоких значений тока (сила тока от 600 до 4000А) при сравнительно невысоких показателях напряжения (от 75 до 230В постоянного тока). В системе питания заложено резервирование по стороне питающего напряжения и по стороне постоянного тока.

Принципиальная схема системы электропитания приведена на Рис.2.3.7.1 и состоит из следующих элементов:

- питающее распределительное устройство РУ-6кВ подстанции «К»;
- силовых трансформаторов 6/0,69кВ;
- высокопрецизионных источников питания;
- шкафов переключения;
- кабельного хозяйства;
- автоматизированной системы управления.

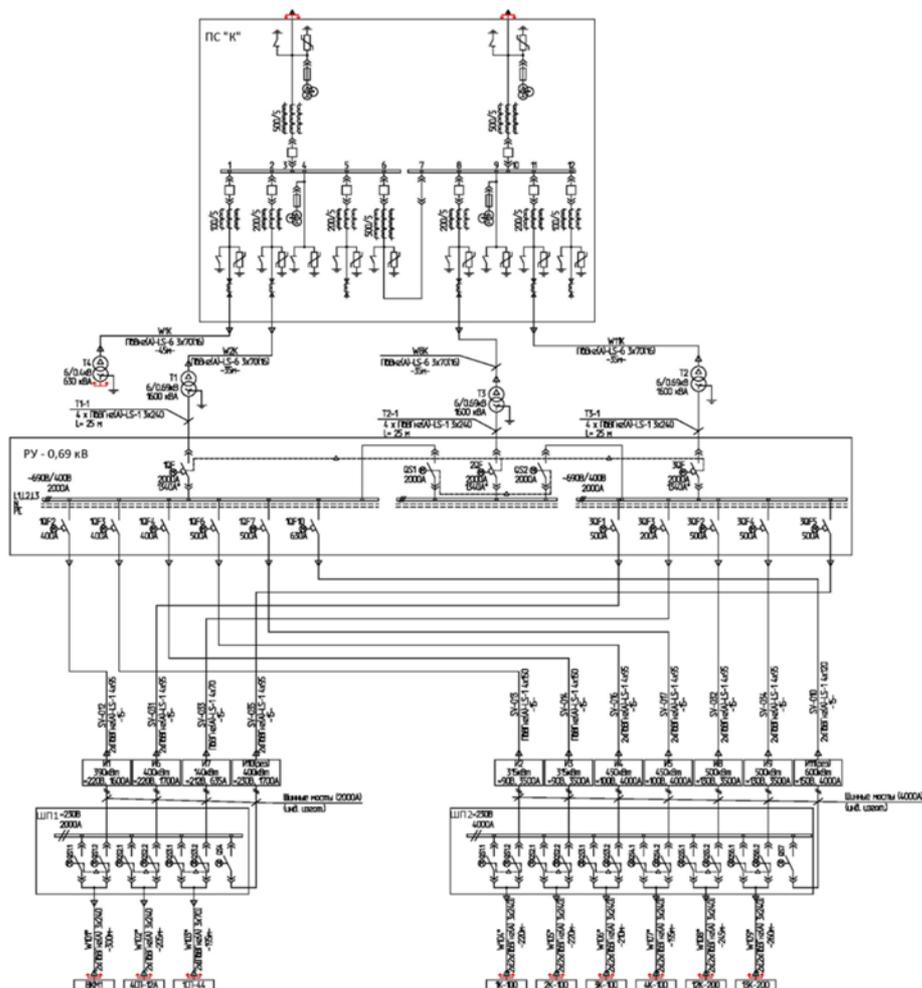


Рис.2.3.7.1. Однолинейная схема системы питания канала вывода пучка из Нуклотрона.

Подключение проектируемой системы электропитания к электросетям площадки ЛФВЭ ОИЯИ предусматривается на уровне напряжения бкВ к двум ячейкам отходящих линий подстанции (ПС) №13 (далее ПС-13). Номинальная рабочая мощность системы электропитания принимается в объеме до 3200 кВА.

Оборудование системы электропитания размещается в существующем помещении переключательного пункта, смежном с помещением корпуса №1Б, компоновочные решения приведены в графической части проекта.

Распределительное устройство бкВ подстанции «К». Для организации системы электропитания по принятой схеме предполагается выполнение реконструкции РУ-бкВ подстанции бкВ «К» с заменой устаревшего оборудования КРУ серии КСО-2УМ на современное серии D-12Р «классика» без увеличения разрешенной мощности в объеме до 3500кВА.

Распределительное устройство 0.69 кВ и силовые трансформаторы. В качестве основного напряжения линейки источников питания магнитных элементов канала вывода пучка заряженных частиц из Нуклотрона принято напряжение 0,69кВ, для чего в смежном с переключаяющим пунктом помещении корпуса №1Б предусматривается установка трех сухих силовых трансформаторов ТСЗ 6/0,69кВ мощностью 1600кВА с питанием их от реконструируемого РУ-6кВ подстанции «К». В нормальном режиме работы системы электропитания магнитных элементов предусматривается ее питание от двух сухих силовых трансформаторов, третий трансформатор используется в качестве резервного, включение его предусматривается в случае аварии на одном из рабочих. Распределение электроэнергии на уровне 0,69 кВ и организация системы электропитания непосредственно источников, осуществляется в РУ-0,69кВ здания переключаяющего пункта.

Распределительное устройство на уровне напряжения 0.69кВ предусматривается индивидуального изготовления, шкафного типа из металлоконструкций серии CUBIC, с тремя секциями шин и тремя вводами от силовых трансформаторов и оборудуется автоматическими выключателями на вводах и отходящих линиях. На вводах РУ-0,69кВ устанавливаются автоматические выключатели серии Masterpact NW производства Schneider Electric, выполненные в выкатном исполнении с моторными приводами и микропроцессорными расцепителями тока до 2000А.

Режим работы установки - 2 трансформатора - рабочие, работают на 1 и 3 секции шин, один трансформатор находится в горячем резерве, и при необходимости работает на 2 секцию шин. В случае аварийной ситуации, повлекшей за собой отключение одного из трансформаторов, включается соответствующий разъединитель, запитывая обесточенную секцию шин от резервного трансформатора. Управление режимами работы осуществляется как в автоматическом, так и в ручном режиме.

Все коммутационные аппараты оснащаются моторными приводами с возможностью удаленного управления ими автоматизированной системой АСУ ТП по каналам RS485.

Источники питания (ИП). Источник питания построен по принципу AC/DC преобразователя и имеет модульную структуру. Мощность преобразователя одного модуля 100-150кВт. Модули соединяются последовательно или параллельно в зависимости от параметров МЭ. Блок конвертора в составе модуля имеет единую схемотехнику и конструкцию для всех типов источников. Параметры блока трансформатора и выпрямителя согласуются с параметрами МЭ. Источник снабжен каналами приема защит и

блокировок от МЭ. Все источники укомплектованы аппаратурой дистанционного мониторинга и контроля включающейся в систему АСУ ТП. Система электропитания состоит из 11 ИП из которых 9 рабочих источников и два резервные. Основные технические параметры источников питания приведены в таблице 2.3.7.2, массогабаритные данные в таблице 2.3.7.3.

Таблица 2.3.7.2.

Основные технические параметры источников питания.

№	Наименование параметра	Значение параметра	Примечание
1.	Входные параметры		
1.1.	Напряжение питающей сети	Трехфазное, переменное 690 (+/-10%) В	Для всех ИП
1.2.	Частота питающей сети	50 (+/- 2%) Гц	
1.3	Коэффициент мощности по входной сети, не хуже	Не ниже 0.92	
2.	Выходные параметры		
2.1.	Номинальное выходное напряжение	Постоянное, 75-220 В	В соответствии с параметрами МЭ
2.2.	Номинальный выходной ток	635-4000 А	
2.3.	Номинальная мощность	140-600 кВт	
2.4.	Режим работы	Статический	Для всех ИП
2.5.	Диапазон установки выходного тока	От 5% до номинального значения ИП	В соответствии с параметрами МЭ
2.6.	Относительная стабильность тока	10^{-4}	Для всех ИП
2.7.	Дискретность изменения выходного тока	10^{-4}	
3.	Индуктивность нагрузки	0,01 – 0,87 Гн	В соответствии с параметрами МЭ
4.	Сопротивление нагрузки	10...100 мОм	В соответствии с параметрами МЭ
5.	Способ охлаждения	Принудительное жидкостное	Для всех ИП
6.	Охлаждающая жидкость	Деионизированная вода	
7.	Габариты Ш×В×Г	1400x2000x800мм	Для всех ИП кроме ИП для МЭ типа СП-94
		800x2000x800мм	ИП для МЭ типа СП-94
8.	Вид климатического исполнения по ГОСТ 15150-69	УХЛ, категория 4	Для всех ИП
9.	Степень защиты по ГОСТ 14254-96	IP21	

Таблица 2.3.7.3.

Массогабаритные параметры источников питания.

Элемент	I, А	U, В	P, кВт	Габарит (мм), ШхГхВ	Масса, кг
20К200	3500	130	455,0	1400х800х1800	800
20К100	3500	75	262,5	1400х800х1800	600
20К100*	4000	100	360,0	1400х800х1800	700
ВКМ	1600	200	320,0	1400х800х1800	700
СП-12А	1700	215	365,5	1400х800х1800	700
СП-94	635	212	134,6	800х800х1800	400

Шкафы ИП предполагается разместить в существующем электротехническом помещении (зале) Переключающего пункта в непосредственной близости от РУ-0,69кВ.

Шкафы переключений ШП. Шкафы переключений (ШП) предназначены для организации резервирования питания источников МЭ по цепям постоянного тока. Резервирование электропитания МЭ организуется с помощью трансферной системы шин, которая позволяет производить подключение МЭ к резервным источникам питания, для обеспечения сохранения в работе электроустановки при выходе из строя основного источника питания. В шкафах ШП предусматривается установка разъединителей номинальными токами 2000А (линейка ШП-1) и 4000А (линейка ШП-2), с моторными приводами.

Шкафы ШП-1 и ШП-2 предназначены для коммутации силовых цепей постоянного тока во время бестоковой паузы. Шкафы ШП соединяются между собой в ряды и включают в себя сборные шины на номинальный ток, которые подключаются к резервному ИП через разъединитель. Выходные цепи шкафов ШП имеют в своей конструкции техническую возможность для изменения полярности силовых выводов на кабели нагрузки.

Шкафы ШП-1 и ШП-2 оснащаются блокировками, не допускающих одновременное включение двух разъединителей. Все ШП укомплектованы аппаратурой дистанционного мониторинга и контроля включающейся в систему АСУ ТП.

Основные технические характеристики ШП приведены в таблице 2.3.7.4.

Таблица 2.3.7.4.

Основные технические характеристики ШП.

№	Наименование параметра	Значение параметра	Примечания
1	Рабочее напряжение	Постоянное, не более 250 В	
2	Номинальный ток		
	- для ШП-1 и ШП-1Р	постоянный, 2000 А	
	- для ШП-2 и ШП-2Р	постоянный, 4000 А	
3.	Напряжение питания собственных нужд	переменное частотой 50 Гц, от 198 до 264 В	
4.	Габаритные размеры шкафов Ш×В×Г	1400 × 600 × 2000 мм	
5.	Степень защиты по ГОСТ 14254-96	IP20	

Кабельное хозяйство. Предусмотрена обвязка системы электропитания МЭ шинами, силовыми и контрольными кабелями. Для организации силовых цепей от источников питания до шкафов ШП номинальными токовыми нагрузками до 2000А и 4000А предполагается использование комплектных шинных мостов. Технические характеристики ошиновки и выбор кабельно-проводниковой продукции осуществляется исходя из номинальных токовых нагрузок силовых цепей, протяженности сети и возможного способа прокладки. Общая длина силовых кабельных линий более 6,5 км.

Автоматизированная система управления.

Создается автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) выполняющая функции мониторинга и управления оборудованием системы электропитания.

В состав АСУ ТП входят 7 шкафов устройств сбора и передачи данных (УСПД), автоматизированные рабочие места (АРМ) оператора и инженерной станции.

Отдельно стоящие шкафы УСПД объединяются в сеть с возможностью передачи данных удаленные рабочие места через сервер. Связь между объектами системы питания и SCADA по протоколу Modbus-RTU, а между SCADA и оператором по Ethernet. АСУ ТП обеспечивает обмен информацией с другими уровнями иерархии управления и эксплуатацией электрических сетей. Для организации бесперебойного питания оборудование АСУ ТП оснащается источниками бесперебойного питания.

Проект на систему питания был сделан в 2017 г. В 2018 г. закуплены источники питания в фирме «НПП ЛМ Инвертор», высоковольтное распределительное устройство сети 6кВ в «ТЭС Таврида», распределительные устройства сети 0,69 кВ в фирме «sp.z o.o. Frako Term», Польша, шкафы переключающие в «НИИФА ЭНЕРГО». В течение 2019 г. закуплено

оборудование АСУ ТП, фирмой «ЭПП-Т» выполнены строительно-монтажные и пуско-наладочные работы по всему комплексу оборудования за исключением прокладки силовых кабелей до магнитных элементов канала.

Фотографии оборудования системы питания приведены на Рис. 2.3.7.2.



Трансформаторы



РУ0,69кВ



Шкафы переключения и источники питания.



Высоковольтная подстанция ПС-К.

Рис.2.3.7.2. Оборудование системы питания канала вывода пучка из Нуклотрона.

2.3.7.3. Система питания каналов транспортировки пучка заряженных частиц в корпус №205

Система питания предназначена для подачи прецизионного постоянного тока в магнитные элементы (МЭ) для формирования магнитооптической оси траектории пролета заряженных частиц в корп. №205. В состав канала входят МЭ - дипольные и квадрупольные магниты, предназначенные для управления движением заряженных частиц по каналам транспортировки. Существующие МЭ охлаждаются водой и имеют систему технологических защит по перегреву, нарушению работы системы охлаждения, по максимальному току и т.п. В штатном режиме один источник питания запитывает МЭ только одного из каналов. Электрические параметры магнитных элементов приведены ниже в таблице 2.3.7.5.

Таблица 2.3.7.5.

Параметры магнитных элементов.

Элемент	I, А	U, В	R=U/I	L _{max} , Гн	Количество для корпуса № 205
К-100	3500	75	0.021	0.010	7
К-200	3500	130	0.037	0.017	16
СП-94	635	212	0.334	0.870	5
СП-57	600	171	0.285	0.400	5
СП-12	1100	190	0.173	1.020	1
СП-12А	1700	215	0.126	0.600	6
СП-40	1100	220	0.200	1.710	3
СП-41	2500	300	0,12		1
МЛ-17	1280	160			1

Основные особенности системы питания являются высокие показатели по точности поддержания высоких значений тока (сила тока от 600 до 4000А) при сравнительно невысоких показателях напряжения (от 75 до 230В постоянного тока). В системе питания заложено резервирование по стороне питающего напряжения и по стороне постоянного тока.

Принципиальная схема системы электропитания приведена на Рис.2.3.7.3. и состоит из следующих элементов:

- питающее распределительное устройство РУ-6кВ подстанции ПС15;
- силовых трансформаторов 6/0,69 кВ;
- высокопрецизионных источников питания;
- шкафов переключения;
- кабельного хозяйства;
- автоматизированной системы управления.

Подключение проектируемой системы электропитания к электросетям площадки ЛФВЭ ОИЯИ предусматривается на уровне напряжения 6 кВ к пяти ячейкам отходящих линий реконструируемой подстанции (ПС) №15 (далее ПС-15). Номинальная расчётная мощность системы электропитания принимается в объёме до 5000 кВА.

Оборудование системы электропитания размещается в существующих помещениях №108 и №111, экспериментальном зале вдоль стены, примыкающей к пом. №108 и №111 и новом модульном здании трансформаторов, располагаемым рядом с корп. №205.

Распределительное устройство 0,69 кВ и силовые трансформаторы.

В качестве основного напряжения линейки источников питания магнитных элементов канала вывода пучка заряженных частиц из Нуклотрона принято напряжение 0,69 кВ, для чего в новом модульном здании трансформаторов предусматривается установка 5-и сухих силовых трансформаторов ТСЗ 6/0,69 кВ мощностью 1600 кВА с питанием их от реконструируемого РУ-6кВ подстанции ПС15. В нормальном режиме работы системы электропитания магнитных элементов предусматривается ее питание от 4-х сухих силовых трансформаторов, 5-ый трансформатор используется в качестве резервного, включение его предусматривается в случае аварии на одном из рабочих. Распределение электроэнергии на уровне 0,69 кВ и организация системы электропитания непосредственно источников, осуществляется в РУ-0,69 кВ в пом. №108 и №111.

Распределительное устройство на уровне напряжения создается аналогично Системе питания канала вывода пучка из Нуклотрона.

Режим работы установки - 4 трансформатора - рабочие, работают на свои секции шин, один трансформатор находится в горячем резерве, и при необходимости запитывает любую из четырёх рабочих секцию шин путём переключения её питания на питание от пятой, резервной, секции шин. Управление режимами работы осуществляется как в автоматическом, так и в ручном режиме.

Все коммутационные аппараты оснащаются моторными приводами с возможностью удаленного управления ими автоматизированной системой АСУ ТП по каналам RS485.

Источники питания (ИП).

Система электропитания состоит из 32 ИП, из которых 27 рабочих и 5 резервных. Основная линейка из 30 источников построена по принципу AC/DC преобразователя и имеет модульную структуру. Мощность преобразователя одного модуля 100-150 кВт. Модули соединяются последовательно или параллельно в зависимости от параметров МЭ. Блок конвертора в составе модуля имеет единую схемотехнику и конструкцию для всех типов источников. Параметры блока трансформатора и выпрямителя согласуются с параметрами МЭ. Источник снабжен каналами приема защит и блокировок от МЭ.

Два отдельных источника питания (один основной, второй резервный) магнита СП41 запитаны от сети 6кВ с ячеек ПС15 и каждый состоит из 12-ти фазного тиристорного выпрямителя и активного фильтра.

Все источники укомплектованы аппаратурой дистанционного мониторинга и контроля включающейся в систему АСУ ТП. Основные технические параметры источников питания типа АС/DC приведены в таблице 2.3.7.6, массогабаритные данные в таблице 2.3.7.7.

Таблица 2.3.7.6.

Основные технические параметры источников питания.

№	Наименование параметра	Значение параметра	Примечание
1.	Входные параметры		
1.1.	Напряжение питающей сети	Трехфазное, переменное 690 (+/-10%) В	Для всех ИП
1.2.	Частота питающей сети	50 (+/- 2%) Гц	
1.3.	Коэффициент мощности по входной сети, не хуже	Не ниже 0.92	
2.	Выходные параметры		
2.1.	Номинальное выходное напряжение	Постоянное, 75-220 В	В соответствии с параметрами МЭ
2.2.	Номинальный выходной ток	635-4000 А	
2.3.	Номинальная мощность	140-600 кВт	
2.4.	Режим работы	Статический	Для всех ИП
2.5.	Диапазон установки выходного тока	От 5% до номинального значения ИП	В соответствии с параметрами МЭ
2.6.	Относительная стабильность тока	10^{-4}	Для всех ИП
2.7.	Дискретность изменения выходного тока	10^{-4}	
3.	Индуктивность нагрузки	0,01 – 0,87 Гн	В соответствии с параметрами МЭ
4.	Сопротивление нагрузки	10...100 мОм	В соответствии с параметрами МЭ
5.	Способ охлаждения	Принудительное жидкостное	Для всех ИП
6.	Охлаждающая жидкость	Деионизированная вода	
7.	Габариты Ш×В×Г	1400x2000x800мм	Для всех ИП кроме ИП для МЭ типа СП-94
		800x2000x800мм	ИП для МЭ типа СП-94
8.	Вид климатического исполнения по ГОСТ 15150-69	УХЛ, категория 4	Для всех ИП
9.	Степень защиты по ГОСТ 14254-96	IP21	

Таблица 2.3.7.7.

Массогабаритные параметры источников питания.

Элемент	I, А	U, В	P, кВт	Габарит Ш×Г×В, мм	Масса, кг
К200	3500	143	556,0	1400×800×2000	800
К100	3500	83	321	1400×800×2000	600
СП-94	635	233	165	1400×800×2000	700
СП-57	600	188	125	1400×800×2000	700
СП-12	1700	237	447	1400×800×2000	700
СП-12А	1700	253	478	1400×800×2000	700
СП-40	1100	242	296	1400×800×2000	700
СП-41	2500	280	700	1400×800×2000	800
МЛ-15,16,17	1280	253	360	1400×800×2000	700

Шкафы ИП предполагается разместить в пом. №108 и №111 в непосредственной близости от РУ-0,69кВ.

Шкафы переключений ШП.

Шкафы переключений (ШП) предназначены для организации резервирования питания источников МЭ по цепям постоянного тока. Резервирование электропитания МЭ организуется с помощью трансферной системы шин, которая позволяет производить подключение МЭ к резервным источникам питания, для обеспечения сохранения в работе электроустановки при выходе из строя основного источника питания. В шкафах ШП предусматривается установка разъединителей номинальными токами 2000А и 4000А, с моторными приводами.

Шкафы ШП предназначены для коммутации силовых цепей постоянного тока во время бестоковой паузы. Шкафы ШП соединяются между собой в ряды и включают в себя сборные шины на номинальный ток, которые подключаются к резервному ИП через разъединитель. Выходные цепи шкафов ШП имеют в своей конструкции техническую возможность для изменения полярности силовых выводов на кабели нагрузки.

Шкафы ШП оснащаются блокировками, не допускающих одновременное включение двух разъединителей. Все ШП укомплектованы аппаратурой дистанционного мониторинга и контроля включающейся в систему АСУ ТП.

Основные технические характеристики ШП приведены в таблице 2.3.7.8.

Таблица 2.3.7.8.

Основные технические характеристики ШП.

№	Наименование параметра	Значение параметра	Примечания
1	Рабочее напряжение	Постоянное, не более 250 В	
2	Номинальный ток	2000А, 4000А	
3.	Напряжение питания собственных нужд	переменное частотой 50 Гц, от 198 до 264 В	
4.	Габаритные размеры шкафов Ш×В×Г	1400 × 600 × 2000 мм	
5.	Степень защиты по ГОСТ 14254-96	IP20	

Кабельное хозяйство.

Предусмотрена обвязка системы электропитания МЭ шинами, силовыми и контрольными кабелями. Для организации силовоточных цепей от источников питания до шкафов ШП номинальными токовыми нагрузками до 2000А и 4000А предполагается использование комплектных шинных мостов. Технические характеристики ошиновки и выбор кабельно-проводниковой продукции осуществляется исходя из номинальных токовых нагрузок силовых цепей, протяженности сети и возможного способа прокладки. Общая длина силовых кабельных линий более 8 км.

Автоматизированная система управления.

Создается автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) выполняющая функции мониторинга и управления оборудованием системы электропитания.

В состав АСУ ТП входит ряд шкафов устройств сбора и передачи данных (УСПД), автоматизированные рабочие места (АРМ) оператора и инженерной станции.

Отдельно стоящие шкафы УСПД объединяются в сеть с возможностью передачи данных удаленные рабочие места через сервер. Связь между объектами системы питания и SCADA по протоколу Modbus-RTU, а между SCADA и оператором по Ethernet. АСУ ТП обеспечивает обмен информацией с другими уровнями иерархии управления и эксплуатацией электрических сетей. Для организации бесперебойного питания оборудование АСУ ТП оснащается источниками бесперебойного питания.

Стадия «П» проекта на систему питания была утверждена в 2019 г. В процессе разработка рабочей документации по этапам создания системы питания. В 2018 г. заключен контракт на изготовление источников питания в

фирме «НПП ЛМ Инвертор» и уже получены 2 партии источников. Заключен договор с фирмой «ЭПП-Т» на изготовление шкафов переключающих. В процессе заключение договора на изготовление распределительные устройства сети 0,69 кВ в фирме «sp.z o.o. Frako Term», Польша. Заключен в 2019 г. договор с фирмой «ДСС инжиниринг» на разработку АСУ ТП системы питания. Идет подготовка договоров на выполнение строительного-монтажных и пуско-наладочных работ с фирмой «ЭПП-Т» по этапам создания системы питания. В 2019 г. произведен частичный демонтаж здания №208, на месте которого готовятся работы по строительству новых модульных зданий ПС15 и Трансформаторов.

2.3.8. Высокотехнологичная линия сборки и испытания сверхпроводящих магнитов

В рамках проекта NICA в ЛФВЭ ОИЯИ была создана и запущена в эксплуатацию специальная линия для сборки и испытаний сверхпроводящих магнитов. Она предназначена для сборки криомодулей с сверхпроводящими магнитами для бустерного синхротрона и Коллайдера проекта NICA и для сборки магнитных блоков синхротрона SIS-100 проекта FAIR. Кроме того, для всех собираемых на линии СП магнитов должна быть проведена полная программа испытаний.

В целом необходимо произвести 258 СП магнитов для бустера и Коллайдера проекта NICA (см. таблицу 2.3.8.1) и 166 блоков СП магнитов для синхротрона SIS100.

Таблица 2.3.8.1

Количество СП магнитов, которые будут произведены на испытательном стенде ЛФВЭ

	Бустер	Коллайдер	SIS-100
Диполи	40	88	-
Квадруполи	48	82	166
Итого	88	170	166

Создание линии началось в 2010 г. В ноябре 2016 г. она была введена в эксплуатацию. К концу 2019 г. все криомодули со СП магнитами будут произведены. Испытания магнитов для Коллайдера NICA должны быть закончены во второй половине 2021 г., магнитов для SIS-100 – в конце 2023 г. Таким образом, средняя производительность линии должна составлять 12 магнитов в месяц, начиная с 2020 г.

Линия расположена в корпусе №217 ЛФВЭ. Ее площадь 2600 м². Там есть несколько павильонов, отведенных различные технологические участки (см.

Рис.2.3.8.1). Схематическое изображение бустерного синхротрона NICA представлено на Рис. 2.3.8.2.

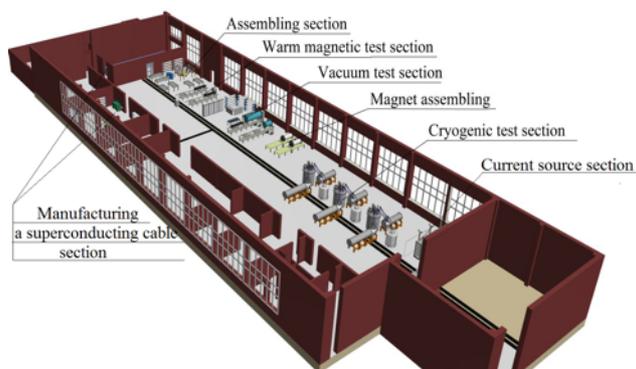


Рис. 2.3.8.1. Линия сборки и испытаний СП магнитов: схематическое изображение (слева), общий вид (справа).

Среди них:

- павильон для изготовления СП кабеля,
- павильон для изготовления СП обмоток,
- павильон для механической сборки магнитов,
- павильон магнитных испытаний при комнатной температуре,
- стенд для вакуумных испытаний,
- стенд для монтажа магнитов в криостат,
- павильон криогенных испытаний,
- павильон с источниками питания.

Линия оборудована кран-балкой.

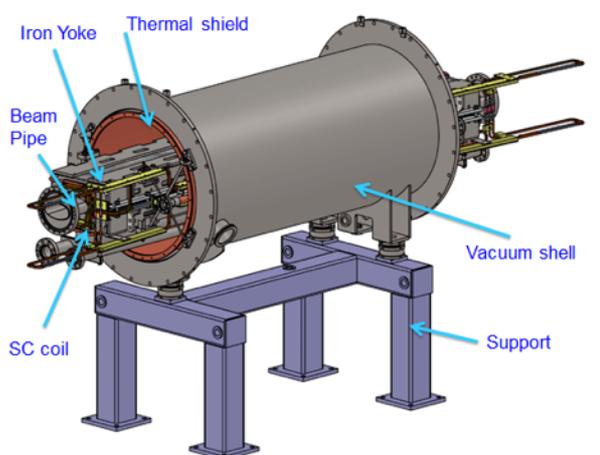


Рис. 2.3.8.2. Схематическое изображение дипольного модуля бустера NICA.

Оборудование для изготовления кабеля позволяет производить полый композитный сверхпроводящий кабель типа Нуклотрон с пропускной способностью до 50 м/ч. Диаметр охлаждающего канала кабеля может

варьироваться от 3 до 5 мм. Количество СП проводов в кабеле до 32. Диаметр провода может быть до 1 мм.

Три павильона для изготовления СП обмоток оборудованы вращающимися столами и станками для намотки различных типов обмоток. Есть две печи для запекания обмоток длиной до 6 м.

Павильон для механической сборки СП магнитов оборудован несколькими столами и станками для вращения магнитов вокруг продольной оси для облегчения сварки и пайки охлаждающих каналов, устройствами для испытаний электроизоляции, измерения сопротивления и индуктивности, гидравлических тестов и настройки охлаждающих каналов.

Также в этом павильоне расположены два гранитных стола, выровненные в одной заданной плоскости. Они используются для входящего контроля и перцизионных геометрических измерений ярма магнитов и других частей. Эти измерения выполняются с помощью 3D-манипулятора (ROMER Absolute Arm) и лазерного трекера с точностью до 2-3 мкм.

Павильон для «теплых» (при комнатной температуре) магнитных измерений оборудован различными магнитными измерительными системами, импульсным линейным преобразователем мощности с током до 100 А и сбором данных на основе измерительной электроники National Instruments PXI и программного обеспечения LabVIEW.

Стенд для проверки герметичности каналов охлаждения магнитов, каналов пучков и криостатов оборудован столами, вакуумной камерой (цилиндрическая камера с направляющими для перемещения тележки с магнитом), насосными системами, системой обнаружения утечек и гелиевой системой высокого давления. Насосная система состоит из диффузионных насосов PDI250-W HSR, роторно-лопастных насосов DUO35, TPR280 и вакуумметров IKR251, производимых компанией Pfeiffer Vacuum, гелиевого течеискателя, манометров, клапанов и редукторов. Также для магнитных измерений используется струнный измерительный стенд, он состоит из специальных столов, проводного оборудования и электронной стойки.

Стенд для монтажа магнитов в криостаты оснащен двумя столами, приспособлениями для монтажа, регулировки и крепления магнитов в криостате, устройствами для монтажа и проверки датчиков температуры и переключателей напряжения.

Павильон для криогенных испытаний магнитов оборудован 3 гелиевыми сателлитными рефрижераторами (HSR) (Рис. 2.3.8.3), 6 коробками подачи с 12 высокотемпературными сверхпроводниковыми (ВТСП) токовводами [9] на

импульсном режиме 18 кА, системой «холодных» (при температуре жидкого гелия - 4,5 К) магнитных измерений, вакуумной системой и системой управления. Он предназначен для проведения криогенных испытаний сверхпроводящих магнитов одновременно на 6 стендах. Каждая пара низкотемпературных стендов включает: гелиевый сателлитный рефрижератор, основной и пусковой теплообменники, емкость с жидким азотом, емкость с жидким гелием, два криостата с токовводами, переохладитель потока жидкого гелия, ВТСП токовводы.

Гелиевый сателлитный рефрижератор охлаждает сверхпроводящий магнит до температуры от 300 К до 4,5 К, обеспечивает охлаждение при рабочей температуре около 4,5 К и нагревает от 4,5 К до 310 К. Холодопроизводительность гелиевого сателлитного рефрижератора составляет 100 Вт.

На испытательном стенде используются ВТСП токовводы. Эти ВТСП токовводы работают с током высокой интенсивности до 18 кА. Они работают в импульсном режиме. ВТСП токовводы имеют три ступени охлаждения. Верхняя часть ВТСП токоввода охлаждается водой.

Холодные магнитные измерения проводятся во время криогенных испытаний под управлением системы сбора данных с использованием специально разработанных датчиков. Специальное оборудование используется для контроля вращения с помощью датчика движения и сбора информации, оно контролирует источник питания. Система записывает и обрабатывает данные.

Для криогенных испытаний используются различные источники энергии. Силовое оборудование проектировалось, разрабатывалось и производилось специальными компаниями. Во время испытаний питание подается от источников на токовводы через медные шины, охлаждаемые специальной системой охлаждения.

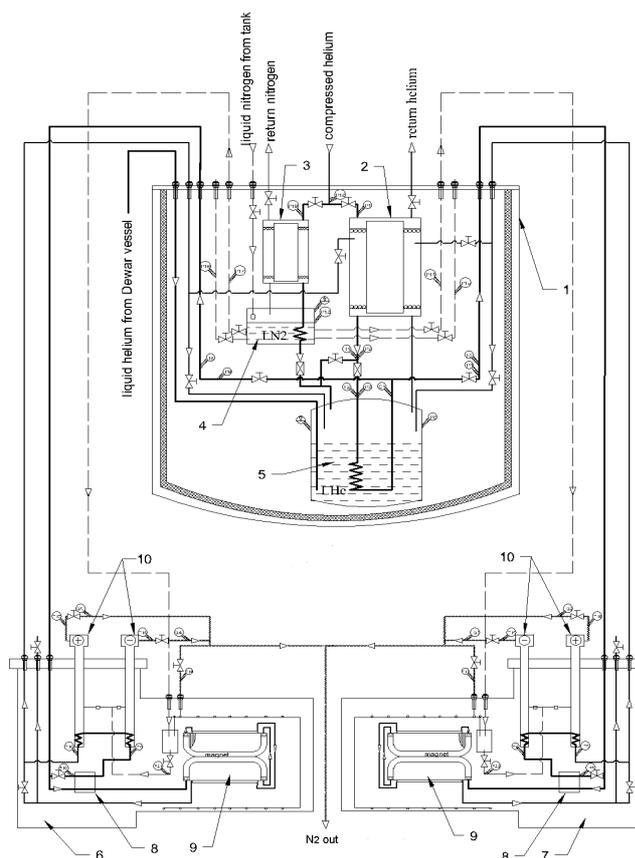


Рис. 2.3.8.3. Схема спутниковой рефрижераторной установки с двумя стендами испытаний: 1 – вакуумная оболочка гелиевого спутникового рефрижератора; 2 и 3 – основной и пусковой теплообменники; 4 – ванна с жидким азотом, 5 – ванна с жидким гелием, 6 и 7 – левая и правая коробки подачи; 8 – переохладитель потока жидкого гелия; 9 – СП магнит; 10 – ВТСП тоководы.

Разработанная испытательная линия была введена в эксплуатацию с задержкой в 1 год по сравнению с первоначальным планом проекта. Но испытания СП магнитов FoS и запуск программы серийных испытаний бустерного синхротрона NICA были начаты до ввода объекта в эксплуатацию на полной мощности. Для выполнения полной программы испытаний для Коллайдера NICA и синхротрона SIS-100 линия должна работать с производительностью 12 магнитов в месяц.

2.4 Компьютерный блок и компьютерные сети распределенного информационно-вычислительного кластера проекта «Комплекс NICA».

2.4.1 Общая структура компьютерного блока и сети

Компьютерный блок проекта «Комплекс NICA» создается по современным технологиям как территориально распределенный информационно-вычислительный кластер, что позволяет наиболее полно удовлетворить требования участников проекта как в области теоретических исследований, так и в области обработки и анализа экспериментальных данных. Следует отметить, что такая распределенная платформа позволяет наиболее эффективно интегрировать как общий вычислительный ресурс ОИЯИ, так и специализированные кластеры. Этот компьютерный блок нацелен как на аккумуляцию, передачу и хранение физических данных, получаемых от основных узлов «Комплекса NICA» - ускорителей, детекторов $BM@N$, MPD и SPD , вычислительной аппаратуры экспериментальных установок для инноваций и прикладных исследований, так и на проведение теоретических исследований, связанных с проектом NICA, а также на обработку данных, их анализ, мониторинг и моделирование исследуемых процессов и используемых систем.

Основные технологические элементы базовой конфигурации распределенного информационно-вычислительного кластера расположены в четырех специализированных помещениях, три из которых расположены на площадке Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ), один - в Лаборатории информационных технологий (ЛИТ) на площадке ЛЯП, в составе многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) ОИЯИ. В структуре кластера предусмотрена его связь с вычислительными комплексами других организаций, вовлеченных в выполнение проекта «Комплекс NICA».

Общая схема распределенного компьютерного блока проекта «Комплекс NICA» приведена на рис. 2.4.1.1.

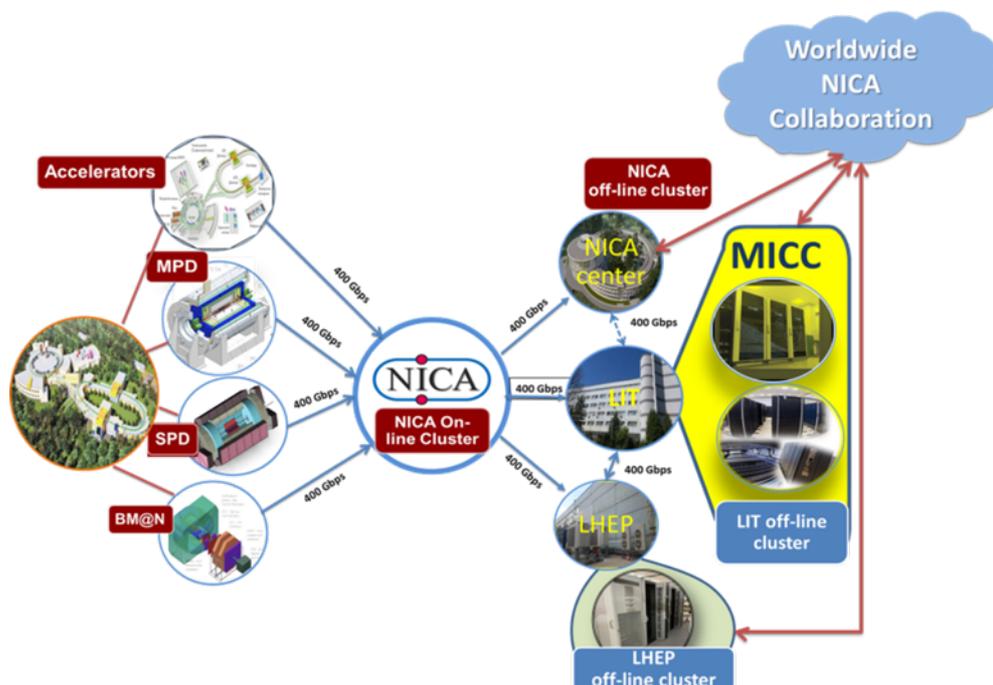


Рис. 2.4.1.1. Схема распределенного компьютерного блока кластера NICA.

2.4.2 Распределенная вычислительная сеть

Одним из важнейших компонентов компьютерного блока «Комплекса NICA» является компьютерная сеть, объединяющая кластеры и сервера внутри кластеров, а также компьютерные подсети физических корпусов в общую вычислительную инфраструктуру комплекса.

Оборудование центрального телекоммуникационного узла - ядро системы коммутации и маршрутизации on-line и off-line кластеров, реализуется на двух многофункциональных коммутаторах семейства Cisco Nexus 9504 с подключением по full-mesh топологии для получения максимальной надежности и производительности. На Рис. 2.4.2.1 представлена реализованная схема вычислительной сети распределенного кластера «Комплекса NICA».

В 2019 году для реализации кластерной сети было приобретено, установлено и настроено 4 100 Gbps коммутатора ядра сети Cisco Nexus 9504 и 10 10 Gbps коммутаторов доступа Cisco Nexus 9336C-FX2. На базе этого оборудования по технологии Cisco ACI (Application-Centric Infrastructure), направленной на объединение физических и виртуальных вычислительных инфраструктур и создание среды, которая автоматизирована, масштабируема, программируема, экономически эффективна и соответствует как потребностям приложений, так и сетевой безопасности, организованы три узла ACI Multisite Fabric: off-line

ЛИТ, off-line ЛФВЭ и on-line. В следующие годы планируется дальнейшее расширение ACI Multisite Fabric на все источники данных «Комплекса NICA»:

- ACI Multisite Fabric, обеспечивающая сетевую безопасность (правильные уровни контроля и защиты от вредоносных агентов) независимо от того, как или где подключаются пользователи;
- ACI Site On-line;
- ACI Site Off-line;
- ACI Site MPD;
- ACI Site BM@N;
- ACI Site SPD;
- ACI Site LIT.

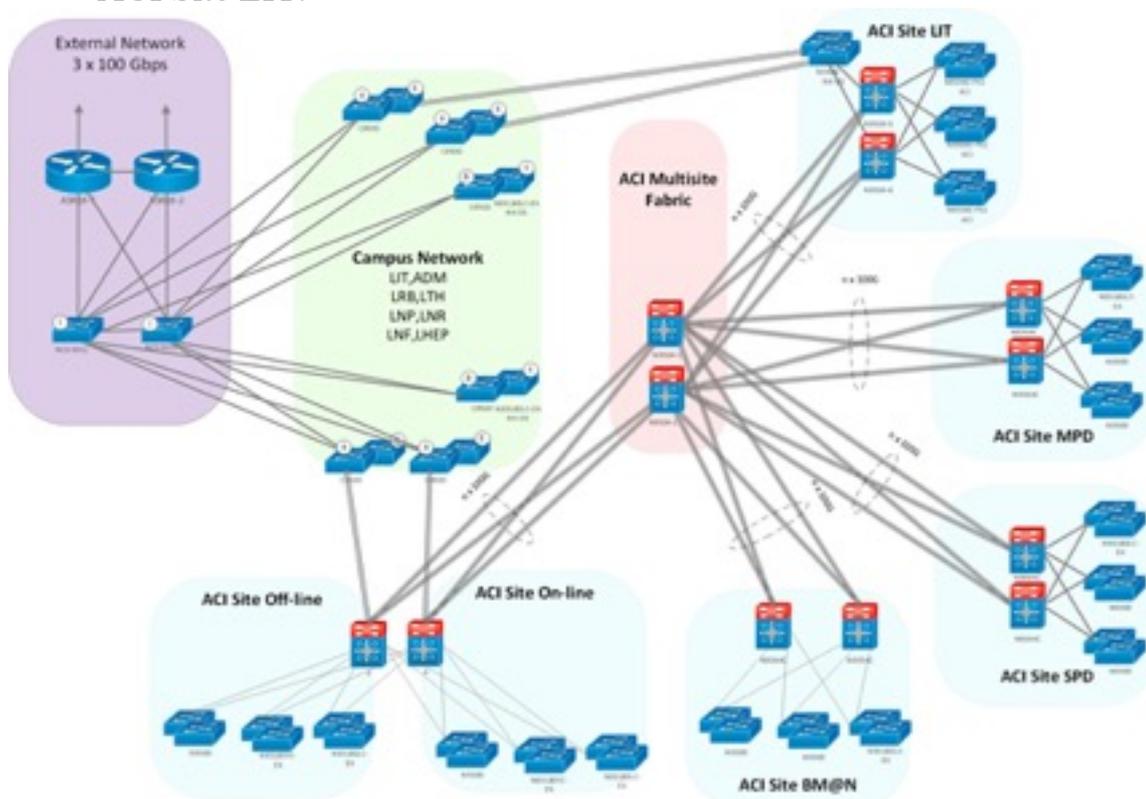


Рис. 2.4.2.1. Схема кластерной сети «Комплекса NICA»

Для обеспечения надежного и отвечающего современным стандартам и требованиям функционирования в 2019 году в сетевой инфраструктуре ЛФВЭ были проведены следующие работы:

- построено ядро вычислительной сети «Комплекса NICA»;
- запущена в эксплуатацию линия связи между площадками на скорости 400 Гб/с с возможностью простого расширения до 800 Гб/с;
- установлены коммутаторы доступа к ACI Multisite Fabric;
- произведено подключение вычислительных кластеров off-line ЛФВЭ и off-line ЛИТ на скорости 200 Гб/с;

— выполнена подготовительная работа по подключению всех элементов MultiSite сетевого кластера.

Эти работы направлены на создание общего информационного пространства существующих в ЛФВЭ ресурсов: вычислительных, информационных, хранения данных, а также на обеспечение доступа к централизованным ресурсам IT-структуры ОИЯИ и ресурсам отдельных подразделений, обеспечение высокоскоростного доступа к ресурсам Internet.

Реализован важнейший этап развития сетевой инфраструктуры ЛФВЭ - организация оптических магистралей между двумя площадками ЛЯП и ЛФВЭ с пропускной способностью 4x100 Гб/с. На Рис. 2.4.2.2 представлена реализованная схема информационно-вычислительной сети между двумя площадками ОИЯИ.

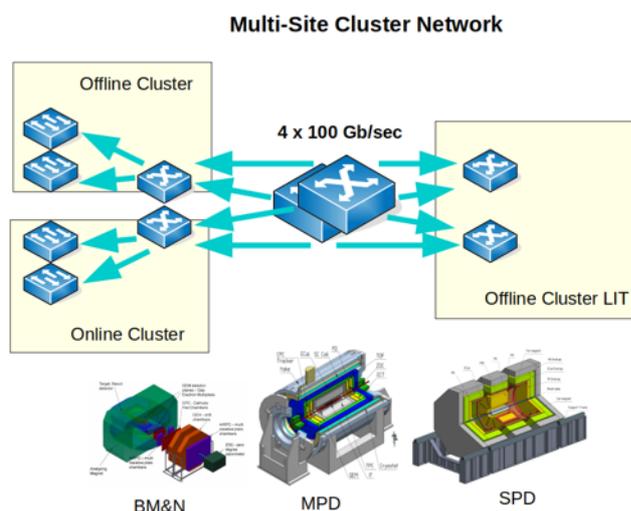


Рис. 2.4.2.2. Схема взаимодействия сетей ЛФВЭ и ЛИТ.

В рамках базовой конфигурации «Комплекса NICA» в 2019 году планировалась, но, по причине сложности согласования проекта, пока не реализована вторая независимая оптическая линия связи между площадками ЛЯП и ЛФВЭ. Работы будут выполнены в 2020 году.

2.1.4. On-line кластер

On-Line кластер «Комплекса NICA» имеет несколько основных и второстепенных функций. Основной функцией является получение данных от системы сбора физических установок (DAQ) NICA. Немаловажной функцией является получение данных от и для мониторинга и диагностики с физических установок.

Цели и задачи on-line фермы NICA ЛФВЭ:

- получение информации от систем сбора данных физических установок;
- сортировка и упаковка «сырых» данных;
- экспресс обработка данных (не более 5% от общего объема);
- временное хранение «упакованных» данных (не более 24 часов);
- передача данных для дальнейшего хранения и обработки на off-line кластерах;
- получение данных от и для мониторинга и диагностики физических установок.

Распределенный информационно-вычислительный кластер «Комплекса NICA» в его базовой конфигурации должен обеспечить обработку и хранение не менее, чем 10-и петабайт данных в год.

В 2019 году для реализации on-line кластера «Комплекса NICA» выполнен проект реконструкции корпуса №14 для его окончательного размещения, произведена инсталляция прототипа кластера в корпусе №201, установлены и настроены необходимые сетевые пакеты для безопасной и надежной работы сетевых ресурсов компьютерного блока (DNS, DHCP и другие). Завершение работ по корпусу №14 и размещению в нем основного оборудования on-line кластера планируется на 2020 г.

2.1.5. Off-line кластер NICA ЛФВЭ

Off-line компьютерный кластер «Комплекса NICA» предназначен для обработки, хранения и анализа данных с экспериментальных установок ускорительного «Комплекса NICA». Как и все крупные центры обработки и хранения данных с больших физических установок, такой кластер создан как территориально распределенный (многосайтовый), объединяющий все компоненты, расположенные как на площадке ЛФВЭ, так и на площадке ЛЯП в ЛИТ, единой локальной компьютерной сетью N x 100 Гб/сек.

Реализованный off-line кластер NICA ЛФВЭ (Рис. 2.4.4.1) доведен до проектных параметров и имеет 4700 ЦПУ ядер и 2 x 5,0 ПБ дисковых массивов для пользователя.

На площадке ЛФВЭ кластер расположен в корпусе №216 (помещение 115), и в дальнейшем расширен кластером нового корпуса «Центра NICA». Кроме того, off-line кластер будет связан с работающим прототипом, расположенном в корпусе №215, on-line кластера (корпус №14) и МИВК ОИЯИ. При проектировании off-line кластера учитывается опыт создания крупного МИВК ОИЯИ, результаты моделирования и опыт, накопленный при создании прототипа off-line кластера. Именно для приобретения такого опыта как в создании компьютерно-сетевой компоненты, так и инженерной

инфраструктуры кластера, работы по проектированию off-line кластера были начаты с создания прототипа.



Рис. 2.4.4.1. Реализованный off-line кластер ЛФВЭ.

Чтобы подключить этот объект к электропитанию и сдать его в эксплуатацию разработан комплект проектной документации инженерных систем и систем пожаротушения кластера. Все оборудование инженерной инфраструктуры фирмы Ритгал (Германия). По финансовым соображениям, поставка оборудования была разбита на 2 части. Первая половина (1 - чиллер, 2 - устройства воздушно-водяного охлаждения, 4 - шкафа и 1 - источник бесперебойного питания (ИБП)) получена и смонтирована во втором квартале 2017 года. Вторая половина оборудования получена к концу 2018 года. В помещении выполнен необходимый ремонт, площадь помещения 5,7 м x 8,8 м = 50,16 м² и высота 6 м.

Полностью off-line кластер состоит из 8 стоек с компьютерным и коммуникационным оборудованием, 2-х ИБП, системы охлаждения, электропитания и пожаротушения.

Состав оборудования внутри помещения 215 корпуса №116 (216-215). Кластер состоит из четырех одинаковых модулей, каждый из которых состоит из двух стоек (шкафов) с серверами и устройством воздушно-водяного охлаждения (LCP) между стойками. для создания «холодного коридора», модули стоят в две линии. Сверху, между линиями стоек, стеклянная крыша шириной 1200 мм и сбоку стеклянные двери. Оборудование в стойках получает

электропитание от двух ИБП, которые, в свою очередь, получают электропитание по кабелям из электрощитовой. Расстановка оборудования внутри помещения 216-115 представлено на Рис. 2.4.4.2:

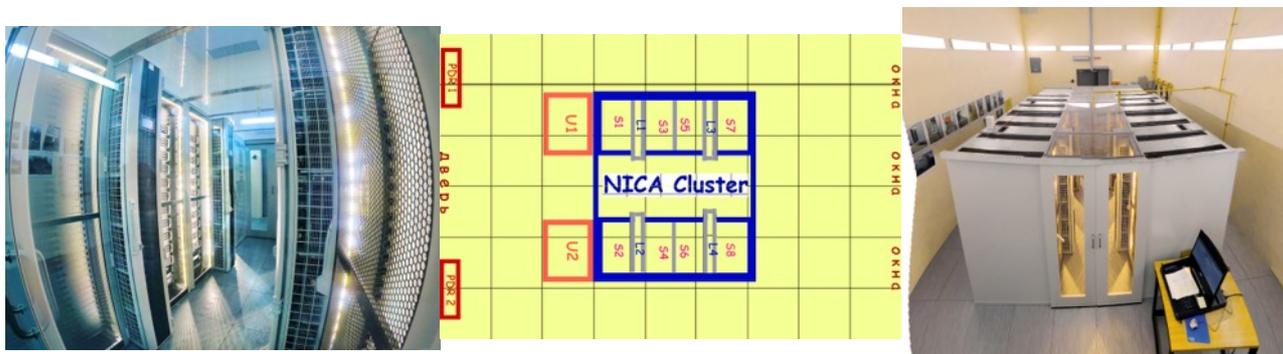


Рис.2.4.4.2. Расстановка оборудования в помещении 216-115.

Стойки(S1-S8) для серверов имеют размеры 1200 x 600 x 2000 мм, ЛСР(L1-L4) -1200 x 300 x 2000 мм, ИБП(U1-U2) -1000 x 800 x 2000мм. Вес стоек (шкафов): 300 (сам шкаф)+20 серверов (20-25кг) <= 800 кг. Вес ЛСП: 300 кг. Вес ИБП: примерно 1100 кг (407+2,65 x 240=1043 кг).

В серверных установлен специальный фальшпол из сульфатно-кальциевых плит со стальной пластиной снизу плиты и антистатическим покрытием сверху плиты. Толщина плиты выбрана так, чтобы пол выдерживал требуемую распределенную нагрузку. В нашем случае нагрузка составляет до 1500 кг/м² в районе ИБП, и до 1000 кг/м² в остальной части зала. Всем этим требованиям удовлетворили плиты Lindpeg Nortec U 36 ST/PVC. Под шкафами установлена рама из С-профилей (С3-2мм), чтобы обеспечить возможность удаления части плит для доступа из шкафов в подпольное пространство. Вдоль шкафов в подпольном пространстве установлены проволочные лотки для прокладки кабелей. Размер лотков 300 x 35 x 3000 мм.

Одним из основных компонентов кластера является кластерная файловая система. В настоящее время применяются несколько кластерных файловых систем: EOS, Ceph, Lustre, dCache, GlusterFS и др. Схема использования распределенной файловой системы на off-line кластере «Комплекса NICA» представлена на Рис. 2.4.4.3.

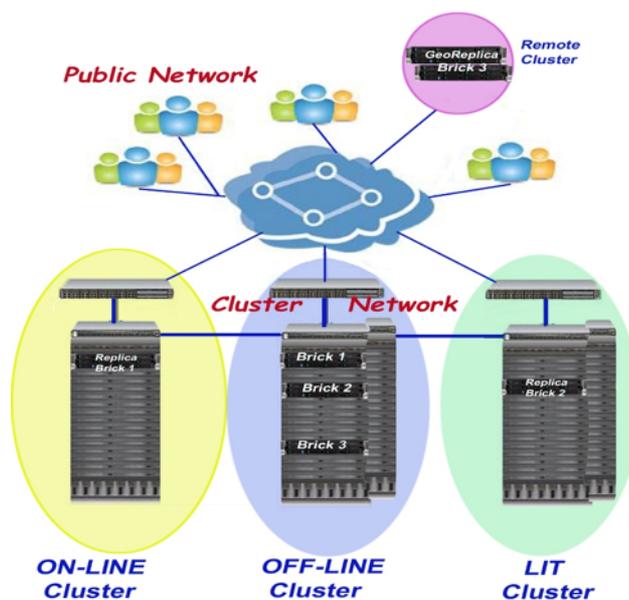


Рис.2.4.4.3. Файловая система off-line комплекса NICA.

В 2019 году согласно планов развития в базовой конфигурации «Комплекса NICA» off-line кластер NICA ЛФВЭ был сдан в эксплуатацию. Кластер имеет 100 Гб/с внутреннюю сеть, подключен к кластерной сети на скорости 200 Гб/с и к лабораторной сети на скорости 100 Гб/с.

2.1.6. Off-line кластер NICA ЛИТ

Разрабатываемые модели компьютеринга должны учитывать тенденции развития сетевых решений, вычислительных архитектур и IT-решений, позволяющих объединять суперкомпьютерные (гетерогенные), грид- и облачные технологии и создавать на этой основе распределенные программно-конфигурируемые НРС-платформы. Вычислительно-информационный off-line кластер NICA в ЛИТ организован на базе МИВК ОИЯИ как распределенный масштабируемый гибридный кластер, что позволяет эффективно и без дополнительных трудозатрат организовать компьютеринг для проекта NICA по требованию различного класса задач и пользователей. Основной задачей off-line кластера ЛИТ является создание двухуровневой (диско-ленточной) системы хранения для экспериментов NICA, поскольку после первого этапа этих экспериментов потребуются значительные объемы хранения (от 2,5 ПБ до 70 ПБ в год).

Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс ОИЯИ в настоящее время имеет основные компоненты, перечисленные ниже.

1. Центральный информационно-вычислительный комплекс (ЦИВК) ОИЯИ со встроенными вычислительными и запоминающими элементами.
2. Кластер Tier2 для всех экспериментов на Большом адронном коллайдере (ЛHC) и других виртуальных организаций (VOs) в грид среде.
3. Кластер Tier1 для эксперимента CMS.

4. Гетерогенная платформа HybriLIT для высокопроизводительных вычислений (HPC) с суперкомпьютером «Говорун».

5. Облачная инфраструктура.

6. Система хранения данных на базе файловой системы EOS.

В настоящее время вычислительно-информационный off-line кластер NICA в ЛИТ организован на базе Tier1, Tier2/ЦИВК и суперкомпьютера «Говорун» и системы хранения на базе EOS.

Реализация различных моделей компьютинга для мегапроекта NICA требует подтверждения их работоспособности, т.е. удовлетворения требованиям к временным характеристикам приема данных с детекторов с их последующей передачей на обработку, анализ и хранение, а также требованиям к эффективности моделирования и обработки событий в эксперименте. Для этих целей необходимо проведение испытаний в реальной программно-аппаратной среде, которая должна содержать все требуемые компоненты. Такой средой может стать введенный в эксплуатацию в составе МИВК суперкомпьютер «Говорун», содержащий самые современные на сегодняшний день вычислительные ресурсы и ресурсы хранения данных, включающие сверхбыструю систему хранения данных, обеспечивающую высокую скорость приема данных до сотни гигабайт в секунду, с возможностью линейного расширения производительности и ёмкости системы.

Одним из основных компонентов компьютерного блока проекта «Комплекс NICA» является кластерная файловая система. В настоящее время в этом качестве применяются несколько кластерных файловых систем: GPFS, Lustre, dCache, Ceph, EOS, GlusterFS и др. Для on-line и off-line кластеров лучше всего подходит файловая система EOS. EOS – это распределённая, параллельная, линейно масштабируемая файловая система с возможностью ее защиты от сбоев. В 2019 году EOS была установлена и успешно интегрирована в структуру МИВК (Рис. 2.4.5.1). В настоящее время для EOS доступно 3740 ТБ дискового пространства. Эксперименты NICA уже используют EOS для хранения данных. В настоящее время в EOS на МИВК хранится ~ 81 ТБ необработанных данных эксперимента VM@N и ~2 ТБ смоделированных данных эксперимента MPD. EOS отображается как локальная файловая система на рабочих узлах МИВК и позволяет авторизованным пользователям (по протоколу Kerberos5) читать и записывать данные.

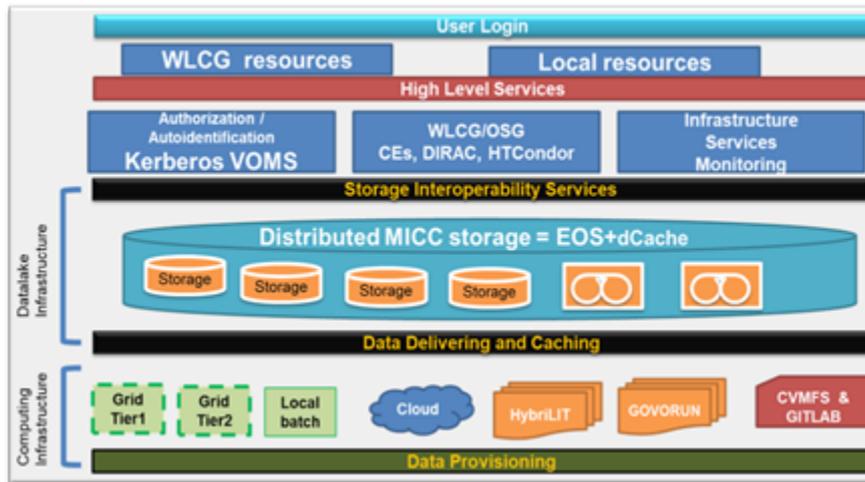


Рис.2.4.5.1. Схема интеграции EOS в МИВК ЛИТ.

В настоящее время унифицирован процесс аутентификации и авторизации пользователей NICA на следующих ресурсах МИВК ЛИТ: счётная ферма ЦИВК/Tier2, счётная ферма Tier1, ресурсы облачной инфраструктуры, ресурсы хранения и доступа к данным EOS, ресурсы обновления и доступа к программному обеспечению CVMFS. Доступ ко всем перечисленным ресурсам авторизуется по протоколам Kerberos5 для всех пользователей, зарегистрированных в базах Kerberos и LDAP ОИЯИ. Этот вариант доступа наиболее удобен при обработке данных и моделировании, так как не требует от пользователя никаких дополнительных манипуляций с данными (копирования из хранилища EOS на локальные диски, переписи с локальных дисков в EOS).

Важной составляющей вычислительно-информационной системы для NICA является наличие единого общего репозитория программного обеспечения. Для этих целей в 2019 году установлена подсистема CVMFS. Программные пакеты NICA MPD и VM@N были помещены в CVMFS. В репозитории хранится несколько версий одного и того же программного пакета и изменить его на сервере CVMFS может только уполномоченное лицо. Доступ на чтение из репозитория был настроен на всех рабочих узлах МИВК, и его можно использовать по всему миру с помощью клиента CVMFS. Репозиторий программного обеспечения MPD и VM@N занимает 9,5 Гб на серверах МИВК CVMFS.

С 2019 году суперкомпьютер «Говорун» используется в составе распределенного и масштабируемого off-line ЛИТ-кластера NICA для решения задач, требующих массивных параллельных вычислений в решеточной квантовой хромодинамике для изучения свойств адронной материи при высокой плотности энергии и барионном заряде и в присутствии супрамаксимальных электромагнитных полей, для математического моделирования взаимодействий антипротонов с протонами и ядрами с

использованием генераторов DPM, FTF и UrQMD+SMM, разработанных в ОИЯИ и представляющих интерес для эксперимента NICA-MPD, для моделирования динамики столкновений релятивистских тяжелых ионов. Кроме того, на базе суперкомпьютера проводятся работы, связанные с разработкой компьютеринга проекта «Комплекс NICA».

Еще одним компонентом off-line кластера ЛИТ для NICA является сверхбыстрая система хранения данных (UDSS), реализованная в суперкомпьютере «Говорун» под управлением файловой системы Lustre (Рис. 2.4.5.2 справа). В настоящее время UDSS имеет пять серверов хранения данных с 12 SSD-накопителями с технологией подключения NVMe, что сокращает время доступа к данным. Общая емкость UDSS в настоящее время составляет 250 ТБ, а скорость приема/передачи данных - 56 ГБ в секунду. Примечательно, что UDSS обладает способностью линейно увеличивать производительность (скорость работы с данными) и объем запоминающего устройства без изменения принципов архитектурного проектирования системы. В то же время гиперконвергентность и программно-определяемая архитектура UDSS позволяют обеспечить максимальную гибкость конфигураций систем хранения данных, включая создание доменов хранения данных, отвечающих требованиям конкретных задач, а также подключение внешних дисковых полей для расширения и развития мощностей UDSS.

Рис. 2.4.5.2 иллюстрирует системы хранения off-line кластера ЛИТ(система хранения данных ЛИТ кластера на лентах - слева и система сверхбыстрой дисковой памяти- справа).

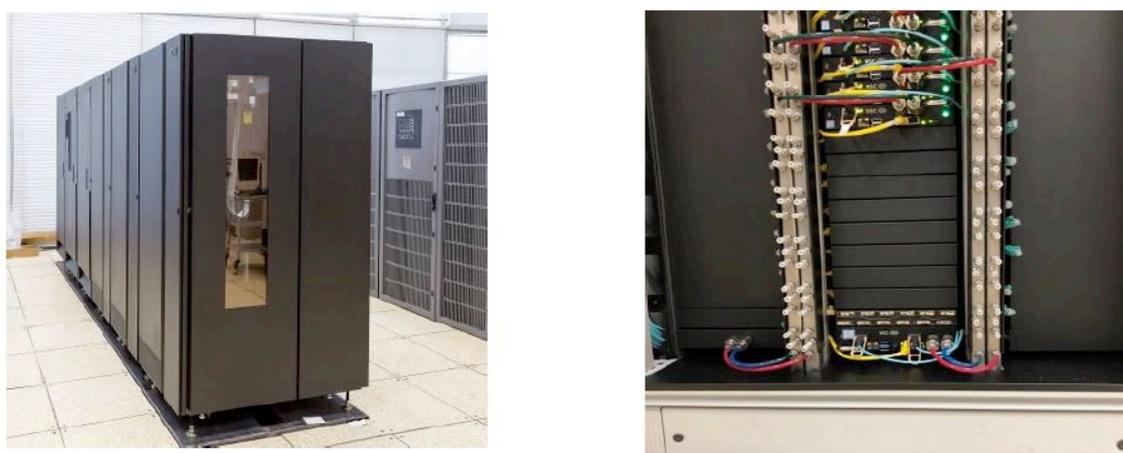


Рис.2.4.5.2. Система хранения данных ЛИТ кластера на лентах (слева) и система сверхбыстрой дисковой памяти (справа).

На первом этапе моделирования компьютеринга для мегапроекта NICA предполагается использовать вычислительные ресурсы суперкомпьютера «Говорун», разделов Skylake и KNL для генерации данных, сохранения их на

UDSS и передачи в «полу-холодные» хранилища, управляемые файловыми системами EOS и ZFS (Рис. 1.7.9). Это позволит проверить базовый стек технологий хранения и передачи данных, а также моделировать потоки данных, выбрать оптимальные распределенные файловые системы и повысить эффективность моделирования и обработки событий. Эта работа была выполнена в 2019 году для моделирования событий эксперимента MPD, кроме того, предполагается использовать программное обеспечение DIRAC для управления заданиями и процессом считывания/записи данных из различных типов хранилищ и различных типов файловых систем (Рис. 2.4.5.3).

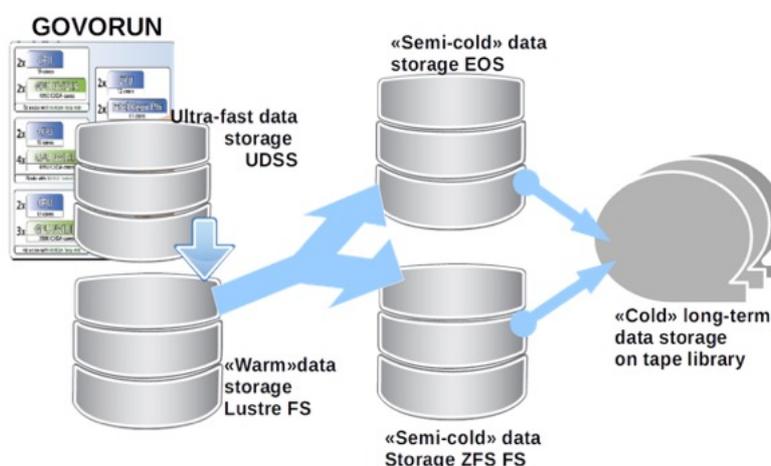


Рис. 2.4.5.3. Схема передачи данных на суперкомпьютере «Говорун» для моделирования компьютеринга для мегапроекта NICA и моделирования событий для эксперимента MPD, реализованная с помощью программного обеспечения DIRAC

В 2019 году только на суперкомпьютере «Говорун» для задач НИКА выполнено более 220000 заданий, что составило 85% от полного числа задач. На Рис. 2.4.5.4 приведено распределение задач, выполненных на суперкомпьютере по проектам MPD, VM@N и SPD.

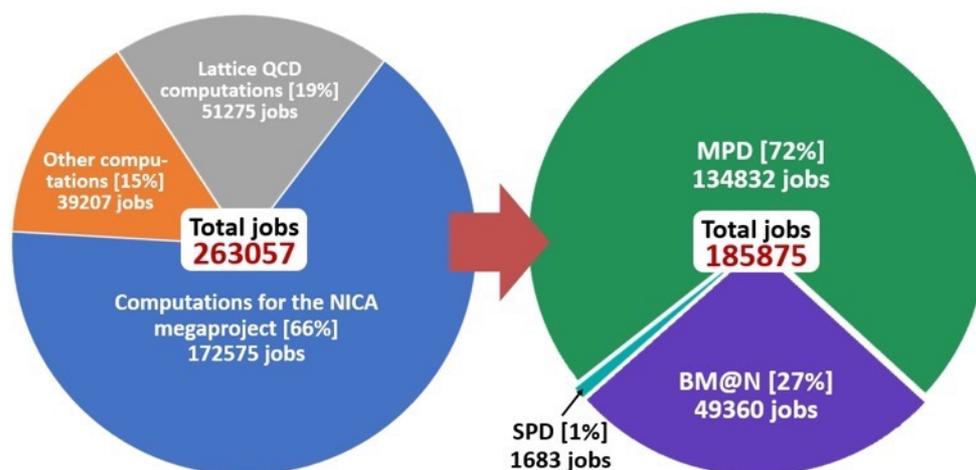


Рис. 2.4.5.4. Распределение задач, выполненных на суперкомпьютере по проектам MPD, BM@N и SPD в 2019 г.

В настоящее время уже сгенерировано более 80 миллионов событий для эксперимента MPD с использованием различных типов генераторов. В настоящее время реконструировано почти 30 миллионов событий. Для решения этих проблем используется компонент ЦПУ и UDSS.

Помимо вычислительных ресурсов суперкомпьютера «Говорун», на базе DIRAC была осуществлена интеграция выделенных под NICA счетных ресурсов на Tier1 и Tier2/ЦИВК компонентах МИВК, а также проверена и оттестирована процедура записи и чтения данных на ленточный робот.

DIRAC Interware — это продукт для интеграции гетерогенных вычислительных ресурсов и ресурсов хранения данных в единую платформу. Интеграция ресурсов основана на использовании стандартных протоколов доступа к данным (xRootD, GridFTP и др.) и пилотных задач. Благодаря этому пользователю предоставляется единая среда в которой можно запускать задачи, управлять данными, выстраивать процессы и контролировать их выполнение. В рамках DIRAC в качестве вычислительных ресурсов могут выступать системы пакетной обработки, грид компьютеринг элементы, облака, супер-компьютеры, и даже отдельно стоящие вычислительные узлы. Ресурсы хранения ограничены лишь теми, которые поддерживают протоколы передачи файлов используемые в грид системах.

Важной концепцией в DIRAC являются пилотные задачи. Именно благодаря им можно интегрировать практически любой вычислительный ресурс. Идея пилотной задачи заключается в том, что вместо задач пользователя в очередь на вычислительный ресурс посылается задача «пилот», которая всегда одинакова. Отличаться может лишь способ запуска пилотов на

разных ресурсах. Оказавшись на рабочем узле пилот загружает базовые утилиты работы с данными, проводит проверку окружения и просит у центрального сервиса DIRAC задачу, которой бы подошли ресурсы занятые пилотом. Получив задачу пилот передаёт ей управление. После завершения задачи пилот может либо попросить следующую задачу, либо завершить свою работу. Наличие пилота гарантирует задаче некоторый базовый набор функций с которым задача сможет работать. В случае если ресурс, на котором работает пилот, не может эти функции предоставить, то задача даже не запустится и ошибка запуска пилота никак не мешает пользователю. Благодаря этому пользователи видят лишь ошибки связанные с их задачами, и лишь администраторы должны беспокоиться о том, что на ресурсе не запускаются пилоты.

При работе с данными DIRAC предоставляет весь необходимый набор команд. Для корректного функционирования всех команд система хранения должна поддерживать грид-протоколы передачи данных. Это позволяет пилоту на любом из ресурсов получать данные и загружать их обратно. Однако, пользователь всегда может отправить свою задачу на конкретный вычислительный ресурс и после этого работать с локальной файловой системой на ресурсе. В таком случае, для того, чтобы сделать данные доступными отовсюду, могут потребоваться дополнительные усилия. Схематически интеграция вычислительных ресурсов и различных систем хранения данных МИВК ОИЯИ представлена на Рис. 2.4.5.5.



Рис.2.4.5.5. Схема работы DIRAC Interware для проекта «Комплекс NICA».

Таким образом, с помощью DIRAC были объединены вычислительные ресурсы МИВК ОИЯИ: Tier1/Tier2, суперкомпьютер «Говорун», облако ОИЯИ и ресурсы хранения: ССХД Lustre, dCache и EOS. В рамках генерации данных методом Monte-Carlo для эксперимента MPD с использованием платформы DIRAC на Tier1/Tier2 компонентах МИВК были выполнены 70000 задач, а на вычислительных ресурсах СК «Говорун» с использованием ССХД - 15000 задач. В результате были сгенерированы 4.5 ТВ данных, которые были отправлены в dCache.

В настоящий момент гибридный off-line NICA кластер в ЛИТ включает в себя 500 ЦПУ (слотов в batch) на Tier2/ЦИВК компоненте МИВК, 447 слотов на Tier1 компоненте. На EOS хранилище МИВК для MPD зарезервировано 500 ТВ, для VM@N – 300 ТВ и для SPD - 250 ТВ. В 2019 году закуплен ленточный робот емкостью 40 ПБ, в котором для проекта NICA будет зарезервировано не менее 16 ПБ.

Основной задачей на ближайшее время является объединение счётных ресурсов и ресурсов хранения/доступа к данным со всех off-line кластеров для удобного использования для нужд экспериментов NICA. Для задач моделирования, реконструкции и анализа экспериментов NICA предполагается использовать ресурсы, расположенные в 2-х лабораториях ОИЯИ: ЛИТ и ЛФВЭ. Для удобного запуска задач и доступа к данным, существующая инфраструктура требует доработки, изменений и унификации различных компонент аутентификации и авторизации пользователей при обращении к различным сервисам систем обработки данных. В будущем предполагается расширение использования ресурсов, с возможностью привлечения ресурсов организаций, так или иначе заинтересованных в доступу к данным экспериментов NICA.

2.4.6. Файловые системы распределенного кластера

Одним из основных компонентов компьютерного блока проекта «Комплекс NICA» является кластерная файловая система. В настоящее время в этом качестве применяются несколько кластерных файловых систем: Lustre, dCache, Ceph, EOS, GlusterFS и др. Для on-line и off-line кластеров лучше всего подходит файловая система EOS. EOS – это распределённая, параллельная, линейно масштабируемая файловая система с возможностью ее защиты от сбоев.

Особое внимание уделяется новым перспективным направлениям в создании распределённых хранилищ данных (DataLake), интеграции Больших данных и суперкомпьютерных технологий, методов «машинного обучения».

В 2020-2023 году ожидается существенное увеличение объемов информации, которую необходимо будет сохранять и обрабатывать. При этом и сегодня оценить требования к системам хранения очень сложно в виду эволюции моделей данных и моделей обработки. Тем не менее, необходимо обеспечить выполнение следующих требований:

- предоставить достаточный ресурс для хранения и оперативного доступа к информации в процессе обработки;

- предоставить постоянно расширяемый ресурс для долговременного хранения информации, объём и скорость которого должна быть сбалансирована с соответствующими потоками информации;

- обеспечить возможность использования системы управления данными, автоматизирующую процессы взаимодействия с системами хранения;

- автоматизировать поддержку системы хранения с целью оптимизации и минимизации затрат.

В предстоящие годы необходимо существенно увеличить объём для хранения информации на системе EOS, которая введена в эксплуатацию в 2019 году. Эта система хранения и доступа к данным должна стать основной системой для всех компонент «Комплекса NICA». В дальнейшем и для всех вычислительных ресурсов ОИЯИ. Уже сейчас система применяется для хранения данных с VM@N. Хранение особо важных данных или данных, распределённых территориально, требует создания реплик, что уменьшает доступное пространство, кратное числу реплик.

Одним из вариантов развития хранилищ является объединение и импорт локальных установок сайтов в «озеро данных» - Data Lake, такие проекты уже находятся на стадии разработки и тестирования.

В связи со значительным ростом потребностей экспериментов NICA и расширением использования EOS, необходимо запланировать существенный рост мощностей этого хранилища.

Для долговременного хранения ничего, кроме лент, не предвидится. В начале периода планирования ёмкость картриджа равна для LTO8 – TS1160 12-20 ТБ. К концу периода она вырастет до 50-60 ТБ. Это означает, что ёмкость существующей библиотеки TS3500 можно будет повысить апгрейдом до 50-60 ПБ, а ёмкость планируемой – на 2023 год - до 120-150 ПБ к приобретенной в 2019 году.

В 2019 году согласно базовой конфигурации комплекса есть отставания в приобретении ленточного хранилища для NICA емкостью 5 и более ПБ.

Отставания связаны с конкурсными процедурами ОИЯИ. До завершения 2019 года планируется закрыть процедуру приобретения.

2.4.7. Программное обеспечение «Комплекса NICA»

Программное обеспечение для моделирования, реконструкции и анализа данных физики элементарных частиц является важной частью компьютерного блока мегапроекта NICA. Для экспериментов на установках BM@N, начатых в 2018 г., и MPD, эксперименты на которой планируется начать в 2021 году, в настоящее время разработаны и используются программные фреймворки: BmnRoot и MpdRoot соответственно. Разрабатывается также у уже частично используется система SpdRoot для работ по созданию концептуального проекта установки SPD. Цель таких вычислительных систем в обеспечении моделирование первичных частиц и взаимодействий ионов и результирующего отклика детектора, реконструкция и анализ данных, поступающих от моделируемых и реальных взаимодействий. При построении детекторов оптимизация аппаратной конструкции и подготовка кода и вычислительной инфраструктуры требуют надежной цепочки моделирования и реконструкции, реализуемой распределенной вычислительной средой. MpdRoot и BmnRoot были использованы для выполнения исследований и моделирования технического дизайна всех суб-детекторов обеих установок в целях оптимизации их конструкций. Они также были использованы для исследований реализуемости физических задач на установках, а BmnRoot - и для реконструкции событий и анализа полученных в экспериментах на BMN физических данных.

2.4.8. Инженерная инфраструктура компьютерного блока

Основной задачей инженерной инфраструктуры компьютерного блока является предоставление необходимых энергетических и климатических условий для вычислительной и сетевой аппаратуры, а также поддержание вычислительных мощностей в работоспособном состоянии. Инженерная инфраструктура включает в себя:

- систему гарантированного и бесперебойного электропитания;
- систему холодоснабжения;
- систему вентиляции и газоудаления;
- систему автоматического пожаротушения;
- структурированную кабельную систему;
- систему видео наблюдения;
- систему контроля и управления доступом;
- систему охранной сигнализации;
- систему диспетчеризации.

Основные работы по инженерным системам компьютерного блока проекта «Комплекс NICA» были выполнены при создании off-line кластера ЛФВЭ.

Снаружи корпуса №216 на подготовленной площадке (Рис.2.4.8.1), размером 5 м x 10 м, смонтированы два чиллера и внешние блоки кондиционеров. Габариты чиллеров: 1100 x 1606 x 3240 мм и вес: 1058 кг. Габариты внешних блоков кондиционеров 900 x 1540 x 320 мм и вес: и 134 кг.



Рис.2.4.8.1. Расстановка оборудования чиллеров и внешних блоков кондиционеров

Система охлаждения кластера воздушно-водяная и включает в себя два чиллера Rittal мощностью охлаждения по 88 кВт с внутренним фрикулингом до 110 кВт и 4-х теплообменников LCP InLine Rittal 40-55 кВт. LCP, находятся внутри помещения и связаны трубами с чиллерами, установленными на улице. Трубы проходят через внешнюю стену здания и идут под фальшполом по центру помещения к LCP. Особо следует отметить, что система охлаждения должна работать круглосуточно, в режиме 24/7 и круглогодично. Поэтому в чиллере и на трубы установлены зимние комплекты. В чиллер также установлены устройства, обеспечивающие автоматический перезапуск чиллера при подаче электропитания после кратковременного сбоя питания. Резервное охлаждение и общее кондиционирование помещения — две инверторные

сплит-системы ToShiBa Digital Inverter RAV-SM2804AT8-E, с суммарной мощностью охлаждения 50 Квт.

Система электропитания кластера. Серверное и коммуникационное оборудование, а также электроника управления чиллеров, подключаются к двум ИБП Conceptpower DPA 150 мощностью по 96 КВт каждая, к которым подключаются стойки распределения питания PDR с установленными модулями вторичного распределения электропитания PDM, имеющие главный выключатель и защищенные 3-х фазные выходы к стойкам с оборудованием. В свою очередь, ИБП получают электропитание по кабелям из электрощитовой (помещение 216-113) по кабельным каналам.

Перечень нагрузок, электрооборудования кластера приведены в таблице 2.4.8.1.

Таблица 2.4.8.1.

Перечень нагрузок электрооборудования кластера.

№ поз	Элемент	Назначение	Масса кг.	Подключение/ потребление
1	Шкаф ИБП-1	Обеспечение бесперебойным питанием 1- 4 шкафов серверов	1100	96 кВт
2	Шкаф ИБП-2	Обеспечение бесперебойным питанием 5- 8 шкафов серверов	1100	96 кВт
3	Шкафы LCP	Воздушно-водяное охлаждение серверов	4 x 300	4 x 1кВт.
4	Вентиляторы	Система вентиляция	2 x 10	2 x 0.5 кВт
5	Кондиционеры	Система кондиционирования	2 x 135	2 x 10 кВт

Суммарная мощность потребления комплекса: 280-300 КВт 380в = 192 (ИБП) + 60 (чиллеры) + 4 (LCP) + 20 (кондиционеры) + 1 (вентиляторы).

Система пожаробнаружения и пожаротушения является интегрированной системой обнаружения и пожаротушения спроектирована на базе автоматических (дымовых, тепловых, комбинированных и др.) пожарных извещателей и автоматической системы газового пожаротушения (АСГПТ); способна производить мониторинг и оповещение по сотовой связи и на пост пожарной охраны. Планируется предусмотреть вентиляцию помещения после срабатывания АСГПТ.

Off-line кластер ЛИТ обеспечивается инженерной инфраструктурой МИВК ОИЯИ, развиваемой в соответствии с утвержденными в ОИЯИ планами.

2.2. Каналы и установки для прикладных инновационных исследований

В рамках проекта «Комплекс NICA» ведется создание Инновационного блока, ориентированного на три направления прикладных исследований. Для этого создается три зоны прикладных исследований на выведенных пучках Нуклотрона и линейного ионного ускорителя НИЛАС (таблица 2.5.1).

Таблица 2.5.1.

Три зоны прикладных исследований

Номер зоны	Исследования	Энергия ионов, МэВ/н
1	1.1 Проведение исследований и испытаний перспективных изделий полупроводниковой микро- и наноэлектроники, на радиационную стойкость при воздействии тяжелых заряженных частиц высоких энергий.	150-350
	1.2 Проведение исследований в области космической радиобиологии и моделировании воздействия тяжелых заряженных частиц Галактического космического излучения на биологические объекты, в том числе на когнитивные функции мозга мелких лабораторных животных и приматов.	400-800
2	Проведение исследований в области релятивистской ядерной энергетики, направленных на получение ядерно-физических данных при взаимодействии релятивистских пучков протонов, дейтронов и легких ионов с энергией 1-4,5 ГэВ/н с мишенями и топливными сборками для верификации программ, используемых при проектировании электроядерных установок и нейтронных источников.	400-4500
3	Проведение исследований и испытаний микро и наноэлектроники на радиационную стойкость при воздействии тяжелых заряженных частиц низких энергий.	3,2

В первой зоне планируются испытания на радиационную стойкость микросхем при воздействии на них многорядных ионов высокой энергии. С этой целью в Измерительном павильоне первого корпуса ЛФВЭ создается Станция Облучения Длиннопробежными Ионами - Техническая (СОДИТ), предназначенная для испытаний изделий электронной компонентной базы и модулей радиоэлектронной аппаратуры на стойкость воздействию тяжелых заряженных частиц космического пространства к одиночным радиационным эффектам.

Также в этой зоне будут проведены исследования в области космической радиобиологии при моделировании воздействия тяжелых заряженных частиц Галактического космического излучения на биологические объекты, в том числе на когнитивные функции мозга, и нарушения функций центральной

нервной системы при длительных межпланетных космических полетах. Планируемые эксперименты также имеют целью изучение воздействия тяжелых заряженных высоких энергий (сотни МэВ/н) на биологические объекты на клеточном уровне, приводящие к генным и структурным мутациям. С этой целью в Измерительном павильоне создается Станция Облучения Длиннопробежными Ионами - Биологическая (СОДИБ).

Вторая зона ориентирована на прикладные исследования в области релятивистской ядерной энергетике. Прежде всего эти исследования направлены на получение ядерно-физических данных при взаимодействии релятивистских пучков протонов, дейтронов и легких ионов с энергией 1-4,5 ГэВ/н для моделирования и проектирования активных субкритических урановых сборок и мишеней для промышленных прототипов установок по утилизации радиоактивных отходов. Для исследований в области релятивистской ядерной энергетике между Измерительным павильоном и 205 корпусом создается специализированная станция.

Третья зона располагается в первом корпусе ЛФВЭ. На выходе из линейного ускорителя НИЛАС создается Станция Облучения Короткопробежными Ионами - Техническая (СОКИТ). Эта станция предназначена для тестирования микросхем при облучении ионов с энергией 3.2 МэВ/н при декапсуляции их корпусов.

2.5.1. Каналы транспортировки пучков

Для транспортировки ионных пучков из Нуклотрона к трем перечисленным выше станциям, две из которых расположены в Измерительном павильоне, а одна - между этим павильоном и корпусом №205, разработано два новых специализированных канала (Рис. 2.5.1.1). Существующий канал транспортировки из Нуклотрона в 205 корпус будет значительно модернизирован. На всей длине от Нуклотрона до всех станций будет обеспечена транспортировка пучка в условиях форвакуума. В существующем канале транспортировки будет заменена диагностика пучков. В 2019 году Белгородским государственным университетом начаты работы над техническим проектом по модернизации существующего канала в корпус № 205.

При облучение микросхем с размерами 20×20 мм и однородностью облучения менее 10% требуется пучки с поперечными размерами 50-75 мм. Для расширения области однородности пучка используются октупольные магниты. Спецификой новых каналов транспортировки является необходимость равномерности облучения поверхностей мишеней с

поперечными размерами до 100×100 мм для радиобиологических исследований и 200×200 мм для облучения электронной аппаратуры, предназначенной для космических исследований. Для равномерного облучения мишеней станций СОДИТ и СОДИБ предложено применять "сканирование" ионным пучком поверхности мишени в каждом цикле. Для этого пятно сфокусированного пучка в пределах каждого сброса смещается по поверхности мишени по выбранной траектории за счет небольших отклонений пучка от основного направления. Эти отклонения создаются при помощи сканирующих дипольных магнитов с управляемым по величине поперечным магнитным полем. Сканирующие магниты расположены на таком расстоянии от мишени, чтобы обеспечить её заданное поле облучения. Диагностическое оборудование во вновь создаваемых каналах должно обеспечивать измерение следующих параметров пучка, горизонтальный и вертикальный профили пучка, поток заряженных частиц, набранный интегральный поток заряженных частиц за время измерений, временная структура выведенного пучка.

Концептуальный проект каналов разработан в 2018 году коллаборацией ОИЯИ-ИТЭФ. В настоящее время идет тендерная процедура выбора Исполнителя по изготовлению оборудования каналов (ИТЭФ, ИФВЭ, ИЯФ СО РАН, Sigma-phi). Начало работ по изготовлению запланировано на декабрь 2019 г. Завершение изготовления должно быть в сентябре 2021 г., монтаж, пуско-наладочные работы и испытания с пучком планируются к завершению до декабря 2021 г.

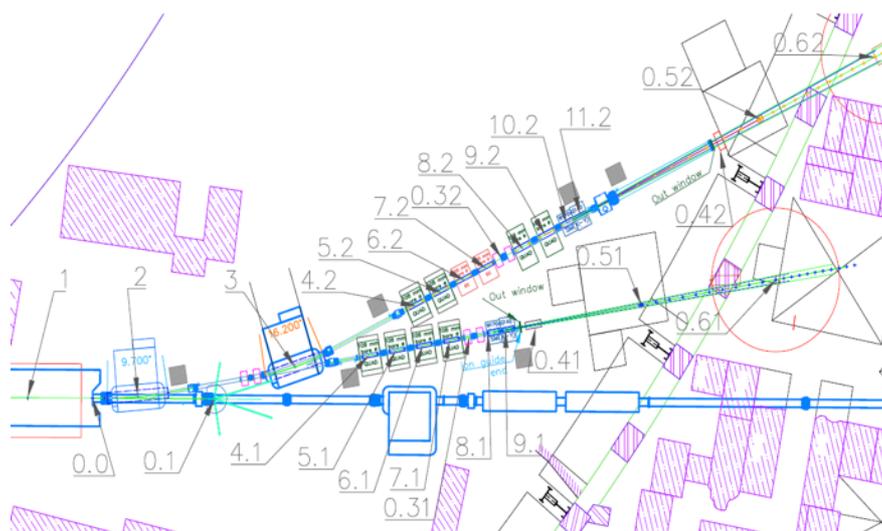


Рис. 2.5.1.1. Схема расположения каналов для прикладных исследований: канала транспортировки пучка и станция для облучения микросхем, канала транспортировки пучка для радиобиологических исследований и канала транспортировки пучка для релятивистской ядерной энергетики.

2.2.3. Станция облучения микроэлектронных систем СОДИТ.

Традиционные методы прогнозирования, оценки и контроля стойкости изделий микроэлектроники, полупроводниковой и твердотельной СВЧ-электроники к воздействию ионов базируется на проведении испытаний изделий на ускорителях таких ионов. Для получения достоверной информации по результатам испытаний необходимо провести ряд экспериментов для различных значений линейных потерь энергии (ЛПЭ) ионов в чувствительном объеме полупроводниковой структуры.

Диапазон изменений линейных потерь энергии (ЛПЭ) ионов должен лежать в интервале от единиц МэВ·см²/мг до 65 МэВ·см²/мг. Максимальные значения ЛПЭ обеспечивается при облучении ионами с зарядом $Z \approx 80$ и энергиями ионов, заторможенными до величины около 10 МэВ/н, при которой возникает пик Брэгга. При этом ионы должны иметь начальную энергию 150-350 МэВ/н, чтобы длина пробега ионов в корпусе микросхемы была чуть больше его толщины и ионы достигали чувствительных областей микросхем с энергией вблизи пика Брэгга. С этой целью на входе в СОДИТ будут сформированы пучки в инжекционном комплексе, состоящем из трех ускорителей: линейном ускорителе НЛАС, бустере и Нуклотроне, полностью ободранных ядер С, Аг, Fe, Кг, Хе и Ау с энергией 150-350 МэВ/н на выходе из Нуклотрона. Параметры ионных пучков и требования к оборудованию СОДИТ приведены в таблице 2.5.2.1. В состав СОДИТ входит следующее оборудование: система диагностики ионных пучков, ослабитель энергии первичных ионов, система позиционирования образцов; система задания температуры; вакуумное оборудование, измерительное оборудование; средства связи для удаленного доступа.

Концептуальный проект оборудования станции СОДИТ выполнен в рамках контракта ОИЯИ-ИТЭФ в 2018 году. Работы по изготовлению оборудования станции, ее монтажу выполняет в рамках контракта ИТЭФ. Работы начались в ноябрь 2019 г. Завершение работ по изготовлению станции запланировано на сентябрь 2021 г, завершение работ по пуско-наладке оборудования станции – на декабрь 2021 г.

Параметры ионных пучков и требования к оборудованию СОДИТ и СОДИБ.

Требования к параметрам пучка ионов		
Параметры	СОДИТ	СОДИБ
Типы ионов:	$^{12}\text{C}^{6+}$, $^{40}\text{Ar}^{18+}$, $^{56}\text{Fe}^{26+}$, $^{84}\text{Kr}^{36+}$, $^{131}\text{Xe}^{54+}$, $^{197}\text{Au}^{79}$	
Энергия ионов на выходе Нуклотрона. МэВ/н	150-350	400-800
Длительность импульса выведенного пучка, с	2-20	
Однородность потока во времени внутри импульса, %	99	
Вакуум, Торр	10^{-3}	
Интенсивность выведенного пучка, ион/импульс	$3 \times 10^4 - 10^8$	$10^6 - 10^8$ (Xe, Kr, Fe, Ar) $10^7 - 310^9$ ($^{12}\text{C}^{6+}$)
Плотность потока ионов, частиц/(см ² ·с)	$10^2 - 3 \times 10^5$	$10^3 - 10^5$
Максимальный флюенс за сеанс ион/(см ²)	2×10^7	10^7
Продолжительность облучения за сеанс, мин	10-20	1-5
ЛПЭ в Si, МэВ×см ² /мг	1-65	
Доза облучения, Гр		1-3
Эмиттанс пучка на входе в стенд при максимальной энергии (95 %), ϵ_x/ϵ_y п·мм·мрад	5/13.3 (рабочий) 16.6/24.9(максимальный)	3/8(рабочий) 10/15 (максимальный)
Область облучения мишени в режиме без сканирования, мм	20×20 (10%)	∅10(5%)
Максимальная область облучения в режиме сканирования, мм	200×200	100×100
Однородность потока при облучении максимальной области	±15%	±10%
Диаметр пучка на мишени, мм (ширина на полувысоте)	30-57 (73 мм –гаусовский пучок)	25-35

2.2.4. Станция облучения для радиобиологических исследований СОДИБ

Планируемые на установке СОДИБ эксперименты имеют целью исследования воздействия ионов с энергиями 0,4 - 0,8 ГэВ/н на биологические объекты на клеточном и организменном уровнях. На клеточном уровне изучаются механизмы образования генных и структурных мутаций в клетках млекопитающих при воздействии на них ионов высоких энергий. На организменном уровне исследуются морфологические изменения в результате такого воздействия в тканях и органах мышей и крыс, а также изменения поведенческих и когнитивных функций мелких лабораторных животных и низших приматов при облучении структур их мозга ионными пучками (моделируются нарушения функций центральной нервной системы космонавтов при длительных межпланетных космических полетах). Наиболее вероятные энергии галактических ядер лежат в области 0,5 - 0,8 ГэВ/н, вызывающие тяжелые кластерные повреждения на клеточном уровне и угнетающие функции центральной нервной системы при хроническом облучении даже небольшими дозами, поэтому для выполнения полномасштабной программы исследования воздействия ядер галактических космических лучей вне магнитосферы Земли на космонавтов в Измерительном павильоне будет создана специализированная станция СОДИБ для радиобиологических объектов. Для обеспечения на биологическом объекте дозы в 1 Гр могут быть использованы различные ионные пучки, выведенные из Нуклотрона с параметрами, приведенными в таблице 2.5.2.1.

Оборудование станции включает в себя: систему диагностики и контроля параметров пучка, систему позиционирования биологических объектов и детекторов, систему нацеливания пучка на биологические объекты, систему микроклимата станции. Диагностическое оборудование предназначено для измерения: плотности потока ионов; интенсивность; флюенса; профиль пучка; дозы. К диагностическому оборудованию относятся: ионизационная камера (2 шт. с рабочем полем 100×100 мм и 10×10 мм); волоконный сцинтилляционный детектор на основе многоканальных фотоумножителей; полупроводниковый кремниевый детектор.

Концептуальный проект оборудования станции СОДИБ выполнен в рамках контракта ОИЯИ-ИТЭФ в 2018 году. Начало работ по изготовлению станции СОДИБ запланировано на 1 квартал 2020 г. Завершение работ по изготовлению станции запланировано на конец 2021 г.

2.2.5. Станция для релятивистской ядерной энергетики

Идея использования пучков ускорителя для электроядерного способа получения энергии (AcceleratorDrivenSystems-ADS) предполагает формирование нейтронных потоков в процессе взаимодействия выведенного из ускорителя пучка и получение энергии на основе реакции деления природного и обедненного урана^{238U}, тория^{232Th} и других тяжелых элементов. Привлекательность возможностей создания ADS-систем обусловлена рядом преимуществ: решение проблем безопасности эксплуатации таких систем, возможность дожигания радиоактивных отходов, более коротким, по сравнению с реакторами на быстрых нейтронах, циклом наработки делящихся материалов, и т.д. Обычно рассматриваемая концепция электроядерного производства энергии предполагает, что энергия сильноточного пучка протонов с энергией ~1 ГэВ и мишенной станции из тяжелых элементов (природный уран, торий) обеспечивает коэффициент умножения энергии 30-40. Также обсуждаются возможности использования вместо протонов пучков легких ионов. Ускоренные ионы низких энергий имеют короткие пробеги в мишени, что существенно сокращает вероятность ядерных неупругих взаимодействий и, соответственно, снижает эффект увеличения мощности системы.

С этой целью создается Станция для Исследований в области Ядерной Энергетики (СИЯЭТ) на выведенных пучках Нуклотрона. Разработка технического проекта СИЯЭТ начата в IV квартале 2019 года ИФТП (Росатом). Работы включают в себя технический проект: системы диагностики и контроля параметров пучков, системы позиционирования (ввода-вывода) мишени в пучке, системы контроля параметров пучка в процессе облучения, системы измерения вторичных частиц в процессе облучения мишени, системы измерения результатов облучения на основе активационного и трекового анализа, системы термометрии, системы синхронизации с ускорителем, системы сбора и передачи данных, системы радиационного контроля в зоне облучения. Проведение расчетов по радиационным условиям облучения толстых мишеней на выведенных пучках ускорительного комплекса NICA. Проведение расчетов режимов работы магнитооптического канала вывода, системы термометрии мишеней. Расчет биологической защиты. Разработка технических требований к помещению для размещения экспериментаторов. Начало работ по изготовлению станции СИЯЭТ запланировано на III квартал 2020 г. Завершение работ по изготовлению станции запланировано на середину 2022 г.

2.2.6. Станция облучения радиоэлектронных систем СОКИТ

Для тестирования радиоэлектронного оборудования ионами с энергией 3,2 МэВ/н, ускоряемыми в НИЛАС создается станция облучения декорпусированных микросхем СОКИТ. В 2019 году создан канал из НИЛАС в Бустер (Рис. 2.5.5.1). В середине канала будет установлен дипольный магнит, отклоняющий ионный пучок в прикладной канал для станции СОКИТ.

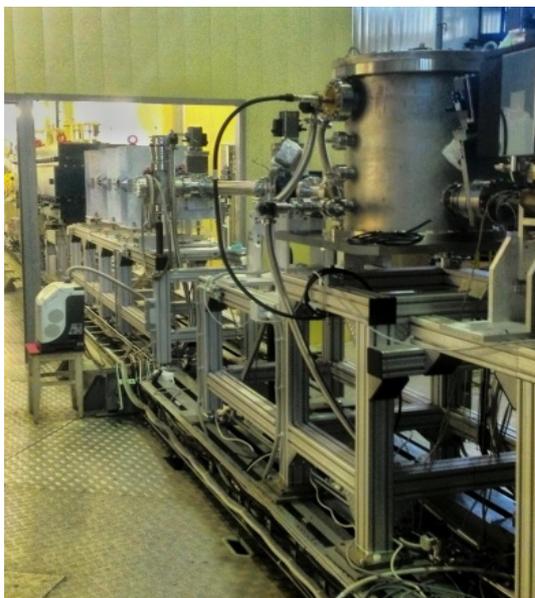


Рис. 2.5.5.1. Канал транспортировки из НИЛАС в Бустер.

Первая особенность конструкции прикладного канала связаны с максимальной мощностью дозы за импульс инъекции. В отдельном импульсе в кремнии она должна быть менее 1 рад/мкс. Это накладывает ограничения на ионный ток. Требуется уменьшить ток на выходе линейного ускорителя с 4 мА до нескольких десятков нА на мишени с помощью подвижной диафрагмы (вольфрам толщиной 50 мкм) с несколькими отверстиями (диаметр 20 мкм) Отверстия расположены вдоль горизонтальной оси пучка, и благодаря дисперсии в дипольном магните пучок на мишени имеет высокую однородность. Вторая - с дифференциальной откачкой при переходе из прикладного канала в канал НИЛАС-бустер с давлением 10^{-8} Торр при давлении в камере СОКИТ 10^{-5} Торр. Важно предотвратить попадание из станции тяжелых газов, таких как СО, Н₂О и СО₂, в канал НИЛас-Бустер с помощью криогенной ловушки и импульсных диафрагм в прикладном канале.

Специфика станции СОКИТ связана с низкой энергией ионов, которые не могут пройти через корпус микросхемы с толщиной несколько мм, поэтому перед ее облучением происходит декапсуляция корпуса. Другая особенность связана с временной структурой тока пучка ионов, длительность импульса тока составляет 10 мкс, а частота повторения 10 Гц. Параметры ионных пучков

приведены в таблице 2.5.5.1. В состав СОКИТ входит следующее оборудование: система диагностики низкоэнергетичных ионных пучков с энергией 3,2 МэВ/н, система позиционирования образцов; система задания температуры; вакуумное оборудование, измерительное оборудование; средства связи для удаленного доступа.

Таблица 2.5.5.1

Параметры ионных пучков и требования к оборудованию СОКИТ

Типы ионов:	$^{12}_{4+}\text{C}$, $^{40}_{8+}\text{Ar}$, $^{84}_{14+}\text{Kr}$, $^{131}_{22+}\text{Xe}$, $^{169}_{21+}\text{Tm}$, $^{197}_{31+}\text{Au}$, $^{209}_{34+}\text{Bi}$
Энергия ионов, выведенных из НИЛАС, МэВ/н	3,2
Длительность импульса выведенного пучка, мкс	30
Частота следования импульсов тока, Гц	10
Количество импульсов	3
Частота следования макро-импульсов, Гц	0,25
Диаметр пучка на мишени СОКИТ, мм	73
Неоднородность пучка на площадке 20 x 20 мм,	10%
Средняя плотность потока ионов 1/(см ² ×с)	10 ³ ... 10 ⁵
Максимальная мощность дозы в кремнии, рад/мкс	1

Работы по изготовлению оборудования станции СОКИТ ее монтажу выполняет в рамках контракта ИТЭФ. Начало работ – IV квартал 2019 г. Завершение работ по изготовлению станции запланировано на сентябрь 2021 г., завершение работ пуско-наладке оборудования станции – на декабрь 2021 г.

3. Кадровые вопросы, мобильность и активность участников проекта

Решение о создании проекта «Комплекс NICA» в рамках Семилетнего плана развития ОИЯИ на 2010 – 2016 годы было принято на сессии Комитета Полномочных Представителей правительств государств-членов ОИЯИ, состоявшейся 19-21 ноября 2009 года.

Проект реализуется в основном силами сотрудников Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ ОИЯИ) им. В.И. Векслера и А.М. Балдина. Большой объем работ выполняется по контрактам, заключаемым на основе конкурентных процедур с компаниями стран-участниц ОИЯИ и высокотехнологичными компаниями из других стран. Постоянно расширяется состав участников за счет развития международного сотрудничества и вовлечения в проект представителей научных центров как из стран-участниц ОИЯИ, так и из других стран. Этому способствуют активное участие в международных тематических конференциях, семинарах и рабочих совещаниях, в том числе проводимых в ОИЯИ. Так, в 2019 году в студенческих практикумах по проекту NICA участвовало более 100 студентов из 13 стран, в краткосрочных командировках в ОИЯИ – 190 представителей университетов и организаций из различных стран. В 2019 г. на работу по проекту NICA в ЛФВЭ было принято 88 сотрудников из них 61 моложе 35 лет.

В 2019 году по тематике проекта в реферируемых журналах опубликовано около 150 научных статей.

4. Международное сотрудничество

В 2019 году на постоянной основе стали проводиться совещания международных коллабораций VM@N и MPD. 16 - 17 апреля 2019 в Дубне состоялось 3-е совместное совещание коллабораций экспериментов MPD и VM@N, на котором обсуждалась научная проблематика экспериментов, статус работ по созданию ускорительного комплекса и подсистем экспериментальных установок. На совещании коллаборации VM@N были рассмотрены и обсуждены первые результаты и ход анализа экспериментальных данных зарегистрированных в сеансе Нулотрона 2018 года.

4-е совещание коллаборации VM@N также состоялось в Дубне 14-15 октября 2019 года. 22-25 октября в Варшаве прошла 3-я конференция «Дни NICA» в рамках которой обсуждалась физическая программа экспериментов комплекса NICA, а также прошло 4-е совещание коллаборации MPD.

В настоящее время в коллаборацию VM@N входит 234 представителя 21 института из 11 стран, в коллаборации MPD участвует 476 ученых и специалистов из 38 институтов, 11 стран.

В 2019 году активно велись работы по подготовке проекта второй установки на коллайдере комплекса NICA – целью которой являются эксперименты с пучками поляризованных частиц – SPD. 4-8 июня в ОИЯИ прошло международное рабочее совещание по данному проекту, обсуждалась научная проблематика, возможная конфигурация установки, планы формирования международной коллаборации.

Заключение

Работа над созданием базовой конфигурации проекта «Комплекс NICA» в рамках проекта класса мегасайенс «Комплекс сверхпроводящих колец на встречных пучках тяжелых ионов» (Комплекс NICA) проводится в соответствии с заключенным Соглашением между Правительством Российской Федерации и ОИЯИ и его актуализацией в рамках Национального проекта РФ «Наука». Интенсивность работ демонстрируется представленной на Рис. 1 диаграммой их ведения, полученной с помощью управленческой системы EVM проекта.

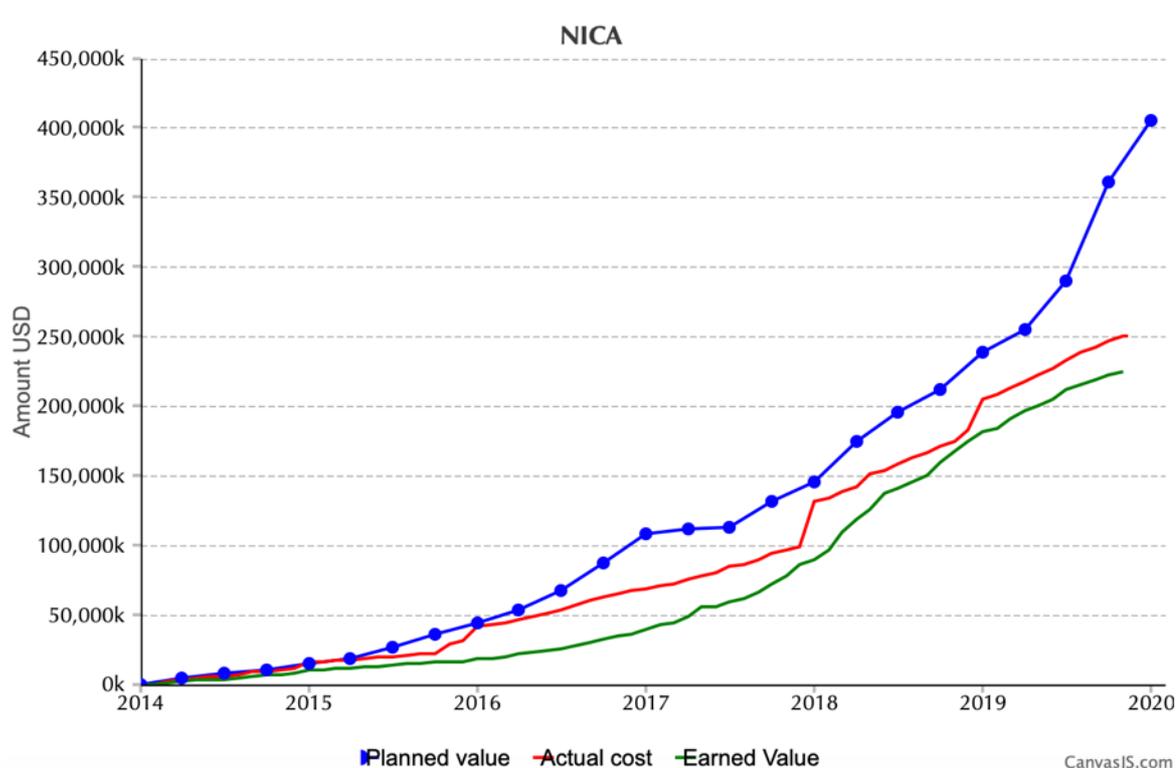


Рис. 1. EVM-диаграмма оценки выполнения работ по проекту «Комплекс NICA» за период 2014 – 2019 гг. Синяя кривая – плановые ресурсы, красная кривая – реальные затраты, зеленая кривая – процент выполнения работ, нормированный на финансовую шкалу.

Ниже перечислены основные достижения 2019 года.

В 2019 г. получены первые физические результаты успешно реализованного первого значимого этапа проекта «Комплекса NICA» – эксперимента на установке BM@N, в ходе которого набрано около 200 миллионов событий.

Началась эффективная работа двух международных коллабораций по проведению экспериментов на установках BM@N и MPD, продолжается работа по формированию коллаборации SPD.

Близок к завершению монтаж Бустера, технологический пуск которого в соответствии с намеченными контрольными сроками Соглашения планируется на конец 2019 г. Расширение международного сотрудничества, привлечение новых участников и выполнение грантовых программ является важнейшей составляющей успешной реализации проекта. В этих направлениях идет постоянная работа.

Подписан ряд новых международных соглашений. В работы по проекту вовлечены новые институты и страны.

На 01.11.2019 г. выполненные работы составляют около 52% от общего объема работ по созданию базовой конфигурации комплекса.

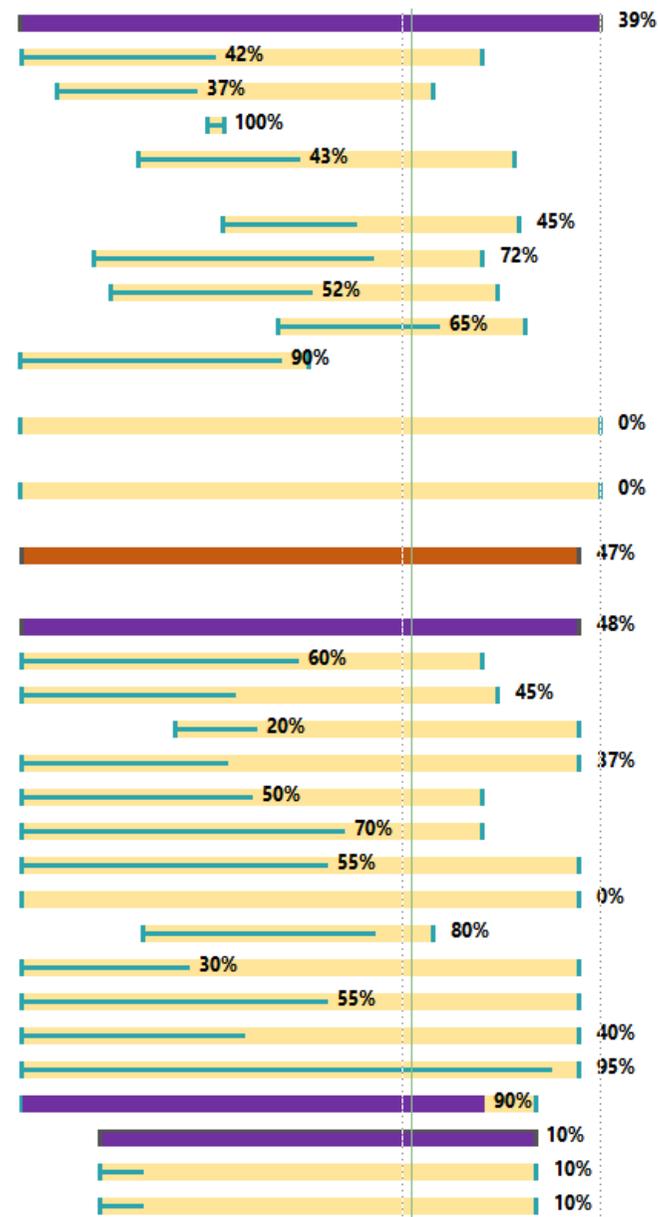
В целом, создание базовой конфигурации проекта «Комплекс NICA» идет темпом, позволяющим рассчитывать на успешное выполнение основных задач Соглашения между Правительством РФ и ОИЯИ и Национального проекта «Наука». Вместе с тем, в процессе реализации проекта накапливаются риски отставания в сроках ввода в эксплуатацию его отдельных элементов. В первую очередь эти риски связаны с проведением строительных работ. Неполная готовность основных сооружений здания №17 к началу монтажа МРД, непредвиденная задержка работ по строительству криогенно-компрессорной станции из-за смены Генподрядчика могут привести к сдвигу сроков реализации проекта в целом. Непредвиденные задержки при заключении и/или выполнении ряда других контрактов на поставку необходимых материалов и оборудования также накапливаются и не могут не сказаться на этих сроках.

Вместе с тем, благодаря включению проекта «Комплекс NICA» в Национальный проект РФ «Наука» и Федеральный проект «Развитие передовой инфраструктуры для проведения исследований и разработок в Российской Федерации» сохраняются реальные возможности завершения создания базовой конфигурации комплекса в установленные сроки.

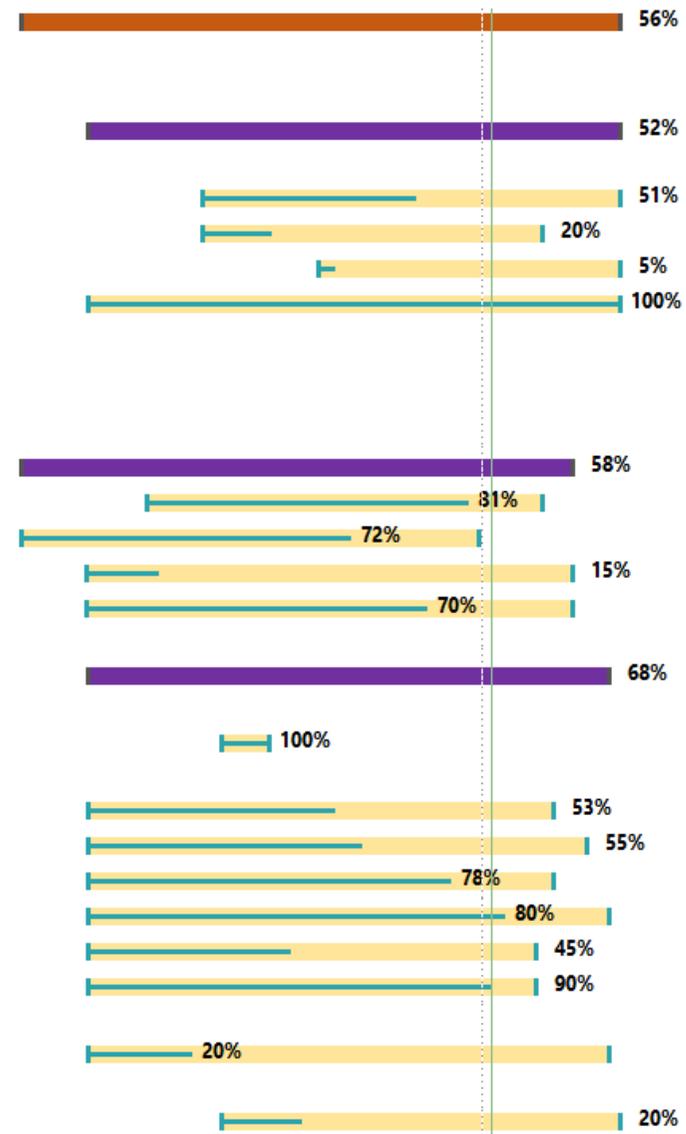
Диаграмма реализации базовой конфигурации проекта «Комплекс NICA» с указанием статуса основных объектов комплекса приведена на Рис. 2.

Структура	Название задачи	% завершения	Начало	Окончание	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
WBS	▲ NICA	56%	Чт 10.01.13	Пт 30.12.22												
1	▲ Создание ускорительного комплекса, включающий бустерный синхротрон и коллайдер	67%	Чт 10.01.13	Пт 30.12.22												
1.1	▲ Инжекционный блок для легких ионов	84%	Ср 01.01.14	Вт 30.06.20												
1.1.1	Источник легких ионов	58%	Ср 01.01.14	Вт 30.06.20												
1.1.2	Лазерный источник	100%	Ср 01.04.15	Вт 31.07.18												
1.1.3	Источник поляризованных частиц	97%	Ср 01.01.14	Вт 30.06.20												
1.1.4	Линак ЛУ-20М	100%	Ср 01.01.14	Сб 31.03.18												
1.1.5	Линак Лилу	65%	Ср 01.01.14	Вт 30.06.20												
1.1.6	Энерго-технологические системы	97%	Ср 01.01.14	Вт 30.06.20												
1.2	▲ Инжекционный блок для тяжелых ионов, в т.ч:	86%	Чт 10.01.13	Вт 31.03.20												
1.2.1	Источника тяжелых ионов КРИОН-6Т	75%	Ср 01.01.14	Вт 31.03.20												
1.2.2	НИЛАС	100%	Чт 10.01.13	Вт 09.01.18												
1.3	▲ Бустер	81%	Пт 10.01.14	Вс 01.11.20												
1.3.1	МКС Бустера	97%	Пт 10.01.14	Пт 20.12.19												
1.3.2	СЭО	95%	Пт 10.01.14	Чт 30.04.20												
1.3.3	Канал транспортировки пучков Бустер-Нуклотрон	47%	Пт 10.01.14	Вс 01.11.20												
1.3.4	Система питания магнитов Бустера	80%	Пт 10.01.14	Вт 10.12.19												
1.3.5	Высокочастотные системы	97%	Пт 10.01.14	Пн 30.03.20												
1.3.6	Система диагностики	77%	Пт 10.01.14	Пт 30.10.20												
1.3.7	Вакуумная система	60%	Пн 12.01.15	Чт 01.10.20												
1.3.8	Энерго-технологические инженерные системы	96%	Пт 10.01.14	Вс 01.11.20												
1.4	▲ Нуклотрон	77%	Ср 01.01.14	Пт 31.12.21												
1.4.1	Нуклотрон-М	62%	Ср 01.01.14	Вт 31.03.20												
1.4.2	Система медленного вывода пучка	85%	Сб 10.01.15	Вт 31.03.20												
1.4.3	Система однооборотного вывода пучка	80%	Сб 10.01.15	Вт 31.03.20												
1.4.4	Каналы выводов к.205	70%	Ср 01.01.14	Пт 31.12.21												
1.4.5	Канал инжекции Лу-20 Нуклотрон	100%	Сб 10.01.15	Ср 18.07.18												

1.5	Коллайдер	39%	Ср 01.01.14	Пт 30.12.22
1.5.1	МКС коллайдера	42%	Пт 10.01.14	Пн 01.03.21
1.5.2	ССО	37%	Пт 01.08.14	Пн 01.06.20
1.5.3	СЭО (проект)	100%	Чт 01.12.16	Ср 01.03.17
1.5.4	Система питания магнитов коллайдера	43%	Пн 02.11.15	Ср 01.09.21
1.5.5	Каналы инжекции из Нуклотрона	45%	Ср 01.03.17	Пт 01.10.21
1.5.6	ВЧ Коллайдера	72%	Вс 01.03.15	Пн 01.03.21
1.5.7	Система диагностики	52%	Пн 01.06.15	Вт 01.06.21
1.5.8	Вакуумные системы	65%	Пн 08.01.18	Пн 01.11.21
1.6	Линия сборки и испытаний СП магнитов	90%	Ср 01.01.14	Сб 30.06.18
1.7	Операционные расходы и персонал	0%	Ср 01.01.14	Пт 30.12.22
1.8	Дополнительное финансирование проектной документации	0%	Ср 01.01.14	Пт 30.12.22
2	Создание экспериментальных установок (MPD, BM@N, SPD)	47%	Пт 10.01.14	Чт 01.09.22
2.1	Установка MPD, в том числе:	48%	Пт 10.01.14	Чт 01.09.22
2.1.1	TOF	60%	Пт 10.01.14	Пн 01.03.21
2.1.2	TPC	45%	Пт 10.01.14	Вт 01.06.21
2.1.3	ECAL	20%	Ср 01.06.16	Чт 01.09.22
2.1.4	ITS	37%	Ср 15.01.14	Чт 01.09.22
2.1.5	FFD	50%	Пт 10.01.14	Пн 01.03.21
2.1.6	Straw	70%	Пт 10.01.14	Пн 01.03.21
2.1.7	ZDC	55%	Пт 10.01.14	Чт 01.09.22
2.1.8	Детектор CPC	0%	Пт 10.01.14	Чт 01.09.22
2.1.9	Соленоид	80%	Вт 01.12.15	Пн 01.06.20
2.1.10	Система сбора данных	30%	Пт 10.01.14	Чт 01.09.22
2.1.11	Система медленного контроля	55%	Пт 10.01.14	Чт 01.09.22
2.1.12	Инженерная инфраструктура	40%	Пт 10.01.14	Чт 01.09.22
2.1.13	Тестовая зона	95%	Пт 10.01.14	Чт 01.09.22
2.2	Установка BM@N	90%	Пт 10.01.14	Чт 30.12.21
2.3	Установка SPD, в том числе:	10%	Ср 01.04.15	Чт 30.12.21
	SPD	10%	Ср 01.04.15	Чт 30.12.21
2.3.1	SPD тестовая зона	10%	Ср 01.04.15	Чт 30.12.21



3	« Создание научно-исследовательской и инженерной инфраструктуры:	56%	Чт 10.01.13	Пт 31.12.21
3.1	« Строительная инфраструктура , в т.ч.:	52%	Пт 10.01.14	Чт 30.12.21
3.1.1	Здание №17 с павильонами	51%	Чт 01.10.15	Чт 30.12.21
3.1.2	Здание ККС	20%	Чт 01.10.15	Пт 30.10.20
3.1.3	Здание Центра NICA	5%	Сб 01.07.17	Чт 30.12.21
3.1.4	Объекты общего назначения строительной инфраструктуры комплекса NICA (к.1, к.1А, к.1Б, к.4., к.14, к. 32, к.42, к.203А, к.205, к.216, к.217)	100%	Пт 10.01.14	Чт 30.12.21
3.2	« Криогенная инфраструктура	58%	Чт 10.01.13	Пн 12.04.21
3.2.1	Азотная система	81%	Пн 01.12.14	Пт 30.10.20
3.2.2	Гелиевая система	72%	Чт 10.01.13	Чт 21.11.19
3.2.3	АСУ	15%	Ср 01.01.14	Пн 12.04.21
3.2.4	Инфраструктура криогенного комплекса	70%	Ср 01.01.14	Пн 12.04.21
3.3	« Инфраструктура энергетических систем	68%	Пт 10.01.14	Сб 30.10.21
3.3.1	Система оборотного водоохлаждения	100%	Вс 10.01.16	Сб 01.10.16
3.3.2	Электрические подстанции	53%	Пт 10.01.14	Ср 30.12.20
3.3.3	Энерго-технологические системы	55%	Пт 10.01.14	Ср 30.06.21
3.3.4	Линии электропитания	78%	Пт 10.01.14	Ср 30.12.20
3.3.5	Наружные сети лаборатории	80%	Пт 10.01.14	Сб 30.10.21
3.3.6	Система радиационного котроля	45%	Пт 10.01.14	Ср 30.09.20
3.3.7	Автоматизированная система контроля доступа на объекты	90%	Пт 10.01.14	Ср 30.09.20
3.4	Инфраструктура экспериментального корпуса 205	20%	Пт 10.01.14	Сб 30.10.21
3.5	Станция СОКИТ	20%	Вс 10.01.16	Пт 31.12.21



4	Создание компьютерного информационного комплекса	54%	Ср 01.01.14	Пт 01.04.22
4.1	On-line кластер	51%	Сб 10.01.15	Пн 01.03.21
4.2	Off-line кластер ЛФВЭ	91%	Пт 10.01.14	Пн 30.12.19
4.3	Off-line кластер Центра NICA	2%	Чт 01.03.18	Пт 01.04.22
4.4	Off-line кластер ЛИТ	45%	Пт 01.07.16	Пн 01.03.21
4.5	Компьютерная сеть и другие сервисы	60%	Ср 01.01.14	Пт 01.04.22
5	Создание каналов и установок для прикладных и инновационных исследований	2%	Вс 10.01.16	Чт 30.12.21
5.1	Станция СОДИТ	5%	Вс 10.01.16	Чт 30.12.21
5.2	Станция СОДИБ	1%	Вс 10.01.16	Чт 30.12.21
5.3	Станция для релятивистской ядерной энергетики	1%	Вс 10.01.16	Чт 30.12.21
6	Сформирована программа научных исследований	0%	Ср 01.01.14	Пт 30.12.22

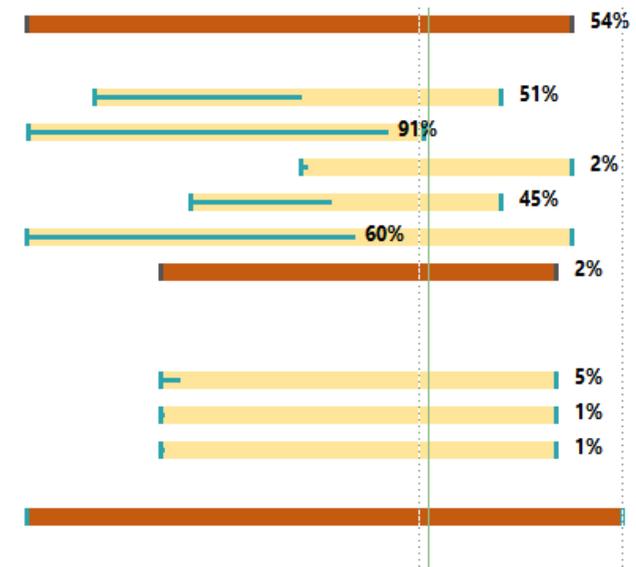


Рис.2. Диаграмма реализации базовой конфигурации проекта «Комплекс NICA».